SERGIO RICARDO GROSSE ROSSI

**“PROJETO DE VELEIRO DE PEQUENO PORTE EM PLÁSTICO
ROTOMOLDADO”**

**São Paulo
2006**

SERGIO RICARDO GROSSE ROSSI

**“PROJETO DE VELEIRO DE PEQUENO PORTE EM PLÁSTICO
ROTOMOLDADO”**

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

**São Paulo
2006**

SERGIO RICARDO GROSSE ROSSI

**“PROJETO DE VELEIRO DE PEQUENO PORTE EM PLÁSTICO
ROTOMOLDADO”**

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

Área de concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Alexandre Nicolaos Simos

**São Paulo
2006**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de março de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Rossi, Sergio Ricardo Grosse
Projeto de veleiro de pequeno porte em plástico
rotomoldado
/ S.R.G. Rossi. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.
89 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Veleiros (Projeto e construção) 2.Embarcações de recreio
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

*Aos meus pais e à Debora pelo carinho, amor,
incentivo e dedicação. Vocês são tudo para mim.*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço ao apoio financeiro fornecido pela CNPQ. Espero ter correspondido às expectativas.

Agradeço ao departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP, pela oportunidade e apoio para a realização deste trabalho.

Não posso deixar de citar todas as pessoas, as quais, sem sua ajuda, não poderia ter terminado esta dissertação. São elas (espero não esquecer ninguém):

- Prof. Dr. Hélio Wiebeck que tanto me auxiliou no início deste trabalho.
- Ênio e Wladimir das empresas, “Caiaker” e “Cuca Art`s”, respectivamente, que me auxiliaram muito quanto a rotomoldagem, e me forneceram material de rotomoldagem para realização de ensaios.
- Arnaldo Andrade (“Cognac Sails”) pelo orçamento das velas.
- Ao pessoal do laboratório de polímeros da “DaimlerChrysler do Brasil”, que gentilmente realizaram os ensaios com polímeros.
- Aos Profs. Bernardo e Marco Antônio pela ajuda com a análise econômica.
- Fernando Dotta e Fabio Okamoto pela grande ajuda com elementos finitos.

Agradeço a minha família e a Debora pela paciência e apoio na leitura, formatação e correção deste trabalho.

Por último e não menos importante, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Simos pelo apoio, incentivo, e dedicação a essa dissertação.

Resumo

De maneira geral, o mercado náutico brasileiro ainda é muito restrito, principalmente o de pequenas embarcações. Nos últimos anos, porém, devido a uma maior exposição na mídia dos bons resultados internacionais de velejadores e exploradores brasileiros, a vela tem se popularizado.

Esta dissertação descreve o projeto de um veleiro de pequeno porte para esporte/lazer fabricado em polietileno linear de média densidade (PEMD) pelo método da rotomoldagem. Este método tem se difundido rapidamente no exterior para a fabricação de equipamentos náuticos de pequeno porte, como veleiros e caiaques, proporcionando redução de custos e vantagens ambientais relacionadas ao processo de construção.

A embarcação projetada é voltada para uma tripulação de duas pessoas adultas (ou um adulto e duas crianças) e foi dimensionada para um fácil transporte, possibilitando carregá-la sobre o bagageiro de um automóvel. O foco deste trabalho está no projeto naval. Desta forma, foram percorridas todas as etapas pertinentes de um projeto de veleiro, desde o projeto do casco, passando pelo projeto do plano vélico, projeto dos apêndices (bolina e leme), análise estrutural do casco em elementos finitos e verificação de desempenho comparativo com um veleiro bem conhecido no ramo da vela. Destaca-se o projeto do plano vélico, no qual, de forma otimizada, se obteve um conjunto de velas (mestra e buja) de bom desempenho, sem, contudo, comprometer a estabilidade do veleiro.

Uma análise econômica preliminar indicou a possibilidade de se fabricar o veleiro rotomoldado com custo reduzido, abaixo do preço de mercado de veleiros do mesmo porte disponíveis no mercado nacional. Complementarmente, verificou-se também a possibilidade de se utilizar material reciclado na construção da embarcação, o que, além de ser uma alternativa para diminuir custos, proporciona benefícios ambientais ao minimizar sobras de produção.

Palavras Chave: Projeto de veleiros, Aerodinâmica, Hidrodinâmica, Projeto de embarcações de esporte lazer, Vela, Método de Elementos Finitos, Rotomoldagem.

Abstract

In a general way, the Brazilian nautical market is still very restricted, specially the one of small dinghies. In the last years, however, mainly due to a greater exposure on the media based on good international results of Brazilian sailors and explorers, sailing has being popularized.

This Msc. Thesis describes the design of a small sail dinghy, for sport or leisure use, made with medium density linear polyethylene using the method of rotomolding. This method has been spreading rapidly worldwide as a process of fabrication of small nautical crafts like sailboats and kayaks, since it results in cost reductions and environmental gains related to the construction process.

The designed sailboat is directed for a crew of two adults (or an adult and two children), and was dimensioned for an easy transport, even on the top of a car. This work is focused on the development of the naval design. Therefore, it goes through all the design steps of a sailboat, starting with the design of the hull, and then going through the design of the sails, appendices (rudder and dagger board), hull structural analysis by Finite Elements Method (FEM) and verification of performance of the sailboat in comparison with a well known sailing dinghy. It should be highlighted, also, the sails designing process, which, in an optimized way, generated a set of sails (main and jib) of good performance, without, however, jeopardizing the stability of the sailboat.

Through a preliminary economical analysis, it was verified that it is possible to produce a rotomolded sailboat with reduced cost, even below the market prices of national sailboats of this size. As a complement, the possibility of employing recycled material in the construction of the boat has been studied. Besides being an alternative to diminish costs, it can bring environmental benefits, as it minimizes production scraps.

Keywords: Sailboat Design, Aerodynamics, Hydrodynamics, Sport/Leisure boats design, Sail, Finite Elements Method, Rotomolding.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3. OBJETIVOS E ETAPAS DO PROJETO	7
3.1 O Projeto Aero-Hidrodinâmico do veleiro	7
3.2 O Projeto Estrutural	8
4. METODOLOGIA DE PROJETO	9
4.1 A metodologia de projeto	9
4.2 O Projeto de um veleiro	9
4.3 ETAPAS DO PROJETO	13
5. PROJETO DO VELEIRO	16
5.1 Projeto do casco	16
5.2 Projeto do Aparelho vélico	23
5.2.1 O processo de Otimização	24
5.2.2 Resultados	26
5.3 Análise estrutural	34
5.3.1 Introdução	34
5.3.2 Geração da malha	35
5.3.3 Definição das condições de contorno/ restrições	35
5.3.4 Carregamento utilizado	37
5.3.5 Representação das propriedades do material	40
5.3.6 Fatores de segurança	40
5.3.7 Resultados obtidos	41
5.3.8 Resultado da análise	51
5.4 Projeto dos Apêndices e Balanceamento Aero-Hidrodinâmico	52
5.4.1 Projeto da bolina	52
5.4.2 Projeto do leme	57
5.4.3 Balanceamento do veleiro	59
6. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO VELEIRO	61
7. ANÁLISE ECONÔMICA	74

7.1 O modelo econômico	75
7.2 Considerações Finais	84
8. CONCLUSÃO	86
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
GLOSSÁRIO NÁUTICO	I
ANEXO I – DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE FABRICAÇÃO - ROTOMOLDAGEM	V
ANEXO II - ESTUDO DO MATERIAL A SER UTILIZADO	VII
ANEXO III – ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO	XVII
ANEXO IV – PARTICULARIDADES DO PROJETO	XXIII

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Veleiros classe Optimist.	2
Figura 1.2 – Veleiros classe Laser.	2
Figura 1.3 – Veleiro classe Dingue	3
Figura 1.4 – Exemplo de Casco Rotomoldado..	4
Figura 4.1 - Espiral de projeto.	9
Figura 4.2 - Representação Esquemática do Equilíbrio no Contra-vento.	11
Figura 5.1 – Veleiro rotomoldado Laser Pico.	17
Figura 5.2 – Veleiro rotomoldado Escape Captiva	18
Figura 5.3 – Plano de linhas.	20
Figura 5.4 – Vista isométrica do casco.	21
Figura 5.5 – Vista isométrica do veleiro completo.	21
Figura 5.6 - Gráfico da curva de estabilidade estática. $\Delta = 270\text{Kg}$ (com tripulação).	22
Figura 5.7 – Formato das Velas (a) e formato da vela mestra (b) (aproximação por trapézios).	25
Figura 5.8 - Formato da vela resultante em otimização para ângulo de incidência de 40° .	27
Figura 5.9 - Formato da vela resultante em otimização para ângulo de incidência de 60° .	28
Figura 5.10 - Formato da vela resultante em otimização para ângulo de incidência de 80° .	28
Figura 5.11 - Formato da vela resultante em otimização para ângulo de incidência de 100° .	29
Figura 5.12 - Formato da vela resultante em otimização para ângulo de incidência de 120° .	29
Figura 5.13 - Formato da vela resultante em otimização para ângulo de incidência de 140° .	30
Figura 5.14 - Formato da vela resultante em otimização para ângulo de incidência de 160° .	30
Figura 5.15 - Formato da vela resultante em otimização para ângulo de incidência de 180° .	31
Figura 5.16 - Análise das diversas velas em VPP com um vento real de 6m/s .	33
Figura 5.17 – Vinculações do casco para análise em MEF.	36
Figura 5.18 – Carregamento utilizado na análise estrutural	39
Figura 5.19 - Casco com reforço na linha de centro em forma de degrau e estruturas de alumínio na proa.	42
Figura 5.20 - Deslocamento no fundo somente com carregamento hidrostático.	43
Figura 5.21 –Deslocamento no “cockpit” devido ao peso da tripulação.	44
Figura 5.22 - Deslocamento de todo o convés com o carregamento completo .	45
Figura 5.23 - Deslocamento do fundo– carregamento completo	46
Figura 5.24 - Deformação de todo o convés com o carregamento completo.	47
Figura 5.25 - Deformação do fundo – carregamento completo.	48
Figura 5.26 – Tensão com carregamento completo (von Mises) – convés .	49
Figura 5.27- Tensão com carregamento completo – lateral BB	50
Figuras 5.28a e 5.28b – Comparação entre perfis serie NACA dígito 4 e 6, e comparação entre formatos de perfis.	54
Figura 5.29 - Potencial de Velocidade ($lv(\beta)$) x Área Relativa da bolina	55
Figura 5.30 – Ângulo de deriva x Área Relativa da bolina.	56
Figura 5.31 - Potencial de Velocity Made Good ($lvmg(\beta)$) x Área Relativa da bolina.	56
Figura 5.32 – Ângulo de leme x Direção real de vento. Intensidade de vento em m/s .	59
Figura 5.33 – Posições longitudinais dos centros de esforços	60
Figura 6.1 – Gráfico polar de velocidade (m/s) para vento de 4 m/s .	63
Figura 6.2 – Gráfico polar de velocidade (m/s) para vento de 6 m/s .	64
Figura 6.3 – Gráfico polar de velocidade (m/s) para vento de 8 m/s .	65
Figura 6.4 – Gráfico de desempenho quanto a ângulo de leeway (vento de 4 m/s).	67
Figura 6.5 – Gráfico de desempenho quanto a ângulo de leeway (vento de 6 m/s).	67
Figura 6.6 – Gráfico de desempenho quanto a ângulo de leeway (vento de 8 m/s).	68
Figura 6.7 – Gráfico de desempenho quanto a ângulo de banda (vento de 4 m/s).	68
Figura 6.8 – Gráfico de desempenho quanto a ângulo de banda (vento de 6 m/s).	69
Figura 6.9 – Gráfico de desempenho quanto a ângulo de banda (vento de 8 m/s).	69
Figura 6.10 – Gráfico de Velocity Made Good (vento de 4 m/s).	70
Figura 6.11 – Gráfico de Velocity Made Good (vento de 6 m/s).	71
Figura 6.12 – Gráfico de Velocity Made Good (vento de 8 m/s).	71
Figura 6.13 – Gráfico de Leme para vento de intensidade de 4 m/s .	72
Figura 6.14 – Gráfico de Leme para vento de intensidade de 6 m/s .	72
Figura 6.15 – Gráfico de Leme para vento de intensidade de 8 m/s .	73
Figura 7.1 – Gráfico de TIR x Preço de Venda para 3 anos de amortização.	80
Figura 7.2 – Gráfico de TIR x Preço de Venda para 5 anos de amortização.	80

Figura 7.3 – Gráfico de TIR x Preço de Venda para 8 anos de amortização.	81
Figura 7.4 – Análise de custos da 1ª hipótese.	82
Figura 7.5 – Gráfico de relação entre preço do molde e preço final de venda do veleiro.	83
Figura 7.6 – Gráfico de tempo de amortização por unidades de veleiros vendidos por ano para preço final de venda de R\$ 6.300, 00.	84
Figura I.1 - Esquema do processo de rotomoldagem.	VI
Figura II.1 – Resultado do ensaio de tração para material virgem.	XI
Figura II.2 – Resultado do ensaio de tração para material reciclado.	XII
Figura II.3 – Resultados do ensaio de flexão para o material virgem.	XIII
Figura II.4 – Resultados do ensaio de flexão para o material reciclado.	XIV
Figura II.5 – Modelo para análise em MEF do corpo de prova.	XVI
Figura II.6 – Comparação entre curva Tensão x Deformação.	XVI
Figura IV.1- Junção cadinho mastro	XXIII
Figura IV.2 – Inserção metálica interna ao plástico	XXIV

Índice de tabelas

Tabela 5.1 – Resultados gerais do veleiro projetado.	16
Tabela 5.2 – Tabela de Veleiros Semelhantes (preços em US\$ não incluem taxa de importação)	17
Tabela 5.3 – Características e coeficientes do veleiro projetado.	19
Tabela 5.4 – Tabela de Pesos e Centro do veleiro	23
Tabela 5.5 – Coeficientes C_l e C_d utilizados. Fonte: Oosanen (1993)	26
Tabela 5.6 - Dados das velas obtidas pela otimização.	31
Tabela 5.7 – Comparação entre velocidade da embarcação para diversos ângulos de vento real das velas geradas pela otimização. Em amarelo o maior valor de velocidade para cada incidência de vento.	33
Tabela 5.8 – Resultado comparativo entre I_v (β_w).	34
Tabela 5.9 – Dados e carregamentos utilizados na análise estrutural	39
Tabela 5.10 – Características físicas do polietileno linear de média densidade para rotomoldagem RC-35U4..	40
Tabela 5.11 – Valores máximos de deformação e tensão	51
Tabela 5.12 - Bolinas analisadas	54
Tabela 5.13 - Potencial de Velocity Made Good (VMG), Área Relativa da bolina (Área de bolina / Área Vélica) e Diferença entre cada valor e o valor máximo obtido.	57
Tabela 6.1 – Dados empregados para a análise em VPP referentes ao “Laser” e Veleiro projetado com um e dois tripulantes.	62
Tabela 7.1 – Custos relativos a produção de um veleiro rotomoldado para a Hipótese 1.	77
Tabela 7.2 – Custos relativos a produção de um veleiro rotomoldado para a Hipótese 2.	78
Tabela II.1 – Resultados do ensaio de tração para o material virgem.	XI
Tabela II.2 – Resultados do ensaio de tração para o material reciclado.	XII
Tabela II.3 – Resultados do ensaio de flexão para o material virgem.	XIII
Tabela II.4 – Resultados do ensaio de flexão para o material reciclado.	XIV
Tabela II.5 – Dados fornecidos pelo fabricante do material das amostras utilizadas para os ensaios.	XV

Lista de Símbolos e Siglas

BWL	Boca na linha d'água
CAD	Computer Aided Design
Cb	Coeficiente de bloco
CD	Coeficiente de arrasto
CE aero	Centro de Esforço aerodinâmico
CE hidro	Centro de Esforço hidrodinâmico
CL	Coeficiente de sustentação
Cm	Coeficiente de seção-mestra
Cmold	Custo do molde
Cp	Coeficiente prismático
Cwp	Coeficiente de linha d'água
E	Base do triângulo da mestra
Fside	Força aerodinâmica lateral
g	Aceleração da gravidade
Gzmax	Máximo braço de endireitamento
Hb	Posição vertical da junção mastro/ brandal
HceAero	Altura do centro de esforço aerodinâmico
I	Altura do triângulo frontal
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IMS	<i>International Measurement System</i>
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
Iv	Potencial de velocidade

lv_{mg}	Potencial de velocity-made-good
J	Base do triângulo frontal
KG	Posição vertical do centro de massa (em relação a quilha)
L/B	Razão comprimento/boca
LCB	Posição longitudinal de centro de carena
LWL	Comprimento na linha d'água
MC	Margem de Contribuição
MEF	Método de Elementos Finitos
Momemb	Momento de emborcamento
n	Número de meses
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
NUV	Número de unidades vendidas
P	Altura do triângulo da mestra
PELMD	Polietileno Linear de Média Densidade
PEMD	Polietileno de Média Densidade
P_{trip}	Peso da tripulação
RM	Momento de restituição total
RM_H	Momento de restituição hidrostática
Sw	Área molhada
T	Tração do brandal de barlavento
T_c	Calado do casco
TCB	Posição transversal do centro de carena
UVA e UVB	Radiação solar
VCB	Posição vertical do centro de carena
V_{mg}	<i>Velocity-made-good</i>

VPP	<i>Velocity Prediction Program</i> (Programa de Medição de Velocidades)
V_w	Velocidade real do vento
Y_{mastro}	Força lateral que o mastro impõe sobre o casco
Y_{trip}	Posição transversal da tripulação
Z_{mastro}	Força vertical que o mastro impõe sobre o casco
a	Ângulo formado entre o estai lateral e o convés
β_w	Ângulo de incidência aparente de vento
D	Deslocamento em massa
DH_{ce}	Distância vertical entre o centro de esforço aerodinâmico e o hidrodinâmico
δRM	Momento de restituição da tripulação
∇	Deslocamento em volume
l	Taxa de atratividade econômica
θ	Ângulo de banda

1. INTRODUÇÃO

O Brasil dispõe de uma costa marítima muito privilegiada. Tendo ainda inúmeras represas e rios e contando com bons ventos, o país se torna um dos mais favoráveis do mundo para o esporte náutico.

O mercado de embarcações de recreio à vela, tanto de cruzeiro como competição, vem crescendo nos últimos anos, impulsionado por regatistas como Robert Scheidt, Torben e Lars Grael e por velejadores como Amir Klink e Beto Pandiani.

Todavia, o país ainda tem pouca tradição náutica e a vela continua com o estigma de ser um esporte elitista. Apesar de cada vez mais surgirem projetos sociais contribuindo com a divulgação da vela no país (caso do projeto “Navegar” e “Navega São Paulo”¹, idealizados por Lars Grael), o preço das embarcações e dos equipamentos envolvidos na prática da vela ainda são muito elevados, sendo, na maioria, equipamentos importados, e, portanto, inacessíveis para grande parte da população.

Alguns exemplos de veleiros de pequeno porte são: o veleiro “Optimist” (Fig. 1.1), amplamente empregado como barco-escola para iniciação de crianças na vela, de custo aproximado de R\$5.000,00 (aprox. US\$2.500,00). O veleiro “Laser Standard”, é um dos mais conhecidos internacionalmente de pequeno porte, sendo classe olímpica. Seu custo é bastante elevado, aproximadamente R\$15.000,00 (aprox. US\$6.000,00). O veleiro “Dingue” é o representante brasileiro entre os veleiros deste porte. É um dos únicos que comporta, sem problemas, dois tripulantes. Seu custo é um dos mais acessíveis do mercado de aproximadamente R\$8.000,00 (aprox. US\$3.600,00).

Os fatores acima expostos motivaram o estudo ora apresentado, que tem como finalidade o desenvolvimento de uma embarcação à vela de pequeno porte (aproximadamente 4 metros de comprimento ou 12 pés) que possa servir de barco-escola ou veleiro para recreio, empregando, para sua fabricação o processo de rotomoldagem em Polietileno Linear de Média Densidade, ou PELMD.

¹ Informações sobre estes programas podem ser vistas em www.projetograel.org.br.

