

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

IURI ANSOLIN

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DA MASTREAÇÃO PARA EMBARCAÇÕES A VELA BASEADA
NA OBRA PRINCIPLES OF YATCH DESIGN

Joinville
2024

IURI ANSOLIN

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DA MASTREAÇÃO PARA EMBARCAÇÕES A VELA BASEADA
NA OBRA PRINCIPLES OF YATCH DESIGN

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Naval do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto

Joinville
2024

IURI ANSOLIN

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DA MASTREAÇÃO PARA EMBARCAÇÕES A VELA BASEADA
NA OBRA PRINCIPLES OF YATCH DESIGN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi
julgado adequado para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Naval, na
Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 13 de Dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Orientador: Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Orientador(a)
Presidente

Prof. Dr. Luis Fernando Peres Calil
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Luiz Eduardo Bueno Minioli
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a minha família e amigos que me apoiaram nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, cuja força e presença foram constantes em todos os momentos desta jornada, guiando-me e fortalecendo-me nos desafios enfrentados.

À minha família, especialmente aos meus pais, Irani e Mirta, e ao meu irmão Ian, que desde o início desta caminhada ofereceram suporte incondicional, incentivo e encorajamento, sendo pilares fundamentais para que eu pudesse concluir esta etapa.

Aos meus avós, Odilo e Natalina, que, em cada despedida, reforçavam minha determinação, dando-me motivos e inspiração para seguir adiante nos estudos.

À minha namorada, Ana Júlia, por todo o apoio, paciência e confiança depositados em mim, ajudando-me a atravessar os momentos mais difíceis e a celebrar as conquistas.

Aos amigos Arthur, Jean, João e Raul, com quem compartilhei não apenas desafios, mas também momentos de alegria, aprendizado e crescimento mútuo, tornando esta jornada acadêmica mais rica e significativa.

Ao Prof. Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto, cuja paciência, dedicação e orientação foram essenciais para a realização deste estudo, compartilhando generosamente sua experiência na área e contribuindo significativamente para o meu crescimento acadêmico.

À UFSC de Joinville por todos os momentos compartilhados e em especial aos professores, que sempre estiveram dispostos a dividir conhecimentos técnicos e experimentais.

A equipe Babitonga por todos os momentos de trabalho, alegria e conhecimento adquiridos durante a minha trajetória, meu muito obrigado.

Melhor lutar por algo do que viver para nada. (Winston Churchill).

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a realização do dimensionamento da mastreação para embarcações a vela baseada na obra *Principles of Yatch Design* de Larsson e Eliasson (2000). Com a ferramenta é possível automatizar o memorial de cálculos do momento de inércia, forças nos estais e brandais, além de realizar a escolha de dispositivos de mastreação baseado no catálogo selecionado de forma mais ágil. A proposta, é reduzir a complexidade dos cálculos, aumentar a precisão dos resultados, além de agilizar o trabalho dos projetistas, disponibilizando uma interface intuitiva que usa dados fundamentais sobre a embarcação para produzir os resultados. Para confirmar a eficiência da ferramenta, foi conduzido um estudo de caso com embarcação YD-40, a mesma da obra de Larsson e Eliasson (2000), e demonstrou bons resultados. Evidencia-se a capacidade da solução criada para aprimorar o processo de projeto na engenharia naval, contribuindo para a construção de embarcações mais seguras e coerentes com as demandas práticas do segmento.

Palavras-chave: Mastreação. Ferramenta computacional. Embarcações a vela.

ABSTRACT

This work presents the development of a computational tool for sizing the mast for sailing vessels based on the book *Principles of Yatch Design* by Larsson e Eliasson (2000). With the tool it is possible to automate the calculation record of the moment of inertia, forces on the stays and ends, in addition to making the choice of masting devices based on the selected catalog in a more agile way. The proposal is to reduce the complexity of the calculations, increase the precision of the results, in addition to speeding up the designers' work, providing an intuitive interface that uses fundamental data about the vessel to produce the results. To confirm the tool's efficiency, a case study was conducted with a YD-40 vessel, the same as in the book of Larsson e Eliasson (2000), and demonstrated good results. The capacity of the solution created to improve the design process in naval engineering is evident, contributing to the construction of safer vessels that are consistent with the practical demands of the segment.

Keywords: Rig. Computational tool. Sailing vessels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da mastreação do tipo Sloop.	18
Figura 2 – Ilustração da mastreação do tipo Cutter.	19
Figura 3 – Ilustração da mastreação do tipo Ketch.	19
Figura 4 – Ilustração da mastreação do tipo Schooner.	20
Figura 5 – Ilustração da mastreação do tipo Yawl.	21
Figura 6 – Definições das distâncias das principais velas de mastreação. . . .	22
Figura 7 – Aplicação de Cruzeta.	24
Figura 8 – Vela de Proa.	26
Figura 9 – Componentes das Velas.	27
Figura 10 – Estaiamento de Proa e de Popa.	29
Figura 11 – Estaiamento com Cruzetas e Multiestaiamento.	30
Figura 12 – Estaiamento em Diamante.	30
Figura 13 – Estaiamento de Mastro de Topo e de Mastro Fracionado.	31
Figura 14 – Forças principais atuantes nos brandais.	33
Figura 15 – Forças secundárias atuantes nos brandais.	34
Figura 16 – Estruturação dos Mastros.	35
Figura 17 – Forças Atuantes nos Brandais para Mastro tipo F-0.	36
Figura 18 – Forças Atuantes nos Brandais para Mastro Tipo F-1 e M-1.	37
Figura 19 – Forças Atuantes nos Brandais para Mastro Tipo F-2 e M-2.	40
Figura 20 – Aparelhamentos de Topo de Mastro.	41
Figura 21 – Aparelhamentos de Mastro Fracionado.	42
Figura 22 – Momento de Inércia Transversal.	44
Figura 23 – Módulo da Seção do Topo do Mastro.	47
Figura 24 – Retranca.	48
Figura 25 – Cruzeta.	49
Figura 26 – Redução do Módulo de Seção.	50
Figura 27 – Fator de estaiamento.	54
Figura 28 – Catálogo de mastros e retrancas.	56
Figura 29 – Catálogo de fuzis e parafusos.	57
Figura 30 – Desenho Técnico YD-40.	59
Figura 31 – Definição da embarcação.	60
Figura 32 – Forças no Brandais.	61
Figura 33 – Forças nos Estais.	61
Figura 34 – Dimensionamento Transversal do Mastro.	62
Figura 35 – Dimensionamento Longitudinal do Mastro.	62
Figura 36 – Topo do Mastro Fracionado.	63

Figura 37 – Retranca.	63
Figura 38 – Primeira Cruzeta.	63
Figura 39 – Segunda Cruzeta.	64
Figura 40 – Redução do Módulo de Seção do Mastro.	64
Figura 41 – Seleção dos Aparelhos de Mastreação.	65
Figura 42 – Dados iniciais da embarcação.	71
Figura 43 – Dados iniciais dos aparelhos de mastreação.	72
Figura 44 – Força nos brandais.	72
Figura 45 – Resultados das forças nos brandais.	73
Figura 46 – Força nos estais.	73
Figura 47 – Dimensionamento longitudinal do mastro	73
Figura 48 – Dimensionamento transversal do mastro	74
Figura 49 – Topo do mastro fracionado.	74
Figura 50 – Retranca.	74
Figura 51 – Cruzeta	75
Figura 52 – Redução do módulo da seção do mastro.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensionamento de F_1, F_2, F_3	33
Tabela 2 – Fator do Painei (k_1) para diferentes tipos de mastreação.	44
Tabela 3 – Fator de Estaiamento (k_2) para diferentes tipos de estaiamento e mastos.	46
Tabela 4 – Características Principais da Embarcação.	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	<i>NORDIC BOAT STANDARD - NBS</i>	16
2.2	Definição de embarcação movida a vela	17
2.2.1	Tipos de Mastreação	17
2.2.1.1	Sloop	17
2.2.1.2	Cutter	18
2.2.1.3	Ketch	19
2.2.1.4	Schooner	20
2.2.1.5	Yawl	20
2.3	Componentes Estruturais da Mastreação	21
2.3.1	O Mastro	22
2.3.2	Cruzetas, Estais e Retrancas	23
2.3.2.1	Cruzetas	23
2.3.2.2	Estais	24
2.3.2.3	Retranca	24
2.3.3	As Velas do Veleiro	25
2.3.3.1	Tipos de Velas	25
2.3.3.1.1	<i>Velas de Proa</i>	25
2.3.3.1.2	<i>Vela Mestra</i>	26
2.3.4	Componentes das Velas	26
2.3.5	Fuzis e Parafusos	27
2.3.5.1	Fuzis	28
2.3.5.2	Parafusos	28
2.4	Tipos de estaiamento	28
2.4.1	Estaiamento de Proa e de Popa	28
2.4.2	Estaiamento Lateral	29
2.4.3	Estaiamento com Cruzetas e Multiestaiamento	29
2.4.4	Estaiamento em Diamante	29
2.4.5	Estaiamento de Mastro Fracionado e de Topo	31
2.5	Forças atuantes nos componentes de mastreação	31
2.5.1	Forças Atuantes nos Brandais	31

2.5.1.1	Forças Atuantes nos Brandais para Mastro tipo F-0	35
2.5.1.2	Forças Atuantes nos Brandais para Mastro Tipo F-1 e M-1	36
2.5.1.3	Forças Atuantes nos Brandais para Mastro Tipo F-2 e M-2	38
2.5.2	Forças Atuantes nos Estais	40
2.5.2.1	Aparelhamentos de Topo de Mastro	40
2.5.2.2	Aparelhamentos de Mastro Fracionado	41
2.6	Dimensionamento dos componentes de mastreação	43
2.6.1	Momento de Inércia	43
2.6.2	Momento de Inércia Transversal	44
2.6.3	Momento de Inércia Longitudinal	45
2.6.4	Módulo da Seção do Topo do Mastro	46
2.6.5	Retranca	47
2.6.6	Cruzeta	48
2.6.6.1	Momento de Inércia	49
2.6.6.2	Módulo da Seção	49
2.6.6.3	Redução do Módulo de Seção	50
3	METODOLOGIA	51
3.1	Revisão Bibliográfica	51
3.2	Desenvolvimento da ferramenta	51
3.2.1	Definição da Embarcação	51
3.2.2	Forças nos Brandais	52
3.2.3	Forças no Estais	52
3.2.4	Dimensionamento Transversal do Mastro	53
3.2.5	Dimensionamento Longitudinal do Mastro	53
3.2.6	Topo do Mastro Fracionado	54
3.2.7	Retranca	54
3.2.8	Cruzeta	55
3.2.9	Redução do Módulo de Seção	55
3.2.10	Seleção do Mastro	55
3.3	Validação da ferramenta	57
4	RESULTADOS	58
4.1	Validação da ferramenta: Estudo de Caso do Veleiro YD-40	58
4.1.1	Validação dos Cálculos	58
4.1.2	Características Principais da Embarcação	58
4.1.3	Utilização da Ferramenta	60
4.1.3.1	Definição da Embarcação	60
4.1.3.1.1	<i>Forças nos brandais</i>	<i>60</i>
4.1.3.1.2	<i>Forças nos estais</i>	<i>61</i>

4.1.3.1.3	<i>Dimensionamento Transversal do Mastro</i>	62
4.1.3.1.4	<i>Dimensionamento Longitudinal do Mastro</i>	62
4.1.3.1.5	<i>Topo do Mastro Fracionado</i>	62
4.1.3.1.6	<i>Retranca</i>	63
4.1.3.1.7	<i>Cruzeta</i>	63
4.1.3.1.8	<i>Redução do Módulo de Seção do Mastro</i>	64
4.1.3.1.9	<i>Seleção dos Aparelhos de Mastreação</i>	64
4.1.4	Limitações da Ferramenta	65
5	CONCLUSÃO	66
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTURO	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento da mastreação em embarcações a vela é um elemento essencial para garantir segurança e bom desempenho durante a navegação. Composta por estruturas como mastros, estais, cruzetas e retrancas, ela não apenas sustenta as velas, mas desempenha um papel importante na interação com as forças aerodinâmicas e hidrodinâmicas que atuam sobre o barco. Essa interação influencia diretamente a estabilidade, a eficiência e o controle da embarcação, tornando indispensável que seu projeto seja realizado com exatidão e baseado em fundamentos sólidos, explica Larsson e Eliasson (2000).

O processo de projetar a mastreação, tradicionalmente, exige cálculos e bastante conhecimento de engenharia naval. Ele considera forças como compressão, torção e flexão, todas influenciadas por variáveis como a intensidade e a direção do vento, o ângulo das velas e características estruturais do barco, como peso, área vélica e dimensões do casco. Segundo Perry (2008), a complexidade técnica desse processo pode representar desafios importantes para projetistas, especialmente quando não se dispõe de ferramentas que facilitem a análise ou ampla experiência na área. Essa lacuna pode levar a projetos a serem menos eficientes ou até mesmo menos seguros.

Portanto, a automatização dos cálculos aparece como uma solução importante. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma planilha computacional para simplificar o dimensionamento de componentes da mastreação, como forças nos estais, rigidez estrutural e momentos de adernamento. A ferramenta foi desenvolvida com o intuito de automatizar o memorial de cálculo da obra de Larsson e Eliasson (2000), aumentar a precisão dos resultados, além de agilizar o trabalho dos projetistas. Sua interface foi desenhada para ser intuitiva, garantindo fácil uso, mesmo em etapas iniciais de projeto.

A fundamentação teórica deste estudo foi construída com base na obra de Larsson, Eliasson e Orych (2022), que fornecem uma análise dos aspectos estruturais e funcionais do design de mastreação. Entre os tópicos abordados estão os modelos de mastreação utilizados em veleiros, os componentes estruturais das mastreação, e o papel de elementos como cruzetas e estais na distribuição de cargas e na estabilidade estrutural.

Para validar a eficácia da ferramenta, foi realizado o estudo de caso com uma embarcação, o veleiro YD-40. Esse estudo demonstra que a planilha não apenas agiliza o processo de projeto, quando comparado a realização do memorial de cálculo de modo manual, mas também oferece bons resultados, reduzindo a possibilidade de erros e aumentando a confiabilidade do modelo.

Além de atender às necessidades atuais da engenharia naval, a ferramenta

desenvolvida tem potencial para ser expandida e aprimorada no futuro, acompanhando os avanços tecnológicos e as demandas crescentes do setor. Com isso, espera-se que este estudo contribua para o desenvolvimento de embarcações mais seguras, eficientes e alinhadas às melhores práticas da engenharia naval.

1.1 OBJETIVOS

Com o intuito de reduzir o tempo gasto com o dimensionamento da mastreação em veleiros, propõe-se o seguinte objetivo.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma planilha computacional para dimensionamento da mastreação de embarcações a vela baseado no modelo de Larsson e Eliasson (2000).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Automatizar os cálculos de momento de inércia, forças nos estais e brandais e seleção de aparelhos de mastreação;
- Desenvolver uma interface de fácil uso a fim de facilitar o trabalho dos projetistas e engenheiros;
- Trazer resultados através de dados básicos das embarcações;
- Aplicar um teste de validação da utilização da ferramenta para o dimensionamento da embarcação YD-40.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aparelhos de mastreação, a serem especificados ao longo do texto, são componentes que garantem o funcionamento eficiente do veleiro. Kimball (2010) explica que o mastro atua como a estrutura vertical principal. Os estais são responsáveis por sustentar o mastro. A retranca, posicionada horizontalmente, fornece suporte à vela principal e facilita o controle de sua orientação. Perry (2008) ressalta que as cruzetas aumentam a resistência estrutural do mastro. Esses componentes trabalham em conjunto para transformar a energia do vento em propulsão, gerando segurança e desempenho durante a operação do veleiro.

Larsson, Eliasson e Orych (2022) exploram as principais partes para o projeto de uma embarcação movida a vela. Neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta computacional, projetada para realizar o dimensionamento e seleção dos aparelhos de mastreação.

2.1 *NORDIC BOAT STANDARD - NBS*

De acordo com a própria Nordic Boat Standard Committee (1990), a Norma Nórdica para Embarcação (*Nordic Boat Standard - NBS*) é um conjunto de normas e diretrizes desenvolvidas pelas administrações marítimas da Dinamarca, Finlândia, Islândia, Noruega e Suécia, em cooperação com a entidade classificadora Det Norske Veritas (DNV), com o intuito de estabelecer requisitos de segurança e certificação para embarcações comerciais de até 15 metros.

A NBS padroniza as exigências regulatórias, permitindo a aprovação recíproca das embarcações e reduzindo barreiras burocráticas, o que facilita o comércio marítimo. Além disso, assegura que as embarcações sejam construídas e operadas conforme diretrizes rigorosas de segurança, prevenindo acidentes e minimizando riscos ambientais. A norma abrange aspectos essenciais da construção naval, como estabilidade, capacidade de carga, subdivisão estanque, instalações elétricas e sistemas de propulsão, garantindo que embarcações comerciais menores sejam projetadas para enfrentar condições marítimas adversas, aumentando a segurança da tripulação e dos passageiros.