FIGURA 1.1 – VELEIROS CLASSE OPTIMIST. FONTE: WWW.FEVESP.ORG.BR
(12/06/2004)

FIGURA 1.2 – VELEIROS CLASSE LASER. FONTE: WWW.LASERINTERNATIONAL.ORG
(12/06/2004)

FIGURA 1.3 – VELEIRO CLASSE DINGUE. FONTE: WWW.FEVESP.ORG.BR (12/06/2004)

A rotomoldagem, técnica ainda pouco difundida no mercado náutico nacional, tem se expandido rapidamente no exterior. A HobieCat (ex. Hobie Wave) dos EUA e a Laser internacional (ex. Laser Pico) da Inglaterra são exemplos de empresas conhecidas no meio da vela que utilizam a rotomoldagem como alternativa de construção à laminação em fibra de vidro. Além do mais, na Europa e Estados Unidos, legislações ambientais e de segurança de trabalho estão se tornando cada vez mais rigorosas e restritivas. Desta forma, a utilização de resina com fibra de vidro começa a requerer um número maior de medidas de segurança e anti-poluição, encarecendo em muito o produto final.

A moldagem rotacional, também conhecida como fundição rotacional ou rotomoldagem é um processo de transformação de materiais poliméricos utilizado para a produção de peças vazadas ou abertas, tais como tanques e contentores, artigos para lazer, play-grounds, manequins e brinquedos. No contexto da indústria náutica nacional, a rotomoldagem é utilizada, por exemplo, para a fabricação de caiaques (fig. 1.4). Paralelamente a este projeto, algumas empresas como a Smart Píer e a Brudden Náutica também estão realizando estudos para a fabricação de veleiros pelo método da rotomoldagem.

Mais detalhes sobre o processo da rotomoldagem podem ser vistos no anexo I.

FIGURA 1.4 – EXEMPLO DE CASCO ROTOMOLDADO. FONTE:

WWW.REGATTA.COM.BR (15/07/2004).

Embora a ênfase deste trabalho recaia sobre o projeto naval (cascos, apêndices, projeto estrutural, balanceamento aero-hidrodinâmico), uma discussão preliminar sobre as características do processo de rotomoldagem e as possíveis vantagens de sua aplicação será apresentada ao longo do texto e nos anexos.

Em especial, será avaliado o possível emprego de material reciclado, o que além de permitir certa redução de custo, traz benefícios ambientais importantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como o foco desta dissertação é o projeto de um veleiro, a maior parte da bibliografia pesquisada foi voltada às etapas do projeto do veleiro. A seguir, apresenta-se uma breve discussão sobre as principais referências utilizadas.

O livro de *Larsson & Eliasson (1994)* foi seguido como referência central desta dissertação. Esta obra discorre sobre todas as etapas pertinentes a um projeto de veleiro, desde o desenvolvimento do casco, passando pelos projetos do aparelho vélico, apêndices, motorização, estruturas e arranjo interno. Em cada tópico são analisadas as teorias envolvidas e apresentadas formulações simplificadas e/ou empíricas que auxiliam no projeto da embarcação.

Claughton, Wellicome & Shenoi (1998) e *Marchaj (2000)* foram outras bibliografias específicas de projeto de veleiro pesquisadas.

Claughton, Wellicome & Shenoi (1998) apresentam também uma abordagem geral do projeto de veleiros, porém menos prática. Contudo, apresentam alguns tópicos de grande valia, como teste de modelos, engenharia de segurança, dinâmica de fluídos e método de elementos finitos.

Já *Marchaj (2000)* tem uma abordagem teórica/experimental voltada para a hidrodinâmica e aerodinâmica envolvidas na operação de um veleiro, como estudo de fólios, diferença entre diversos formatos de vela, ensaios em túnel de vento, etc.

Ainda na área hidrodinâmica e aerodinâmica de fólios, *Abott (1959)*, além de apresentar a teoria de fólios e asas de forma completa, reúne uma extensa coleção de perfis (principalmente perfis NACA) e seus respectivos ensaios, dando uma grande base para o projeto de apêndices como o leme e a bolina/quilha.

O projeto estrutural requer atenção especial. O projeto estrutural de um casco convencional, seja ele construído em materiais compostos ou metal, normalmente segue normas de dimensionamento que trazem consigo muitos anos de experiência

e são amplamente aceitas, inclusive para fins de seguro de embarcações. Para este projeto específico, todavia, em virtude do pequeno porte do veleiro e do material alternativo, não há ainda uma norma que possa ser aplicada. Desta forma, o projeto estrutural deve ser realizado de maneira racional. Optou-se, então, pela aplicação de método de elementos finitos. Este método é amplamente difundido para análise estrutural, mas sua aplicação para análise de um veleiro apresenta inúmeras particularidades. Após extensa pesquisa bibliográfica, verificou-se que a literatura especializada sobre o tema é escassa. Dentre as poucas referências encontradas, destacam-se os trabalhos técnicos de *Santos et al (2004)* e *Belgrano (2004)*, que apresentam importantes informações para análise em elementos finitos relativos especificamente para o projeto de veleiros, tais como definição de carregamento, fatores de segurança e condições de contorno.

3. OBJETIVOS E ETAPAS DO PROJETO

O objetivo central deste estudo se refere ao projeto de um veleiro de pequeno porte que comporte até dois tripulantes adultos (ou um adulto e duas crianças) e cujo casco seja construído em material plástico (PELMD) através do processo de rotomoldagem.

Os principais requisitos da embarcação a ser projetada são:

- Comportar dois tripulantes adultos ou um adulto e duas crianças.
- Ser dotado de duas velas (mestra e buja).
- Ser de fácil transporte sobre o bagageiro de um carro (restrições de peso e de dimensões).
- Ser orientado para lazer e iniciação nos esportes náuticos à vela.

As características acima descritas orientarão todas as atividades de projeto. Estas, por sua vez, podem ser agrupadas em duas áreas principais, que serão discutidas brevemente a seguir.

3.1 O PROJETO AERO-HIDRODINÂMICO DO VELEIRO

Este tópico engloba as etapas referentes ao projeto do veleiro, subdivididas abaixo:

- Definição da geometria do casco: para que o projeto de um veleiro seja bem sucedido sua geometria deve ser estudada com cuidado para melhorar seu desempenho não só quanto à resistência ao avanço, como também quanto à sua estabilidade, fundamental para o velejo contra-o-vento (ou em “órça”).
- Estudo e definição do aparelho vélico (plano vélico): toda a força motriz deste tipo de embarcação está relacionada à sua área vélica. Porém, qualquer excesso pode causar um comprometimento na estabilidade da embarcação. Assim, pretende-se determinar uma solução de compromisso ótima entre força propulsora e a estabilidade desejada para a embarcação através de um algoritmo de otimização;
- Estudo de apêndices (quilha ou bolina e leme): a bolina e o leme são peças fundamentais no funcionamento de um veleiro. A primeira está relacionada principalmente com o equilíbrio hidrodinâmico, equilibrando a força lateral

imposta pelas velas, evitando que a embarcação derive demasiadamente. Já o leme está diretamente relacionado com a manobrabilidade da embarcação;

- Análise de desempenho: analisar-se-á o desempenho do veleiro projetado e comparar-se-á com o desempenho de um veleiro bem estabelecido no mercado da vela nacional por intermédio de um programa de computador desenvolvido para prever o comportamento do veleiro em diversas condições de vento.

3.2 O PROJETO ESTRUTURAL

Este tópico está relacionado com toda análise estrutural a ser desenvolvida em relação ao veleiro. Pode ser dividido em:

- Estudo de métodos de fabricação: como este projeto envolve a fabricação da embarcação em material plástico reciclável, é necessário adequar o formato do casco ao método de fabricação. Assim, o estudo do método de fabricação se faz necessário para se conhecer as limitações presentes neste;
- Projeto estrutural do casco: para se avaliar o projeto estrutural da embarcação será utilizado método de elementos finitos.
- Análise e seleção de materiais: paralelamente ao projeto estrutural será feito um levantamento e análise de materiais plásticos recicláveis a serem utilizados para a fabricação do veleiro.

Por fim, dadas as características gerais do mercado náutico nacional e a baixa difusão do processo de rotomoldagem para esta aplicação, uma análise preliminar de custos será realizada. Será estudada, em particular, a possibilidade de utilização de material reciclado, na tentativa de reduzir o custo final da embarcação e promover o processo de reciclagem, de modo a proporcionar ganhos ambientais.

4. METODOLOGIA DE PROJETO

4.1 A METODOLOGIA DE PROJETO

O método mais utilizado na concepção de um projeto de engenharia naval é um processo iterativo conhecido como “Espiral de Projeto”. Neste método considera-se o andamento de um projeto como se evoluísse em uma espiral. O projeto é dividido em etapas a serem realizadas em uma determinada ordem. Assim que fossem realizadas todas as etapas, retornar-se-ia para a primeira, já que ao se passar pelas outras etapas teriam surgido novas restrições ou alterações no projeto. Assim, o procedimento de projeto se torna cíclico e deve ser repetido até que a convergência dos parâmetros principais seja considerada satisfatória. Um arranjo esquemático do processo envolvido para a elaboração deste projeto é ilustrado na figura abaixo.

FIGURA 4.1 - ESPIRAL DE PROJETO.

4.2 O PROJETO DE UM VELEIRO

O projeto de um veleiro apresenta certas particularidades em relação a outros projetos de engenharia naval, cuja compreensão requer o entendimento de seu

funcionamento. Cabe aqui, portanto, uma breve discussão sobre tal funcionamento, antes de adentrar ao projeto propriamente dito.

Primeiramente, toda propulsão de um veleiro é fornecida por forças aerodinâmicas formadas nas velas, ora de sustentação, ora de arrasto ou até mesmo uma combinação de sustentação e arrasto, dependendo da incidência do vento sobre a vela.

Todo o funcionamento e desempenho de um veleiro depende do equilíbrio de forças: aerodinâmicas na vela, hidrodinâmicas no casco e nos apêndices (bolina ou quilha e leme), hidrostáticas no casco e, por fim, gravitacionais no casco e na tripulação. Porém, para cada ângulo de incidência de vento sobre o veleiro, este equilíbrio de forças se modifica.

A grosso modo, um veleiro poderia se defrontar com três situações diferentes de incidência de vento e por conseqüência com três situações diferentes de equilíbrio de forças. Estas situações, descritas a seguir, são: a favor do vento (vento de popa) com o vento incidindo com ângulo de aproximadamente 180° em relação à proa da embarcação; vento com incidência de aproximadamente 90° em relação à proa (vento de través) e por fim, contra-vento (ou orça) quando o vento incide, aproximadamente, de 35° a 70° em relação à proa.

Com vento de popa, quase não há a formação de força de sustentação nas velas e a propulsão da embarcação é dada, basicamente, pela força de arrasto gerada nas velas. Neste caso o velejador “abre” as velas formando quase um ângulo de 90° entre as velas e o vento. Este é o caso de condição de equilíbrio mais simples, no qual a força propulsora é equilibrada pela resistência ao avanço do casco. Normalmente a tripulação deve se localizar mais à ré da embarcação para contrabalançar o ângulo de inclinação longitudinal (*trim*) causado pela força de arrasto da vela, e dada a quase ausência de forças laterais, centralizar seu peso próximo à linha de centro do veleiro.

Quando o veleiro se encontra no contra-vento ou com vento de través há a formação de força de sustentação nas velas. No caso do contra-vento, a condição de equilíbrio é mais complexa. Para simplificar um pouco, pode-se decompor todas as forças em forças longitudinais e forças transversais. Um diagrama esquemático destas forças pode ser visto na Figura 4.2.

FIGURA 4.2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EQUILÍBRIO NO CONTRA-VENTO.
 FONTE: LARSSON & ELIASSON (1994).

As forças de sustentação e de arrasto nas velas podem ser decompostas em força propulsora e força lateral. Considerando somente o equilíbrio de forças na direção transversal, esta força lateral aerodinâmica causaria uma grande deriva da embarcação. Para contrabalançar esta força o veleiro se utiliza de dois artifícios: a bolina (ou quilha) que funciona como um elemento de asa submerso e o próprio casco. Ambos, ao se deslocarem com certo ângulo em relação a longitudinal (ângulo de orça ou *leeway* em inglês), geram uma força de sustentação hidrodinâmica que evita a deriva demasiada do veleiro.

Porém, como há forças nas velas no sentido lateral, com a bolina gerando uma força contrária, e como estas duas forças agem em cotas verticais diferentes, surge então um momento de emborcamento. Este momento é resistido pelo momento de restauração hidrostática do casco, e o barco adotará, então, um ângulo de inclinação. No caso de veleiros pequenos, a tripulação exerce uma forte influência aliviando o momento de emborcamento ao se deslocar o máximo possível (na direção transversal) para longe da linha de centro da embarcação. Este

movimento é chamado de “escora”, e no caso de veleiros de pequeno porte é, muitas vezes a principal contribuição para o momento de restauração da embarcação, evitando assim ângulos de inclinação demasiados.

No equilíbrio de forças longitudinais do veleiro, a força propulsora do veleiro (decomposição da força de sustentação na direção longitudinal) é contrabalançada pelas forças de arrasto hidrodinâmicas e aerodinâmicas.

No caso do veleiro com o vento de través as forças envolvidas são praticamente as mesmas do caso do equilíbrio em orça. Há, no entanto, uma diferença: a força lateral aerodinâmica é bem pequena. Assim o equilíbrio de forças na direção transversal não é tão importante no equilíbrio geral do veleiro, não havendo grandes ângulos de orça, nem grandes ângulos de banda. Não há a necessidade de escora, somente um leve deslocamento da tripulação para contrabalançar o pequeno momento de emborcamento. Já no equilíbrio longitudinal, praticamente toda força de sustentação aerodinâmica se transforma em força propulsora. Em pequenos veleiros a bolina é móvel e para reduzir o arrasto, neste caso, ela é levantada quase pela metade nestas condições de vento. Normalmente esta é a condição de vento onde o veleiro atinge uma maior velocidade.

Obviamente um veleiro pode encontrar condições de vento diferentes das descritas acima. Porém, simplificadamente, pode-se dizer que sejam combinações das situações descritas acima. Entre 150° e 100° a força propulsora da embarcação é formada por uma combinação de força de arrasto e força de sustentação. Entre a condição de través e de orça, o que muda basicamente é a decomposição das forças aerodinâmicas. Quanto menor o ângulo de incidência do vento (em relação à proa) maior a força lateral e menor a força propulsora.

É necessário dizer também que os ângulos entre as velas e o veleiro devem ser ajustados para as diferentes direções de vento. O velejador deve ajustá-los visando a obtenção de uma maior força de propulsão². Geralmente, quanto menor o ângulo de incidência de vento, menor o ângulo entre as velas e a linha de centro do casco (velas “caçadas”). Entre o vento de través e o vento de popa o ângulo da vela fica próximo dos 90° em relação ao veleiro, procurando expor ao máximo a área vélica ao vento.

² A isso se dá o nome de “trimar” as velas

Outro diferencial no projeto de um veleiro é seu “balanceamento”. Em um bom “balanceamento”, os centros de esforços aerodinâmicos e hidrodinâmicos estão distantes longitudinalmente de forma ao veleiro tender a “entrar” no vento em ventos fortes, “sair” do vento em ventos fracos e ter uma tendência neutra em ventos de média intensidade. Deste modo, a atitude do veleiro difere com as diversas intensidades de vento. Este comportamento, exclusivo de veleiros, além de outros detalhes sobre o balanceamento, serão analisados no capítulo 5.

Assim, para um bom projeto de veleiro deve-se levar em conta todos os fatores acima descritos. Vale lembrar que, principalmente para a condição de orça, a segurança é um fator muito importante devido à “fragilidade” da condição de equilíbrio. Qualquer movimento errado do velejador em uma embarcação pequena pode causar seu emborcamento, assim como um ângulo de vela errado, onde a força lateral se torne exageradamente grande.

4.3 ETAPAS DO PROJETO

O primeiro passo a ser tomado neste projeto será definir suas características principais com base nos requisitos da embarcação. Será feito também um levantamento de materiais plásticos recicláveis que poderiam ser utilizados no processo de fabricação injeção/rotomoldagem, assim como um estudo do processo de rotomoldagem para se conhecer suas restrições. Neste levantamento serão estudadas as propriedades mecânicas dos materiais, assim como o custo de cada material. Dado um material, estima-se preliminarmente o deslocamento da embarcação com este material, sua área vélica, os principais esforços envolvidos e em uma análise estrutural simplificada, verifica-se se este material suportaria os esforços aos quais está sendo solicitado.

Inicia-se então o desenho do casco. As formas do casco podem ser geradas em programas de CAD (*Computational Aided Design*), como o “Autoship[®]”, software de CAD voltado para o projeto embarcações. Através do modelo gerado, pode-se avaliar a embarcação quanto à resistência ao avanço e quanto à estabilidade.

Para a modelagem preliminar do casco são consideradas as dimensões principais, definidas segundo os requisitos do projeto e com auxílio de uma análise prévia de veleiros semelhantes.

Além disso, considerações hidrodinâmicas são feitas com base em resultados de séries sistemáticas de veleiros monocascos (a mais completa foi desenvolvida pela escola de engenharia *Delft University of Technology*, Holanda).

Com o casco preliminar definido é necessário iniciar o projeto da mastreação e plano vélico do veleiro. Este estudo compreende a definição de quantas velas serão utilizadas, a área vélica da embarcação, a geometria das velas, o comprimento do mastro, e a configuração do estaiamento (cabos de sustentação do mastro).

Usualmente, quando se projeta uma embarcação comercial de pequeno porte, é comum a utilização de alguma mastreação semelhante à de algum veleiro já existente no mercado. É assim com o “Dingue” e o “Laser”. Apesar de a área vélica dos dois veleiros serem um pouco diferentes, pode-se intercambiar mastros e velas de ambos veleiros.

Neste estudo, contudo, pretende-se projetar um plano vélico otimizado e específico para a embarcação projetada. Será então, desenvolvido um algoritmo de otimização baseado em um modelo aerodinâmico simplificado. Este algoritmo deverá considerar também as características de estabilidade da embarcação. Isto é necessário, pois quanto maior for a área vélica, e/ou quanto maior for a altura do centro de esforços aerodinâmicos, maior será o momento de emborcamento a ser resistido pela embarcação. Assim, com o algoritmo de otimização poder-se-á escolher a melhor opção de propulsão (no caso do veleiro, as velas) sem, contudo, comprometer sua estabilidade.

Após o projeto do casco e da mastreação, inicia-se a análise estrutural do veleiro. Esta análise também será realizada através do auxílio de métodos numéricos, como o método de elementos finitos.

Por fim, levando-se em consideração o formato do casco, seu peso e sua área vélica, faz-se necessário avaliar o desempenho do veleiro projetado. Para isto é comum se utilizar, em projetos de veleiros, de um VPP (*Velocity Prediction Program*), programa de predição de velocidade através do qual se pode estimar a velocidade da embarcação e em que condição estará operando (inclinação, ângulo de *leeway*, etc).

Em um VPP estão formuladas as equações de equilíbrio sucintamente relacionadas anteriormente (equilíbrio longitudinal, lateral e de momentos). Em virtude do elevado número de parâmetros envolvidos no projeto e de sua interdependência, o emprego deste tipo de programa é fundamental no projeto de um veleiro. Ele permite ao projetista analisar de forma consistente a influência de alterações nos parâmetros de projeto sobre o desempenho final e, dessa forma, auxilia a tomada de decisões ao longo do projeto.

5. PROJETO DO VELEIRO

Como já dito no capítulo 4, a espiral de projeto é uma das metodologias de projeto mais difundida entre os engenheiros navais. Para este trabalho, a espiral de projeto (ver na figura 4.1) foi percorrida duas vezes. Os resultados apresentados neste capítulo se referem àqueles obtidos ao final da segunda volta.

Dentre as principais modificações realizadas entre a primeira e segunda volta da espiral, estão o cálculo da posição do centro de gravidade do casco (realizado por um estudo de pesos e centros), que na primeira volta foi estimado (a diferença entre os dois estava em torno de 25%) e o peso da embarcação que, após a uma análise estrutural via MEF (método dos elementos finitos), resultou 10% menor do que o estimado inicialmente a partir de semelhantes.