Existem outras agências regulamentadoras, como a Lloyd's Register e a *American Bureau of Shipping - ABS*, no entanto, a obra *Principles of Yacht Design* utilizou a NBS como base, visto que é um dos poucos padrões de arqueação de embarcações que considera o aparelho vélico.

2.2 DEFINIÇÃO DE EMBARCAÇÃO MOVIDA A VELA

Uma embarcação movida a vela se trata de um projeto naval em que o aproveitamento da força do vento é utilizado como propulsão principal para deslocar a embarcação. Muitas vezes denominadas de veleiros, essas embarcações, utilizam as velas para transformar a força do vento em movimento. Para Larsson, Eliasson e Orych (2022), o projeto de um veleiro envolve uma complexa interação entre a hidrodinâmica do casco e a aerodinâmica das velas.

Para Kimball (2010) a posição e o ajuste adequado das velas permitem que o veleiro navegue em diferentes direções em relação ao vento, o que lhe confere versatilidade. Sendo assim, tanto o desenho de casco quanto a configuração das velas determinam o comportamento hidrodinâmico e aerodinâmico de uma embarcação desse tipo.

As velas são o coração de um veleiro, desempenhando um papel essencial tanto na propulsão quanto na estabilidade durante a navegação. Por isso, dimensionar corretamente as estruturas que as sustentam, como mastros, estais, retrancas e cruzetas é indispensável para garantir segurança e eficiência. Esses componentes trabalham juntos para suportar as forças do vento e transformar essa energia em movimento, ao mesmo tempo em que influenciam diretamente o desempenho da embarcação.

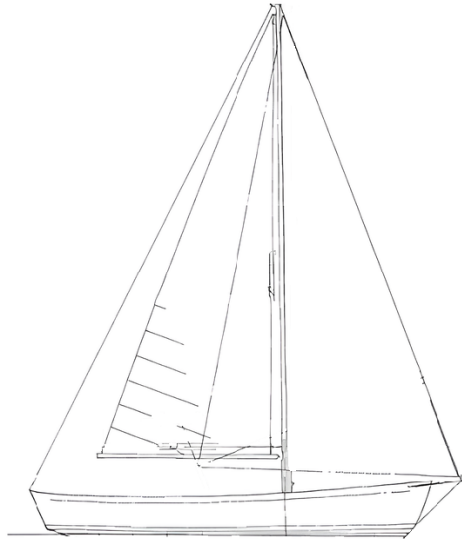
2.2.1 Tipos de Mastreação

A mastreação de um veleiro é um elemento fundamental do projeto, visto que determina seu desempenho, manobrabilidade e adaptação às condições de atuação do vento. Há diversas configurações de mastreação, cada qual projetada para atender a requisitos específicos do projeto.

2.2.1.1 *Sloop*

O sloop é uma das configurações de mastreação mais populares em veleiros modernos, tanto em embarcações de lazer quanto de competição. Esse arranjo possui como características principais a existência de um único mastro que suporta duas velas principais: a vela mestra e a genoa, conforme mostra a Figura 1. Essa configuração oferece simplicidade e eficiência, sendo eficaz em condições de vento moderado. Segundo Larsson, Eliasson e Orych (2022), o sloop é amplamente favorecido devido à sua facilidade de operação, além do bom desempenho em ventos contrários.

Figura 1 – Ilustração da mastreação do tipo Sloop.

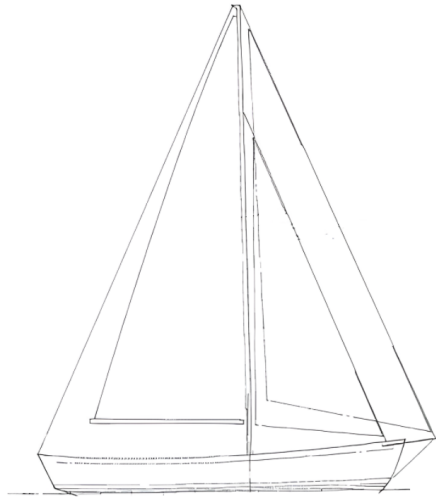


Fonte: Adaptado de Perry (2008)

2.2.1.2 Cutter

A mastreação do tipo Cutter apresenta um mastro único com uma vela mestra e dois estais de proa, um sendo o estai de proa principal e o outro geralmente é um estai interno, mostrado na Figura 2, possibilitando a utilização de duas velas de proa, sendo geralmente uma genoa acompanhada de uma vela de trabalho auxiliar. Essa configuração oferece uma maior flexibilidade na manipulação da área vélica, sendo especialmente vantajoso em navegações de longa distância e em condições de vento intenso. Perry (2008) destaca que é amplamente utilizada em embarcações de cruzeiro oceânico, devido à sua robustez, versatilidade e eficiência em condições adversas.

Figura 2 – Ilustração da mastreação do tipo Cutter.

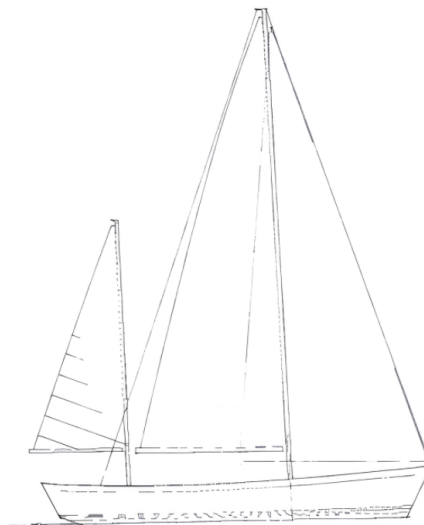


Fonte: Adaptado de Perry (2008)

2.2.1.3 Ketch

A Ketch é uma configuração que conta com dois mastros, como visto na Figura 3, sendo o mastro principal localizado à vante e o mastro de mezena, sendo este menor que o principal e localizado a ré. Esse arranjo permite uma distribuição mais equilibrada da área vélica, reduzindo o esforço nas velas principais, facilitando a manobra em condição de vento forte. Segundo Spectre (1997), o ketch é comum em embarcações maiores, em que a estabilidade é uma prioridade de projeto.

Figura 3 – Ilustração da mastreação do tipo Ketch.

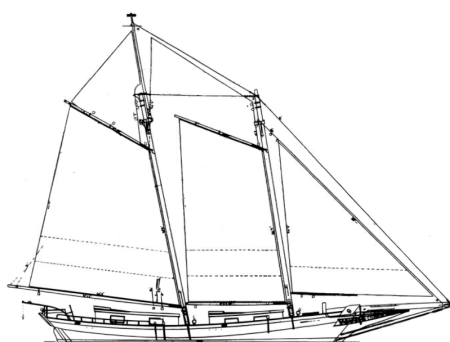


Fonte: Adaptado de Perry (2008)

2.2.1.4 Schooner

A configuração schooner, ou de escuna, é caracterizada por dois ou mais mastros, mostrado na Figura 4, em que geralmente o mastro a ré, possui altura igual ou maior que o mastro à vante. Esse arranjo, favorece a estabilidade e permite uma maior flexibilidade na disposição das velas, sendo frequentemente utilizado para embarcações maiores, em navegações de longa distância. Para Larsson, Eliasson e Orych (2022), a escuna valoriza a eficiência no controle da embarcação e a adaptação às diversas situações climáticas.

Figura 4 – Ilustração da mastreação do tipo Schooner.

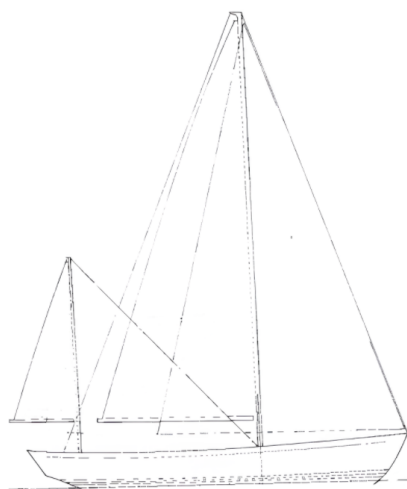


Fonte: Adaptado de Spectre (1997)

2.2.1.5 Yawl

O yawl é um arranjo caracterizado por dois mastros, o principal localizado à vante, e o mastro de mezena, menor que o principal e posicionado atrás do leme, mostrados na Figura 5. Nessa configuração, o mastro de mezena contribui mais para o equilíbrio da embarcação e menos para a propulsão. Por se tratar de um modelo mais estável e com uma maior facilidade de manobra em condições diversas de vento é tradicionalmente utilizado para veleiro de lazer. Segundo Larsson, Eliasson e Orych (2022), o yawl é principalmente utilizado em embarcações menores ou de médio porte, pois a mezena pode ser utilizada como vela de equilíbrio ou para melhorar a manobrabilidade sem adicionar complexidade excessiva no manejo das velas.

Figura 5 – Ilustração da mastreação do tipo Yawl.

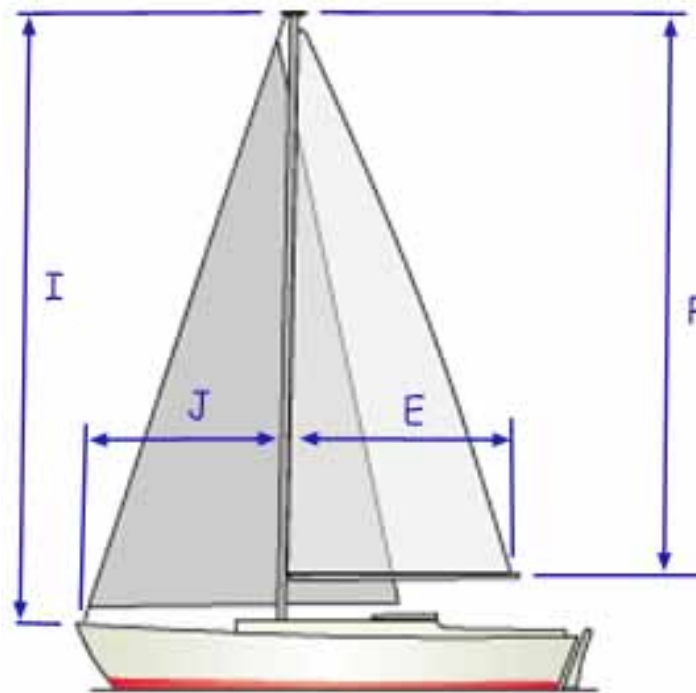


Fonte: Adaptado de Perry (2008)

2.3 COMPONENTES ESTRUTURAIS DA MASTREAÇÃO

Nessa seção são descritos os componentes estruturais da mastreação. A Figura 6 mostra cada um deles e em seguida estão as especificações de cada distância representada.

Figura 6 – Definições das distâncias das principais velas de mastreação.



Fonte: McClary (2024)

- I: É a distância na vertical entre o convés e a adriça da vela de proa;
- J: É a distância na horizontal entre o fuzil de fixação do estai de proa no convés até a parte frontal do mastro;
- E: É a distância na horizontal entre a parte traseira do mastro e o ponto mais à popa da retranca, onde a vela principal pode ser fixada;
- P: É a distância na vertical entre o ponto de fixação da retranca no mastro e o ponto mais alto onde a vela principal pode ser içada.

2.3.1 O Mastro

Na mastreação de um veleiro, o mastro é o elemento estrutural essencial, visto que exerce influência direta na estabilidade, desempenho e segurança do veleiro, é o componente responsável pelo suporte das velas e sujeito a intensas forças de compressão, torção e flexão, principalmente ocasionadas pela intensa variação dos ventos e do ângulo das velas. Segundo Larsson, Eliasson e Orych (2022) o mastro é projetado para suportar forças significativas que agem sobre as velas e, ao mesmo tempo, precisa ser suficientemente leve para não comprometer a estabilidade da embarcação.

Considerando que o mastro deve resistir às forças que agem sobre as velas e que deve ser suficientemente leve, a seleção de seu material é fundamental para

garantir a durabilidade e resistência do componente. Para Perry (2008) o alumínio tem sido amplamente utilizado em mastros devido à sua resistência à corrosão e ao seu peso relativamente baixo, enquanto a fibra de carbono proporciona maior rigidez com um peso ainda menor.

Com relação à eficiência da embarcação, Kimball (2010) aponta que o perfil do mastro deve ser otimizado para reduzir o arrasto, especialmente em embarcações de corrida, onde o desempenho em alta velocidade é prioritário, sendo necessário otimizar o formato do mastro para minimizar o arrasto aerodinâmico e melhorar a eficiência de navegação.

Para manter o mastro em posição e suportar as tensões, ele é ancorado ao casco por meio de componentes como adriças, estais e brandais. Esses elementos auxiliam na rigidez estrutural, equilibrando a distribuição das forças. Larsson, Eliasson e Orych (2022) diz que o sistema de estais e brandais é essencial para proporcionar rigidez ao mastro e garantir que ele se mantenha estável em diferentes condições de vento.

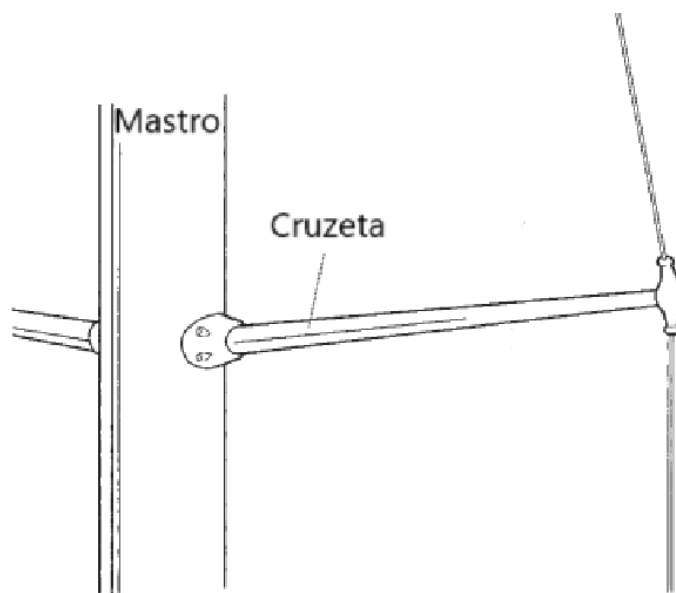
2.3.2 Cruzetas, Estais e Retrancas

As cruzetas, os estais e as retrancas são componentes importantes na estrutura dos veleiros, tendo como função principal garantir a estabilidade do mastro, influenciando diretamente o desempenho da embarcação. Perry (2008) destaca que esses componentes “estabilizam o mastro, prevenindo flexões excessivas e garantindo a integridade estrutural do sistema de velas”. Esta estabilização é causada pois distribuem as forças exercidas pelo vento de maneira uniforme, permitindo que o mastro permaneça na posição ideal, mesmo em condições de navegação adversas.

2.3.2.1 Cruzetas

As cruzetas, mostradas na Figura 7, são os componentes que podem ser instalados transversalmente ao longo do mastro, e têm a função de sustentar os estais laterais, que, ao formarem um ângulo de apoio, aumentam a estabilidade lateral da estrutura. De acordo com Larsson, Eliasson e Orych (2022) elas têm a função de proporcionar sustentação adicional ao mastro, além de reduzir as forças de flexão lateral e contribuir para a resistência do sistema como um todo. Projetar corretamente as cruzetas é primordial para conferir a robustez necessária ao mastro, permitindo que ele suporte tensões elevadas e maximizando a eficiência aerodinâmica das velas.

Figura 7 – Aplicação de Cruzeta.



Fonte: Adaptado de Forum (2008)

2.3.2.2 Estais

Os estais são os cabos de sustentação do mastro que o conectam à proa, à popa e aos lados (brandais) do veleiro, e têm a função de manter o mastro na posição ideal para suportar as cargas das velas. Segundo Kimball (2010), "os estais são componentes essenciais para a estabilização longitudinal e lateral do mastro, garantindo sua posição ideal para resistir às pressões das velas e às variações de carga durante a navegação". Assim sendo fundamentais para que o mastro suporte as forças de compressão sem sofrer deformações.

Segundo Perry (2008), o ajuste preciso entre as cruzetas e os estais permite controlar a curvatura do mastro, sendo essa uma técnica importante em veleiros modernos para otimizar o desempenho aerodinâmico das velas. Esse controle das velas é crucial em competições, pois as mínimas variações no ajuste da estrutura podem resultar em vantagens em manter a vela de modo ideal para as diversas condições de vento.

2.3.2.3 Retranca

A retranca é uma peça estrutural essencial nos veleiros, desempenhando um papel fundamental no controle e na estabilidade das velas, com ênfase na vela principal. Instalada horizontalmente e fixada ao mastro, a retranca permite que o velejador ajuste o ângulo da vela principal para maximizar a eficiência da propulsão e o desempenho da embarcação sob diversas condições de navegação. Para Perry

(2008), a retranca é indispensável para manter a forma e a posição adequadas da vela principal, especialmente em situações de vento variável.

2.3.3 As Velas do Veleiro

As velas têm um papel central na navegação de um veleiro, visto que são responsáveis por converter a força do vento em propulsora. No entanto, para Perry (2008), elas não apenas definem a capacidade de velocidade de um barco, mas também impactam significativamente sua estabilidade e controle.