Os resultados gerais do veleiro projetado são apresentados na tabela 5.1. Estes valores, entre outros, serão melhores descritos ao longo deste capítulo.

TABELA 5.1 – RESULTADOS GERAIS DO VELEIRO PROJETADO.

Comprimento total	4,0 m	I	4,32 m
Boca	1,4 m	J	1,45 m
Calado	0,155m	Área Bolina	0,5 m ²
Área Vélica total	8,7 m ²	Área Leme	0,08 m ²
P	4 m	Peso do casco	65Kg
E	2,08 m	Deslocamento de Projeto	274 Kg

5.1 PROJETO DO CASCO

A definição das dimensões principais requer a definição dos objetivos comerciais do veleiro. Foi decidido que este veleiro se destinaria para o esporte/lazer e como um possível barco/escola, para uma tripulação máxima de dois adultos ou duas crianças e um adulto. Para se adequar a esta finalidade, decidiu-se então privilegiar a estabilidade, mesmo que com certo sacrifício dos parâmetros de desempenho.

Foi feita, então, uma pesquisa de embarcações semelhantes para se decidir qual seria o comprimento máximo desta embarcação. Nesta análise, levou-se em conta também veleiros rotomoldados do exterior. Alguns desses veleiros se encontram nas figuras 5.1 e 5.2 e na tabela 5.2.

Constatou-se também que os principais concorrentes no mercado nacional desta nova embarcação seriam: o “Laser”, o “Dingue” e o “Holder”. Dentre estes, somente o “Dingue” realmente se destina a dois tripulantes, porém os outros também suportam tal tripulação, embora não em condições ideais.

TABELA 5.2 – TABELA DE VELEIROS SEMELHANTES (PREÇOS EM US\$ NÃO INCLUEM TAXA DE IMPORTAÇÃO)

Veleiro	Construção	Comp. (m)	Boca (m)	Peso Casco (kg)	Área Vélica (m ²)	Preço
Laser	Fibra de Vidro	4,30	1,37	59	7,06	R\$15000,00
Laser Pico	Rotomoldagem	3,50	1,45	65	5,9+1,09 (buja)	R\$13972,00
Dingue	Fibra de Vidro	4,16	1,66	85	6,50	R\$8000,00
Holder	Fibra de Vidro	3,66	1,50	55	6,50	R\$7500,00
Escape Mambo	Rotomoldagem	2,90	1,20	38	5,20	US\$2000,00
Escape Captiva	Rotomoldagem	3,60	1,60	65	5,90	-
Escape Rumba	Rotomoldagem	3,90	1,60	68	7,90	US\$3000,00

As dimensões iniciais da embarcação escolhidas foram:

- Comprimento total: 4,00 m;
- Boca: 1,4m;
- Pontal: 0,45m;
- Peso aproximado (somente casco): Aprox. 70 kg.

FIGURA 5.1 – VELEIRO ROTOMOLDADO LASER PICO. FONTE:

WWW.LASERSAILING.COM (04/2004).

FIGURA 5.2 – VELEIRO ROTOMOLDADO ESCAPE CAPTIVA. FONTE: [HTTP://WWW.BOSUNS.CO.UK/ESCAPE.HTM](http://www.bosuns.co.uk/escape.htm) (04/2004).

Tendo-se as dimensões principais, iniciou-se uma modelagem preliminar do casco deste veleiro.

Nesta modelagem, executada através do “software” Autoship® (“software” de Computer Aided Design - CAD específico para a área naval), algumas premissas foram adotadas. O comprimento e largura tiveram suas dimensões pré-estabelecidas, de forma que o veleiro pudesse ser transportado em cima do teto do carro. Segundo a legislação nacional (Resolução 577/81 do Conselho Nacional de Trânsito - Contran), nenhum objeto transportado por um veículo de passeio pode exceder as dimensões externas do mesmo. Tomando como base um carro de médio porte, a embarcação foi definida com 4 metros de comprimento e 1,4 m de largura. A embarcação deveria, também, suportar uma tripulação de dois adultos ou duas crianças e um adulto. Estabeleceu-se assim, massa de tripulação de 160 Kg, ou 80 Kg para cada tripulante (adulto).

Desta forma, para se satisfazer as premissas acima, apesar dos projetos mais modernos de veleiro apresentarem características um pouco diferentes (popa larga e baixo calado, visando facilitar o planeio), devido às restrições de comprimento e boca, criou-se um casco com coeficiente de bloco e de seção-mestra um pouco mais alto do que aqueles verificados usualmente em veleiros de pequeno porte voltados para competição. Como este veleiro se destina ao esporte/laser e não

como um veleiro de competição, suas linhas não foram orientadas com foco principal na velocidade.

A definição dos valores de C_p e LCB seguiu as recomendações obtidas a partir de resultados experimentais da série de Delft. Tais recomendações definem valores ótimos de C_p e LCB em função do número de Froude, valores estes que minimizam a resistência residual do casco, estando dentro de uma faixa ótima de C_p entre 0,52 e 0,6 e de LCB de 2,5% a 3,5% (*Larson & Eliasson (1994)*). Pode-se ver, pela Tabela 5.3 os valores de C_p e Lcb estabelecidos para o casco projetado, que foram definidos com base em uma velocidade de 2,5 m/s (aprox. 5 nós), velocidade esta estimada como típica para uma velocidade de vento de 6 m/s (12 nós).

As características e coeficientes de forma obtidos podem ser vistos na tabela 5.3, assim como o plano de linhas (figura 5.3) e vistas isométricas do veleiro (figuras 5.4 e 5.5).

TABELA 5.3 – CARACTERÍSTICAS E COEFICIENTES DO VELEIRO PROJETADO.

Dimensões			
Copmrimento total	4,03 m	Comprimento de linha D'água	3,62 m
Boca Máxima	1,40 m	Boca na linha D'água	1,18 m
Calado máximo	0,16 m		
Volume submerso	0,27 m ³		
Deslocamento (água salgada)	274,12 kg		
Centroides:			
LCB	3,0% à ré da seção mestra	LCF	1,99 m (em relação a popa)
TCB	0,000	VCB	0,10 m (em relação a quilha)
Coeficientes:			
Bloco (Cb)	0,42	Prismatico (Cp)	0,58
Seção mestra (Cm)	0,72	Linha d'água (Cwp)	0,73
Volume (Cv)	0,18		
Áreas:			
Linha D'água	3,10 m ²	Superfície molhada	3,27 m ²
Razões			
L/B	3,07	D/L	156,89
Metacentro:			
BM transversal	1,00 m

FIGURA 5.3 – PLANO DE LINHAS.

FIGURA 5.4 – VISTA ISOMÉTRICA DO CASCO.

FIGURA 5.5 – VISTA ISOMÉTRICA DO VELEIRO COMPLETO.

Por fim, depois de terminado o projeto do casco, iniciou-se uma análise de estabilidade estática. Levantou-se a curva de estabilidade estática do veleiro com tripulação, considerando-se ou não a escora. Esses resultados foram obtidos através do programa “*Autohydro*®” e foram empregados para a definição do plano vélico e para o estudo de desempenho do veleiro (ver figura 5.6).

FIGURA 5.6 GRÁFICO DA CURVA DE ESTABILIDADE ESTÁTICA. $\Delta = 270\text{KG}$ (COM TRIPULAÇÃO).

Para a obtenção do KG da embarcação, já considerando velas, leme, bolina e mastro, utilizou-se o modelo em CAD da embarcação completa (Figura 5.5). O resultado foi um KG de 0,593 m. Conforme apresentado na tabela a seguir.

TABELA 5.4 – TABELA DE PESOS E CENTRO DO VELEIRO

Componente	Material	Peso (Kg)
Casco	PE	65
Estruturas internas (convés)	Alumínio	6,5
Leme (completo: madre + estrutura)	Cedro	6,5
Bolina	Cedro	12
Mastro	Alumínio	15
Retranca	Aluminio	4
Vela	Lona Leve	2
Cordas e equipamentos		3
Total		114
Centro de massa total	x: 1,82 m (em relação à popa)	
	z: 0,593 m (em relação à quilha)	

5.2 PROJETO DO APARELHO VÉLICO

O estudo do aparelho vélico compreende principalmente a definição das dimensões da(s) vela(s), bem como, sua geometria. Este projeto tem como um de seus principais objetivos a definição de um processo que permita orientar o projeto das velas com base em resultados experimentais (modelo aerodinâmico semi-empírico) e considerando as características de estabilidade do veleiro.

Desenvolveu-se, então, um processo baseado em uma técnica de otimização que, embora simplificada, auxilia sobremaneira o processo de decisão.

Intuitivamente, sabe-se que um dos fatores principais de otimização seria a área vélica, afinal as velas são o “motor” da embarcação e, desta forma, quanto maior a área vélica, respeitando as restrições de estabilidade, maior o potencial de propulsão e conseqüentemente maior o desempenho. Porém, como as velas funcionam como elementos de asa, um outro fator importante a ser considerado é a sua razão de aspecto, além da distribuição de área entre as velas.

A razão de aspecto de uma asa tem relação direta com sua eficiência. Em geral, quanto maior a razão de aspecto (envergadura/corda), maior a eficiência aerodinâmica da asa, pois diminui a influência da vorticidade formada nas pontas da asa, e conseqüentemente, o arrasto induzido. No caso da vela do veleiro, principalmente no contra-vento, quando o desempenho depende de uma maior eficiência da vela, a razão de aspecto é um fator importante a ser considerado.

Na verdade, a eficiência de uma vela depende de uma série de fatores, inclusive relacionados ao formato da vela. Além da razão de aspecto, acima

mencionada, a geometria da vela influi em muito em sua eficiência. Pela teoria de asas, sabe-se que quanto mais perto o contorno de uma asa se aproxima da forma de uma elipse, mais eficiente é a vela (devido a uma distribuição elíptica de sustentação ao longo da asa que apresenta melhor relação sustentação/arrasto). Há outro fator inerente à geometria da vela chamado “*camber*”. Este fator geométrico se refere à curvatura seccional que a vela assume quando um fluxo de ar passa por ela. Esta curvatura é variável ao longo da envergadura da vela e também influencia sua eficiência aerodinâmica (*Marchaj (2000)*). Devido à grande complexidade deste problema aero-elástico, o projeto da vela em si requer um extenso estudo aerodinâmico e estrutural. A maioria dos fabricantes de veleiros terceiriza a fabricação da vela, deixando este projeto para velarias de renome. Resta ao projetista/fabricante do veleiro definir as dimensões básicas das velas, que são normalmente definidas pelos seguintes parâmetros: altura (testa) das velas (simplificadas por P para vela mestra e I para buja) e base (ou esteira) das velas (E para vela mestra e J para buja) (vide figura 5.7). É importante notar que estes parâmetros são parâmetros do veleiro e com eles define-se a chamada área vélica “triangular”.

Assim, para a definição do aparelho vélico, esses quatro parâmetros (I, J, P e E) representarão as variáveis no processo de otimização proposto.

5.2.1 O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Iniciou-se, então, o desenvolvimento de um algoritmo de otimização utilizando como parâmetros de otimização as dimensões das velas I, J, P e E.

Buscou-se obter um algoritmo que retornasse um plano vélico otimizado que garantisse ao veleiro o melhor desempenho para uma determinada incidência de vento sem, contudo, comprometer a estabilidade da embarcação.

De fato, a questão desempenho x estabilidade é a principal relação de compromisso que orienta o projeto do plano vélico de um veleiro. Como dito anteriormente nos capítulos iniciais, face aos objetivos do veleiro projetado, optou-se por manter uma baixa tendência ao emborcamento.

FIGURA 5.7 – FORMATO DAS VELAS (A) E FORMATO DA VELA MESTRA (B)
(APROXIMAÇÃO POR TRAPÉZIOS).

Deste modo, estabeleceu-se como requisito uma inclinação máxima da embarcação ($\theta < 30^\circ$) quando velejando na situação de maior solicitação de força lateral (orça fechada) para vento com velocidade real (V_w) de 6 m/s (ou 12 nós). Definiu-se como 6 m/s a velocidade máxima em que o veleiro poderia velejar, sem que fosse necessária qualquer ação sobre as velas que diminuísse sua eficiência. A embarcação pode até operar com ventos superiores a 6 m/s, porém quando velejando em orça fechada (próximo de 30° de incidência de vento aparente) a inclinação (banda) do veleiro seria superior a 30° e o veleiro correria risco de emborcar caso o velejador não “soltasse” a vela, ou corrigisse o rumo do veleiro.

Para o cálculo dos coeficientes de sustentação e de arrasto das velas foram utilizados os resultados do modelo semi-empírico desenvolvido por *Poor* (1986) obtidos a partir de *Oosanen* (1993), ainda hoje utilizados pela *International Measurement System (IMS)*. Para obter este modelo, *Poor* fez uma série de ensaios em escala reduzida de velas de diversos formatos (dentro dos formatos mais comumente utilizados por veleiros) e chegou a uma tabela de valores de coeficientes

de arrasto e de sustentação (CD e CL) médios. Esta tabela (tabela 5.5) apresenta valores de CD e CL somente para algumas direções de vento. Por isso foi necessário interpolar estes dados para se chegar aos valores de CL e CD para todas as direções de vento necessárias.

TABELA 5.5 – COEFICIENTES CL E CD UTILIZADOS. FONTE: OOSANEN (1993)

Ângulo de vento (aparente)	C _{lm} (vela mestra)	C _{dm} (vela mestra)	C _{lj} (vela buja)	C _{dj} (vela buja)
0	0,00	0,05	-	-
7º	1,00	0,03	0,00	0,05
9º	1,22	0,027	-	-
12º	1,35	0,027	-	-
15º	-	-	1,00	0,023
20º	-	-	1,375	0,031
27º	-	-	1,45	0,037
50º	-	-	1,43	0,25
60º	1,25	0,144	1,25	0,35
90º	0,96	0,306	-	-
100º	-	-	0,40	0,73
120º	0,58	0,671	-	-
150º	0,25	1,11	0,00	0,95
180º	-0,10	1,20	-0,10	0,90

Por fim, foi escolhida, para a otimização, uma faixa de vento aparente entre 30º e 180º de incidência. Para cada ângulo de incidência (variou-se de 10º em 10º a incidência do vento) obteve-se uma vela otimizada e que obedecesse a todas as restrições impostas.

A formulação do algoritmo, assim como as restrições impostas utilizadas nesta otimização, se encontram no anexo III.

5.2.2 RESULTADOS

Nas figuras a seguir serão apresentadas as formas das velas otimizadas, obtidas para diversos ângulos de incidência de vento, utilizando vela mestra com

talas parciais (talas são estruturas mais rígidas que são introduzidas na vela para melhorar seu formato aerodinâmico).

Estes resultados foram obtidos com a restrição de ângulo imposta para um vento real de 6 m/s, tripulação de duas pessoas (160 Kg) e ângulo máximo de inclinação de 30° . As restrições nas variáveis (I, J, P, E) são discutidas no Anexo III. Os ângulos são contados a partir da proa da embarcação (0° corresponde a vento incidindo de proa).

FIGURA 5.8 - FORMATO DA VELA RESULTANTE EM OTIMIZAÇÃO PARA ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 40° (DIMENSÕES EM METROS).

FIGURA 5.9 - FORMATO DA VELA RESULTANTE EM OTIMIZAÇÃO PARA ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 60° (DIMENSÕES EM METROS).

FIGURA 5.10 - FORMATO DA VELA RESULTANTE EM OTIMIZAÇÃO PARA ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 80° (DIMENSÕES EM METROS).

FIGURA 5.11 - FORMATO DA VELA RESULTANTE EM OTIMIZAÇÃO PARA ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 100° (DIMENSÕES EM METROS).

FIGURA 5.12 - FORMATO DA VELA RESULTANTE EM OTIMIZAÇÃO PARA ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 120° (DIMENSÕES EM METROS).

FIGURA 5.13 - FORMATO DA VELA RESULTANTE EM OTIMIZAÇÃO PARA ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 140° (DIMENSÕES EM METROS).

FIGURA 5.14 - FORMATO DA VELA RESULTANTE EM OTIMIZAÇÃO PARA ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 160° (DIMENSÕES EM METROS).

FIGURA 5.15 - FORMATO DA VELA RESULTANTE EM OTIMIZAÇÃO PARA ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 180º (DIMENSÕES EM METROS).

A tabela 5.6 caracteriza as velas obtidas para os diferentes ângulos de vento apresentados.

TABELA 5.6 - DADOS DAS VELAS OBTIDAS PELA OTIMIZAÇÃO.

Vela Otimizada para ângulo de vento (β_w)	40º	50º	60º	70º	80º	90º	100º	120º	140º	160º	180º
P (m)	4,15	4,11	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
E (m)	1,80	1,81	2,08	2,29	2,45	2,54	2,61	2,55	2,47	2,46	2,46
I (m)	4,95	4,99	4,32	3,51	2,80	2,28	1,96	2,33	2,75	2,78	2,80
J (m)	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
Razão de aspecto vela mestra	3,45	3,40	2,87	2,61	2,44	2,35	2,29	2,34	2,42	2,42	2,43
Razão de aspecto vela buja	6,82	6,88	5,95	4,85	3,86	3,15	2,70	3,21	3,79	3,83	3,86
Área vela mestra (m²)	5,00	4,97	5,57	6,13	6,55	6,80	6,97	6,81	6,60	6,59	6,58
Área vela buja (m²)	3,59	3,62	3,13	2,55	2,03	1,66	1,42	1,69	1,99	2,01	2,03
Área vélica total (m²)	8,59	8,59	8,70	8,68	8,58	8,46	8,39	8,50	8,59	8,60	8,61
Altura CE.Aero - Vela Mestra (m)	2,49	2,47	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43
Altura CE.Aero - Vela Buja (m)	1,93	1,95	1,68	1,37	1,09	0,89	0,76	0,91	1,07	1,08	1,09
Altura CE.Aero Total (m)	2,25	2,25	2,16	2,12	2,11	2,13	2,15	2,13	2,12	2,12	2,11

Os formatos das velas resultantes refletem a função objetivo imposta. Como as velas foram otimizadas para uma maior força propulsora, em orça a tendência é

de velas com mestra menor e buja com área próxima à da mestra. Isto ocorre, porque, na orça, o arrasto induzido tem grande influência na força propulsora (vide formulação no anexo III). Assim para reduzir o arrasto induzido é necessário aumentar a razão de aspecto das velas (maior eficiência aerodinâmica). Todavia, privilegiar o aumento da razão de aspecto da vela mestra acarretaria em uma grande elevação do centro de esforço aerodinâmico. Deste modo, para satisfazer a restrição imposta de momento de emborcamento máximo, a otimização tende a criar bujas maiores quando comparadas com aquelas obtidas para diferentes situações de vento. Por outro lado, quando se otimiza as velas para incidência de vento de través, a tendência é se obter velas com bujas pequenas e velas mestras de área grande e de razão de aspecto menores. Isto se deve ao fato da vela-mestra ser mais eficiente para ventos “largos” (través e popa).

Para verificar se cada plano vélico obtido realmente implicaria na maior velocidade para cada ângulo de incidência de vento, os diferentes planos vélicos foram testados em VPP. O resultado da análise em VPP do veleiro com cada plano vélico será exposto a seguir.

A tabela 5.7 demonstra que cada conjunto de velas realmente é mais eficiente que os outros em termos da velocidade da embarcação para as diferentes faixas de vento analisadas (note que cada vela somente é melhor quando na verdade o ângulo aparente de incidência de vento é próximo do ângulo para qual ela foi otimizada e não o ângulo de vento real). Esta tabela foi gerada para intensidade de vento real de 6 m/s. Estes valores são ilustrados na figura 5.16. Nota-se, também, que a influência das características das velas projetadas sobre o desempenho é maior em orça, como esperado.

TABELA 5.7 – COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DA EMBARCAÇÃO PARA DIVERSOS ÂNGULOS DE VENTO REAL DAS VELAS GERADAS PELA OTIMIZAÇÃO. EM AMARELO O MAIOR VALOR DE VELOCIDADE PARA CADA INCIDÊNCIA DE VENTO.