2.3.3.1 Tipos de Velas

As velas podem ser classificadas em dois grandes grupos, sendo as velas de proa e as velas principais. Cada uma delas tem suas funções na navegação e são explicadas a seguir.

2.3.3.1.1 Velas de Proa

Também conhecidas como genoa ou jib, são as velas posicionadas à vante do mastro e contribuem para a performance e manobrabilidade da embarcação, conforme mostra a Figura 8. Para Larsson, Eliasson e Orych (2022), sua principal função é otimizar o fluxo de ar em torno da vela principal, e indicam que criam um efeito de canalização do vento, melhorando a eficiência aerodinâmica, resultando em uma maior força propulsora. De acordo com isso, Kimball (2010) afirma que a interação entre as velas de proa e as velas principais reduz a turbulência, maximizando a utilização da energia disponível.

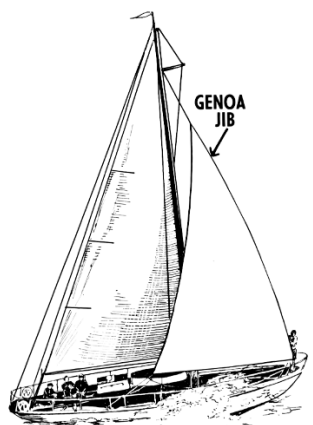
Além disso, são fundamentais para a realização de manobras, sendo assim, a vela de proa pode ser ajustada para otimizar o desempenho em diversas condições de vento, mesmo em ventos contrários à navegação, garantindo o maior controle da mesma. Para isso, existem dois principais modelos, sendo eles:

Genoa: vela de grande porte que se estende além do mastro.

Jib: vela de proa de menor porte. Segundo Kimball (2010), sua principal vantagem está na otimização do fluxo de vento para a vela mestra.

Para Edmunds (1998), dependendo da condição de vento, um tipo de vela de proa é mais indicado, por exemplo, o uso de velas maiores, como a genoa, é comum em condições de vento fraco, pois oferecem maior área para capturar o vento. No entanto, em ventos fortes, a utilização de jibs é preferível, pois garantem maior controle e estabilidade na embarcação.

Figura 8 – Vela de Proa.



Fonte: Foreman (2007)

2.3.3.1.2 Vela Mestra

A vela principal, também conhecida como grande, é a vela posicionada à ré do mastro. Segundo Edmunds (1998), entre suas principais características está a capacidade de proporcionar potência, já que quando ajustada corretamente, distribui as forças aerodinâmicas de modo uniforme, mantendo uma trajetória da embarcação sem grandes ajustes, visto que reduz o esforço no leme.

Além disso, pode ser ajustada de acordo com as condições de ventos em que a embarcação está exposta. De acordo com Larsson, Eliasson e Orych (2022), em condições de vento fraco, deve ser ajustada para maximizar a área exposta ao vento, capturando a maior quantidade possível de energia. No entanto, em ventos fortes, para proporcionar maior controle, o rizo da vela grande reduz a área exposta.

2.3.4 Componentes das Velas

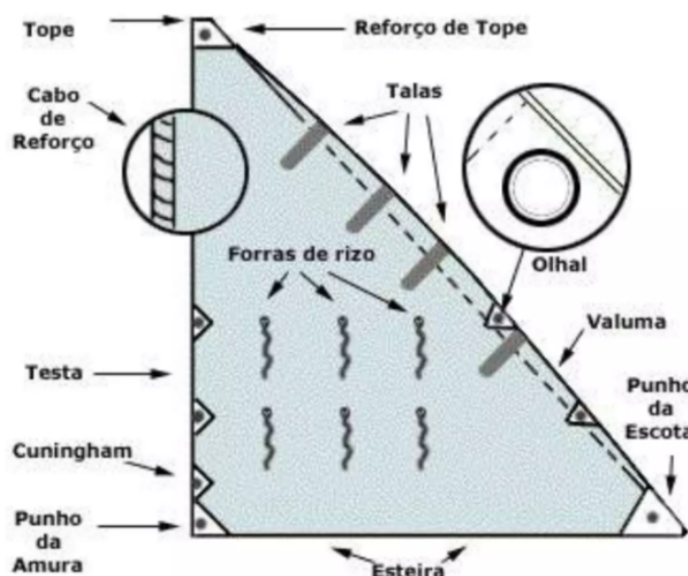
As velas são compostas por diversas partes, cada uma com funções específicas e fundamentais para o desempenho da embarcação. A valuma, por exemplo, é a borda traseira que vai do tope ao pé, delimitando a área onde o fluxo de ar se desprende. De acordo com Larsson, Eliasson e Orych (2022), ela faz a distribuição de forças. Já a esteira, ou pé da vela, é a borda inferior, frequentemente presa à retranca na principal. A testa, por sua vez, é a borda dianteira, conectada ao mastro ou ao estai, e tem como função garantir a formação do campo aerodinâmico na superfície. Na base frontal da vela, encontra-se o punho da amura, ponto onde a testa e a esteira se encontram e que fixa a base dianteira à embarcação. De acordo com Kimball (2010), o punho da amura influencia diretamente a curvatura da base e o ajuste do ângulo de ataque. Outro ponto importante é o punho da escota, localizado na base traseira, onde a esteira encontra a

valuma. Esse componente é fundamental no controle da forma da vela, pois transfere a força gerada para o sistema de escotas, permitindo ajustes no ângulo e na tensão.

A extremidade superior da vela é o tope, onde ela se conecta ao mastro por meio de adriças ou ganchos, suportando as maiores tensões geradas pelo vento. Kimball (2010) ressalta que o tope é fundamental para a eficiência do veleiro. Associado a ele, o reforço do tope tem como função aumentar sua resistência estrutural. O *cunningham* é outro elemento importante, sendo composto por olhais instalados na testa da vela grande, utilizados para tensioná-la. Além disso, as talas, reforços rígidos instalados ao longo da vela, auxiliam na manutenção de sua forma, enquanto as forras de rizo, constituídas por olhais e cabos, permitem a redução da área efetiva da vela em ventos fortes. Esse sistema possibilita dobrar e fixar a vela na retranca ou no mastro. Por fim, os olhais, que são anéis de reforço, são empregados para a passagem ou fixação de cabos e acessórios, garantindo maior praticidade e segurança no manejo da vela.

Nesse contexto, existem dois equipamentos de auxílio para o manejo das velas, a adriça é o cabo utilizado para içar ou abaixá-las, enquanto as escoltas são cabos que ajudam no controle das velas. A Figura 9 especifica os componentes citados.

Figura 9 – Componentes das Velas.



Fonte: National Defence, Canada (s.d.)

2.3.5 Fuzis e Parafusos

Além dos equipamentos principais da mastreação, os fuzis e parafusos desempenham funções essenciais na estrutura da embarcação a vela, visto que

são elementos críticos para a resistência estrutural e durabilidade dos sistemas da embarcação. De acordo com Larsson, Eliasson e Orych (2022), a correta integração de parafusos e fuzis é essencial para a distribuição eficiente de cargas e prevenção de falhas estruturais.

2.3.5.1 Fuzis

Os fuzis, de acordo com Larsson e Eliasson (2000) são os componentes que têm como principal função estabilizar e garantir a distribuição eficiente das cargas dinâmicas geradas pelo mastro e pelas velas ao longo do casco do veleiro. Além disso, desempenham papel fundamental na prevenção de falhas estruturais em condições adversas de navegação, como em ventos fortes ou marés agitadas, reforçando a importância do dimensionamento correto deste componente.

2.3.5.2 Parafusos

Os parafusos são os componentes de fixação, unindo diversos outros elementos como os fuzis, os mastros e os painéis. De acordo com Kimball (2010), a função principal do parafuso é garantir conexões firmes e confiáveis. Além disso, Hancock (2003) destaca que o subdimensionamento pode levar a falhas catastróficas, enquanto o superdimensionamento aumenta desnecessariamente o peso da estrutura, comprometendo o desempenho da embarcação.

2.4 TIPOS DE ESTAIAMENTO

O estaiamento se trata do conjunto de estais e componentes estruturais de uma embarcação que visam manter o mastro ereto e estável, tendo como objetivo suportar as forças provenientes dos ventos nas velas. Para manter a segurança e o desempenho da embarcação, o estaiamento correto é fundamental, pois mantém o mastro na posição correta e suporta as cargas de compressão atuantes, afirmam Larsson, Eliasson e Orych (2022).

2.4.1 Estaiamento de Proa e de Popa

Os estais de proa e popa são os componentes de ancoragem principais do mastro, visto que asseguram sua estabilidade contra movimentos longitudinais. O estai de proa (ou de genoa) é o cabo que conecta o mastro na área superior de fixação da vela à proa da embarcação e auxilia no tensionamento para frente, enquanto o estai de popa (ou *backstay*) conecta com a popa e tensiona o mastro para trás. Os estais longitudinais são importantes para impedir que o mastro se incline excessivamente,

proporcionando resistência contra a compressão gerada pela pressão das velas, explica Kimball (2010).

Figura 10 – Estaiamento de Proa e de Popa.



Fonte: Howell (s.d)

2.4.2 Estaiamento Lateral

Para Perry (2008), os estais laterais ou brandais, atuando em conjunto com as cruzetas, proporcionam à embarcação o suporte lateral essencial para a navegação. Esse tipo de estaiamento, ancorado em cruzetas, aumenta a eficiência estrutural e a resistência do mastro contra forças laterais, visto que estão posicionados em ambos os lados do mastro.

2.4.3 Estaiamento com Cruzetas e Multiestaiamento

Conforme Larsson, Eliasson e Orych (2022), o multiestaiamento com cruzetas adiciona rigidez ao mastro, ajustando sua curvatura conforme as condições de vento, otimizando o desempenho das velas. Isso ocorre porque a utilização das cruzetas permite a fixação dos brandais em múltiplas alturas, distribuindo as forças ao longo do mastro, pois diminuem o momento de aplicação das forças, assim incrementando a estabilidade do mesmo.

2.4.4 Estaiamento em Diamante

O estaiamento em diamante apresenta uma configuração em padrão losangular ao redor do mastro, proporcionando uma distribuição balanceada de forças que aumenta a sustentação das velas em condições de vento intenso. De acordo com Hancock (2003), "o estaiamento em diamante é eficaz na estabilização do mastro, mesmo em ângulos de navegação que representam desafios".

Figura 11 – Estaiamento com Cruzetas e Multiestaiamento.



Fonte: GMT Composites (2024)

Figura 12 – Estaiamento em Diamante.



Fonte: Clements (2009)

2.4.5 Estaiamento de Mastro Fracionado e de Topo

A posição em que o estai de fixação da vela de proa é conectado ao mastro define se o estaiamento é fracionado, no qual a fixação é em uma fração ou de topo. De acordo com Perry (2008), o estaiamento de topo possui uma configuração robusta e maior facilidade de ajuste, proporcionando uma distribuição equilibrada das forças ao longo do mastro, contribuindo para uma maior estabilidade e menor flexão durante ventos fortes. Enquanto isso, o estaiamento fracionado para Hancock (2003) oferece uma flexibilidade adicional pois permite um ajuste de tensão das velas de forma independente em diferentes alturas de mastro, otimizando a eficiência aerodinâmica.

Figura 13 – Estaiamento de Mastro de Topo e de Mastro Fracionado.



Fonte: Headifen (2024)

2.5 FORÇAS ATUANTES NOS COMPONENTES DE MASTREAÇÃO

Com o intuito de assegurar a integridade estrutural da embarcação, vê-se necessário calcular as forças atuantes sobre os componentes que integram o sistema de mastreação da embarcação, principalmente no mastro e nos estais. De acordo com (????), os estais e o mastro de um veleiro estão sujeitos a forças de compressão, tração e flexão cuja magnitude e direção variam conforme as condições de vento e ângulo da vela.

2.5.1 Forças Atuantes nos Brandais

As forças que atuam no brandais devem ser calculadas considerando 2 casos e utilizar o caso mais crítico. A Figura 14 explica o posicionamento destas forças na mastreação.

Caso 1: Força atuante exercida apenas pela vela de proa

Nesse caso, a força atuante é dada pela Equação 1:

$$T_1 = \frac{RM}{\alpha_1} \quad (1)$$

Onde RM é o momento de recuperação e α_1 é a altura da linha d'água até o ponto de fixação da vela de proa.

Caso 2: Força atuante exercida pela vela mestra com redução profunda

Nesse caso, a força atuante é dada pela Equação 2:

$$T_2 = \frac{RM}{\alpha_2} \quad (2)$$

Onde α_2 é a altura da linha d'água até o centro geométrico da vela mestra.

Essa força T_2 é distribuída entre a cabeça da vela (T_{head}) e o balão (T_{boom}). Sendo, respectivamente, dadas pelas Equações 3 e 4 :

$$T_{head} = 0,4 \cdot T_2 \quad (3)$$

$$T_{boom} = 0,33 \cdot T_2 \quad (4)$$

Quando T_{head} está entre dois brandais, a força é distribuída proporcionalmente entre os dois brandais, resultando em (T_{hu}) e (T_{hl}), dados, respectivamente, pelas Equações 5 e 6 :

$$T_{hu} = \frac{T_{head} \cdot d_1}{d_1 + d_2} \quad (5)$$

$$T_{hl} = \frac{T_{head} \cdot d_2}{d_1 + d_2} \quad (6)$$

Em que d_1 é a distância entre o ponto de aplicação de T_{head} e o ponto de amarração do brandal inferior e d_2 é a distância entre o ponto de aplicação de T_{head} e o ponto de amarração do brandal superior.

Já T_{boom} , localizada entre o convés e o brandal inferior, distribui a força pela retranca no mastro, (T_{bu}), dada pela Equação 7 :

$$T_{bu} = \frac{T_{boom} \cdot BD}{l_1} \quad (7)$$

Onde BD é a distância entre o convés e o ponto de fixação da retranca e l_1 é a distância entre o convés e o ponto de fixação da primeira cruzeta.

Com as forças T_1 e T_2 calculadas, é possível determinar as forças atuantes de acordo com a estrutura do mastro. Conforme mostra a Tabela 1.

O mastro pode ser estruturado de cinco modos diferentes, conforme mostrado na Figura 16, baseando-se na quantidade de cruzetas e no tipo de mastreação. Os tipos resultantes estão descritos a seguir.

Tabela 1 – Dimensionamento de F_1 , F_2 , F_3 .

Tipo de plataforma	Caso de Carga 1			Caso de Carga 2		
	F_1	F_2	F_3	F_1	F_2	F_3
F-0	T_1	0	0	$T_{hu} + T_{bu}$	0	0
M-1/F-1	0	0	T_1	$T_h + T_{bu}$	T_{hu}	0
M-2/F-2 (1)	0	0	T_1	T_{bu}	T_{hl}	T_{hu}
M-2/F-2 (2)	0	0	T_1	$T_{bu} + T_{hl}$	T_{hl}	T_{hu}

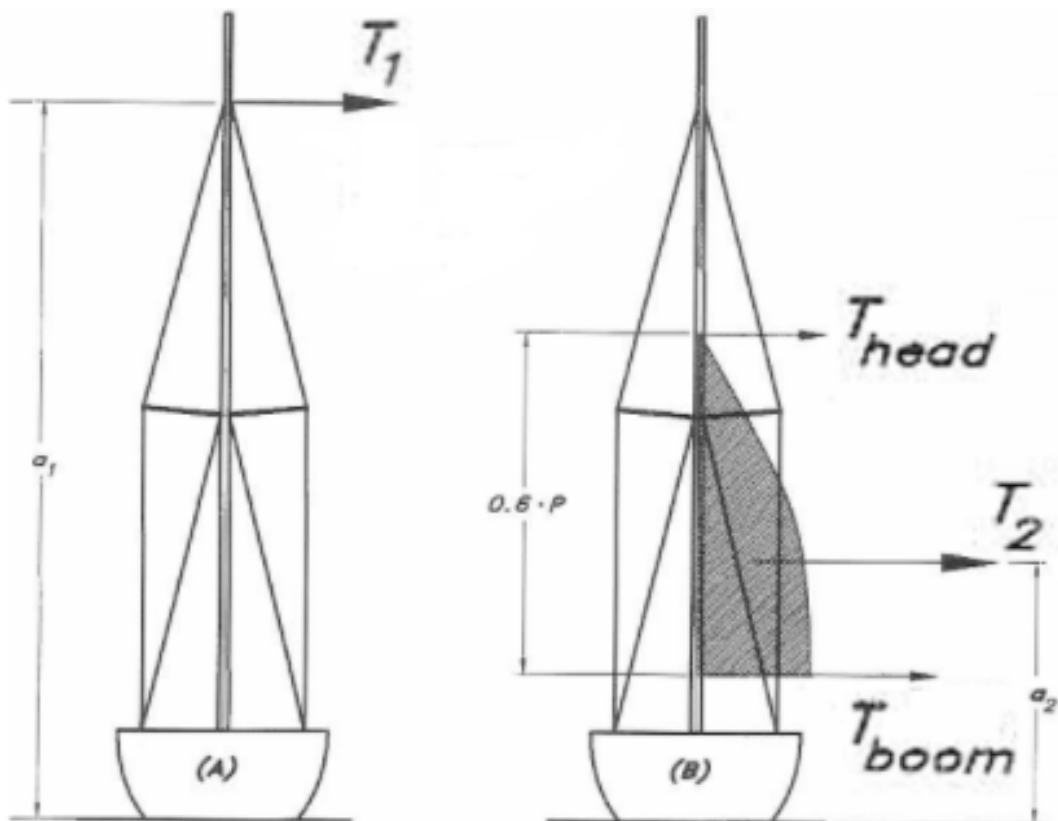
1) Se $BD + 0.6P > l_1 + l_2$

2) Se $BD + 0.6P < l_1 + l_2$

Fonte: Adaptado de Larsson e Eliasson (2000)

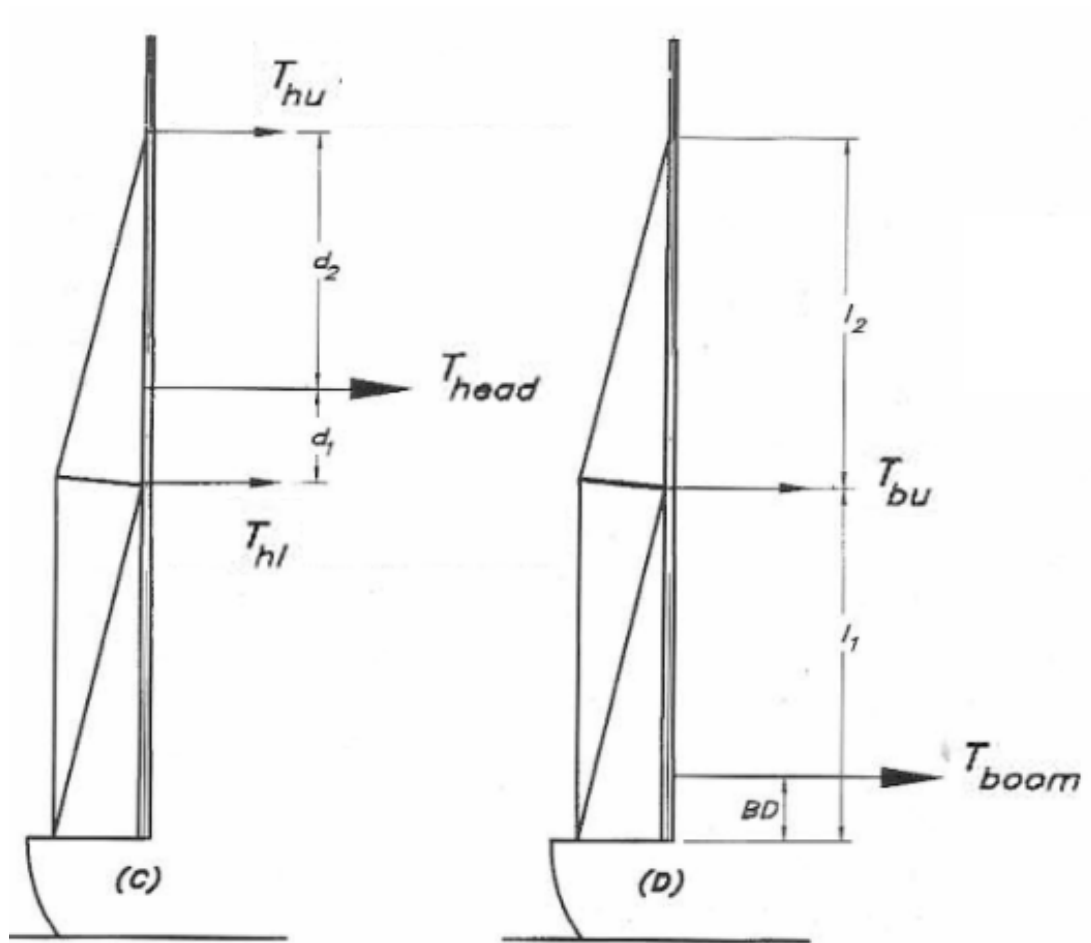
- **F-0**: Mastro de mastreação fracionada e nenhuma cruzeta;
- **F-1**: Mastro de mastreação fracionada e uma cruzeta;
- **M-1**: Mastro de mastreação de topo e uma cruzeta;
- **F-2**: Mastro de mastreação fracionada e duas cruzetas;
- **M-2**: Mastro de mastreação de topo e duas cruzetas.

Figura 14 – Forças principais atuantes nos brandais.



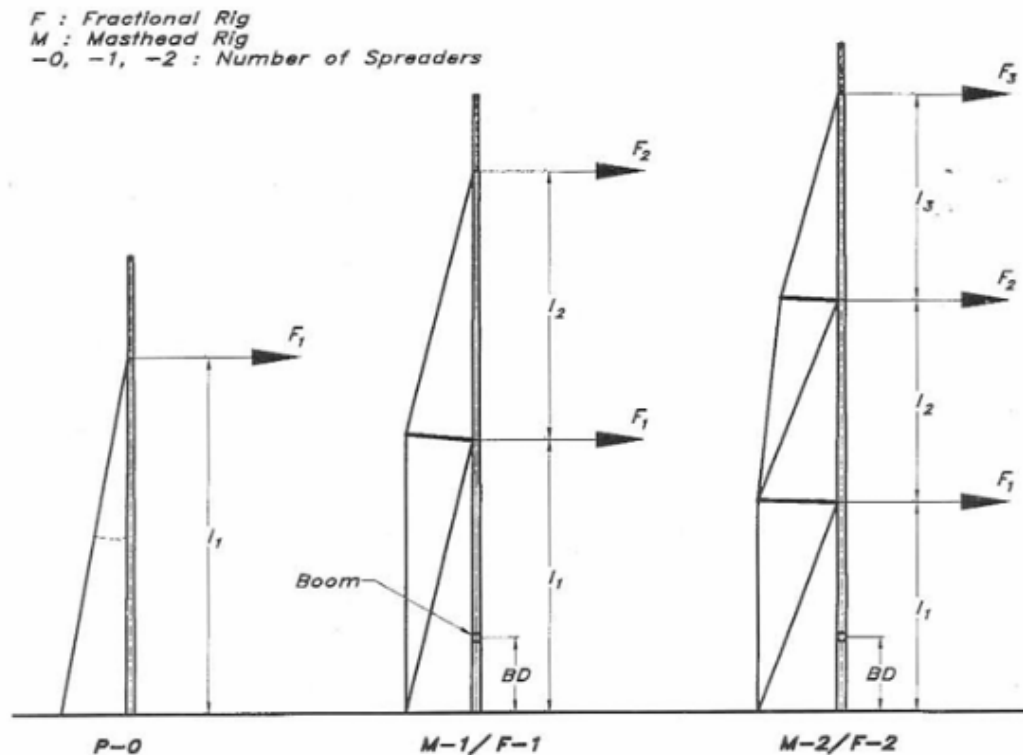
Fonte: Adaptado Larsson e Eliasson (2000)

Figura 15 – Forças secundárias atuantes nos brandais.



Fonte: Adaptado de Larsson e Eliasson (2000)

Figura 16 – Estruturação dos Mastros.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

Com as forças atuantes nos pontos de amarração dos brandais no mastro, e com o tipo de estrutura definido, é possível calcular as cargas nos brandais, tendo suas especificações para cada modelo.

2.5.1.1 Forças Atuantes nos Brandais para Mastro tipo F-0

Para os mastros que não possuem cruzetas, a tensão no brandal (D_1) é calculada pela Equação 8:

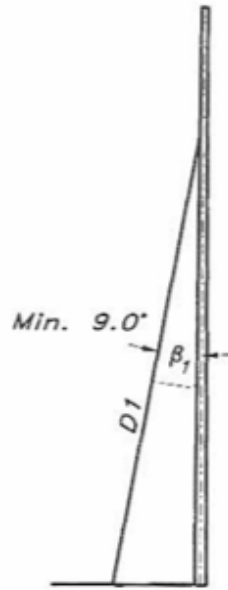
$$D_1 = \frac{F_1}{\sin(\beta_1)} \quad (8)$$

Onde F_1 é a força atuante no ponto de amarração do brandal no mastro e β_1 é o ângulo entre o brandal e a cruzeta, e não pode ser menor que $9,0^\circ$.

A carga de dimensionamento (PD_1) é calculada pela Equação 9:

$$PD_1 = 3,0 \cdot D_1 \quad (9)$$

Figura 17 – Forças Atuantes nos Brandais para Mastro tipo F-0.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

2.5.1.2 Forças Atuantes nos Brandais para Mastro Tipo F-1 e M-1

Para os mastros que possuem uma cruzeta, a tensão no brandal superior com o mastro (D_2) é calculada pela Equação 10:

$$D_2 = \frac{F_2}{\sin(\beta_2)} \quad (10)$$

Sendo F_2 a força atuante no ponto de amarração do brandal superior na segunda seção do mastro e β_2 é o ângulo entre o brandal fixado na segunda seção do mastro e a cruzeta.

A tensão do brandal superior na primeira seção (V_1) é dada pela Equação 11:

$$V_1 = \frac{F_2}{\cos(\gamma_1) \cdot \tan(\beta_2)} \quad (11)$$

Onde γ_1 é o ângulo que a parte da primeira seção do brandal superior faz com a transversal.

A tensão no brandal inferior (D_1) é dada pela Equação 12:

$$D_1 = \frac{F_1 + C_1}{\sin(\beta_1)} \quad (12)$$

Sendo F_1 a força atuante no ponto de amarração do brandal inferior na primeira seção do mastro, β_1 o ângulo entre o brandal fixado na primeira seção do mastro e a cruzeta e C_1 a componente horizontal da força F_2 , dada pela Equação 13:

$$C_1 = F_2 - V_1 \cdot \sin(\gamma_1) \quad (13)$$

As cargas dimensionantes são dadas pelas Equações 14,15, 16 e 17

- Carga de dimensionamento do brandal inferior em caso de brandal inferior único (PD_1):

$$PD_1 = 2,8 \cdot D_1 \quad (14)$$

- Carga de dimensionamento do brandal inferior em caso de brandal inferior duplo (PD_1):

$$PD_1 = 2,5 \cdot D_1 \quad (15)$$

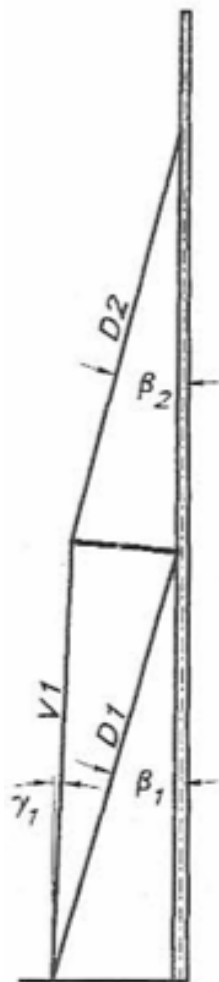
- Carga de dimensionamento do brandal superior (PD_2):

$$PD_2 = 3,0 \cdot D_2 \quad (16)$$

- Carga de dimensionamento do brandal superior na primeira seção do mastro (PV_1):

$$PV_1 = 3,0 \cdot V_1 \quad (17)$$

Figura 18 – Forças Atuantes nos Brandais para Mastro Tipo F-1 e M-1.



2.5.1.3 Forças Atuantes nos Brandais para Mastro Tipo F-2 e M-2

Para os mastros que possuem duas cruzetas, a tensão no brandal superior com o mastro (D_3) é calculada pela Equação 18:

$$D_3 = \frac{F_3}{\sin(\beta_3)} \quad (18)$$

Onde F_3 é a força atuante no ponto de amarração do brandal superior na terceira seção do mastro e β_3 é o ângulo entre o brandal fixado na terceira seção do mastro e na segunda cruzeta.

A tensão do brandal superior na segunda seção (V_2) é dada pela Equação 19:

$$V_2 = \frac{F_3}{\cos(\gamma_2) \cdot \tan(\beta_3)} \quad (19)$$

Sendo γ_2 o ângulo que a parte da segunda seção do brandal superior faz com a transversal.

A tensão no brandal intermediário (D_2) é dada pela Equação 20:

$$D_2 = \frac{F_2 + C_2}{\sin(\beta_2)} \quad (20)$$

Onde F_2 é a força atuante no ponto de amarração do brandal intermediário na segunda seção do mastro, β_2 é o ângulo entre o brandal fixado na segunda seção do mastro e a primeira cruzeta e C_2 é a componente horizontal da força F_3 , dada pela Equação 21:

$$C_2 = F_3 - V_2 \cdot \sin(\gamma_2) \quad (21)$$

A tensão do brandal intermediário na primeira seção (V_1) é dada pela Equação 22:

$$V_1 = \frac{F_2 + C_2}{\cos(\gamma_1) \cdot \tan(\beta_2) + \frac{V_2 \cdot \cos(\gamma_1)}{\cos(\gamma_2)}} \quad (22)$$

γ_1 é o ângulo que a parte da primeira seção do brandal intermediário faz com a transversal.

A tensão no brandal inferior (D_1) é dada pela Equação 23:

$$D_1 = \frac{F_1 + C_1}{\sin(\beta_1)} \quad (23)$$

Onde F_1 é a força atuante no ponto de amarração do brandal inferior na primeira seção do mastro, β_1 é o ângulo entre o brandal fixado na primeira seção do mastro e C_1 é a componente horizontal da força F_2 , dada pela Equação 24

$$C_1 = F_2 + C_2 + V_2 \cdot \sin(\gamma_2) - V_1 \cdot \sin(\gamma_1) \quad (24)$$

As cargas dimensionantes são dadas pelas Equações 25, 26, 27, 28, 29 e 30:

- Carga de dimensionamento do brandal inferior em caso de brandal inferior único (PD_1):

$$PD_1 = 2,8 \cdot D_1 \quad (25)$$

- Carga de dimensionamento do brandal inferior em caso de brandal inferior duplo (PD_1):

$$PD_1 = 2,5 \cdot D_1 \quad (26)$$

- Carga de dimensionamento do brandal intermediário (PD_2):

$$PD_2 = 2,3 \cdot D_2 \quad (27)$$

- Carga de dimensionamento do brandal superior (PD_3):

$$PD_3 = 3,0 \cdot D_3 \quad (28)$$

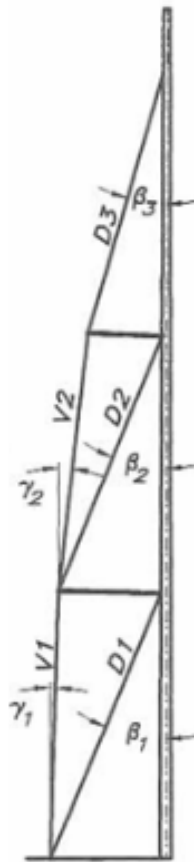
- Carga de dimensionamento do brandal intermediário na primeira seção do mastro (PV_1):

$$PV_1 = 3,2 \cdot V_1 \quad (29)$$

- Carga de dimensionamento do brandal superior na segunda seção do mastro (PV_2):

$$PV_2 = 3,0 \cdot V_2 \quad (30)$$

Figura 19 – Forças Atuantes nos Brandais para Mastro Tipo F-2 e M-2.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

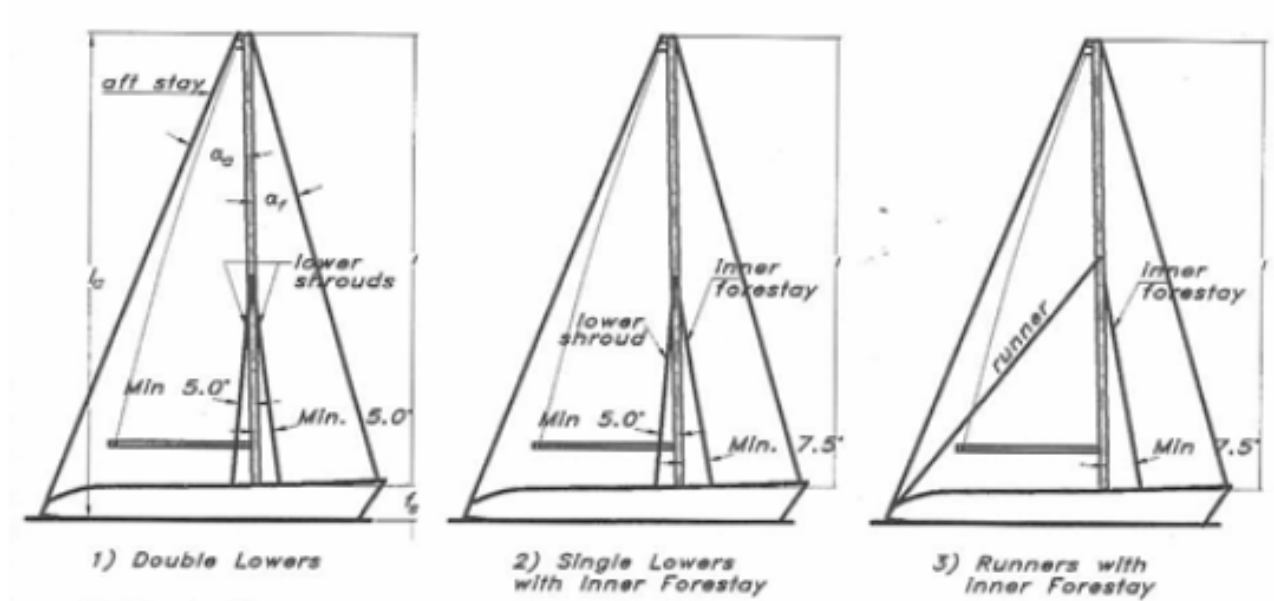
2.5.2 Forças Atuantes nos Estais

As forças atuantes nos estais são resultantes das cargas longitudinais geradas pelos dispositivos de tensionamento, como cabos, guinchos e sistemas hidráulicos. De acordo com a NBS, existem seis tipos de aparelhamento, subdivididos em duas classes: estaiamento de topo e estaiamento fracionado.