Ângulo de incidência de vento real	Ângulo de incidência aparente	Vela otimizada - Ângulo de incidência de vento (β_w)							
		40	60	70	90	100	120	140	180
30	21	1,9406	1,8383	1,7295	1,4613	1,3405	1,4630	1,5674	1,5783
40	28	2,2492	2,1945	2,1327	1,9668	1,8836	1,9655	2,0325	2,0395
50	35	2,4212	2,3929	2,3549	2,2516	2,1976	2,2501	2,2895	2,2937
60	42	2,5366	2,5171	2,4898	2,4142	2,3791	2,4133	2,4427	2,4457
70	50	2,6066	2,5962	2,5791	2,5242	2,4941	2,5244	2,5469	2,5491
80	57	2,6419	2,6390	2,6290	2,5891	2,5715	2,5904	2,6064	2,6081
90	66	2,6334	2,6386	2,6373	2,6143	2,6042	2,6164	2,6260	2,6269
100	75	2,5851	2,5975	2,6042	2,5976	2,5941	2,5998	2,6033	2,6036
110	85	2,5052	2,5267	2,5397	2,5448	2,5457	2,5468	2,5459	2,5457
120	96	2,4015	2,4232	2,4399	2,4524	2,4555	2,4542	2,4508	2,4503
130	109	2,3071	2,3308	2,3485	2,3619	2,3653	2,3639	2,3602	2,3597
140	121	2,2531	2,2702	2,2815	2,2878	2,2892	2,2895	2,2880	2,2878
150	135	2,2458	2,2590	2,2667	2,2686	2,2687	2,2701	2,2701	2,2700
160	149	2,2619	2,2738	2,2803	2,2808	2,2804	2,2822	2,2827	2,2827
170	164	2,2762	2,2881	2,2946	2,2951	2,2948	2,2966	2,2971	2,2971
180	180	2,2690	2,2803	2,2863	2,2865	2,2860	2,2879	2,2885	2,2885

FIGURA 5.16 - ANÁLISE DAS DIVERSAS VELAS EM VPP COM UM VENTO REAL DE 6M/S.

Para a escolha do plano vélico a ser utilizado, definiu-se um critério que procura avaliar o melhor desempenho global.

Adotou-se, então, como critério de seleção o valor máximo do parâmetro I_v (β_w) sendo,

$$I_v(\beta w) = \int_0^{180} v(\beta w) d\beta w \quad (1)$$

Onde:

v = velocidade da embarcação

βw = ângulo de incidência real do vento

Desta forma, o conjunto que apresentou melhor desempenho (vide tabela 5.8) neste critério, foi aquele otimizado para vento aparente de 60º.

TABELA 5.8 – RESULTADO COMPARATIVO ENTRE IV (BW).

Vela – Ângulo de otimização (βw)	$I_v(\beta w)$
40	359,80
50	359,70
60	360,07
70	358,86
80	354,41
90	353,23
100	350,37
120	353,39
140	355,70
160	355,80
180	355,93

5.3 ANÁLISE ESTRUTURAL

5.3.1 INTRODUÇÃO

A análise estrutural do casco foi realizada com base em método de elementos finitos (MEF), método este bastante difundido na engenharia de estruturas. Todavia, o projeto estrutural de um veleiro apresenta particularidades que dificultam sua análise e serão discutidas a seguir.

Como qualquer embarcação flutuando, o equilíbrio de um veleiro é dado somente por forças aerodinâmicas, hidrodinâmicas, hidrostáticas e gravitacionais. Do ponto de vista computacional, isto traz um problema relativo à vinculação do casco, de forma a garantir o equilíbrio de corpo rígido e, ao mesmo tempo, não

comprometer a representação das deformações do casco. Além disso, as forças agindo sobre o veleiro são, em sua maioria, assimétricas em relação à linha de centro da embarcação, dificultando mais ainda sua análise. Deve-se ressaltar, ainda, que a bibliografia sobre o assunto é relativamente escassa. Duas referências encontradas (*Santos et al* (2004) e *Belgrano* (2004)) foram extremamente importantes na obtenção das condições de contorno e na definição do carregamento e dos fatores de segurança.

O programa utilizado nesta análise foi o Patran[®]/Nastran[®] versão 2004.

5.3.2 GERAÇÃO DA MALHA

Para a análise estrutural em elementos finitos primeiramente exportou-se o casco gerado no programa Autoship[®] de modo a ser utilizado no programa de elementos finitos.

Com a superfície do casco no programa Patran[®], iniciou-se a geração da malha, empregando-se elementos quadriláteros de quatro nós do tipo “shell” ou casca.

Empregou-se uma malha de aproximadamente 4200 elementos, o que significa um elemento de aproximadamente 0,05m x 0,05m em um casco de 4m de comprimento e 1,4m de boca.

5.3.3 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO/ RESTRIÇÕES

Definir as condições de contorno de uma embarcação flutuando na água não é uma tarefa simples, principalmente porque todo o carregamento realizado sobre a embarcação é equilibrado pela pressão hidrostática. Isto foge um pouco das análises habituais onde há engastes ou apoios restringindo os movimentos. Em um programa de MEF é muito difícil garantir o equilíbrio de corpo rígido do veleiro somente pelos carregamentos externos. É sempre necessário aplicar condições de contornos sobre o modelo a ser analisado. Para minimizar, então, a diferença entre o modelo analisado e a realidade, é necessário aplicar as condições de contorno em locais que não interfiram com o resultado e de forma que, ao se aplicar o carregamento sobre o modelo, as reações sobre estes locais de aplicação sejam mínimas.

Seguindo *Santos et al (2004)* e *Belgrano (2004)*, decidiu-se utilizar os apêndices e a mastreação como restrições (já que são elementos externos ao casco e que, ao se aplicar o carregamento total, resultam em forças e momentos no casco bem parecidos com os reais). Chegou-se, então, às seguintes condições de contorno:

- 1) Apoio simples sobre o ponto de conexão do estai de proa, impedindo-o de se locomover nas direções longitudinal e vertical.
- 2) Apoio simples aplicado sobre o centro de área da bolina, impedindo-a de se locomover nas direções longitudinal e transversal.
- 3) Apoio simples aplicado sobre o centro de área do leme, impedindo-o de se locomover na direção transversal.
- 4) Apoio simples aplicado na popa da embarcação, impedindo-a de se locomover nas direções longitudinal e vertical.

Com estes quatro apoios foi possível eliminar todos os seis graus de liberdade do modelo e garantir o equilíbrio necessário para o modelo em elementos finitos.

Este modelo de condição de contorno está exposto na figura 5.17

FIGURA 5.17 – VINCULAÇÕES DO CASCO PARA ANÁLISE EM MEF.

5.3.4 CARREGAMENTO UTILIZADO

Outro grande desafio em um modelo de veleiro em elementos finitos é a definição do carregamento a ser analisado. Na operação de um veleiro, a condição onde os carregamentos são os mais severos é aquela com o veleiro em orça fechada (perto de 30 graus entre a linha longitudinal da embarcação e a direção do vento aparente).

Na condição de orça os principais carregamentos sobre o casco são:

1. Força lateral e força de compressão do mastro sobre o convés.
2. Tração do estai de proa sobre o ponto de fixação estai/casco.
3. Tração do brandal de barlavento sobre o ponto de fixação brandal/casco.
4. Pressão hidrostática distribuída sobre a superfície molhada do casco com inclinação de banda de 30 graus.
5. Peso da tripulação em escora.
6. Força de sustentação hidrodinâmica da bolina agindo sobre a caixa de bolina.
7. Força de sustentação hidrodinâmica do leme agindo sobre o espelho de popa.

O carregamento aerodinâmico máximo foi calculado com base em modelo sugerido pela *Nordic Boat Standard* (NBS), norma existente para o dimensionamento da mastreação de veleiros (*Larsson & Eliasson* (1994)). Esse carregamento é definido com base no máximo momento de restauração do veleiro, calculada da seguinte forma:

$$RM_H = Gz_{max} \times \Delta \times g \quad (1)$$

$$\delta RM = P_{trip} \times Y_{trip} \quad (2)$$

$$RM = RM_H + \delta RM \quad (3)$$

Sendo:

Gz_{max} = braço de endireitamento máximo da embarcação;

Δ = deslocamento em massa do casco;

g = constante gravitacional;

δRM = momento de restauração da tripulação;

RM_H = momento de restauração hidrostática máximo;

P_{trip} = peso da tripulação (2 tripulantes de 800N cada);

Y_{trip} = posição transversal do centro de gravidade da tripulação (considerado como meia boca);

RM = o momento máximo de restituição da embarcação considerando a tripulação.

Tendo-se o momento máximo de restituição, é possível calcular a força lateral aerodinâmica máxima:

$$Mom_{emb} = RM \quad (4)$$

$$Mom_{emb} = F_{side} \times \Delta H_{ce} \quad (5)$$

Sendo:

F_{side} = a força lateral aerodinâmica;

ΔH_{ce} = distância vertical entre o centro de esforço aerodinâmico e hidrodinâmico.

Com a força lateral aerodinâmica é possível calcular, por simples análise de corpo livre, a força que o mastro aplica sobre o convés e a força de tração no brandal de barlavento.

Solucionando o sistema de equações de equilíbrio, pode-se chegar às seguintes equações (vide figura 5.18):

$$T = (F_{side} * H_{ceAero}) / (H_b * \sin \alpha) \quad (6)$$

$$Z_{mastro} = T \cos \alpha \quad (7)$$

$$Y_{mastro} = F_{side} + T \sin \alpha \quad (8)$$

Sendo,

T = tração do brandal de barlavento;

H_b = Altura da junção mastro/brandal;

α = ângulo entre o estai lateral e o mastro;

Z_{mastro} = força vertical de reação casco/mastro;

Y_{mastro} = força lateral de reação casco/mastro;

H_{ceAero} = Altura do centro de esforço aerodinâmico.

De posse destas forças e considerando a pressão hidrostática e o peso da tripulação é possível montar o modelo estático a ser analisado em elementos finitos. As forças causadas pela bolina e pelo leme sobre o casco e a força de tração devida ao estai de proa não serão impostas ao modelo, mas serão, na verdade, reações das condições de contorno (vide Figura 5.17).

O carregamento utilizado e os dados necessários para a análise estrutural se encontram na tabela 5.9.

TABELA 5.9 – DADOS E CARREGAMENTOS UTILIZADOS NA ANÁLISE ESTRUTURAL

Carregamento e Dados Utilizados	
Deslocamento total (Δ)	270 Kg
Peso Tripulação (P_{trip})	1600N
Posição transversal da tripulação em escora (Y_{trip})	0,8m (em relação a linha de centro)
Distância vertical entre centros de esforços (ΔH_{ce})	2,72 m
Altura Centro de Esforço Aerodinâmico (H_{ceAero})	2,16 m (em relação ao convés)
Altura do ponto de fixação do brandal no mastro (H_b)	4,32 m
Ângulo do estaiamento (α)	10°
Tração brandal (T)	1736 N
Tração brandal com coeficiente de segurança 1,75 (T_{max})	3038 N
Força lateral no mastro com coeficiente de segurança 1,75 (Y_{mastro})	1583 N
Força vertical no mastro com coeficiente de segurança 1,75 (Z_{mastro})	2992 N

FIGURA 5.18 – CARREGAMENTO UTILIZADO NA ANÁLISE ESTRUTURAL

5.3.5 REPRESENTAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

Um polímero geralmente não pode ser considerado como um material linear elástico, ou seja, seu comportamento não pode ser descrito pelas leis de Hooke.

Apesar de no programa Patran[®]/ Nastran[®] ser possível analisar a estrutura de forma não linear, não se dispunha dos dados não lineares do polímero escolhido. Como o polietileno é um polímero sólido, com comportamento que simplifiadamente pode ser descrito como parte elástico / parte plástico, foi utilizada como simplificação somente a parte elástica, restringindo a análise até o limite de escoamento do material (dados fornecidos pelo fabricante, vide tabela 5.10).

TABELA 5.10 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO POLIETILENO LINEAR DE MÉDIA DENSIDADE PARA ROTOMOLDAGEM RC-35U4. FONTE: WWW.POLITENO.COM.BR (01/2005).

Testes	Unidade	Resina RC -35U4
Elong. Ruptura	%	1395
Res.Tração de Escoamento	MPa	15,5
Res.Tração de Ruptura	MPa	20,5
Módulo Elástico (tração)	MPa	255
Módulo Elástico (flexão)	MPa	470
Densidade	g/cm ³	0,939

Mais informações sobre o material utilizado e sua escolha foram descritas no anexo II. Neste anexo encontram-se, também, curvas de força x deslocamento obtidas em ensaios de tração realizadas com polímero semelhante. Os resultados indicam, de fato, que uma análise linear é apropriada desde que a tensão máxima não ultrapasse o limite de escoamento.

Tais curvas foram obtidas a partir de ensaios de tração com amostras de material virgem e reciclado, de forma a permitir uma avaliação preliminar da possível utilização de polietileno reciclado (ver Anexo II).

5.3.6 FATORES DE SEGURANÇA

No projeto estrutural de veleiros, há basicamente dois métodos para aplicação de fatores de segurança. O primeiro considera o fator de segurança (geralmente de

valor próximo a 2) diretamente na maior carga estática a ser analisada, prevendo assim, o máximo possível de carregamento que a estrutura estará exposta, incluindo, desta forma, possíveis cargas dinâmicas sobre a estrutura. No segundo método, mais tradicional, calcula-se o máximo carregamento estático que a estrutura poderia sofrer, analisa-se o modelo com este carregamento e aplica-se o fator de segurança sobre o resultado de tensões obtido.

Seguindo a bibliografia sobre o tema (*Santos et al (2004) e Belgrano (2004)*), para esta análise aplicou-se o fator de segurança diretamente na maior carga estática a ser analisada, prevendo assim o carregamento máximo possível que a estrutura poderá estar exposta, incluindo desta forma possíveis cargas dinâmicas sobre a estrutura. Porém, como a bibliografia encontrada apenas fornecia uma idéia básica do limite para os fatores de segurança (perto de 2), decidiu-se realizar um método iterativo no qual, após definida uma espessura, variou-se o fator de segurança (aumentando conseqüentemente o carregamento utilizado) até que a tensão máxima atingisse o limite de escoamento especificado pelo fabricante (ver Tabela 5.10).

5.3.7 RESULTADOS OBTIDOS

Na primeira análise realizada com o casco, considerou-se 5 mm de espessura de material (sendo essa geralmente a espessura utilizada em caiaques rotomoldados).

Como este valor inicial se mostrou insuficiente, principalmente devido à grande deflexão do fundo causada pela pressão hidrostática, aumentou-se, então, a espessura para 6 mm. Mesmo assim, em algumas regiões localizadas, como o convés sob o mastro, a junção brandal/casco e o fundo do cockpit, foi necessária a introdução de reforços no casco. Vale aqui uma ressalva. O processo de rotomoldagem permite a introdução de reforçadores, desde que estes estejam já presentes no próprio molde ou uma estrutura, necessariamente metálica, ligada ao molde por elementos de fixação móveis (parafusos). (vide exemplo na figura IV.2 no anexo IV).

O primeiro reforço (sendo este não metálico) está localizado na linha de centro do convés do veleiro na região do “cockpit”. Para reforçar esta região foi introduzido um degrau na linha de centro no modelo em CAD que serve como uma

quilha e será composta de polietileno. A introdução desta estrutura deve ser prevista já no molde. Este reforço pode ser visto na figura 5.19.

FIGURA 5.19 - CASCO COM REFORÇO NA LINHA DE CENTRO EM FORMA DE DEGRAU E ESTRUTURAS DE ALUMÍNIO NA PROA.

Outros reforços introduzidos na região do convés foram duas barras de alumínio, sendo uma passando pela linha de centro do convés de proa e outra transversal à primeira. A intersecção das duas se dá na posição de fixação do mastro (vide figura 5.19). Estes reforçadores, de dimensões respectivamente 5 cm (~2") de altura x 2,5 cm (~1") de largura e 3 cm (~1,2") x 2,5 cm (~1"), são fixados ao casco por baixo da superfície do plástico.

Por fim, outros dois reforços se referem às junções mastro/casco e brandal/casco. Na primeira, será introduzida uma peça metálica sobre a qual o mastro possa se apoiar e rotacionar (vide figura IV.1 no anexo IV). Esta peça será fixada nas duas barras de alumínio descritas acima. A segunda estrutura será uma placa metálica (alumínio ou aço inox) fixada ao casco durante o próprio processo de rotomoldagem para evitar a concentração de esforços localizados em um único ponto da junção brandal/casco. Esta placa foi dimensionada com 15 cm de comprimento e 7 cm de largura.

Inicialmente, para se avaliar somente as deformações do fundo do casco, aplicou-se o carregamento hidrostático relativo ao casco submerso no calado de projeto (0,155 m) e com o peso da tripulação localizado no centro da embarcação. A figura 5.20 ilustra os deslocamentos no fundo para este caso.

Analisou-se também, isoladamente, a influencia de duas pessoas de 800 N de peso pisando diretamente no "cockpit". Este resultado de deslocamentos é

apresentado na figura 5.21. Em nenhum dos casos, a tensão resultante foi próxima da tensão de escoamento do material.

Por ultimo, analisou-se o casco com carregamento total de projeto, descrito na tabela 5.9, com coeficiente de segurança de 1,75. (vide figuras 5.22 a 5.27).

FIGURA 5.20 - DESLOCAMENTO NO FUNDO SOMENTE COM CARREGAMENTO HIDROSTÁTICO (ESCALA EM METROS).

FIGURA 5.21 –DESLOCAMENTO NO “COCKPIT” DEVIDO AO PESO DA TRIPULAÇÃO
(ESCALA EM METROS).

FIGURA 5.22 - DESLOCAMENTO (COMPONENTE VERTICAL, VISTA ISOMÉTRICA) DE TODO O CONVÉS COM O CARREGAMENTO COMPLETO (ESCALA EM METROS).

FIGURA 5.23 - DESLOCAMENTO DO FUNDO (VISTA INFERIOR) – CARREGAMENTO COMPLETO (ESCALA EM METROS).

FIGURA 5.24 - DEFORMAÇÃO (VISTA ISOMÉTRICA) DE TODO O CONVÉS COM O CARREGAMENTO COMPLETO.

FIGURA 5.25 - DEFORMAÇÃO DO FUNDO (VISTA ISOMÉTRICA) – CARREGAMENTO COMPLETO (ESCALA EM METROS).

FIGURA 5.26 – TENSÃO COM CARREGAMENTO COMPLETO (VON MISES) – CONVÉS
(ESCALA EM PA).

FIGURA 5.27- TENSÃO COM CARREGAMENTO COMPLETO – LATERAL BB (ESCALA EM PA).

Os valores máximos de deslocamento, deformação e tensão do casco são apresentados na tabela 5.11. O maior deslocamento se localiza na região da junção

brandal/casco. As maiores deformações se encontram entre junção brandal/casco e o apoio do mastro. Já as maiores tensões se localizam na região do apoio do mastro e o maior valor está um pouco deslocado para a região de junção do casco com o brandal de barlavento.

TABELA 5.11 – VALORES MÁXIMOS DE DEFORMAÇÃO E TENSÃO

	Valores Máximos
Deformação (strain)	1,60%
Deslocamento (m)	0,058
Tensão (MPa)	15,39

5.3.8 RESULTADO DA ANÁLISE

Com as dimensões finais do casco e dos reforços, chegou-se a um fator de segurança de 1,75 sobre o carregamento estático.

Este valor está de acordo com as recomendações encontradas na literatura. Ademais, vale ressaltar que se pode, também, criar “fusíveis” no veleiro para se evitar danos maiores ao casco. Se o veleiro for submetido a um carregamento extremo (maior que o máximo carregamento previsto), a junção casco/estaiamento deve conter um componente que se rompa, evitando maiores danos ao casco. Deste modo, o casco não sofrerá danos permanentes, havendo somente a queda do mastro, que estava sendo suportado pelo estaiamento.