2.5.2.1 Aparelhamentos de Topo de Mastro

Os aparelhamentos de topo de mastro podem ser com estais inferiores duplos, com estais inferiores simples e com estai interno de proa ou com estais ajustáveis e estai interno de proa, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Aparelhamentos de Topo de Mastro.

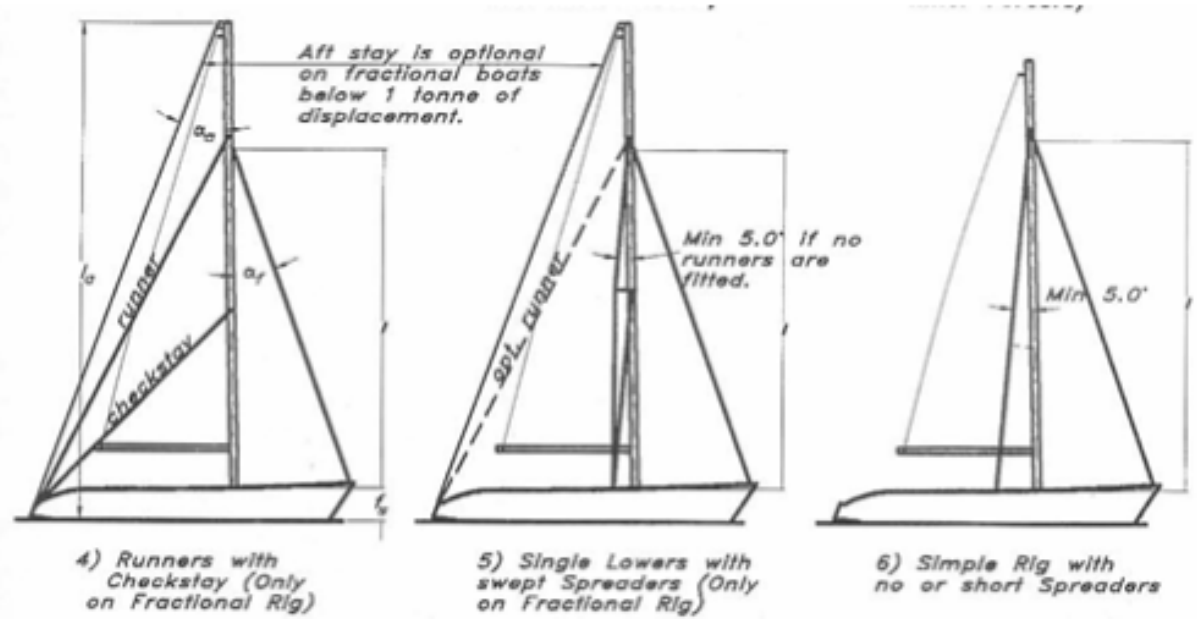


Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

2.5.2.2 Aparelhamentos de Mastro Fracionado

O aparelhamento de mastro fracionado, como mostrado na Figura 21, pode ser com estais ajustáveis com checkstay, com estais inferiores simples angulados para trás ou com estais simples.

Figura 21 – Aparelhamentos de Mastro Fracionado.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

O estai de proa deve ter uma resistência à ruptura (P_{fo}) dada pela Equação 31:

$$P_{fo} = \frac{15 \cdot RM}{l + f_s} \quad (31)$$

Onde l é a distância entre o convés e o ponto de fixação do estai de popa e f_s é a altura entre a linha d'água e o convés.

O forestay de proa deve ter uma resistência à ruptura (P_{fi}) dada pela Equação 32:

$$P_{fi} = \frac{12 \cdot RM}{l + f_s} \quad (32)$$

Para o estai de popa, a resistência à ruptura (P_a) depende do tipo de mastreação, sendo:

Mastreação de Topo

Dada pela Equação 33:

$$P_a = P_{fo} \cdot \sin(\alpha_f) \cdot \sin(\alpha_a) \quad (33)$$

Onde α_f é o ângulo entre o estai de proa e o mastro e α_a é o ângulo entre o estai de popa e o mastro.

Mastreação Fracionada

Dada pela Equação 34:

$$P_a = 2,8 \cdot RM \cdot l_a \cdot \sin(\alpha_a) \quad (34)$$

Onde l_a é a distância entre a linha d'água e o ponto de fixação do estai de popa.

Nos casos dimensionados acima, o fator de segurança já foi considerado. No entanto, quando se trata de tensores ajustáveis, recomenda-se aumentar os valores dimensionados em 25%.

2.6 DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DE MASTREAÇÃO

O dimensionamento do mastro baseia-se nos momentos de inércia transversal e transversal, visto que são parâmetros fundamentais para determinar a rigidez estrutural do mastro. De acordo com Larsson e Eliasson (2000), ambos os momentos de inércia trabalham em conjunto para manter a integridade estrutural e minimizar deformações no mastro.

2.6.1 Momento de Inércia

Segundo Hibbeler (2018) o momento de inércia é uma grandeza fundamental na análise estrutural e dinâmica de corpos rígidos, sendo utilizado para prever a resistência de elementos estruturais e a estabilidade de sistemas mecânicos. Esta propriedade geométrica de uma área é especialmente relevante no estudo da flexão de vigas e da estabilidade de placas submersas, permitindo o cálculo preciso de esforços e deslocamentos.

Os mastros geralmente possuem seções transversais retangulares ou elípticas, e o cálculo do momento de inércia é essencial para prever sua resposta as cargas de vento e tensões exercidas pelas velas e estais, afirma Larsson e Eliasson (2000). De acordo com Hibbeler (2018), o momento de inércia de uma seção (I) é definido matematicamente pela equação 35:

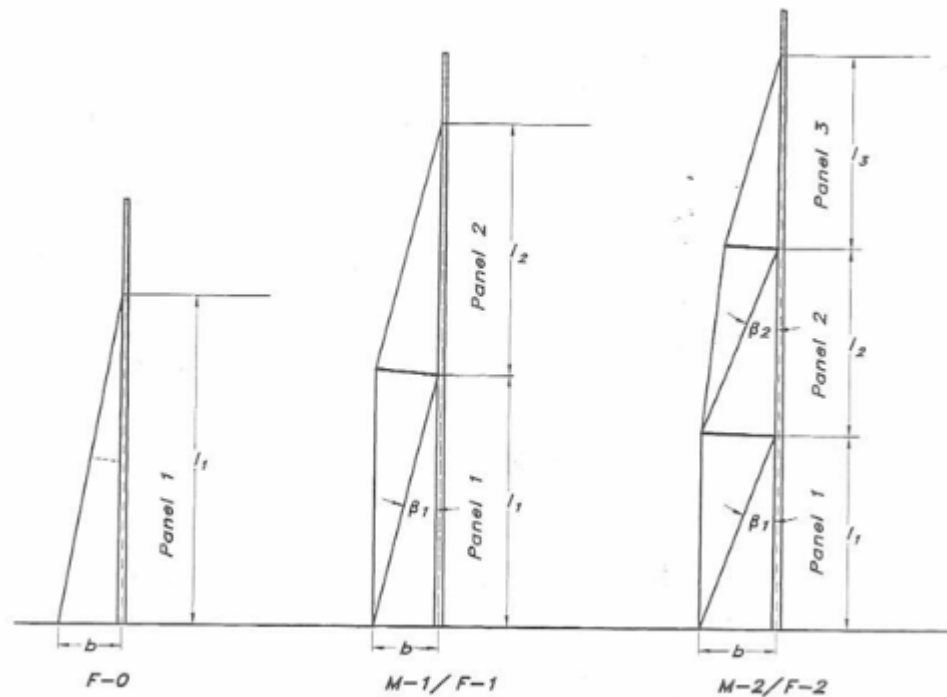
$$I = \int y^2 dA \quad (35)$$

Onde y é a distância do elemento diferencial de área (dA) ao eixo neutro da seção. Nos mastros, com o intuito de garantir a rigidez estrutural contra as forças externas, o momento de inércia pode ser analisado em duas direções principais: transversal e longitudinal.

2.6.2 Momento de Inércia Transversal

Segundo Larsson e Eliasson (2000), a tensão nos estais e nos brandais induz compressão no mastro. Para evitar que ele dobre ou quebre, é necessário que o mastro possua momento de inércia suficiente para suportar essas forças. O momento de inércia transversal tem como objetivo assegurar a rigidez do mastro contra os esforços realizados pelos brandais.

Figura 22 – Momento de Inércia Transversal.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

Tabela 2 – Fator do Painei (k_1) para diferentes tipos de mastreação.

Tipo de plataforma	Painei 1	Painei 2 & 3
F-0	$2.4 \cdot k_3$	—
F-0 short spr.	$1.6 \cdot k_3$	—
M-1	$2.5 \cdot k_3$	3.50
F-1	$2.4 \cdot k_3$	3.35
M-2	$2.7 \cdot k_3$	3.80
F-2	$2.6 \cdot k_3$	3.60

$m = 1$ para alumínio;
 $m = 7.25$ para madeira (Spruce);
 $m = \frac{70500}{E}$ para outros materiais.

Fonte: Adaptado de Larsson e Eliasson (2000)

O momento de inércia transversal (I_x) é dado pela Equação 36:

$$I_x = K_1 \cdot m \cdot PT \cdot l(n)^2 \quad (36)$$

Onde K_1 é o fator do painel, apresentado na Tabela 2, e depende do fator de base (k_3), sendo 1,35 para mastros apoiados no convés e 1,00 para mastros apoiados na quilha, $l(n)$ é a altura do painel e PT é a carga de projeto, dada pela Equação 37:

$$PT = \frac{1,5 \cdot RM}{b} \quad (37)$$

Onde RM é o momento de endireitamento e b é a distância de fixação do brandal na horizontal.

A carga de projeto é multiplicada por 1,5 devido aos fatores dinâmicos dos brandais.

Momento de Inércia do Painel 2

Para calcular o momento de inércia do painel 2, a carga de projeto tem um decréscimo dado pela Equação 38:

$$D_1 \cdot \cos(\beta_1) \quad (38)$$

Onde D_1 é a força no brandal inferior e β_1 é o ângulo entre o brandal inferior e a primeira seção do mastro.

Momento de Inércia do Painel 3

Para calcular o momento de inércia do painel 3, a carga de projeto tem um decréscimo dado pela Equação 39:

$$D_1 \cdot \cos(\beta_1) + D_2 \cdot \cos(\beta_2) \quad (39)$$

Onde D_1 é a força no brandal inferior, β_1 é o ângulo entre o brandal inferior e a primeira seção do mastro, D_2 é a força no brandal intermediário e β_2 é o ângulo entre o brandal intermediário e a segunda seção do mastro.

2.6.3 Momento de Inércia Longitudinal

Assim como no tópico anterior, é necessário que haja rigidez suficiente para que o mastro não dobre nem quebre. No entanto, neste caso, o momento de inércia longitudinal tem como função se opor às tensões criadas pelos estais de popa e de proa.

O momento de inércia longitudinal (I_y) é dado pela Equação 40:

$$I_y = k_2 \cdot k_3 \cdot m \cdot PT \cdot h^2 \quad (40)$$

Onde:

- k_2 é o fator de estaiamento, apresentado na Tabela 3;
- k_3 é o fator de base, sendo:
 - 1,35 para mastros apoiados no convés;
 - 1,00 para mastros apoiados na quilha.
- m é referente ao material, conforme Tabela 3;
- h é a altura acima do convés ou da superestrutura até o ponto de amarração do estai de proa;
- PT é a carga de projeto, dada pela Equação 41:

$$PT = \frac{1.5 \cdot RM}{b} \quad (41)$$

Tabela 3 – Fator de Estaiamento (k_2) para diferentes tipos de estaiamento e mastros.

Tipo de Estaiamento	F-0	M-1	F-1	M-2	F-2
1) Double Lowers	–	0.85	0.80	0.90	0.85
2) Single Lowers	0.80	0.75	0.85	0.80	–
3) Runners & i.f	–	0.80	0.85	–	0.80
4) Runners & c.s	–	1.00	0.95	0.90	0.90
5) Swept spreaders	–	–	1.00	–	0.95
6a) Short spreaders	1.05	–	–	–	–
6b) No spreaders	2.00	–	–	–	–

$$m = 1 \text{ para alumínio;}$$

$$m = 7.25 \text{ para madeira (Spruce);}$$

$$m = \frac{70500}{E} \text{ para outros materiais.}$$

Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

2.6.4 Módulo da Seção do Topo do Mastro

Quando se trata de mastros de estaiamento fracionado, a vela de proa não aplica força no topo do mastro. Segundo Larsson, Eliasson e Orych (2022), é possível reduzir o módulo de seção do mastro utilizando as seguintes fórmulas:

O módulo da seção na longitudinal (SM_x) é dado pela Equação 42:

$$SM_x = \frac{8 \cdot RM \cdot O_x}{P} \quad (42)$$

Sendo SM_x o módulo da seção na longitudinal, O_x a distância do ponto de amarração da vela principal até o ponto de fixação dos brandais superiores, RM o momento de endireitamento e P a carga de compressão.

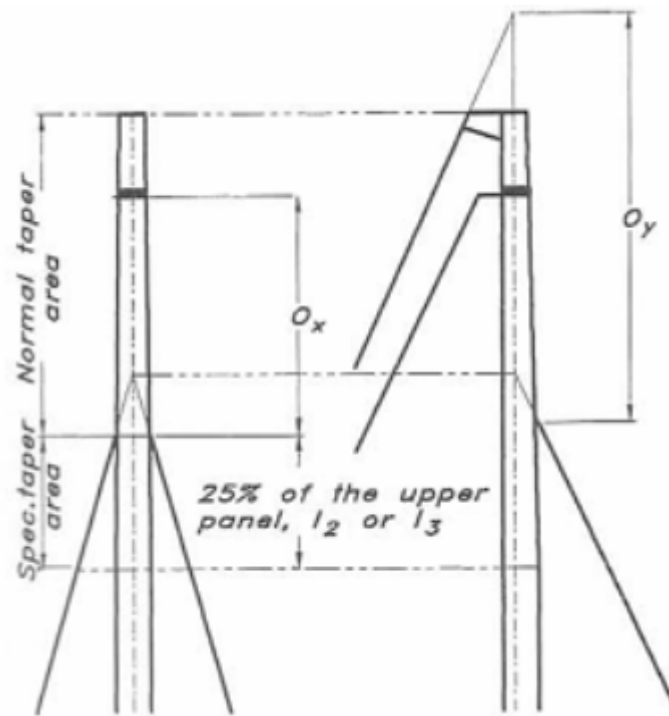
O módulo da seção na transversal (SM_y) é dado pela Equação 43:

$$SM_y = \frac{2100 \cdot RM \cdot O_y}{\sigma_{0,2} \cdot (O_y + h)} \quad (43)$$

Onde SM_y é o módulo da seção na transversal, O_y é a distância do ponto de amarração da vela principal até o ponto de fixação dos brandais superiores, h é o comprimento do mastro e $\sigma_{0,2}$ é a resistência ao escoamento do material.

Caso O_x seja menor que 6% do comprimento do mastro, a amarração é considerada de topo.

Figura 23 – Módulo da Seção do Topo do Mastro.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

2.6.5 Retranca

A principal função da retranca é garantir a estabilidade e a eficiência da vela mestra ao direcionar e controlar a pressão do vento. Segundo Larsson e Eliasson (2000), a retranca fornece suporte estrutural à vela, ajudando a maximizar a força propulsora gerada.

Para garantir a integridade estrutural da retranca, é necessário realizar seu dimensionamento baseado no momento de adriçamento, considerando um valor mínimo de força de 1000N. O pescoço de ganso é a conexão entre a retranca e o mastro e deve suportar as forças transmitidas pela retranca. Essas forças são descritas da seguinte maneira:

Força Vertical (F_v)

A força vertical é dada pela Equação 44:

$$F_v = \frac{0,5 \cdot RM \cdot E}{HA \cdot d_1} \quad (44)$$

Onde d_1 é a distância entre o ponto de fixação do burro na retranca e o mastro e HA é a distância entre a linha d'água e o centro de atuação das forças na vela.

Força Horizontal (F_h)

A força horizontal é dada pela Equação 45:

$$F_h = \frac{0,5 \cdot RM \cdot E}{HA \cdot d_2} \quad (45)$$

Sendo d_2 a distância entre o ponto de fixação do burro no mastro e o pescoço de ganço.

Módulo da Seção

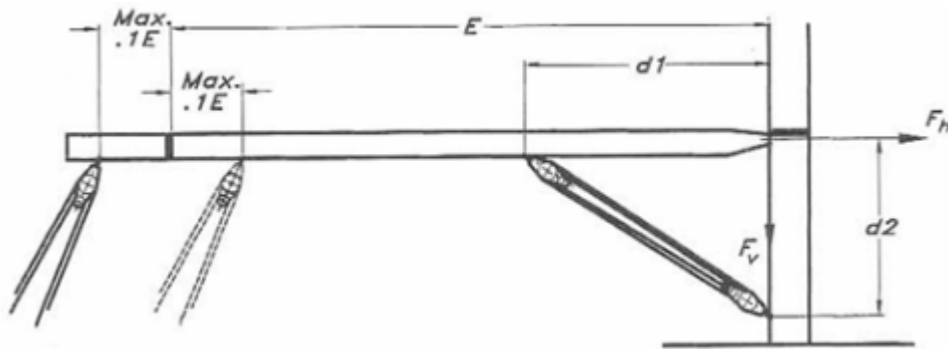
O módulo da seção vertical mínimo requerido (SM_y) é dado pela Equação 46:

$$SM_y = \frac{600 \cdot RM \cdot (E - d_1)}{\sigma_{0,2} \cdot HA} \quad (46)$$

Onde RM é o momento de adriçamento, E é a distância horizontal da retranca e $\sigma_{0,2}$ é a resistência ao escoamento do material. O módulo da seção horizontal mínimo requerido (SM_x) é dado pela Equação 47:

$$SM_x = 0,5 \cdot SM_y \quad (47)$$

Figura 24 – Retranca.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

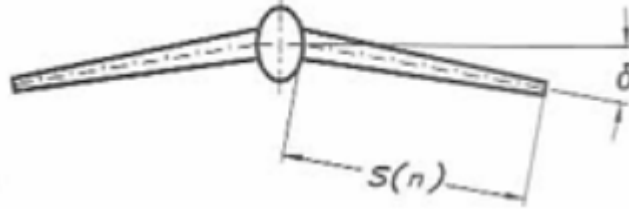
2.6.6 Cruzeta

Segundo Larsson e Eliasson (2000), o uso de cruzetas tem como objetivo diminuir o comprimento livre do mastro. Como o momento de inércia necessário para suportar uma determinada carga é proporcional ao quadrado desse comprimento, ao reduzi-lo pela metade, a seção do mastro necessária pode ser dividida por 4.

Para garantir que as cruzetas estejam sob compressão pura, elas devem ser ajustadas para dividir igualmente o ângulo dos brandais. No caso em que há duas

cruzetas, o ângulo a ser considerado é a média dos ângulos dos brandais superior e intermediário acima da cruzeta.

Figura 25 – Cruzeta.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

2.6.6.1 Momento de Inércia

O momento de inércia na extremidade da cruzeta (I_c) é dado pela Equação 48:

$$I_c = \frac{0,8 \cdot C(n) \cdot S(n)^2}{E \cdot \cos(\delta)} \quad (48)$$

Onde $C(n)$ é a componente horizontal da força nos brandais, sendo n o identificador da cruzeta a que a componente horizontal representa, $S(n)$ é o comprimento entre a extremidade da cruzeta e o mastro, E é o módulo de elasticidade do material da cruzeta e δ é o ângulo da cruzeta com a horizontal.

2.6.6.2 Módulo da Seção

O módulo de seção da cruzeta (SM_c) é referente à área que envolve o mastro e é dado pela Equação 49:

$$SM_c = k \cdot S(n) \cdot V(n) \cdot \cos(\delta) \quad (49)$$

Onde $V(n)$ é a força do brandal, considerando V_1 para o brandal inferior e D_3 para o brandal superior, k é o fator do material da cruzeta, calculado pela Equação 50:

$$k = \frac{0,16}{\sigma_{0,2}} \quad (50)$$

Onde $\sigma_{0,2}$ é a resistência ao escoamento do material da cruzeta, $S(n)$ é o comprimento entre a extremidade da cruzeta e o mastro e δ é o ângulo da cruzeta com a horizontal.

Além desses fatores, a cruzeta necessita de uma fixação que suporte um momento (M_s) dado pela Equação 51:

$$M_s = 0,16 \cdot S(n) \cdot V(n) \cdot \cos(\delta) \quad (51)$$

2.6.6.3 Redução do Módulo de Seção

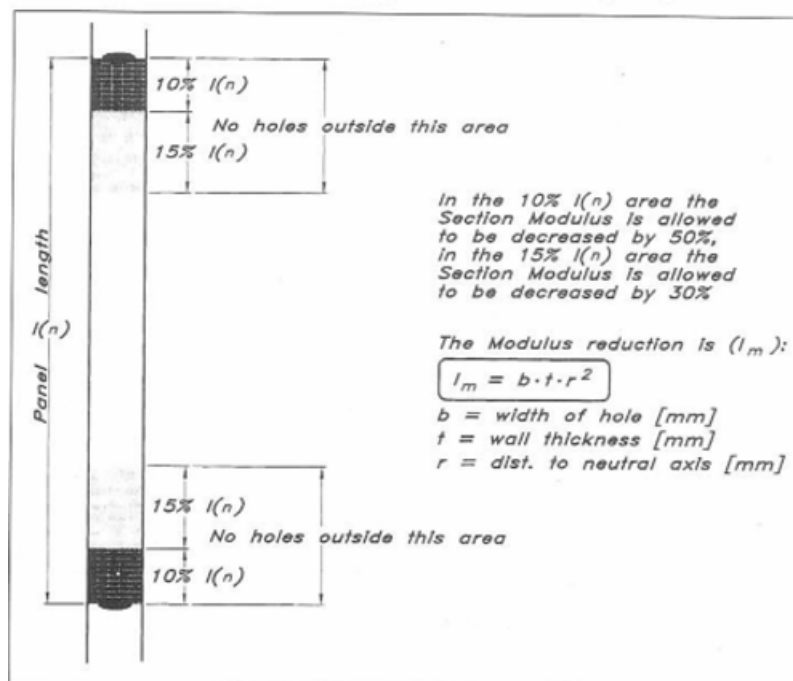
Segundo Larsson e Eliasson (2000), furos no mastro são inevitáveis, principalmente para realizar a fixação de estais, brandais e os demais aparelhos de mastreação. No entanto, esses furos causam um enfraquecimento do mastro, e o dimensionamento até o momento não considerava redução de momento de inércia.

Mesmo havendo a necessidade de manter a integridade estrutural do mastro, existem áreas específicas em que é aceitável realizar os furos e consequentemente reduzir o momento de inércia, visto que nesses pontos as tensões são menores. Essas regiões geralmente estão nas extremidades dos painéis, dentro dos 10% do comprimento do painel, em cada extremidade, é permitido reduzir o momento de inércia em 50%, nos próximos 15% do comprimento, essa redução permitida é de 30%. A redução do módulo (I_m) é dada pela Equação 52:

$$I_m = b \cdot t \cdot r^2 \quad (52)$$

Onde b é a largura do furo, t é a espessura da parede, e r é a distância do eixo neutro.

Figura 26 – Redução do Módulo de Seção.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo visa detalhar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional em planilhas eletrônicas (Google Planilhas) destinada ao dimensionamento do projeto de mastreação de embarcações a vela. Esse desenvolvimento foi estruturado em etapas sequencias que partiram das definições dos princípios teóricos, passando pela construção e validação da ferramenta. Essas etapas estão descritas a seguir:

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O trabalho teve como base da pesquisa referências consolidadas na literatura, como os estudos de Larsson e Eliasson, Perry, e Edmunds, os quais forneceram toda a estruturação teórica para o entendimento das funções dos aparelhos de mastreação de veleiros, além da compreensão do correto dimensionamento desses componentes.

3.2 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA

Com base na obra *Principles of Yacht Design*, de Larsson e Eliasson (2000), foi estruturada uma ferramenta em seções de planilhas eletrônicas, que estão listadas e descritas a seguir.

3.2.1 Definição da Embarcação

Nessa seção, tem-se como objetivo verificar se a embarcação projetada pode ser considerada uma embarcação movida a vela. Para isso, alguns dados de entrada são necessários:

- Peso vazio da embarcação;
- Peso da embarcação totalmente carregada;
- Peso do lastro;
- Boca máxima;
- Comprimento total da embarcação;
- Área Vélica;
- Momento de inclinação;
- Número de pessoas a bordo;
- Borda livre no mastro;
- Momento de inclinação adicional da tripulação;

Com a entrada desses valores, a ferramenta retorna se a embarcação pode ser considerada como tendo a vela como propulsão principal.

Caso a resposta seja afirmativa, mais alguns dados são necessários para dar prosseguimento ao projeto, sendo eles:

- Quantidade de cruzetas;
- Tipo de mastreação;
- Material do mastro;
- Módulo de elasticidade do material do mastro (caso não seja alumínio ou madeira);
- Se os brandais são simples ou duplos;
- Se possui vela adicional (além da genoa e da vela grande);
- Se o mastro é passante ou apoiado (fixado na quilha ou no convés);
- Distância entre a fixação e o topo do mastro (I), presente na Figura 6;
- Altura da vela principal (Distância entre a fixação da vela principal e a retranca)(P);
- Distância na horizontal entre o pé do mastro e o ponto de fixação do estai de proa na proa da embarcação (J);
- Comprimento da retranca (E).

3.2.2 Forças nos Brandais

Nesta parte da ferramenta são dimensionadas as forças atuantes no mastro e nos brandais, além de dimensionar os carregamentos nos brandais.

Para o sucesso dessa etapa, são necessários alguns dados de entrada geral, além dos solicitados anteriormente, sendo eles:

- Distância da linha d'água até a fixação do brandal superior;
- Distância da linha d'água ao centro geométrico da vela grande;
- Distância entre a retranca e o convés;
- Módulo de elasticidade do material do mastro (caso não seja alumínio ou madeira);
- Altura da primeira seção do mastro;
- Altura da segunda seção do mastro (quando houver);
- Altura da terceira seção do mastro (quando houver);
- Distância da primeira cruzeta até o topo do mastro;
- Altura da vela mestra;
- Ângulo entre o brandal e o mastro na primeira seção;
- Ângulo entre o brandal e o mastro na segunda seção (se houver);
- Ângulo entre o brandal e o mastro na terceira seção (se houver);
- Ângulo da vertical com o vau finalizado na primeira cruzeta;
- Ângulo da vertical com o vau finalizado na segunda cruzeta (se houver).

3.2.3 Forças no Estais

Nesta seção da ferramenta, são calculadas as resistências a rupturas dos estais de popa e de proa. Além de utilizar os valores das seções anteriores, são

necessários alguns dados de entrada fornecidos pelo usuário, sendo eles:

- Distância na vertical entre o convés e o ponto de amarração do estai de proa;
- Ângulo entre o estai de proa e o mastro;
- Ângulo entre o estai de popa e o mastro;
- Distância na vertical entre a linha d'água e o ponto de amarração do estai de popa.

3.2.4 Dimensionamento Transversal do Mastro

Nessa parte da ferramenta, os momentos de inércia requeridos para suportar as tensões dos brandais no mastro são dimensionados. Para isso, são necessários alguns dados de entrada, de acordo com a quantidade de cruzetas:

- Distância entre o centro da base do mastro e o brandal;
- Ângulo entre o mastro e o primeiro brandal;
- Ângulo entre a segunda seção do mastro e o segundo brandal (se houver);
- Ângulo entre a terceira seção do mastro e o terceiro brandal (se houver);
- Altura do mastro do convés até a primeira cruzeta ou até o ponto de fixação do primeiro brandal;
- Distância na vertical da segunda seção do mastro ou até o ponto de fixação do segundo brandal (se houver);
- Distância na vertical da terceira seção do mastro ou até o ponto de fixação do terceiro brandal (se houver).

3.2.5 Dimensionamento Longitudinal do Mastro

Assim como na seção anterior, é necessário calcular os momentos de inércia requeridos para suportar as tensões dos estais no mastro, além de selecionar o tipo de estais auxiliares, de acordo com a Figura 27 e informar a altura a partir do convés ou superestrutura até a parte mais alta do estai de proa.

Figura 27 – Fator de estaiamento.

Type of Staying	Staying Factor k_2				
	F-0	M-1	F-1	M-2	F-2
1) Double Lowers	–	0.85	0.80	0.90	0.85
2) Single Lowers	–	0.80	0.75	0.85	0.80
3) Runners & i.f	–	–	0.85	–	0.80
4) Runners & c.s	–	1.00	0.95	0.95	0.90
5) Swept spreaders	–	–	1.00	–	0.95
6a) Short spreaders	1.05	–	–	–	–
6b) No spreaders	2.00	–	–	–	–

Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

3.2.6 Topo do Mastro Fracionado

Essa seção da ferramenta se aplica apenas aos casos onde a mastreação é do tipo fracionada, visto que busca determinar a redução no módulo de seção do mastro. Para determinar essa redução, é necessário que os dados abaixo sejam informados:

- Distância do ponto de amarração da vela principal até o ponto de fixação dos brandais superiores (O_x);
- Distância do ponto de amarração da vela principal até o ponto de fixação dos brandais superiores (O_y);
- Limite de escoamento do mastro.

3.2.7 Retranca

Essa parte da ferramenta tem como intuito determinar as forças e os módulos de seção requeridos na retranca, para dimensionar a mesma para que suporte as esforços a que estará sujeita. São necessários alguns dados, sendo eles:

- Distância na horizontal em que o *gooseneck* está preso entre a retranca e o mastro;
- Distância na vertical em que o *gooseneck* está preso entre a retranca e o mastro;
- Distância entre o *gooseneck* e a ponta da retranca;
- Distância da linha d'água ao centro de forças na vela;
- Limite de escoamento do mastro.

3.2.8 Cruzeta

Essa fração da ferramenta só é válida para as embarcações que possuem mastros com cruzetas, visto que tem a função de determinar o momento de inércia da cruzeta e do seu ponto de fixação além do seu módulo de seção próximo ao mastro. Para realizar corretamente, é necessário informar alguns dados, sendo eles:

- Módulo de elasticidade do material da cruzeta;
- Comprimento da cruzeta;
- Ângulo da cruzeta na horizontal;
- Indicação se a cruzeta é superior ou inferior (no caso de 2 cruzetas);
- Comprimento transversal da força do estai.

3.2.9 Redução do Módulo de Seção

Essa fração da ferramenta tem o objetivo de determinar a redução do módulo de seção do mastro causada pela existência de furos. Para isso, alguns dados são necessários, sendo eles:

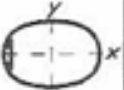
- Largura do furo;
- Espessura da parede;
- Distância do eixo neutro.

3.2.10 Seleção do Mastro

Considerando todos os cálculos realizados até o momento, essa seção da ferramenta tem como objetivo, nos catálogos disponíveis na obra *Principal of Yatch Design (2000)*, Figura 28 e 29, selecionar o mastro, a retranca, o diâmetro dos estais, os parafusos para a fixação e os fuzis.

Figura 28 – Catálogo de mastros e retrancas.

Typical properties for aluminium extrusions

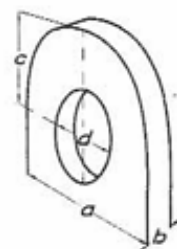
Mast	Main Dim. (mm)	I_y (cm ⁴)	I_x (cm ⁴)	Wall Thkn. (mm)	Weight Kg/m	SM_y (cm ³)	SM_x (cm ³)
 Oval Sect.	122/85	165	75	2.45	2.43	23.6	17.6
	130/93	215	100	2.50	2.71	29.0	21.5
	138/95	287	139	2.85	3.35	35.0	29.3
	155/104	413	191	3.05	3.69	45.9	36.7
	170/115	569	260	3.10	4.11	58.1	45.2
	177/124	725	345	3.40	4.75	74.7	55.6
	189/132	956	458	3.70	5.73	89.3	69.4
	206/139	1310	613	4.10	6.44	115	88.2
	224/150	1775	830	4.50	7.32	143	111
	237/162	2360	1120	4.85	8.76	176	138
Delta Sect.	274/185	3650	1650	4.90	10.32	232	178
	121/92	205	122	3.00	3.15	28.9	26.5
	129/100	292	175	3.50	3.74	38.9	35.0
	137/113	375	250	3.90	4.21	50.0	44.2
	146/112	508	310	4.40	5.05	61.9	55.3
Furl. Sect.	160/132	750	500	5.30	6.67	80.6	75.7
	190/94	580	200	3.00	4.69	55.4	42.5
	213/104	850	290	3.15	5.45	73.2	55.7
	235/116	1240	435	3.40	6.55	97.6	75.0
	232/126	1590	605	5.00	8.71	128	96
Boom Sect.	260/136	2400	900	5.75	10.36	176	132
	290/150	3520	1300	6.00	12.63	224	173
	86/59	60	23	1.80	1.67	14.0	7.8
	120/62	155	42	1.80	2.16	24.8	13.7
	143/76	290	80	2.20	2.83	39.4	20.9
	162/125	615	330	2.80	4.75	76.0	53.0
Spinn Pole Sect.	171/94	610	170	2.80	4.03	67.7	35.7
	200/117	1190	325	2.80	5.36	112	55.5
	250/140	2410	640	3.20	6.96	185	91.4
	48/48	7.65	7.65	2.00	0.75		
	60/60	15.4	15.4	2.00	1.00		
	72/72	29.9	29.9	2.20	1.38		
Pole Sect.	84/84	48.8	48.8	2.20	1.53		
	96/96	72.3	72.3	2.20	1.76		
	99/99	123	123	3.60	2.65		
	111/111	197	197	4.10	3.38		

Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

Figura 29 – Catálogo de fuzis e parafusos.