Uma análise adicional foi realizada com o intuito de avaliar, ao menos de forma preliminar, o emprego de material reciclado. Para tanto, amostras de material virgem e reciclado foram obtidas junto a empresas do ramo, as quais foram submetidas a ensaios de tração (detalhes dos procedimentos são apresentados no Anexo II). Verificou-se uma diminuição no módulo de elasticidade em 6% (diferença obtida no ensaio de tração), tendo este passado de 255 MPa para 240 MPa. O limite de resistência, como verificado nos ensaios, não variou.

Utilizando estes novos dados, a espessura do casco deve ser aumentada para 6,3 mm para que o mesmo fator de segurança seja mantido, o que representa cerca de 5% em relação à espessura original. Assim o aumento no peso do casco será também somente de 5%, que pode ser considerado não muito significativo. Com este aumento de espessura, o novo deslocamento máximo é de 0,057 m, a

nova deformação máxima é de 1,58% e a nova tensão máxima é de 15,21 MPa. Os resultados indicam, portanto, que é possível utilizar o material reciclado na estrutura, sem, contudo, haver uma mudança muito significativa na espessura e peso final do casco.

5.4 PROJETO DOS APÊNDICES E BALANCEAMENTO AERO-HIDRODINÂMICO

O projeto dos apêndices (bolina e leme) é uma das partes mais importantes no projeto de uma embarcação à vela.

5.4.1 PROJETO DA BOLINA

É a bolina (e nas embarcações maiores, a quilha³) que impede que o veleiro derive acentuadamente devido à força aerodinâmica lateral nas velas em situação de orça. Assim, se medirmos o desempenho do veleiro levando em consideração o quanto ele consegue navegar próximo à direção de incidência do vento, uma embarcação com bolina subdimensionada pode não conseguir velejar muito bem em contra-vento (orça) e, conseqüentemente, terá de executar muitos bordos (manobra de ziguezague) para conseguir chegar ao seu destino. Por outro lado, uma bolina superdimensionada pode causar um grande acréscimo na resistência total da embarcação, piorando assim seu desempenho quanto à velocidade absoluta que o veleiro atinge ao velejar.

Desta forma, um bom projeto de uma bolina deve levar em consideração estes dois fatores, havendo então um compromisso entre velocidade absoluta e capacidade de velejar contra o vento.

Para isso, realizou-se uma análise paramétrica, auxiliada por um programa de medição de velocidade (VPP), avaliando a influência dos parâmetros geométricos de projeto em diversos fatores como velocidade, ângulo de deriva, etc.

Depois de realizado um estudo preliminar, verificou-se que para razões de aspecto geométricas da bolina superiores a 2,5, o ganho de velocidade obtido com a diminuição do arrasto induzido é pequeno, principalmente porque, no caso da bolina do veleiro, a razão de aspecto efetiva é usualmente considerada como o dobro da razão de aspecto geométrica. Isto se deve ao fato do fluxo de água que incide na

³ Convenciona-se chamar de quilha, as bolinas que são dotadas de lastro interno.

bolina na região de encontro com casco não sofrer ação de efeitos tridimensionais, ao contrário do fluxo próximo à sua ponta. Deste modo, o casco age como um “espelho” para o fluxo e a razão de aspecto da bolina para tal fluxo pode ser considerada como se fosse a de uma asa de razão de aspecto duas vezes maior que a geométrica.

Com a razão de aspecto pré-estipulada, estudou-se os perfis possíveis para esta bolina. Como os ângulos de ataque, nos quais a bolina opera, não são muito grandes (perto de 4° , vide figura 5.30), pode-se escolher uma série de perfis NACA⁴ série 6, que apresenta arrasto inferior à série NACA 4 dígitos para pequenos ângulos de ataque (vide figura 5.28A e 5.28B). Resta somente definir a relação entre corda e espessura da bolina. Como embarcações podem emborcar, para se desviar o veleiro é necessária uma manobra onde o velejador se apóia na bolina para causar um momento de desemborcamento. Assim, a bolina tem de ser resistente, ou seja, não pode ser pouco espessa (para este tipo de embarcação, geralmente são feitas de madeira, devido ao baixo custo deste material), sendo então escolhida uma bolina de relação espessura e corda média de 12%. O código do perfil da bolina fica então 6x-012, sendo que o zero antes do número 12 indica que o perfil é simétrico. O x do código indica a localização do ponto de mínima pressão e, analisando veleiros semelhantes e a bibliografia sobre o assunto (ver, p.ex., *Marchaj* (2000)), definiu-se x como 3, ou seja, o ponto de mínima pressão localizada a 30% da corda (em relação ao bordo de ataque). Para visualizar melhor a influência da relação espessura/corda e do ponto de mínima pressão vide figura 5.28B.

Definidos perfil e razão de aspecto, realizou-se uma análise de desempenho baseada na área lateral da bolina. Variou-se, então, a área de bolina de 2% a aproximadamente 10% da área total das velas (usualmente, para fins estatísticos, se compara a área da bolina com a área vélica total), conforme apresentado na Tabela 5.12.

⁴ As séries NACA são séries de perfis para asas desenvolvidas pela NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*, predecessora da NASA). O formato do perfil é descrito por uma sequência de dígitos.

FIGURAS 5.28A E 5.28B – COMPARAÇÃO ENTRE PERFIS SÉRIE NACA DÍGITO 4 E 6, E COMPARAÇÃO ENTRE FORMATOS DE PERFIS. FONTE: LARSSON & ELIASSEN (1994)

TABELA 5.12 - BOLINAS ANALISADAS

Corda média (m)	0,26	0,29	0,32	0,35	0,37	0,40	0,42	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,58
Envergadura (m)	0,66	0,74	0,81	0,87	0,95	1,00	1,05	1,10	1,17	1,22	1,27	1,32	1,37	1,41	1,46
Área (m)	0,17	0,22	0,26	0,30	0,35	0,40	0,44	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
Razão de aspecto (m)	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
A.bolina/A.vélica	2,0%	2,5%	3,0%	3,5%	4,0%	4,6%	5,1%	5,7%	6,3%	6,9%	7,5%	8,0%	8,6%	9,2%	9,8%

Terminada a análise, pôde-se perceber claramente que, primeiro, quanto maior a bolina, maior a resistência, e, portanto menor o potencial de velocidade da embarcação (vide figura 5.29). Por outro lado, quanto maior a bolina, menor o ângulo de deriva (*leeway*) da embarcação no contra-vento, ou seja, menos a embarcação sofre movimento relativo lateral, e menos ela se distancia do seu rumo original (vide figura 5.30). Esses resultados quantificam o compromisso velocidade-deriva em contra-vento, já mencionado anteriormente.

Escolheu-se, então, outro parâmetro de desempenho para servir como base para a decisão da área da bolina: o “*velocity made good*” (*vmg*), que é a velocidade do veleiro projetada na direção do vento. Este parâmetro de comparação é o mais utilizado quando se quer saber o desempenho de um veleiro em orça, já que ele leva em consideração os dois parâmetros descritos anteriormente, velocidade e ângulo de deriva. É com base neste parâmetro que se baseou a escolha da melhor bolina. Assim, para analisar o desempenho relativo ao *vmg* para diversos ângulos de vento (somente ângulos considerados de orça) define-se o potencial de *vmg* (I_{vmg}).

$$I_{vmg}(\beta w) = \int_0^{80} vmg(\beta w) d\beta w \quad (1)$$

FIGURA 5.29 - POTENCIAL DE VELOCIDADE (IV(B)) X ÁREA RELATIVA DA BOLINA (ÁREA DE BOLINA / ÁREA VÉLICA).

FIGURA 5.30 – ÂNGULO DE DERIVA X ÁREA RELATIVA DA BOLINA (ÁREA DE BOLINA / ÁREA VÉLICA).

Como se pode perceber na figura 5.31 e tabela 5.13, o lv_{mg} aumenta, na faixa de bolinas analisadas, com o aumento da área de bolina. Porém, após certo ponto, a diferença do lv_{mg} de uma bolina para outra passa a ser pequena, não variando muito o desempenho final. Além do mais, aumentando a bolina após este ponto, aumenta-se o peso da bolina e conseqüentemente, o calado da embarcação. Deste modo, com base na tabela 5.13, escolheu-se uma área de bolina que apresentasse uma diferença pequena entre o seu potencial de vmg e o valor máximo de potencial de vmg obtido, com $(lv_{mg} - lv_{mgmax}) / lv_{mgmax}$ abaixo de 1%. Com base neste critério, a bolina escolhida foi a de área lateral correspondente a 5,75% da área vélica (dimensões: 1,1 m de envergadura e 0,45 m de corda).

FIGURA 5.31 - POTENCIAL DE VELOCITY MADE GOOD ($lv_{mg}(B)$) X ÁREA RELATIVA DA BOLINA (ÁREA DE BOLINA / ÁREA VÉLICA).

TABELA 5.13 - POTENCIAL DE VELOCITY MADE GOOD (VMG), ÁREA RELATIVA DA BOLINA (ÁREA DE BOLINA / ÁREA VÉLICA) E DIFERENÇA ENTRE CADA VALOR E O VALOR MÁXIMO OBTIDO.

A. Bolina/A. Vélica	Potencial de VMG	Diferença do potencial de vmg entre valor atual e o maior valor obtido
2,00%	-6,16	7,26%
2,50%	-6,28	5,35%
3,00%	-6,38	3,99%
3,50%	-6,44	3,00%
4,02%	-6,50	2,11%
4,60%	-6,54	1,55%
5,06%	-6,56	1,14%
5,75%	-6,59	0,81%
6,32%	-6,61	0,49%
6,90%	-6,62	0,32%
7,47%	-6,63	0,20%
8,05%	-6,63	0,12%
8,62%	-6,64	0,07%
9,20%	-6,64	0,06%
9,77%	-6,64	0,05%

5.4.2 PROJETO DO LEME

Um leme corretamente dimensionado é fundamental para a segurança e para o conforto ao velejar. O leme não pode ser superdimensionado, pois o barco se tornaria muito “sensível”, o que torna o velejar desconfortável, já que se faz necessária constante correção do rumo. Com um leme subdimensionado, para ventos muito fortes, pode ser necessário aplicar ângulos de ataque no leme muito grandes, aumentando o arrasto desnecessariamente e correndo-se o risco do leme perder sustentação devido a estol em manobras. Assim, a área do leme deve ser

suficiente para que, em ventos fortes, o ângulo máximo de leme não estole. Para embarcações pequenas como esta, um vento com velocidade de aproximadamente de 16 nós ou 8m/s pode ser considerado forte. A grosso modo, o ângulo máximo permitido em asas carenadas de razão de aspecto alta (superiores a 3), sem que haja perda de sustentação por estol, varia tipicamente entre 12º e 15º. Desta forma definiu-se que o ângulo máximo que o leme poderia ter, em um vento de intensidade de 8 m/s, seria 12º.

Para o leme projetado, adotou-se um perfil NACA série 4 dígitos por apresentar valores de máximo de sustentação maiores quando comparado à série 6.⁵ O perfil escolhido foi o NACA 0010, um dos mais utilizados no meio náutico para lemes, pois apresenta boa relação de corda/espessura. Como o leme projetado corta a superfície da água, uma relação maior que esta geraria uma resistência maior por geração de ondas.

Levando-se em conta todos os fatores comentados acima e com o auxílio do VPP, definiu-se uma corda de 0,2m e envergadura de 0,4m. A área lateral do leme é de 0,08m². A figura 5.32 mostra o ângulo de leme necessário para cada direção de vento e diversas velocidades.

⁵ Com ângulos maiores de operação, a melhoria na resistência de arrasto do dígito 6 não é significativa e até, às vezes, inexistente.

FIGURA 5.32 – ÂNGULO DE LEME (EM GRAUS) X DIREÇÃO REAL DE VENTO (EM GRAUS). INTENSIDADE DE VENTO EM M/S.

5.4.3 BALANCEAMENTO DO VELEIRO

Outro fator importantíssimo no projeto de um veleiro é o chamado “balanceamento” do barco. No balanceamento do veleiro define-se a posição longitudinal relativa de todos os centros de esforços (CEaero das velas, CEhidro da bolina e do casco, e CEhidro do leme). Um mau balanceamento compromete a manobrabilidade do barco, aumenta desnecessariamente a resistência ao avanço e pode comprometer também a segurança. O balanceamento do veleiro deve levar em conta a inclinação do veleiro em orça. Com a inclinação, a distância entre as projeções horizontais dos centros aerodinâmico e hidrodinâmico varia. Isto se deve ao fato de que estes centros se localizam em cotas verticais diferentes em relação ao centro de rotação do veleiro. Com o veleiro inclinando, a projeção horizontal da força aerodinâmica (quando em vista de topo) das velas se desloca em direção à popa da embarcação e a projeção da força hidrodinâmica em direção à proa.

A distância de projeto entre o centro de esforço aerodinâmico e o centro de esforço hidrodinâmico é denominada “*lead*”. Um bom balanceamento deve garantir que, em ventos de intensidade mediana (no caso, de 3 a 5 m/s), o veleiro possa manter seu rumo sem necessitar de grandes ângulos de leme. Devido à movimentação das projeções horizontais dos centros de esforços quando o veleiro assume um ângulo de banda, o *lead* deve ser estabelecido de forma que o centro de esforço hidrodinâmico esteja um pouco à ré do centro de esforço aerodinâmico. Assim, com o veleiro velejando em ventos fracos, a tendência da embarcação em orça é de “sair” do vento. Com um vento de média intensidade, quando o veleiro adquirir certo ângulo de banda, velejando no contra-vento, a distância entre as projeções das forças aero e hidrodinâmicas diminui, diminuindo, também, a tendência do veleiro “sair” do vento. Com um vento de intensidade mais forte, esta tendência se inverte, ou seja, a projeção da força aerodinâmica passa a estar à ré da projeção da força hidrodinâmica. A tendência agora é do veleiro “entrar” no vento. Na realidade, esta tendência age em favor da segurança. Quando um veleiro está em orça e se depara com uma rajada (aumento repentino da velocidade do vento), há um aumento instantâneo na força de sustentação aerodinâmica e,

conseqüentemente, na força lateral. Caso a tendência fosse do veleiro “sair” do vento, com o aumento repentino na força lateral, o veleiro, antes que a tripulação pudesse soltar a vela, poderia ficar de través para o vento, com as velas “caçadas”. Desta forma, a segurança do veleiro ficaria comprometida. Já com uma tendência de “entrar” no vento, no caso da rajada, o veleiro perderia sustentação e diminuiria sua velocidade, não comprometendo sua segurança.

A correta definição do *lead* é importante. Um *lead* muito elevado impede o veleiro de orçar adequadamente devido a uma tendência demasiada de “sair” do vento com ventos de baixa e média intensidade, além de haver um aumento de resistência devido aos grandes ângulos de leme requeridos.

Como há uma interdependência do projeto do leme e da bolina com o balanceamento do veleiro, estes três projetos foram realizados em conjunto. O processo de balanceamento do veleiro foi realizado iterativamente com o auxílio do VPP. O resultado do balanceamento se encontra na figura 5.33. No gráfico do ângulo de leme (fig. 5.32), é possível ver as diferentes tendências do veleiro para cada intensidade de vento nas diferentes direções de incidência.

FIGURA 5.33 – POSIÇÕES LONGITUDINAIS DOS CENTROS DE ESFORÇOS

6. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO VELEIRO

Para a análise de desempenho de um veleiro é usualmente utilizada uma ferramenta computacional chamada “*Velocity Prediction Program*” (VPP). Esta ferramenta analisa quatro equações relativas ao equilíbrio estático do veleiro, duas relativas à translação (eixos x - *surge* e y - *sway*) e duas relativas a momento (em torno do eixo z - *yaw*, e do eixo x - *roll*), quando submetido a um vento com certa intensidade e direção de incidência. Assim, especificando os dados do veleiro (velas, bolina, leme, coeficientes, etc) e indicando as direções e a intensidade de vento agindo sobre este veleiro, o programa fornece como resposta: a velocidade final do veleiro, a *vmg*, o ângulo de *leeway*, o ângulo de leme e a inclinação da embarcação (banda).

Como já havia um programa VPP em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP, deu-se preferência pela utilização deste.

Para avaliar o desempenho deste veleiro foram realizadas comparações entre o veleiro projetado com um tripulante e com dois tripulantes. De forma suplementar, o desempenho foi comparado com aquele previsto para um veleiro “Laser”, que é o mais difundido veleiro deste porte, sendo inclusive uma classe olímpica. O “Laser” é considerado um dos melhores projetos de embarcações deste porte e também uma embarcação rápida para seu tamanho. Assim, uma comparação com um projeto tão bem difundido e desenvolvido é bastante válida, mesmo que ele não comporte dois tripulantes.

Os dados empregados nas comparações são apresentados na tabela 6.1.

TABELA 6.1 – DADOS EMPREGADOS PARA A ANÁLISE EM VPP REFERENTES AO “LASER” E VELEIRO PROJETADO COM UM E DOIS TRIPULANTES.

	Veleiro Projetado - 1 tripulante	Veleiro Projetado - 2 tripulantes	Laser
Calado (m)	0,128	0,155	0,135
L.W.L. (m)	3,43	3,62	3,92
B.W.L. (m)	1,11	1,18	1,02
Deslocamento (kg)	190,00	274,12	190,18
LCB em % atrás da s. mestra	3,2	3,0	2,7
Cb	0,415	0,402	0,341
Cp	0,569	0,576	0,584
Cm	0,707	0,721	0,584
Área de linha d'água -Awl (m²)	2,71	3,10	2,79
Área molhada - Sw (m²)	2,81	3,27	2,97
L/B	3,05	3,07	3,85
Área Vélica Total (m²)	8,7	8,7	7,2
Área Vélica Mestra (m²)	5,57	5,57	7,2
Área Vélica Buja (m²)	3,13	3,13	0,00
Área de Bolina (m²)	0,5	0,5	0,36
Área de Leme (m²)	0,08	0,08	0,1

Os resultados de velocidade do veleiro com um tripulante (80 Kg), com dois tripulantes (80 Kg cada) e do “Laser” com um tripulante (80 Kg) serão expostos a seguir em um tipo especial de gráfico chamado gráfico polar. Neste gráfico, o mais comumente utilizado para representar a velocidade de um veleiro, a velocidade é exposta em um eixo radial, e as diversas incidências de vento real são dispostas em uma rosa dos ventos.

Comparando os resultados de velocidade (figuras 6.1 a 6.3), algumas diferenças são evidenciadas. Estas diferenças refletem o objetivo de cada veleiro. O veleiro “Laser” apresenta melhores valores de velocidade para ventos “largos” (entre través e vento de popa). Além disso, o formato de seu casco facilita a entrada em condição de planeio.

Análise de desempenho 4m/s

FIGURA 6.1 – GRÁFICO POLAR DE VELOCIDADE (M/S) PARA VENTO DE 4 M/S.

FIGURA 6.2 – GRÁFICO POLAR DE VELOCIDADE (M/S) PARA VENTO DE 6 M/S.

Análise de desempenho 8 m/s

FIGURA 6.3 – GRÁFICO POLAR DE VELOCIDADE (M/S) PARA VENTO DE 8 M/S.

Já o veleiro projetado opera com duas velas, mestra e buja, e teve suas velas otimizadas para vento de orça (aproximadamente para incidência de vento aparente de 60°). Como consequência, seu desempenho em orça foi superior. O simples fato da divisão da área vélica total em duas velas, mestra e buja, ao invés de somente mestra (caso do “Laser”), privilegia o desempenho em orça (em boa parte, devido à redução da altura do CE aerodinâmico). O desempenho em través se mostrou bastante satisfatório, porém o desempenho do veleiro em vento de popa foi um pouco inferior ao obtido pelo “Laser”, apesar de sua maior área vélica. Isto era esperado em virtude da baixa eficiência aerodinâmica da buja para ventos “largos”.

Além disso, como as premissas iniciais de projeto objetivaram um veleiro de dimensões praticamente iguais ao do “Laser” (visando a facilidade de transporte, principalmente em cima do bagageiro de um carro) e que pudesse transportar normalmente dois tripulantes, mantidas boca e comprimento, o casco teve de contar com um maior volume submerso. Com isso, o veleiro projetado apresenta C_b maior (0,4 ante 0,34 do “Laser”) e C_m maior (0,72 ante 0,58). Assim, apesar dos resultados evidenciarem que o casco consegue entrar em condição de planeio em ventos máximos de 8m/s, este barco apresenta uma maior dificuldade quando comparado ao “Laser”.