Matching components made of stainless steel, type AISI-316

1x19 Wire			Rigging Screw		Chainplate lug (see fig.)			
Diam (mm)	Br.str (N)	Weight (kg/m)	Diam (in)	Br.str (N)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)
3	7700	0.040	1/4	14700	20.0	5.0	12.0	8.5
4	13800	0.073	5/16	22600	22.0	6.0	13.0	10.0
5	21600	0.113	3/8	33400	25.0	8.0	16.0	12.0
5.5	25700	0.139	7/16	46100	30.0	10.0	18.0	14.0
6	30000	0.165	7/16	46100	36.0	10.0	21.0	14.0
7	40900	0.225	1/2	66700	38.0	12.0	24.0	16.0
8	53500	0.327	5/8	93200	40.0	13.0	25.0	16.0
10	69100	0.475	3/4	123000	45.0	14.0	27.0	18.0
11	83500	0.648	3/4	123000	50.0	14.0	30.0	18.0
12	120200	0.820	7/8	167000	60.0	18.0	36.0	22.0
14	160100	1.000	1	218000	65.0	22.0	38.0	25.0



Chainplate lug

*a = width
b = thickness
c = centre of hole
to top of lug
d = diameter of hole*

Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

Nesse contexto, a seleção dos perfis de mastro baseia-se em seções que atendem aos momentos de inércia transversal e longitudinal exigidos. Cada fabricante de componentes define os perfis disponíveis de acordo com as características específicas de seus produtos, disponibilizando opções para atender às necessidades estruturais e funcionais de cada projeto.

3.3 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA

O processo de validação da ferramenta foi realizado por meio da aplicação de um estudo de caso do veleiro YD-40, o qual já possui dados consistentes para realizar uma comparação detalhada entre os dados obtidos pela ferramenta e os obtidos por cálculos manuais, disponibilizados na obra *Principles of Yacht Design*, de Larsson e Eliasson (2000). Essa validação foi realizado com o intuito de assegurar a precisão e confiabilidade dos cálculos.

4 RESULTADOS

Neste capítulo a ferramenta será utilizada no estudo de caso da embarcação YD-40 com o intuito de comprovar sua efetividade para o dimensionamento da mastreação de embarcações.

4.1 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA: ESTUDO DE CASO DO VELEIRO YD-40

O veleiro em questão se trata do modelo de referência utilizado no desenvolvimento e validação da ferramenta, visto o que é apresentado no livro *Principles of Yatch Design*, de Larsson e Eliasson (2000).

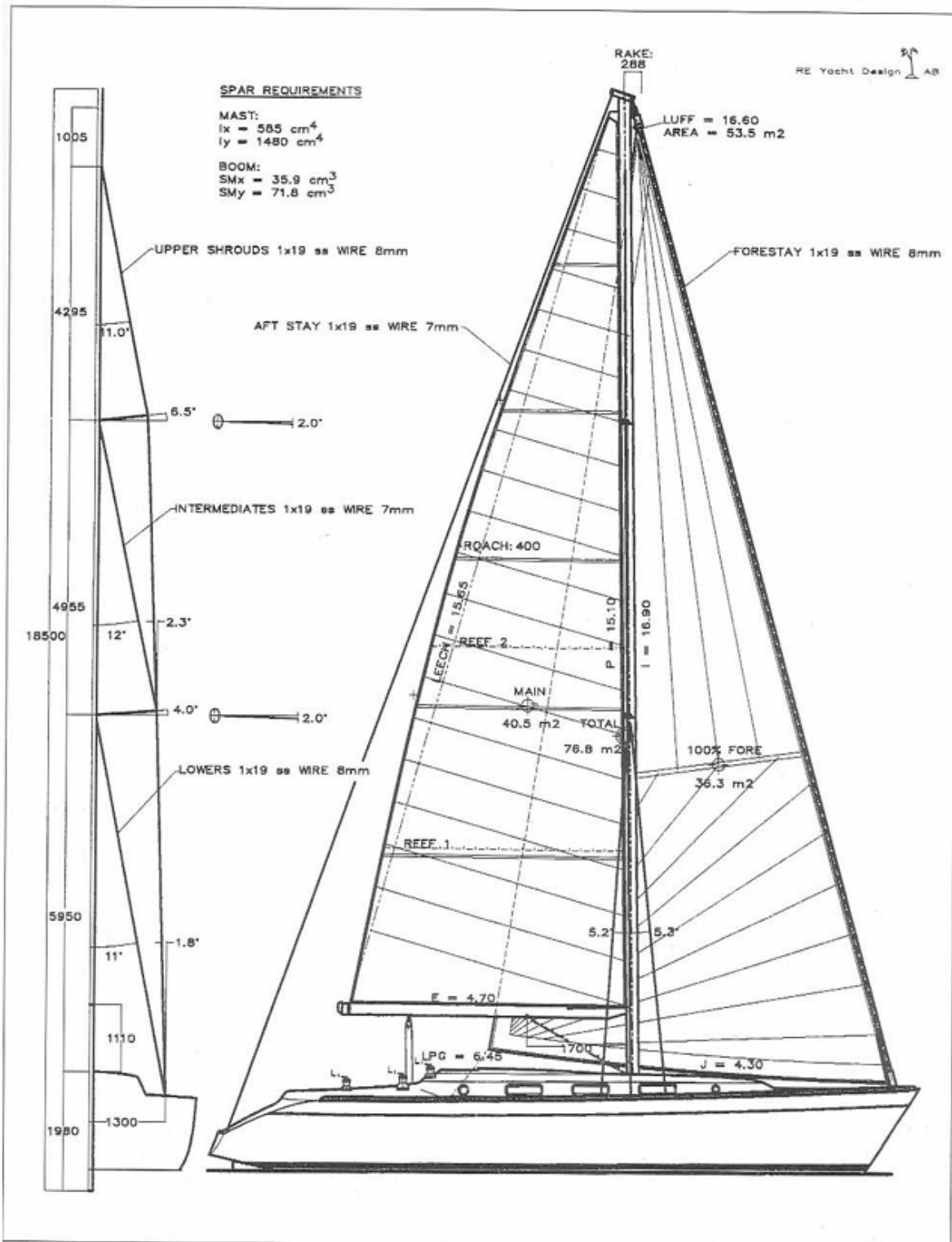
4.1.1 Validação dos Cálculos

Baseado no capítulo 11 do livro de Larsson e Eliasson (2000) e com a conclusão da ferramenta, foi realizada a validação das fórmulas e dos resultados utilizando os dados do estudo de caso da embarcação YD-40. Estes serão detalhados nas próximas seções.

4.1.2 Características Principais da Embarcação

A Figura 30 é o desenho técnico da embarcação e nos mostra dados importantes que serão utilizados como valores de entrada na planilha, assim como os valores da Tabela 4, presente no Apêndice A.

Figura 30 – Desenho Técnico YD-40.



Fonte: Larsson e Eliasson (2000)

4.1.3 Utilização da Ferramenta

A seguir será realizada a análise para a validação da ferramenta, comparando os valores obtidos com a resolução do estudo de caso da embarcação YD-40, já fundamentada no livro *Principles of Yacht Design* de Larsson e Eliasson (2000).

4.1.3.1 Definição da Embarcação

Conforme a Figura 31, com os dados inseridos, a planilha foi capaz de identificar que a embarcação se trata de veleiro, já que a área da vela de proa é menor que 1,6 vezes a área da vela principal, estando de acordo com o resultado da referência.

Figura 31 – Definição da embarcação.

Tipo de embarcação	VELEIRO
--------------------	---------

Fonte: Autor.

4.1.3.1.1 Forças nos brandais

Utilizando os dados obtidos no projeto, a ferramenta calcula as forças atuantes e as cargas dimensionantes. É possível notar que os valores de carregamento transversal de ambos os casos (T1 e T2), apresentados na Figura 14, a ferramenta obteve valores idênticos aos teóricos.

Além disso, o valor da força na cabeça da vela (T_{head}), apresentado na Figura 14, também atingiu o valor teórico. Já o valor da força na retranca (T_{boom}), teve uma pequena diferença de 0,1%, provavelmente ocasionado pelo arredondamento do *software*.

No entanto, nos valores de tensão no brandal superior (T_{hu}) e tensão no brandal inferior (T_{hl}), presentes na Figura 15, os erros percentuais da ferramenta, quando comparado com a referência, foram de -0,80% e 4,95%, respectivamente. Esses erros, provavelmente estão relacionados a uma imprecisão na altura entre o ponto de atuação da força de cabeça da vela (T_{head}) e o convés, visto que, por falta da altura entre a primeira cruzeta e o convés, sendo utilizada a altura entre a primeira cruzeta e a superestrutura.

Outro ponto, é a força distribuída pela retranca no mastro (T_{bu}) que apresentou erro percentual 0,94%, em relação a referência, provavelmente ocasionada pela imprecisão da distância do moitão da grande até o convés, sendo utilizada a altura da retranca até a superestrutura.

Nas cargas dimensionantes, os valores referentes ao brandal intermediário na primeira seção (P_{V1}) e ao brandal superior na segunda seção (P_{V2}) obtiveram

valores muito próximos aos teóricos, tendo erros percentuais de 0,004% e 0,01%, respectivamente, provavelmente causados pelo arredondamento do *software* utilizado. Já no valor referente ao brandal inferior (P_{D1}), ao brandal intermediário (P_{D2}) e ao brandal superior (P_{D3}), o erro percentual foi de 0,24%, -0,80% e 0,68%, respectivamente, provavelmente causados pelos erros provenientes das tensões, conforme mostra a Figura 32.

Figura 32 – Forças no Brandais.

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Carregamento na transversal (caso 1) (T1)	2920	[N]	2920	0,00%
Carregamento na transversal (caso 2) (T2)	9100	[N]	9100	0,00%
Thead	3640	[N]	3640	0,00%
Tboom	3003	[N]	3000	0,10%
Thu	3100	[N]	3125	-0,80%
Thl	540	[N]	515	4,85%
Tbu	560	[N]	555	0,94%
Carga Dimensionante (D1)	49028	[N]	48910	0,24%
Carga Dimensionante (D2)	34295	[N]	34570	-0,80%
Carga Dimensionante (D3)	45912	[N]	45600	0,68%
Carga Dimensionante (V1)	83022	[N]	83025	-0,004%
Carga Dimensionante (V2)	45104	[N]	45100	0,01%

Fonte: Autor.

4.1.3.1.2 Forças nos estais

Com os dados de entrada, foram calculadas as resistências à ruptura para os estais de proa (P_{fo}) e de popa (P_{fa}), obtendo valores semelhantes aos teóricos, como mostra a Figura 33, com um erro percentual de 0,004% e -0,43%, respectivamente. Além disso, a ferramenta calcula a resistência à ruptura do estai interno, no entanto, o estudo de caso não apresenta um valor de referência para realizar a validação nesse caso.

Figura 33 – Forças nos Estais.

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Resistência mínima a ruptura do estai da genoa (Pfo)	43802	[N]	43800	0,00%
Resistência mínima de ruptura do estai de popa (Pa)	36342	[N]	36500	-0,43%
Resistência mínima de ruptura do estai interno	35041	[N]		

Fonte: Autor.

4.1.3.1.3 Dimensionamento Transversal do Mastro

No caso do dimensionamento transversal do mastro, a carga de projeto calculada foi próxima à teórica, tendo um erro de 0,01%. Além disso, conforme mostrado na Figura 34, o dado de saída dessa seção da ferramenta é o momento de inércia transversal requerido, o qual obteve um valor de $5,85 \times 10^4 \text{ mm}^4$, valor idêntico ao teórico, mesmo apresentando um erro percentual de 0,08%, ocasionado pelo erro da carga de projeto e o arredondamento da planilha eletrônica.

Figura 34 – Dimensionamento Transversal do Mastro.

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Carga de projeto (PT)	61154	[N]	61150	0,01%
Momento de inércia transversal requerido no painel 1	5,85E+06	mm ⁴		
Momento de inércia transversal requerido no painel 2	3,70E+06	mm ⁴		
Momento de inércia transversal requerido no painel 3	1,81E+06	mm ⁴		
Momento de inércia transversal requerido Máximo (Ix)	5,85E+06	mm ⁴	5,85E+06	-0,08%

Fonte: Autor.

4.1.3.1.4 Dimensionamento Longitudinal do Mastro

Nesta seção da ferramenta, o momento de inércia longitudinal requerido calculado obteve valores aproximados ao de referência, como demonstra a Figura 35, tendo um erro percentual de 1,49%. Essa diferença percentual está relacionada a imprecisão dos dados da altura a partir do convés ou superestrutura até a parte mais alta do estai de proa.

Figura 35 – Dimensionamento Longitudinal do Mastro.

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Momento de inércia longitudinal requerido (Iy)	1,50E+07	[mm ⁴]	1,48E+07	1,49%

Fonte: Autor.

4.1.3.1.5 Topo do Mastro Fracionado

Neste estudo de caso, por se tratar de um estaiamento de topo de mastro, como mostra a Figura 36, essa seção da ferramenta não se aplica, não sendo possível validar o funcionamento da mesma.

Figura 36 – Topo do Mastro Fracionado.

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
SMx	0,00E+00	[mm³]		
SMy	0,00E+00	[mm³]		

Fonte: Autor.

4.1.3.1.6 Retranca

Com os dados de entrada, é possível determinar o módulo da seção requerido para a retranca, o qual obteve valores próximos aos de referência, tendo um erro percentual de 0,18%, conforme a Figura 37 ocasionado pela imprecisão dos dados da distância da linha d'água ao centro de forças na vela.

Além disso, a ferramenta determina as forças atuantes no pescoço de gancho. No entanto, o livro não apresenta esses valores, não sendo possível realizar a validação.

Figura 37 – Retranca.

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Força vertical no pescoço de gancho	1,54E+04	[N]		
Força horizontal no pescoço de gancho	1,78E+04	[N]		
Módulo da seção vertical requerido	7,19E+04	[mm³]	7,18E+04	0,18%
Módulo da seção horizontal requerido	3,60E+04	[mm³]	3,59E+04	0,18%

Fonte: Autor.

4.1.3.1.7 Cruzeta

Nessa seção, a ferramenta determina o módulo de seção e os momentos relacionados às cruzetas, podendo ser selecionada se é a primeira, Figura 38, ou a segunda, Figura 52, no entanto, o estudo de caso não retorna resultados de referência, portanto não é possível validar a funcionalidade da ferramenta no dimensionamento da cruzeta.

Figura 38 – Primeira Cruzeta.

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Momento de inércia da cruzeta	1,11E+01	mm ⁴		
Módulo da seção da cruzeta próximo ao mastro	3,15E+01	mm³		
Momento no ponto de fixação da cruzeta	2,29E+07	Nmm		

Fonte: Autor.

Figura 39 – Segunda Cruzeta.

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Momento de inércia da cruzeta	1,11E+01	mm ⁴		
Módulo da seção da cruzeta próximo ao mastro	5,70E+01	mm ³		
Momento no ponto de fixação da cruzeta	4,15E+07	Nmm		

Fonte: Autor.

4.1.3.1.8 Redução do Módulo de Seção do Mastro

No estudo de caso, os dados de entrada necessários para realizar o cálculo não foram disponibilizados, portanto, não foi considerada redução do módulo de seção do mastro.

Figura 40 – Redução do Módulo de Seção do Mastro.

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Redução do módulo de seção do mastro	0			

Fonte: Autor.

4.1.3.1.9 Seleção dos Aparelhos de Mastreação

Utilizando os valores obtidos de inércia transversal e longitudinal, e utilizando como referência o catálogo disponibilizado no livro *Principles of Yacht Design* conforme as Figuras 28 e 29, a ferramenta selecionou o mastro com diâmetro de 224×150 mm, sendo o mesmo selecionado pelo autor, conforme a Figura 41. Na seleção da retranca, o modelo selecionado foi o mesmo da referência, sendo com um diâmetro de 162×125 mm.

Outro ponto de validação são os estais e brandais, que foram selecionados de acordo com a teoria. Os brandais inferior e superior, bem como o estai de proa, possuem 8 mm de diâmetro, considerando um cabo de aço inoxidável de 1x19, enquanto o brandal intermediário e o estai de popa possuem um diâmetro de 7 mm. Além disso, os parafusos e fuzis foram selecionados corretamente de acordo com o brandal ou estai relacionado e a tabela.

Figura 41 – Seleção dos Aparelhos de Mastreação.