Analisando-se os resultados referentes ao ângulo de *leeway* (figuras 6.4 a 6.6), pode-se ver que os ângulos máximos de *leeway* não são excessivos (máximo de 8° para um tripulante), atestando um projeto de bolina bem sucedido.

Um detalhe muito importante a ser notado é que o ângulo de banda limite de 30° com dois tripulantes, previsto anteriormente como restrição para o projeto do plano vélico, realmente se confirmou (vide figura 6.8). Obviamente, ao se analisar o ângulo de banda do veleiro com somente um tripulante, nas mesmas condições de vento apresentadas acima, pode-se perceber que este ângulo é bastante superior (aproximadamente 37°). Assim, para manter as mesmas condições de segurança, bastaria ao velejador “soltar” a vela buja, diminuindo a eficiência desta vela, e conseqüentemente, seu momento de emborcamento e o ângulo de inclinação. As figuras 6.7 a 6.9 mostram a relação entre a direção de vento e o ângulo de banda para ventos de intensidade de 4 m/s, 6 m/s e 8 m/s.

FIGURA 6.4 – GRÁFICO DE DESEMPENHO QUANTO A ÂNGULO DE LEEWAY (VENTO DE 4 M/S).

FIGURA 6.5 – GRÁFICO DE DESEMPENHO QUANTO A ÂNGULO DE LEEWAY (VENTO DE 6 M/S).

FIGURA 6.6 – GRÁFICO DE DESEMPENHO QUANTO A ÂNGULO DE LEEWAY (VENTO DE 8 M/S).

FIGURA 6.7 – GRÁFICO DE DESEMPENHO QUANTO A ÂNGULO DE BANDA (VENTO DE 4 M/S).

FIGURA 6.8 – GRÁFICO DE DESEMPENHO QUANTO A ÂNGULO DE BANDA (VENTO DE 6 M/S).

FIGURA 6.9 – GRÁFICO DE DESEMPENHO QUANTO A ÂNGULO DE BANDA (VENTO DE 8 M/S).

Já as figuras 6.10 a 6.12 mostram o gráfico de vmg dos veleiros. Por esse gráfico fica claro a maior aptidão do veleiro projetado para velejar em ventos de orça quando comparado ao veleiro “Laser”, já que quanto mais negativo (por convenção, velocidade negativa é na direção contrária ao vento incidente) for o valor de vmg, melhor ele navega contra o vento. Percebe-se também, que o ângulo de máxima vmg do veleiro projetado, que define o curso ótimo do veleiro na perna de contra-vento de uma regata, é menor que o do “Laser”.

FIGURA 6.10 – GRÁFICO DE VELOCITY MADE GOOD (VENTO DE 4 M/S).

FIGURA 6.11 – GRÁFICO DE VELOCITY MADE GOOD (VENTO DE 6 M/S).

FIGURA 6.12 – GRÁFICO DE VELOCITY MADE GOOD (VENTO DE 8 M/S).

Os gráficos de ângulo de leme (figuras 6.13 a 6.15) mostram a relação entre incidência de vento e ângulo de leme necessário para manter o rumo. Pode-se ver por estes gráficos que o veleiro, ao se inclinar, exige que o velejador aumente o

ângulo de leme. Isto pode ser visto comparando o ângulo de leme do veleiro projetado com um e dois tripulantes. Pode-se ver, também, que o ângulo de leme máximo não ultrapassa 12° (mesmo com somente um tripulante), estando este leme dentro dos parâmetros definidos em seu projeto inicial.

FIGURA 6.13 – GRÁFICO DE LEME PARA VENTO DE INTENSIDADE DE 4 M/S.

FIGURA 6.14 – GRÁFICO DE LEME PARA VENTO DE INTENSIDADE DE 6 M/S.

FIGURA 6.15 – GRÁFICO DE LEME PARA VENTO DE INTENSIDADE DE 8 M/S.

Por fim, um outro ponto a se destacar é a pequena diferença de desempenho em orça do veleiro projetado para um e para dois tripulantes. Isto comprova que o projeto foi, como desejado, otimizado para dois tripulantes em orça. O acréscimo de deslocamento proporcionado pelo segundo tripulante é compensado por um maior momento de restauração do veleiro, o que permite velocidades similares em orça nos dois casos.

Em suma, o veleiro apresenta desempenho satisfatório tanto para um como para dois tripulantes, priorizando a segurança e o prazer de velejar, fatores muito importantes na escolha de um veleiro de esporte e lazer para a família.

7. ANÁLISE ECONÔMICA

Este capítulo traz uma discussão sobre aspectos econômicos fundamentais referentes à produção em série do veleiro projetado.

Depois de visitadas diversas empresas que realizam rotomoldagem, conversado com seus técnicos, o que se pôde descobrir é que a rotomoldagem é um método construtivo ideal para uma produtividade de baixa para média. Assim, se fosse necessário produzir um produto em grande escala (em torno de 100 peças por dia), este método não seria o mais indicado. Todavia, para uma aplicação náutica, este processo é perfeitamente compatível.

Quando comparada à produtividade de um barco de fibra de vidro (utilizando um molde) com a produtividade do método da rotomoldagem, pode-se dizer que a vantagem da rotomoldagem é grande. Enquanto para se produzir um barco de fibra do porte do veleiro projetado, leva-se poucos dias, para se produzir um veleiro rotomoldado se leva poucas horas. Na verdade, o tempo de fabricação é, quase que exclusivamente, dado pelo tempo de aquecimento do material, o tempo da rotomoldagem em si e o tempo de esfriamento do material de forma adequada. Todo esse processo leva aproximadamente 5 horas. Após o resfriamento, resta apenas retirar algumas rebarbas provenientes do molde em duas metades e montar os acessórios. Já para se produzir um barco de fibra, é necessário passar por diversas etapas, como aplicar o gelcoat, a fibra, a resina, para finalmente esperar a resina “curar” e só então montar os acessórios. Até na montagem de acessórios a rotomoldagem leva vantagem, pois pode incluir em seu processo a inserção de pequenas roscas metálicas para prender alças, bancos, e outros acessórios.

A grande desvantagem técnica da rotomoldagem em relação à fibra se refere às estruturas internas. Qualquer estrutura interna ao casco, se não puder ser prevista no molde, deve ser metálica e mecanicamente ligada a este, geralmente por meio de parafusos. Isto porque, para o material aderir à estrutura, esta deve estar quente, na mesma temperatura do molde. Deste modo, para evitar o peso excessivo da embarcação, a própria estrutura de plástico deve suportar a maioria dos esforços à qual é submetida, evitando ao máximo a inserção de material metálico, que além de pesado, pode aumentar o custo final do produto. A construção por fibra de vidro

permite alternativas mais simples e baratas, como cavernas de madeira e construção sanduíche.

Atualmente, algumas empresas de rotomoldagem no Brasil e no exterior conseguem a adição de material espumoso na rotomoldagem, aumentando assim a espessura do produto final sem aumentar tanto o peso. Isso melhoraria bastante a estrutura do material, mas como são poucas as empresas que realizam este processo e este ainda se encontra em fase de testes no Brasil, este tipo de construção não foi considerado.

As informações técnicas obtidas indicam que o casco ora projetado não apresentaria maiores dificuldades para ser construído, pois seu molde seria de fácil construção.

7.1 O MODELO ECONÔMICO

Para uma análise de viabilidade econômica do emprego da rotomoldagem, deve-se ter como base que a embarcação nacional mais barata do mesmo porte tem como preço de venda aproximadamente R\$8.000,00 (ou aproximadamente US\$ 3.600,00) e uma embarcação do mesmo porte rotomoldada importada custa em média, no exterior, aproximadamente US\$3.000,00. Assim, espera-se chegar a um valor significativamente menor como preço final de venda, com quase os mesmos acessórios.

Fez-se um levantamento de todos os custos envolvidos para se fabricar um veleiro pelo método da rotomoldagem, assim como os custos dos acessórios básicos para a operação do veleiro. Nestes custos estão incluídos os da fabricação do casco, da mastreação e velas, dos apêndices (bolina e leme) e da mão de obra, além dos impostos, como ICMS e IPI.

Pesquisou-se o valor do molde para rotomoldagem do veleiro. Este é o maior custo envolvido na rotomoldagem de um veleiro, e na verdade é o único investimento inicial significativo. O custo do molde varia de R\$70.000,00 a R\$100.000,00, custo que deve ser amortizado ao longo do tempo. Na verdade, esta amortização vai ser o fator preponderante na determinação do preço final de venda do veleiro. Para uma amortização mais longa, em torno de cinco anos, o preço de venda pode ser diminuído, pois somente uma pequena parcela será destinada à amortização do molde. Já para uma amortização em espaço de tempo menor, uma

parcela maior deverá ser destinada, aumentando assim seu preço de venda. Vale lembrar aqui, que na construção em série em fibra de vidro, é necessária também, a construção de um molde que tem um custo relativamente alto. Contudo este molde custa no máximo 50% de um molde de alumínio para rotomoldagem.

Para a análise do modelo econômico criado foram adotadas duas diferentes hipóteses:

1º) Partiu-se do pressuposto que uma empresa, já possuidora dos fornos de rotomoldagem, gostaria de adicionar à sua linha de produtos um veleiro rotomoldado. Assim, já contando com toda sua infra-estrutura, o único investimento inicial significativo seria no molde. Além do mais, obter material para reciclagem seria bastante fácil, já que se obteria o refugo da própria produção da empresa. Neste caso, para a planilha de custo de fabricação entrariam o custo do material, a mão-de-obra e os custos variáveis do processo de rotomoldagem, como o gás natural.

2º) Como segunda opção, supôs-se uma nova empresa que gostaria de comercializar o veleiro. Esta empresa se comprometeria em montar o veleiro e terceirizaria a fabricação do casco. Neste caso, o custo da fabricação seria o valor cobrado pela empresa de rotomoldagem terceirizada, porém, o custo do molde seria arcado pela própria empresa que irá comercializar o veleiro. O único problema seria o material reciclado, que teria de ser fornecido pela própria empresa de rotomoldagem ou comprado separadamente. Tomou-se o valor do material reciclado como 50% do custo do material “virgem”, valor típico encontrado no mercado.

Para ambos os casos, o molde foi fixado em R\$100.000,00, e foi tomada a proporção entre material virgem e material reciclado de 60% e 40%⁶, respectivamente. As tabelas 7.1 e 7.2 explicitam os custos envolvidos para a composição do preço de venda do produto final das hipóteses 1 e 2, respectivamente.

⁶ Os motivos desta proporção foram explicados no capítulo 4.

TABELA 7.1 – CUSTOS RELATIVOS A PRODUÇÃO DE UM VELEIRO ROTOMOLDADO PARA A HIPÓTESE 1.

Custos de produção do veleiro rotomoldado Hipotese 1		
Fabricação do casco	Custos variáveis	
	Material - Polietileno virgem	R\$6,00/Kg
	Gás para o forno	R\$1,95/Kg
	Tempo de forno aproximado	4-5 h
	Micronização do material reciclado	R\$0,7/Kg
	Custos para um veleiro	
	Gás	R\$195,00
	Material virgem (60%)	R\$234,00
	Material reciclado (40%)	R\$18,00
	Mão de Obra (5h aprox.)	R\$50,00
Fabricação da vela (orçamento de uma velaria)		
	Vela de Lona Leve (mestra e buja)	R\$600,00
	ou Vela de Dacron (mestra e buja)	R\$800,00
	Mastro de alumínio (aproximadamente)	R\$200,00
	Retranca de alumínio (aproximadamente)	R\$120,00
Apêndices		
	Leme (em madeira)	R\$180,00
	Bolina (em madeira)	R\$220,00
Outros		
	Ferragens (cabos, moitões, etc)	R\$200,00
	Reforços estruturais convés (Alum.)	R\$92,00
Impostos		
	IPI (em relação ao preço de venda)	25%
	ICMS (em relação ao preço de venda)	24%
	Total de custos (sem impostos)	R\$2.109,00

TABELA 7.2 – CUSTOS RELATIVOS A PRODUÇÃO DE UM VELEIRO ROTOMOLDADO PARA A HIPÓTESE 2.

Custos de produção do veleiro rotomoldado Hipotese 2		
Fabricação do casco (rotomoldagem tercerizada)	Custos variáveis	
	Material - Polietileno virgem	R\$13,00/Kg
	Material - Polietileno reciclado (50% do virgem)	R\$6,50/Kg
	Custos para um veleiro	
	Material virgem (60%)	R\$507,00
	Material reciclado (40%)	R\$156,00
	Mão de Obra (3h aprox.)	R\$30,00
Fabricação da vela (orçamento de uma velaria)		
	Vela de Lona Leve (mestra e buja)	R\$600,00
	ou Vela de Dacron (mestra e buja)	R\$800,00
	Mastro de alumínio (aproximadamente)	R\$200,00
	Retranca de alumínio (aproximadamente)	R\$120,00
Apêndices		
	Leme (em madeira)	R\$180,00
	Bolina (em madeira)	R\$220,00
Outros		
	Ferragens (cabos, moitões, etc)	R\$200,00
	Reforços estruturais convés (Alum.)	R\$92,00
Impostos		
	IPI (em relação ao preço de venda)	25%
	ICMS (em relação ao preço de venda)	24%
Total de custos (sem impostos)		R\$2305,00

A diferença final de custos entre a primeira e a segunda hipótese é de aproximadamente R\$ 200,00, que se comparado ao preço final de venda (entre de R\$ 6.000,00 e R\$ 8.000,00), significa menos de 5% do preço final de venda. Ou seja, ambas as hipóteses são equivalentes quanto a esta análise de custos, e caso uma hipótese tenha sucesso em obter um veleiro mais acessível, a outra também seria bem sucedida.

Para analisar a viabilidade econômica da produção deste veleiro utilizou-se um dos critérios mais difundidos da engenharia econômica que é o critério da Taxa Interna de Retorno (TIR) utilizando valor futuro (Torres (2006)). Neste critério, dado o tempo de amortização e utilizando o fluxo de caixa, o número de veleiros vendidos por ano e o preço final de venda, calcula-se a taxa interna de retorno para que, no

tempo de amortização pré-estabelecido, todo o custo do molde tenha sido amortizado. Desta forma, se a taxa interna de retorno obtida for favorável ao fabricante, o projeto é viável economicamente.

A equação utilizada nesta análise foi a seguinte:

$$C.Mold \times (1 + \lambda)^n = MC \times NUV \times \sum_{x=0}^n (1 + \lambda)^x \quad (1)$$

Sendo:

C.Mold = o custo do molde de rotomoldagem;

MC = a margem de contribuição de cada unidade vendida;

NUV = o numero de unidades vendidas por ano;

λ = a Taxa Interna de Retorno;

n = o número de anos para o molde ser amortizado.

A margem de contribuição foi calculada subtraindo-se do preço final de venda os custos totais inerentes à montagem final de uma unidade do veleiro.

Analisando o critério de custos para a primeira hipótese e utilizando a formulação 1, calculou-se as TIR relativas a cada preço de venda suposto para a embarcação e a determinados números mensais de vendas de embarcações. Os gráficos relativos a essa análise para 3, 5 e 8 anos de amortização do molde são apresentados nas figuras 7.1, 7.2 e 7.3, respectivamente.

FIGURA 7.1 – GRÁFICO DE TIR X PREÇO DE VENDA PARA 3 ANOS DE AMORTIZAÇÃO.

FIGURA 7.2 – GRÁFICO DE TIR X PREÇO DE VENDA PARA 5 ANOS DE AMORTIZAÇÃO.

FIGURA 7.3 – GRÁFICO DE TIR X PREÇO DE VENDA PARA 8 ANOS DE AMORTIZAÇÃO.

Analisando estes gráficos e, por exemplo, escolhendo uma TIR de 12,5% ao ano (próximo do valor da usura), pode-se montar um gráfico com preço de venda em função do número de unidades do veleiro a serem vendidas. Neste gráfico (figura 7.4), pode-se ver que depois de determinado ponto, não há vantagem significativa em se aumentar o número de vendas para diminuir o preço final de cada veleiro. A partir deste ponto, para se abaixar o preço de venda é necessário reduzir o custo do processo ou o custo do molde.

FIGURA 7.4 – ANÁLISE DE CUSTOS DA 1ª HIPÓTESE.

Tendo em vista este fato, pode-se escolher o número de 20 unidades (ou menos de duas unidades vendidas por mês, algo bastante plausível) no modelo para retorno em 5 anos, já que deste ponto em diante, para cada unidade vendida por ano, o preço diminuirá menos de 2%.

Assim, o preço de venda final do produto para 5 anos de retorno na primeira hipótese e com TIR de 12,5% ao ano para o projeto se tornar viável seria de R\$6.300,00 (aprox. US\$2.800,00), ou seja, aproximadamente 25% menor que o preço do veleiro mais barato do mesmo porte comercializado atualmente. O lucro dos primeiros 20 veleiros vendidos no ano seria destinado à amortização do molde e qualquer unidade extra vendida seria considerada lucro.

A figura 7.5 mostra uma análise de sensibilidade do preço final do veleiro em função do custo do molde, para um número de 20 unidades vendidas por ano. A cada R\$10.000,00 a menos no custo do molde, há uma redução de R\$255,00 no custo final de venda do veleiro.

FIGURA 7.5 – GRÁFICO DE RELAÇÃO ENTRE PREÇO DO MOLDE E PREÇO FINAL DE VENDA DO VELEIRO (20 UNIDADES VENDIDAS POR ANO).

Fazendo a mesma análise para 3 anos de amortização, e mantendo-se o mesmo número de unidades vendidas por mês, o preço final de venda do veleiro deveria subir para aproximadamente R\$8.000,00, o que seria um valor relativamente alto e muito próximo do valor do mais barato dos veleiros atualmente vendidos. Para se manter o preço final de venda de R\$6.300,00, seria necessário vender aproximadamente 38 unidades por ano, um pouco mais de três unidades por mês. Este valor também não é exagerado, porém dependeria um pouco mais da aceitação do mercado. A figura 7.6 mostra a relação entre número de unidades vendidas e tempo de amortização para um preço de venda de R\$6.300,00.

FIGURA 7.6 – GRÁFICO DE TEMPO DE AMORTIZAÇÃO POR UNIDADES DE VELEIROS VENDIDOS POR ANO PARA PREÇO FINAL DE VENDA DE R\$ 6.300, 00.

7.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo como base a análise feita, pode-se concluir que o método da rotomoldagem é, sim, capaz de reduzir os custos envolvidos na fabricação, especialmente se auxiliada pela reciclagem de material.

Caso se dispensasse o emprego de material reciclado e velas de lona leve (material cuja utilização tem sido contestada no meio náutico), dever-se-ia acrescentar ao custo final de venda do veleiro R\$360,00 (R\$160,00 da utilização de material 100% virgem e mais R\$200,00 para a utilização de tecido Dacron®, o mais utilizado para velas internacionalmente). Poder-se-ia criar, então, uma nova versão, um pouco mais cara do veleiro, com o intuito de dar ao cliente uma maior opção de acessórios.

Como a diferença entre a utilização de material virgem e reciclado é de cerca de 60% do custo de material (relativo à hipótese 1, sendo 50% quando relativo à hipótese 2) polimérico utilizado, mas somente 7,5% do custo total de produção do

veleiro, pode-se questionar a vantagem de se utilizar o material reciclado. Porém, deve-se ter em mente que sobre a reciclagem recai um outro fator importante, o ambiental. Utilizando o refugo de produção, este material, que originalmente seria descartado é reutilizado, evitando assim desperdício e poluição.

8. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo o projeto de um veleiro de pequeno porte e material plástico rotomoldado.

Procurou-se obter um veleiro que pudesse ser utilizado para o esporte/lazer para duas pessoas e que fosse facilmente transportado, sempre se preocupando com o bem estar dos tripulantes.

Para o projeto do veleiro buscou-se uma embarcação com uma boa relação desempenho/segurança. Dada a necessidade de comportar dois tripulantes, e com o comprimento e boca limitados em 4m e 1,4m, respectivamente, o formato do casco resultante não privilegiou muito o desempenho, mas este fator não foi definido como um dos principais objetivos do projeto.

O aparelho vélico (única propulsão do veleiro) obtido foi otimizado para um vento incidente (aparente) de 60° (em relação à proa), visando um melhor desempenho em orça folgada. Foi escolhida uma configuração de duas velas, uma vela mestra e uma vela buja. Desenvolveu-se um algoritmo de otimização utilizando os dados da IMS como coeficientes de arrasto e sustentação. Os resultados da otimização foram validados utilizando-se um programa de previsão de velocidade para veleiros (VPP).

O VPP também auxiliou o projeto dos apêndices. Para a bolina foi realizado um estudo de sensibilidade entre sua área lateral e o desempenho da embarcação.

O projeto do leme foi baseado em um processo iterativo, levando em consideração o desempenho e o conforto ao velejar.

Em conjunto com o projeto da bolina e do leme realizou-se o balanceamento aero-hidrodinâmico do barco, uma das etapas mais importantes no projeto de um veleiro. Variando as posições longitudinais dos centros de esforços, aerodinâmicos e hidrodinâmicos, regula-se a tendência que o veleiro irá ter quando navegando. Por fim, como desejado, obteve-se um veleiro que tende a “sair” do vento com ventos

fracos ($< 3\text{m/s}$), manter facilmente o rumo com ventos de intensidade mediana (entre 3m/s e 6m/s) e “entrar” no vento com ventos considerados fortes (maiores que 6m/s).

Uma análise de elementos finitos da estrutura do casco foi realizada. Nesta análise definiram-se a espessura do casco (6 mm) e as estruturas de reforço necessárias para o veleiro suportar o carregamento ao qual estará submetido quando velejando. Analisou-se também a possibilidade de se utilizar material reciclado. Para tanto, foi realizada uma série de ensaios de tração que forneceram subsídios que atestam que um aumento na espessura de 6 mm para $6,3\text{ mm}$ é suficiente para suprir a diferença das propriedades mecânicas do material reciclado.

Analisou-se o desempenho da embarcação com um e dois tripulantes e realizou-se uma comparação com o desempenho previsto para um veleiro “Laser”, o mais difundido veleiro deste porte, reconhecido pelo seu bom desempenho. Resultados mostram que o desempenho do veleiro projetado (tanto com um e dois tripulantes) é bastante satisfatório, principalmente em orça, comprovando a eficácia do método proposto para a escolha das velas.

No que se refere à fabricação do casco do veleiro em plástico reciclável, a rotomoldagem se mostrou ser um processo de fabricação bastante viável e passível de ser utilizado para reduzir os custos de fabricação de um veleiro de pequeno porte. Foi possível, realizando uma análise econômica, estimar o preço de venda da embarcação que seria em torno de R\$6.300,00 (US\$2.800,00). Realizou-se também uma análise de sensibilidade quanto ao retorno do investimento, preço de venda e número de unidades vendidas e pôde-se concluir que, supondo um investimento do molde de fabricação de R\$100.000,00 e retorno de investimento em 5 anos, seriam necessárias 20 unidades vendidas por ano para amortizar o investimento do molde, número considerado compatível com o produto em questão.

Por fim, deve-se destacar que o estudo indica que a construção de veleiros de pequeno porte em polietileno rotomoldado é, de fato, uma alternativa interessante à tradicional utilização de fibra de vidro. Propicia benefícios em termos ambientais e de segurança do trabalho (especialmente se comparada ao método de laminação

manual, ainda hoje empregado na maioria dos estaleiros nacionais), benefícios esses que podem ainda ser incrementados ao se explorar a alternativa de emprego de material reciclado. Todavia, embora em rápida expansão no exterior, as aplicações náuticas do processo são ainda incipientes no Brasil. Espera-se, assim, que os resultados obtidos neste trabalho possam contribuir para futuros estudos voltados para este fim.

Estes estudos podem ser voltados principalmente no aprimoramento dos seguintes tópicos:

- Desenvolver um algoritmo de otimização da forma do casco, visando melhorar o desempenho. Juntamente com este algoritmo, um estudo da relação entre formato do casco e o custo do molde para rotomoldagem pode auxiliar na diminuição dos custos de fabricação do veleiro, colaborando assim para a potencial aceitação do veleiro no mercado.

- Integração do algoritmo de otimização de velas, com o algoritmo de projeto dos apêndices, e o VPP, de forma que, dadas as premissas e restrições de projeto de um veleiro, o algoritmo final desenvolvido fornecesse como resposta as dimensões e características ótimas de um veleiro, assim como seu desempenho.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbott, I.; *Theory of Wing Sections*, New York: Dover Publications, 1959.

American Society for Testing and Materials, ASTM *ASTM D638-Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, 2000.

American Society for Testing and Materials, ASTM *ASTM D747 -Standard Test Method for Apparent Bending Modulus of Plastics by Means of a Cantilever Beam*, 1999.

Belgrano, G. *Working Load to Break Load: Safety Factors in Composite Yacht Structures*, In I International Symposium on Yacht Design and Production, 2004.

Brandrup, J. ; Immergut, E. ; Grulke, E. *Polymer Handbook*, New York: Wiley, 4 ed., 1999.

Gerritsma, J.; Onnink, R.; Versluis, A. *Geometry, Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht Hull Series*, Int. Shipbuilding Progress 28(328), pp.276-97,1981.

International Standardization Organization, ISO *ISO 527-Plastics: Determination of Tensile Properties*, 1994.

International Standardization Organization, ISO *ISO 178-Plastics: Determination of Flexural Properties*, 1994.

Larsson, L.; Eliasson, R.E. *Principles of Yacht Design*, International Marine, 1994.

Machado Santos, F. et al *Finite Element Analysis of a 30 ft. One-off Racer-cruiser Yacht*, In I International Symposium on Yacht Design and Production, 2004.

Marchaj, C.A. *Aero-Hydrodynamics of Sailing*, 2nd edition, London: Adlard Coles Nautical, 2000.

Marchaj, C.A. *Sail Performance, Theory and Practice*, London: Adlard Coles Nautical, 1996.

Oossanen, P. van *Predicting the Speed of Sailing Yachts*, SNAME – Transactions , Vol 101, pp 337 – 397, Amsterdam, 1993.

Poor, C.L. *A Description of the New International Rating System*, Publication of the United States Yacht Racing Union (USYRU), 1986.

Tôres, O.F.F. *Fundamentos da engenharia econômica e da análise econômica de projetos*, São Paulo : Thomson Learning, 2006.

Autoship® 8.0 *Manual de Referência* , 1998.

Patran® / Nastran® 2004 *Manual de Referência*, 2004.

Sítios eletrônicos consultados:

Escape [on-line]. Empresa de fabricação de veleiros rotomoldados Escape. [2004-06-12]. Disponível em:< <http://www.bosuns.co.uk/escape.htm>>.

Grupo Gyros[on-line]. Grupo de estudo rotomoldagem do CEFET/RS. [2004-04-10]. Disponível em:<<http://www.gyros.hpg.ig.com.br/rotomoldagem.htm>>.

Laser Int. [on-line]. Empresa de fabricação de veleiros Laser Int. [2004-06-12] Disponível em:<<http://www.lasersailing.com>>.

Lojas Regatta [on-line]. [2004-07-15]. Disponível em:<<http://www.regatta.com.br>>.

Politeno [on-line]. Empresa produtora de polímeros Politeno. [2005-01-27]. Disponível em:<<http://www.politeno.com.br>>.

GLOSSÁRIO NÁUTICO⁷

Descrição das partes do veleiro

Adernar – Inclinar-se (a embarcação) para um dos bordos.

Barlavento – Lado de onde incide o vento.

Bolina – Apêndice de um veleiro para auxiliar na condição de orça.

Bombordo – Parte esquerda da embarcação, supondo um observador de costas para a popa. Abreviatura BB.

Boreste – Parte direita da embarcação, supondo um observador de costas para a popa. Abreviatura BE.

Brandal – Cada um dos cabos fixos que suportam o mastro para as bordas, a bombordo e a boreste. Complementam a ação dos estai.

Cadinho – Peça, usualmente metálica, que suporta o mastro no convés permitindo rotação.

Contra-vento – Ou orça. Incidência de vento pela proa da embarcação.

⁷ Glossário baseado no Dicionário Ilustrado de Navegação a Vela, Editora Abril, 1975.

Condição de vento de contra vento ou orça. Fonte: www.revistanautica.com.br

E – Base do triângulo da mestra.

Emborcar – Virar a embarcação sobre um dos bordos. Esse acidente pode ocorrer devido a condições climáticas adversas, ao pequeno grau de estabilidade transversal da embarcação ou ainda à execução incorreta de uma manobra.

Escora – Tripulação em posição de contra peso ao adernamento do barco, projetando-se com o corpo na direção oposta àquela sobre a qual se inclina a embarcação.

Estai - Cada um dos cabos que sustentam o mastro na direção proa-popa.

I – Altura do triângulo frontal.

J – Base do triângulo frontal.

Leeway – Ângulo de Leeway ou de Orça é o ângulo entre a direção da velocidade e a linha longitudinal do veleiro devido a deriva em orça.

Orça – O mesmo que contra vento.

P – Altura do triângulo da mestra.

Quilha – Tem a mesma função da bolina, mas costuma ser fixa e é dotada de lastro interno.

Retranca – Barra que suporta a base (esteira) da vela mestra.

Sotavento – Bordo da embarcação para onde sopra o vento. O lado oposto ao barlavento.

Través – Direção perpendicular ao plano longitudinal da embarcação. Vento de través: incidência de vento perto de 90° de incidência em relação a proa.

Condição de vento través. Fonte: www.revistanautica.com.br

Vela buja – Nome genérico dado às velas triangulares localizadas a vante da embarcação.

Vela mestra – Ou vela grande. Vela principal do veleiro, localizada à ré do mastro principal.

Velocity-Made-Good (VMG) – Projeção da velocidade do veleiro na direção da incidência do vento. Mede a velocidade com que o veleiro se desloca na direção da incidência do vento real.

Vento Aparente – Velocidade e direção do vento medidas por um observador fixo no veleiro.

Vento aparente e vento real. Fonte: www.revistanautica.com.br

Vento de popa – Incidência de vento próximo à popa da embarcação

Condição de vento de popa. Fonte: www.revistanautica.com.br

Vento real – Velocidade e incidência de vento medidas em relação a um referencial fixo na terra.

ANEXO I – DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE FABRICAÇÃO - ROTOMOLDAGEM

O processo de rotomoldagem⁸ divide-se em quatro etapas:

- Carregamento;
- Aquecimento;
- Resfriamento;
- Desmoldagem.

O carregamento consiste na alimentação do molde com uma quantidade de material pré-determinada, que usualmente se encontra na forma de pó. Após a alimentação, o molde é fechado com auxílio de grampos ou parafusos, e segue para o aquecimento.

Após o carregamento e o fechamento do molde, o mesmo é conduzido para um forno onde inicia um movimento de rotação em dois ou três eixos. O calor recebido do forno e a movimentação multiaxial resultam em um aquecimento uniforme do material no interior do molde. Quando a temperatura no interior do molde alcança a temperatura de derretimento do polímero, o mesmo começará a aderir à superfície do molde.

Com a continuidade do aquecimento o material começará a fundir e o ar que estava junto com as partículas de pó pode ser retido, formando bolhas. Estas bolhas, se permanecerem na peça, resultam em perdas nas propriedades mecânicas, principalmente com relação à resistência ao impacto.

Para a eliminação destas bolhas é necessária a continuidade do aquecimento após o derretimento do material. A continuidade do aquecimento resulta em uma diminuição da viscosidade do polímero, o que torna mais fácil o processo de dissolução do ar, até que a maioria das bolhas tenha sido eliminada. Se este aquecimento adicional for prolongado, a peça resultante não apresentará bolhas, porém poderá se degradar, com acentuada perda de resistência mecânica. A condição ideal de rotomoldagem será alcançada quando a peça apresentar algumas

⁸ Definição e descrição do processo de rotomoldagem extraído de www.gyrus.hpg.ig.com.br/rotomoldagem.htm (04/2004).

bolhas próximas à superfície interna, sem apresentar degradação. Esta condição de moldagem é determinada, na prática, por tentativa e erro.

O molde ainda em movimento rotacional é conduzido para fora do forno até uma estação de resfriamento. O resfriamento do molde pode ocorrer por ar ambiente, jato de ar, ou por sistemas mais complexos como camisas envoltas no molde. O processo de resfriamento do molde também possui grande influência sobre as propriedades mecânicas da peça moldada. Se o resfriamento for lento, haverá tempo suficiente para o crescimento de cristais, o que resultará em peças com alta rigidez, mas com baixa resistência ao impacto. Pelo contrário, um resfriamento muito rápido resultará em diferenças de temperaturas bruscas na parede da peça, o que provoca variações na estrutura do material, com diferentes níveis de contração do polímero. Estas diferenças de estrutura e níveis de contração resultarão no empenamento da peça.

Após o molde e a peça serem resfriados, o movimento de rotação é terminado, e o molde é conduzido para ser desmoldado. A abertura do molde e a extração da peça são feitas manualmente. A figura abaixo ilustra o processo descrito.

FIGURA I.1 - ESQUEMA DO PROCESSO DE ROTOMOLDAGEM. FONTE:

WWW.GYRUS.HPG.IG.COM.BR/ROTOMOLDAGEM.HTM (04/2004).

ANEXO II - ESTUDO DO MATERIAL A SER UTILIZADO

OS POLÍMEROS

Polímeros são os materiais mais utilizados na indústria náutica brasileira. Isto porque a resina que une a fibra de vidro (sendo ela de poliéster ou de epóxi) é um composto polimérico. No trabalho ora apresentado visa-se a substituição da fibra de vidro e da resina por um polímero rotomoldado e possivelmente reciclável.

Antes de se falar do plástico a ser utilizado na rotomoldagem, é necessário se entender um pouco sobre o comportamento dos polímeros. Deste modo, uma pequena introdução sobre polímeros será apresentada a seguir.

DIFERENTES TIPOS DE POLÍMEROS

Os polímeros são compostos orgânicos nos quais uma cadeia de moléculas é formada com diversas outras moléculas repetidas. Por exemplo, o polietileno é uma macromolécula formada pela repetição de moléculas de etileno.

Os polímeros podem ser subdivididos em pelo menos três categorias: os termofixos, os termoplásticos e as borrachas ou elastômeros (*Brandrup et al.* (1999)).

Sem entrar em detalhes de composição química ou da formação microscópica da molécula dos polímeros, os polímeros termoplásticos são polímeros de cadeia molecular mais linear, sem cruzamento em sua cadeia. São, em sua essência, passíveis de reciclagem. Porém, a reciclagem de polímeros é extremamente restrita. Na verdade o polímero pode ser reciclado desde que não se ultrapasse uma determinada temperatura característica de cada polímero. Após este ponto, a cadeia molecular se degenera e o polímero “queima”. Neste subgrupo se encontram o polietileno, o pvc, o acrílico, o polipropileno, entre outros.

Os polímeros termofixos têm em sua cadeia alguns cruzamentos. É devido a estes cruzamentos que os termofixos não podem ser reciclados, degenerando suas moléculas quando submetidos ao calor. Decorre daí o nome “termofixo”, ou seja, uma vez formado o polímero, não pode ser transformado. Neste subgrupo se

encontram o isopor e principalmente as resinas, como as resinas de poliéster e epóxi, utilizadas para a fabricação de barcos.

Já as borrachas, ou elastômeros, são polímeros com moléculas extremamente cruzadas. Neste grupo se encontram as borrachas naturais ou sintéticas, os silicones, etc.

Como a idéia é exatamente a reciclagem, mesmo que parcial, a ser utilizada na fabricação, polímeros termofixos ou elastômeros estão descartados na escolha do material.

Dentre os termoplásticos, no mercado atual da rotomoldagem, poucos polímeros podem ser utilizados na fabricação de produtos utilizando este método de fabricação. Entre os mais utilizados se encontram o polietileno e o polipropileno. O polipropileno, porém, ao ser rotomoldado se torna um tanto frágil a impactos. Portanto, o material mais recomendado para a rotomoldagem de produtos expostos a intempéries e impactos é o polietileno.

O POLIETILENO

Os polímeros feitos a partir do polietileno podem variar segundo a sua morfologia micro-estrutural. Desta forma, podem variar de densidade e de formato de cadeia. O polietileno mais utilizado para a fabricação via rotomoldagem de produtos como caiaques, caixas d'água e veleiros (no exterior) é o polietileno linear de média densidade. Fabricantes do polietileno, petroquímicas em geral, apresentam uma variedade grande de polietileno linear de média densidade, acrescidos de uma série de aditivos como, por exemplo, filtros anti UVA e UVB, de forma a tornar o produto final mais resistente, e menos suscetível aos agentes da natureza.

Assim, como cada polietileno apresenta, devido ao acréscimo de aditivos, diferentes características físicas, como módulo de elasticidade, tensão limite de ruptura, resistência ao sol, entre outros fatores, foi necessário escolher um polietileno específico para fazer a análise estrutural do veleiro (apresentada no capítulo 4.3). O polímero escolhido (recomendado para projetos estruturais e resistente às intempéries) e suas características físicas foram descritas na tabela 5.10.

O COMPORTAMENTO NÃO LINEAR DOS POLÍMEROS

Os materiais poliméricos, diferentemente dos metais, raramente podem ser considerados elásticos em sua análise estrutural, sendo visco-elásticos em sua maioria. Na verdade, alguns tendem mais para a propriedade de materiais plásticos e outros tendem para materiais de características mais elásticas, dependendo da formação molecular do polímero. No caso dos elastômeros e dos termofixos, os materiais têm características mais plásticas do que elásticas. No caso dos termoplásticos, o principal fator é a temperatura em que este material se encontra. Se a temperatura de operação do polímero está próxima da temperatura de derretimento do material, este material apresenta comportamento plástico. Porém, este tipo de polímero apresenta uma temperatura limite, abaixo da qual sua estrutura interna se torna semi-cristalizada. Neste caso, o material apresenta propriedades quase-elásticas, e comumente são considerados perfeitamente elásticos. É o caso, por exemplo, do acrílico e do PVC.

O material utilizado, o polietileno, tem temperatura de derretimento de aproximadamente 140°C e temperatura de cristalização perto de -120°C. Deste modo, em temperatura ambiente e de utilização, este se encontra em estado molecular quase amorfo e de característica estrutural plástica.

É por isso que, ao se tentar obter seu módulo de elasticidade pelo método de ensaio de tração ou ensaio de flexão, o resultado é bastante diferente. Isto se explica pelo fato de que o comportamento do plástico ao ser tracionado difere de seu comportamento sob compressão.

POLIETILENO “VIRGEM” X POLIETILENO RECICLADO

Como um dos tópicos deste projeto trata da utilização de material reciclado para a fabricação, é necessário analisar as diferenças entre o material considerado de primeira rotomoldagem, ou “virgem”, e materiais reciclados.

Pesquisando em empresas de rotomoldagem⁹, verificou-se que a reciclagem é feita, sim, porém, em sua maioria, trata-se da reutilização de material de refugo de peças rotomoldadas. Reciclar materiais antigos é possível, desde que este material

⁹ Cuca's Art (SP) e Caiaker (SP)

não tenha ficado muito tempo exposto ao sol. Há empresas que vendem material reciclado, porém, como não se sabe a procedência do material, acrescentá-lo a um produto que estará sujeito a grandes cargas de esforço pode ser um risco. Assim, por razões de confiabilidade, o melhor é utilizar refugo de produção (peças que não ficaram boas ou foram devolvidas pelos clientes por apresentarem algum defeito) como material para reciclagem.

Outro cuidado que se deve ter é não utilizar somente material reciclado para a rotomoldagem. O de praxe, na indústria de polímeros que realiza reciclagem, é a utilização da razão de 40% de material reciclado para 60% de material virgem. Razões maiores são evitadas, pois podem comprometer a estrutura do produto.

ENSAIOS DE TRAÇÃO E FLEXÃO

Para verificar o quanto difere estruturalmente uma peça rotomoldada virgem de uma peça rotomoldada reciclada (razão 60% x 40%), além de verificar o comportamento do polímero quando submetido a esforços, foram realizados testes de tração e flexão para os dois tipos de materiais. Este ensaio aconteceu no laboratório de pesquisa da empresa do ramo automobilístico **DaimlerChrysler do Brasil**, aonde as amostras de produtos rotomoldados (duas peças fornecidas pela **Cuca Art`s**) foram transformadas em diversos corpos de provas para ambos os testes de tração e compressão. Tanto os corpos de provas como os ensaios seguiram normas internacionais ISO, *International Standardization Organization* (ISO 527 para o ensaio de tração e ISO 178 para ensaio de flexão).

Os resultados destes ensaios estão expostos nas figuras e tabelas abaixo.

TABELA II.1 – RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA O MATERIAL VIRGEM.

	Força Máxima N	Alongamento %	Limite de Resistência MPa	Módulo de elasticidade MPa	Área transversal mm ²	Largura mm	Espessura mm
Valor Mínimo	380,50	70,48	15,78	188,45	24,120	13,300	1,800
Valor Máximo	491,32	91,04	17,34	213,66	29,260	13,400	2,000
Valor Médio	442,04	82,77	16,72	198,86	26,410	13,375	1,975
Desvio Padrão	47,77	8,71	0,67	10,81	2,193	0,050	0,171

FIGURA II.1 – RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA MATERIAL VIRGEM.
(FORÇA DE TRAÇÃO (N) X DESLOCAMENTO (MM)).

TABELA II.2 – RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA O MATERIAL RECICLADO.

	Força Máxima N	Alongamento %	Limite de Resistência MPa	Módulo de elasticidade MPa	Área transversal mm ²	Largura mm	Espessura mm
Valor Mínimo	760,03	67,50	15,99	180,18	47,340	13,150	3,600
Valor Máximo	853,19	80,73	17,82	201,13	47,880	13,300	3,600
Valor Médio	799,75	72,60	16,78	190,46	47,655	13,238	3,600
Desvio Padrão	45,47	6,30	0,87	10,36	0,269	0,075	0,001

FIGURA II.2 – RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA MATERIAL RECICLADO.
(FORÇA DE TRAÇÃO (N) X DESLOCAMENTO (MM)).

TABELA II.3 – RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO PARA O MATERIAL VIRGEM.

	Força Máxima N	Flecha %	Limite de Resistência MPa	Módulo de elasticidade MPa	Área transversal mm ²	Largura Mm	Espessura mm
Valor Mínimo	-13,9257	6,60	-13,9501	403,1433	23,958	9,900	2,420
Valor Máximo	-22,1879	-8,81	-22,2268	748,0909	23,958	9,900	2,420
Valor Médio	-17,4071	-5,06	-17,4376	525,7994	23,958	9,900	2,420
Desvio Padrão	3,0047	6,54	3,0099	139,9271	0,005	0,004	0,001

FIGURA II.3 – RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO PARA O MATERIAL VIRGEM.
(FORÇA DE FLEXÃO (N) X DESLOCAMENTO (MM)).

TABELA II.4 – RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO PARA O MATERIAL RECICLADO.

	Força Máxima N	Flecha %	Limite de Resistência MPa	Módulo de elasticidade MPa	Área transversal mm ²	Largura mm	Espessura mm
Valor Mínimo	-20,6678	-10,83	-14,1383	409,5950	35,084	9,800	3,580
Valor Máximo	-27,5816	-11,86	-18,8678	606,8474	35,084	9,800	3,580
Valor Médio	-23,7325	-11,47	-16,2347	507,7334	35,084	9,800	3,580
Desvio Padrão	2,6358	0,39	1,8031	89,1252	0,010	0,002	0,001

FIGURA II.4 – RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO PARA O MATERIAL RECICLADO.
(FORÇA DE FLEXÃO (N) X DESLOCAMENTO (MM)).

Os resultados mostram que, considerando-se os valores médios tanto para o módulo de elasticidade como para o limite de resistência, a diferença entre o

material virgem e o material reciclado ficou sempre abaixo dos 5%. Isto prova que a inserção de material reciclado na proporção 60% / 40% é bastante aceitável, acarretando em um desvio máximo de 5% em relação ao material virgem. Isto indica que é possível a utilização de material reciclado na rotomoldagem sem que seja necessário aumentar demasiadamente a espessura final do produto para contrabalançar a menor resistência do material reciclado.

Vale lembrar também que este foi um teste qualitativo para a determinação da diferença entre material reciclado e virgem. Seus dados diferem pouco dos valores fornecidos pelo fabricante do polímero (vide Tabela II.5). O material utilizado para estes testes não são exatamente os mesmos escolhidos para a utilização neste projeto. Porém, como se dispunha somente destes materiais para realizar ensaios, o resultado obtido foi extrapolado para o material utilizado no projeto como forma de aproximação.

TABELA II.5 – DADOS FORNECIDOS PELO FABRICANTE DO MATERIAL DAS AMOSTRAS UTILIZADAS PARA OS ENSAIOS.

Testes	Unidade	Resina RD -34U3
Elongamento de Ruptura	%	791
Res.Tração de Escoamento	MPa	13,6
Res.Tração de Ruptura	MPa	11,7
Módulo Elástico (tração)	MPa	210
Densidade	g/cm ³	0,935

Os resultados dos ensaios também permitiram verificar que o comportamento do polietileno é praticamente linear, até valores próximos àqueles especificados pelo fabricante como tensão limite de escoamento. Para verificar esta afirmação, realizou-se uma pequena análise em MEF com modelos de algumas amostras dos ensaios reais (vide figura II.5). Pode-se ver a comparação entre a análise linear em MEF e de um resultado experimental na figura II.6. Com base nestes resultados e, uma vez que o critério de projeto estrutural prevê que as tensões máximas sejam limitadas pela tensão de escoamento, a análise, via método de elementos finitos do casco do veleiro, foi realizada utilizando modelagem linear do material.

Figura II.5 – Modelo para análise em MEF do corpo de prova (1/4 do corpo de prova original).

FIGURA II.6 – COMPARAÇÃO ENTRE CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDA EM ENSAIO E APROXIMAÇÃO LINEAR.

ANEXO III – ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

Neste anexo será discutida a formulação utilizada para o algoritmo de otimização.

Restrições

A maior parte das restrições na otimização das velas de um veleiro são relacionadas com a estabilidade lateral.

A condição mais crítica do funcionamento de um veleiro quanto à estabilidade se dá no contra-vento. Nesta condição grande parte da força aerodinâmica nas velas projeta-se como força lateral (vide Figura 4.2).

Uma vela muita alta (razão de aspecto elevada) pode comprometer a estabilidade, pois seu centro de esforço aerodinâmico estará muito distante em relação ao centro de esforço hidrodinâmico do casco (abaixo d'água). Uma área vélica muito grande também compromete a estabilidade por exercer uma força lateral muito grande.

Assim, a principal restrição adotada diz respeito a um ângulo máximo de inclinação de 30° em orça fechada, para tripulação de 160 Kg em escora e vento de velocidade real de 6 m/s. Essa restrição se traduz como:

Momento de Emborcamento < Momento de restauração

$$\text{Mom}_{\text{emb}} = F_{\text{side}} \times (\Delta H_{\text{ce}}) \quad (1)$$

Onde:

Mom_{emb} = momento de emborcamento total sofrido pela embarcação devido às forças aerodinâmicas nas velas e às forças hidrodinâmicas no casco e na bolina;

F_{side} = força aerodinâmica lateral sofrida pela vela;

ΔH_{ce} = altura entre os centros de esforços aero e hidrodinâmico

Aqui vale uma observação: a restrição imposta na otimização é sempre a mesma, com ângulo de vento aparente de aproximadamente 30° (orça fechada), não dependendo do ângulo de vento no qual a otimização será realizada.

$$\text{MomRest} = (G_{\text{zmax}} \times \Delta) + (y_{\text{trip}} \times P_{\text{trip}}) \quad (2)$$

Onde:

MomRest = momento de restauração total da embarcação;

Δ = deslocamento total da embarcação (com tripulação);

y_{trip} = posição transversal do centro de massa da tripulação;

P_{trip} = peso da tripulação;

G_{zmax} = braço de endireitamento hidrostático da embarcação.

O valor de G_{zmax} é obtido pelo software Autohydro® que é um complemento de análise hidrostática do Autoship®.

Foram impostas também restrições relativas aos tamanhos máximos e mínimos da vela mestra, evitando que velas com razões de aspecto muito pequenas fossem geradas. Desta forma, limitou-se o comprimento da base da vela (E) em 2,8 m. Já a altura da vela (P) não pode ser menor que 4 metros.

Função objetivo

A função objetivo escolhida busca maximizar os coeficientes de força de propulsão (tanto da vela mestra como da vela buja), multiplicados pela área vélica. Com esta função foi possível obter velas otimizadas para diversos ângulos de vento, de orça fechada até vento de popa.

$$F_{obj} = A \times (C_{drive}) = A_m \times C_{drive_m} + A_j \times C_{drive_j} \quad (7)$$

$$C_{drive} = C_l \times \sin(\beta) - C_d \times \cos(\beta) \quad (8)$$

Onde:

C_{drive} = coeficiente de força propulsora;

C_{drive_m} = coeficiente de força propulsora da vela mestra;

C_{drive_j} = coeficiente de força propulsora da vela buja;

A_m = área da vela mestra;

A_j = área da vela buja;

β = ângulo de incidência aparente do vento.

Simplificações realizadas

Algumas simplificações foram adotadas para o processo de otimização. A primeira simplificação realizada foi quanto ao formato da vela mestra. Inicialmente utilizou-se vela triangular. Esta simplificação subestima, porém, a área real desta

vela, pois as velas atuais, em especial as velas mestras, não são triangulares. Como melhoria foi utilizada uma série de trapézios (vide figura 5.7b). O formato final se aproximou bastante das velas existentes no mercado e foi considerado satisfatório. Os trapézios são obtidos por relações pré-estabelecidas com o fator E.

O centro de esforço utilizado nos cálculos da restrição é, na verdade, o centro de área ponderado dos trapézios.

Já a vela buja, por ter formato aproximadamente triangular, continua tendo como simplificação a área do triângulo retângulo formado pelos parâmetros I e J.

O cálculo da posição dos centros de esforços (aerodinâmicos e hidrodinâmicos) e coeficientes aerodinâmicos utilizados são aqueles propostos por *Larson & Eliasson* (1994).

O Algoritmo de Otimização

Como núcleo do algoritmo de otimização foi utilizada uma rotina de otimização com restrições do software MATLAB.

O algoritmo de síntese utilizado para a otimização é apresentado a seguir:

Restrições impostas:

Entradas

$mgl = 0.95 \cdot e$; (mgl , mgm , mgu , mgt e hb são fatores de relação da vela trapezoidal, vide figura 5.7b.);

$mgm = 0.75 \cdot e$;

$mgu = 0.45 \cdot e$;

$mgt = 0.25 \cdot e$;

$hb = 0.05 \cdot e$;

$pesoleve = 1100$ (em N);

$pesotrip = 1600$ (em N);

$deslocamento = pesotrip + pesoleve$;

$BAD = 0.85$ (posição vertical da retranca com relação a quilha em m);

$SpanK = 1.1$ (envergadura quilha);

$Tcb = 0.155$ (Calado);

$V_a = 8.237 \cdot \cos(30 \cdot \pi / 180)$ (velocidade do vento aparente em nós);

$\rho = 1.33$ (densidade do ar);

$\beta = 30$ (ângulo do vento em graus);

$\theta = \pi / 6$ (ângulo de banda);

$p_{\text{ontal}} = 0.49$;

$\text{FreeB} = p_{\text{ontal}} - T_{\text{cb}}$ (borda livre);

$\text{CEh} = 0.45 \cdot (\text{SpanK} + T_{\text{cb}}) - \text{FreeB}$ (posição vertical do centro hidrodinâmico do barco em relação quilha em m).

Equações

$\beta = \beta \cdot (\pi / 180)$;

$r_{\text{amax}} = 0.136$ (máximo braço de endireitamento);

$A_m = p \cdot (h_b + 2 \cdot m_{gt} + 3 \cdot m_{gu} + 4 \cdot m_{gm} + 4 \cdot m_{gl} + 2 \cdot e) / 16$ (área vélica vela mestra);

$C_{em} =$

$$\left(\left(\frac{p}{4} \cdot \left(\left(\frac{1}{3} \right) \cdot m_{gl} + \left(\frac{1}{6} \right) \cdot e \right) / (0.5 \cdot m_{gl} + 0.5 \cdot e) \right) \cdot (m_{gl} + e) \cdot \frac{p}{8} \right) + \left(\frac{p}{4} + \left(\frac{p}{4} \cdot \left(\left(\frac{1}{3} \right) \cdot m_{gm} + \left(\frac{1}{6} \right) \cdot m_{gl} \right) / (0.5 \cdot m_{gm} + 0.5 \cdot m_{gl}) \right) \right) \cdot (m_{gm} + m_{gl}) \cdot \frac{p}{8} \right) + \left(2 \cdot \frac{p}{4} + \left(\frac{p}{4} \cdot \left(\left(\frac{1}{3} \right) \cdot m_{gu} + \left(\frac{1}{6} \right) \cdot m_{gm} \right) / (0.5 \cdot m_{gu} + 0.5 \cdot m_{gm}) \right) \right) \cdot (m_{gu} + m_{gm}) \cdot \frac{p}{8} \right) + \left(3 \cdot \frac{p}{4} + \left(0.55 \cdot \frac{p}{4} \cdot \left(\left(\frac{1}{3} \right) \cdot m_{gt} + \left(\frac{1}{6} \right) \cdot m_{gu} \right) / (0.5 \cdot m_{gt} + 0.5 \cdot m_{gu}) \right) \right) \cdot (m_{gt} + m_{gu}) \cdot \frac{p}{8} \right) + \left(0.55 \cdot \frac{p}{4} + 3 \cdot \frac{p}{4} + \left(0.45 \cdot \frac{p}{4} \cdot \left(\left(\frac{1}{3} \right) \cdot h_b + \left(\frac{1}{6} \right) \cdot m_{gt} \right) / (0.5 \cdot h_b + 0.5 \cdot m_{gt}) \right) \right) \cdot (h_b + m_{gt}) \cdot 0.45 \cdot \frac{p}{8} \right) / (A_m + \text{BAD})$$
 (centro de esforço da vela mestra);

$AR_m = (p^2) / A_m$ (razão de aspecto vela mestra);

$A_j = 0.5 \cdot i \cdot j$ (área vélica triangular vela buja);

$\text{CEj} = 0.39 \cdot i$ (Centro de esforço aerodinâmico vela buja, em relação ao convés);

$AR_j = (i^2) / A_j$ (Razão de aspecto vela buja);

$A_n = A_m + A_j$;

$C_{dim} = (C_{lm}^2) \cdot (1 / (\pi \cdot AR_m) + 0.005)$ (coeficiente de arrasto induzido vela mestra);

$C_{dij} = (C_{lj}^2) \cdot (1 / (\pi \cdot AR_j) + 0.005)$ (coeficiente de arrasto induzido vela buja);

$C_{dt} = ((C_{dim} + C_{dm}) \cdot A_m + (C_{dij} + C_{dj}) \cdot A_j) / A_n$ (coeficiente de arrasto induzido total);

$C_{lt} = ((C_{lm}) \cdot A_m + (C_{lj}) \cdot A_j) / A_n$ (coeficiente de sustentação total);

$F_{lm} = 0.5 \cdot C_{lm} \cdot \rho \cdot A_m \cdot V_a^2$ (força de sustentação vela mestra);

$F_{lj} = 0.5 \cdot C_{lj} \cdot \rho \cdot A_j \cdot V_a^2$ (força de sustentação vela buja);

$F_{lt} = 0.5 \cdot C_{lt} \cdot \rho \cdot A_n \cdot (V_a^2)$ (força de sustentação total);
 $F_{dm} = 0.5 \cdot (C_{dm} + C_{dim}) \cdot \rho \cdot A_m \cdot V_a^2$ (força de arrasto vela mestra);
 $F_{dj} = 0.5 \cdot (C_{dj} + C_{dij}) \cdot \rho \cdot A_j \cdot V_a^2$ (força de arrasto vela buja);
 $F_{dt} = 0.5 \cdot (C_{dt}) \cdot \rho \cdot A_n \cdot (V_a^2)$ (força de arrasto total);
 $F_y = (F_{lt} \cdot \cos(\beta_{\text{etaw}}) + F_{dt} \cdot \sin(\beta_{\text{etaw}}))$ (força aerodinâmica decomposta na direção Y);
 $C_{Ea} = (C_{Em} \cdot A_m + C_{Ej} \cdot A_j) / A_n$ (Centro de esforço aerodinâmico total);
 $z_{trip} = FreeB$ (posição vertical da tripulação);
 $y_{trip1} = 0.85$ (posição da tripulação em relação ao centro da embarcação);
 $\text{angphi} = \text{atan}(z_{trip}/y_{trip1})$;
 $y_{trip} = ((y_{trip1}^2 + z_{trip}^2)^{0.5}) \cdot \cos(\text{heel} + \text{angphi})$;
 $\text{momrest} = \text{ramax} \cdot \text{desloc} + y_{trip} \cdot \text{pesotrip}$ (Momento de restauração total da embarcação);
 $c = F_y \cdot (C_{Ea} - C_{Eh}) - \text{momrest}$ (Restrição de equilíbrio sendo momento de emborcamento – momento de restauração ≤ 0).

Função Objetivo Aplicada:

Entradas

$m_{gl} = 0.95 \cdot e$;
 $m_{gm} = 0.75 \cdot e$;
 $m_{gu} = 0.45 \cdot e$;
 $m_{gt} = 0.25 \cdot e$;
 $h_b = 0.05 \cdot e$;
 $\rho = 1.3$;
 $\beta_{\text{etaw}} = v(3)$ (ângulo do vento em graus, variando em cada otimização).

Equações

$\beta_{\text{etaw}} = \beta_{\text{etaw}} \cdot (\pi/180)$;
 $A_m = p \cdot (h_b + 2 \cdot m_{gt} + 3 \cdot m_{gu} + 4 \cdot m_{gm} + 4 \cdot m_{gl} + 2 \cdot e) / 16$;
 $A_{Rm} = (p^2) / A_m$;
 $A_j = 0.5 \cdot i_j$;

$$AR_j = (i^2)/A_j;$$

$$C_{dim} = (C_{lm}^2) * (1/(pi * AR_m) + 0.005);$$

$$C_{dij} = (C_{lj}^2) * (1/(pi * AR_j) + 0.005);$$

$$F_{obj} = (-1 * A_m * ((C_{lm}) * \sin(\beta_{aw}) - (C_{dm} + C_{dim}) * \cos(\beta_{aw}))) - 1 * A_j * ((C_{lj}) * \sin(\beta_{aw}) - (C_{dj} + C_{dij}) * \cos(\beta_{aw})))$$

(Função Objetivo: minimizar (-1)x a Força de propulsão).

ANEXO IV – PARTICULARIDADES DO PROJETO

Apoio do mastro

O sistema de apoio do mastro funciona da seguinte forma: há uma estrutura metálica comumente chamada de cadinho que está fixa ao convés (parafusada ou colada, geralmente). Esta estrutura possui na face superior uma superfície convexa. Na parte inferior do mastro há uma rótula que é colocada sobre a superfície convexa do cadinho. Desta forma o mastro pode girar livremente em cima do cadinho, seguindo a angulação da vela. A figura IV.1 mostra um conjunto mastro/cadinho de um veleiro do mercado náutico brasileiro

FIGURA IV.1- JUNÇÃO CADINHO MASTRO

Estruturas internas no polímero

Como foi dito no capítulo 5.3, devido a problemas estruturais, seria necessária a inserção de duas estruturas metálicas em forma de cruz no centro do convés (figura 5.19). Para um maior entendimento, a figura IV.2 mostra uma inserção metálica em PELMD rotomoldado de um filtro para piscina. Nesta figura é possível se ver que a estrutura metálica é envolta pelo polímero.

FIGURA IV.2 – INSERÇÃO METÁLICA INTERNA AO PLÁSTICO