Dados	Valor	Unidade	Referência	
Catálogo Utilizado	YD-40			
Mastro selecionado	224/150		224/150	OK
Peso do mastro selecionado	7,32	[kg/m]	7,32	OK
Retranca selecionada	162/125		162/125	OK
Peso da retranca selecionada	4,75	[kg/m]	4,75	OK
Diâmetro do estai de proa selecionado	8	[mm]	8	OK
Diâmetro do estai de popa selecionado	7	[mm]	7	OK
Diâmetro do brandal inferior selecionado	8	[mm]	8	OK
Diâmetro do brandal intermediário selecionado	7	[mm]	7	OK
Diâmetro do brandal superior selecionado	8	[mm]	8	OK
Parafuso selecionado para o estai de proa	5/8	[in]	5/8	OK
Parafuso selecionado para o estai de popa	1/2	[in]	1/2	OK
Parafuso selecionado para o brandal inferior	5/8	[in]	5/8	OK
Parafuso selecionado para o brandal intermediário	1/2	[in]	1/2	OK
Parafuso selecionado para o brandal superior	5/8	[in]	5/8	OK
Fuzil da placa de fixação do estai de proa	13	[mm]	13	OK
Fuzil da placa de fixação do estai de popa	12	[mm]	12	OK
Fuzil da placa de fixação do brandal inferior	13	[mm]	13	OK
Fuzil da placa de fixação do brandal intermediário	12	[mm]	12	OK
Fuzil da placa de fixação do brandal superior	13	[mm]	13	OK

Fonte: Autor.

4.1.4 Limitações da Ferramenta

Entre as principais limitações da ferramenta, está a abrangência da quantidade de cruzetas, a qual só é possível dimensionar os aparelhos de mastreação para embarcações de até duas cruzetas. Outro fator limitante é a dependência de dados de entrada precisos, pois qualquer erro nos dados fornecidos, podem comprometer os resultados.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível automatizar os cálculos relacionados ao momento de inércia, forças nos estais e brandais e da seleção de aparelhos de mastreação. A ferramenta computacional desenvolvida se mostrou funcional, viabilizando a execução do memorial de cálculo presente na obra *Principles of Yatch Desing* de Larsson e Eliasson (2000) de forma eficiente. No processo de construção de ferramentas algumas dificuldades foram encontradas, como por exemplo a alteração entre a quantidade de cruzetas e o modo de dimensionamento de cada uma, até a nomenclatura que difere do português usual para o inglês.

Em relação ao desenvolvimento de uma interface de fácil utilização, os resultados confirmaram o alcance do objetivo proposto. A ferramenta se mostrou intuitiva, promovendo uma interação simples para os usuários e contribuindo para a otimização do tempo necessário à execução dos cálculos. No entanto, foram identificadas algumas limitações, principalmente no que diz respeito à adaptação da ferramenta para embarcações com características não abordadas previamente no escopo do estudo.

Outro ponto relevante foi o uso de dados básicos das embarcações para a gerar os resultados. A validação da ferramenta, por meio de um estudo de caso com o veleiro YD-40, mostrou eficiência no dimensionamento dos aparelhos de mastreação assegurando uma maior confiabilidade.

Por conta dos pontos acima citados, o estudo cumpriu com o seu objetivo de realizar o dimensionamento dos aparelhos de mastreação da embarcação a vela, tendo a embarcação YD-40 como base, fundamentando teoricamente e de forma simplificada o estudo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTURO

Devido à ampla aplicabilidade da metodologia desenvolvida neste estudo, há diversos temas que podem ser explorados em trabalhos futuros. Entre eles, destacam-se:

- Validação da ferramenta para modelos de veleiros distintos do YD-40, entre eles, os que apresentam mastreação do tipo fracionada ou do tipo cutter;
- Incrementar a ferramenta para que abranja embarcações com três cruzetas ou mais;
- Incluir novos para os mastros, como fibra de carbono;
- Adicionar catálogos atualizados de diversos fornecedores.

REFERÊNCIAS

CLEMENTS, T. **Rigging**. 2009. Publicado em 27 de março de 2009. Acesso em: 28 nov. 2024. Disponível em: <https://catamaranconcepts.com/2009/03/27/rigging/>.

EDMUNDS, A. **Designing Power & Sail**. Enola, Pennsylvania: Bristol Fashion Publications, 1998.

FOREMAN, P. S. **Imagem bruta da doação de Pearson Scott Foreman**. 2007. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PSF_G-380009.png.

FORUM, C. **Sagging Spreader: Is That a Symptom of Something Sinister?** 2008. Accessed: 26 November 2024. Disponível em: <https://www.cruisersforum.com/forums/f116/sagging-spreader-is-that-a-symptom-of-something-sinister-21777.html>.

GMT Composites. **Boom and Mast - GMT Composites**. 2024. Acessado em: 29 de novembro de 2024. Disponível em: <https://www.nauticexpo.es/prod/gmt-composites/product-21928-264565.html>.

HANCOCK, B. **Maximum Sail Power: The Complete Guide to Sails, Sail Technology and Performance**. Norwich, VT, United States: Nomad Press, 2003. Cover photo by Rick Tomlinson. ISBN 0-9722026-0-9.

HEADIFEN, G. **Mast Head and Fractional Rigging**. 2024. Última atualização em 12 de agosto de 2024. Acesso em: 27 nov. 2024. Disponível em: <https://sailing-blog.nauticed.org/mast-head-and-fractional-rigging/>.

HIBBELER, R. C. **Título do Livro (Substituir pelo título correto)**. Edição (se aplicável). Brasil: Pearson Education do Brasil, 2018. Editora de texto: Sabrina Levensteinas; Revisão: Fernanda Umile; Projeto gráfico e diagramação: Casa de Ideias.

HOWELL, M. W. **[Título da foto ou descrição breve]**. s.d. Fotografia disponível no OceanoAtlantico. Acesso em: 07 nov. 2024. Disponível em: <https://oceanoantartico.com.br/2022/09/20/nomenclatura-da-vela/>.

KIMBALL, J. **Physics of Sailing**. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010. University of Albany, New York, U.S.A.

LARSSON, L.; ELIASSON, R. E. **Principles of Yacht Design**. Second. London: Adlard Coles Nautical, an imprint of A & C Black (Publishers) Ltd, 2000. ISBN 0-7136-5181-4.

LARSSON, L.; ELIASSON, R. E.; ORYCH, M. **Principles of Yacht Design**. 5th. ed. London: Bloomsbury Publishing, 2022. ISBN 9781472981929.

MCCLARY, D. **Understanding Sail Dimensions and Sail Area Calculation**. 2024. Acessado em: 25 nov. 2024. Disponível em: <https://www.sailboat-cruising.com/sail-dimensions.html>.

National Defence, Canada. **Reference Guide For Rigging and Sailing the 27 ft Service Whaler**. [S.l.], s.d. Issued on Authority of the Chief of Reserves and Cadets. Disponível em: <https://www.amphion.ca/wp-content/uploads/2016/02/Service-Whaler-Manual2014r1.pdf>.

Nordic Boat Standard Committee. **Nordic Boat Standard: Commercial Boats less than 15 metres**. Denmark, Finland, Iceland, Norway, Sweden: Søfartsstyrelsen, Merenkululaitos, Siglingastofnun, Sjøfartsdirektoratet, Sjøfartsverket, DNV, 1990.

PERRY, R. H. **Yacht Design According to Perry**. United States of America: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0071596528.

SPECTRE, P. H. **100 Boat Designs Reviewed: Design Commentaries by the Experts**. London / Brooklin, Maine: Adlard Coles Nautical / WoodenBoat Books, 1997. (The WoodenBoat Series). ISBN 0-7136-4935-6.

APÊNDICE A - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA EMBARCAÇÃO YD-40

Nesta seção são apresentadas as características da embarcação YD-40, utilizadas no estudo de caso para a validação da ferramenta.

Tabela 4 – Características Principais da Embarcação.

Símbolo	Deslocamento de meia carga	Deslocamento leve
L_{OA}	12,05 m	12,05 m
L_{WL}	12,02 m	9,85 m
B_{MAX}	3,71 m	3,71 m
B_{WL}	3,17 m	3,12 m
T_C	0,57 m	0,54 m
T	2,07 m	2,04 m
∇C	7,63 m ³	6,95 m ³
mC	7,82 t	7,12 t
SWC	25,2 m ²	24,4 m ²
SW	30,9 m ²	30,1 m ²
Δ	8,12 t	7,25 t
$Blst$	3,25 t	3,25 t
I	16,9 m	16,9 m
J	4,3 m	4,3 m
P	15,1 m	15,1 m
E	4,7 m	4,7 m
SL	16,6 m	16,6 m
SMW	7,75 m	7,75 m
SAF	36,3 m ²	36,3 m ²
SAM	35,5 m ²	35,5 m ²
SA	71,8 m ²	71,8 m ²
C_{ku}	1,85 m	1,85 m
C_{kl}	1,05 m	1,05 m

Continuação da tabela		
Símbolo	Deslocamento de meia carga	Deslocamento leve
T_k	1,50 m	1,50 m
C_{ru}	0,68 m	0,68 m
C_{rl}	0,32 m	0,32 m
T_r	1,47 m	1,47 m
$\hat{k}$	21°	21°
$\hat{r}$	14°	14°
LCB	-3,5%	-3,5%
C_P	0,56	0,56
$\frac{SA}{SW}$	2,3	2,4
$\frac{SA}{\nabla C^{2/3}}$	18,5	19,7
$\frac{L_{OA}}{B}$	3,25	3,25
$\frac{L_{WL}}{T}$	4,84	4,83
$\frac{L_{WL}}{T_C}$	17,6	18,2
$\frac{L_{WL}}{\nabla C^{2/3}}$	5,09	5,16
$\frac{L_{OA}}{L_{WL}}$	1,20	1,22
$\frac{F_f}{L_{WL}}$	0,142	0,144
$\frac{F_f}{F_a}$	1,22	1,22
$Blst\ Rto$	0,40	0,45

Fonte: Adaptado de Larsson e Eliasson (2000)

APÊNDICE B - FERRAMENTA

Nesta seção são apresentadas as etapas da ferramenta, tanto os dados de entrada quanto os resultados.

Figura 42 – Dados iniciais da embarcação.

Legenda			
	Dados de entrada		
	Valores relevantes (intermediários)		
	Valores obtidos		
Dados		Valor	Unidade
Peso vazio do barco		7250	[kg]
Peso total carregado do barco		8990	[kg]
peso da lastro		3250	[kg]
Largura máxima		3,71	[m]
Comprimento total		12,05	[m]
Área da vela		71,8	[m²]
Momento de inclinação dimensionamento		53000	[Nm]
Número de pessoas a bordo			
Borda livre no mastro		1,25	[m]
Momento adicional da tripulação para a guarnição		0	[Nm]
Tipo de embarcação		VELEIRO	

Fonte: Autor.

Figura 43 – Dados iniciais dos aparelhos de mastreação.

Dados	Valor	Unidade
Quanta cruzetas tem o mastro?	2 ▾	
O mastro possui brandais simples ou duplos?	Duplo ▾	
Possui estai adicional?	Sim ▾	
Tipo de mastreação	De topo ▾	
Qual é o material do mastro?	Alumínio ▾	
Se for outro material, qual é o E dele?		
Possui Espalhador curto?	Sim ▾	
O mastro é fixado na quilha ou no convés?	Quilha ▾	
Distância entre a fixação e o topo do mastro (I)	16,9	[m]
Altura da vela principal (Distância entre a fixação da vela principal e a retranca)(P)	15,1	[m]
Distância na horizontal entre o pé do mastro e o ponto de fixação do estai de proa na proa da embarcação (J)	4,3	[m]
Comprimento da retranca (E)	4,7	[m]

Fonte: Autor.

Figura 44 – Força nos brandais.

Força nos brandais		
Dados	Valor	Unidade
Distância da linha d'agua até a fixação do brandal superior	18,15	[m]
Distância da linha d'água ao centro geométrico da vela grande	5,824	[m]
Distância entre a retranca e o convés	1,11	[m]
Altura da primeira seção do mastro	5,95	[m]
Altura da segunda seção do mastro (quando houver)	4,955	[m]
Altura da terceira seção do mastro (quando houver)	4,295	[m]
Qual é a distância da primeira cruzeta até o topo do mastro?	10,255	[m]
Qual é a altura da vela mestra?	15,1	[m]
Distância entre o ponto de aplicação da força da cabeça de vela e o convés		[m]
Ângulo entre o brandal e o mastro na primeira seção	11	[°]
Ângulo entre o brandal e o mastro na segunda seção (se houver)	12	[°]
Ângulo entre o brandal e o mastro na terceira seção (se houver)	11	[°]
Ângulo da vertical com o vau finalizado na primeira cruzeta?	1,8	[°]
Ângulo da vertical com o vau finalizado na segunda cruzeta?	2,3	[°]
Altura de aplicação do Thead	10,17	[m]
Distância da aplicação do Thead até a primeira cruzeta	4,22	[m]
Distância da aplicação do Thead até o ponto de amarração do brandal superior	0,735	[m]

Fonte: Autor.

Figura 45 – Resultados das forças nos brandais.

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Carregamento na transversal (caso 1) (T1)	2920	[N]	2920	0,00%
Carregamento na transversal (caso 2) (T2)	9100	[N]	9100	0,00%
Thead	3640	[N]	3640	0,00%
Tboom	3003	[N]	3000	0,10%
Thu	3100	[N]	3125	-0,80%
Thl	540	[N]	515	4,85%
Tbu	560	[N]	555	0,94%
Carga Dimensionante (D1)	49028	[N]	48910	0,24%
Carga Dimensionante (D2)	34295	[N]	34570	-0,80%
Carga Dimensionante (D3)	45912	[N]	45600	0,68%
Carga Dimensionante (V1)	83022	[N]	83025	-0,004%
Carga Dimensionante (V2)	45104	[N]	45100	0,01%

Fonte: Autor.

Figura 46 – Força nos estais.

Forças nos estais				
Distância na vertical entre o convés e o ponto de amarração do estai de proa	16,9	[m]		
Ângulo entre o estai de proa e o mastro	14,28	[°]		
Ângulo entre o estai de popa e o mastro	17,29	[°]		
Distância na vertical entre a linha d'água e o ponto de amarração do estai de popa	18,15	[m]		

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Resistência mínima a ruptura do estai da genoa (Pfo)	43802	[N]	43800	0,00%
Resistência mínima de ruptura do estai de popa (Pa)	36342	[N]	36500	-0,43%
Resistência mínima de ruptura do estai interno	35041	[N]		

Fonte: Autor.

Figura 47 – Dimensionamento longitudinal do mastro

Dimensionamento Longitudinal do mastro				
Dados	Valor	Unidade		
Altura a partir do convés ou superestrutura até a parte mais alta do estai de proa	16,52	[m]		
Tipo de estai lateral	Branda...			

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Momento de inércia longitudinal requerido (Iy)	1,50E+07	[mm^4]	1,48E+07	1,49%

Fonte: Autor.

Figura 48 – Dimensionamento transversal do mastro

Dimensionamento Transversal do mastro				
Dados	Valor	Unidade		
Distância entre o centro da base do mastro e o brandal	1,3	[m]		
Ângulo entre o mastro e o primeiro brandal	11	[°]		
Ângulo entre a segunda seção do mastro e o segundo brandal (se houver)	12	[°]		
Ângulo entre a terceira seção do mastro e o terceiro brandal (se houver)	11	[°]		
Altura do mastro do convés até a primeira cruzeta ou até o ponto de fixação do primeiro brandal	5,95	[m]		
Distância na vertical da segunda seção do mastro ou até o ponto de fixação do segundo brandal (se houver)	4,955	[m]		
Distância na vertical da terceira seção do mastro ou até o ponto de fixação do terceiro brandal (se houver)	4,295	[m]		

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Carga de projeto (PT)	61154	[N]	61150	0,01%
Momento de inércia transversal requerido no painel 1	5,85E+06	mm ⁴		
Momento de inércia transversal requerido no painel 2	3,70E+06	mm ⁴		
Momento de inércia transversal requerido no painel 3	1,81E+06	mm ⁴		
Momento de inércia transversal requerido Máximo (Ix)	5,85E+06	mm ⁴	5,85E+06	-0,08%

Fonte: Autor.

Figura 49 – Topo do mastro fracionado.

Topo do mastro fracionado				
Dados	Valor	Unidade		
Distância do ponto de amarração da vela principal até o ponto de fixação dos brandais superiores (Ox)	0	[m]		
Distância do ponto de amarração da vela principal até o ponto de fixação dos brandais superiores (Oy)	0	[m]		
Limite de escoamento do mastro	240	[N/mm ²]		

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Módulo da seção vertical requerido	0,00E+00	[mm ³]		
Módulo da seção horizontal requerido	0,00E+00	[mm ³]		

Fonte: Autor.

Figura 50 – Retranca.

Retranca				
Dados	Valor	Unidade		
Distância na horizontal em que o gooseneck está preso entre a retranca e o mastro	1,28	[m]		
Distância na vertical em que o gooseneck está preso entre a retranca e o mastro	1,11	[m]		
Distância entre o gooseneck e a ponta da retranca	4,7	[m]		
Distância da linha d'água ao centro de forças na vela	6,3	[m]		
Limite de escoamento do mastro	240	[MPa]		

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Força vertical no pescoço de gancho	1,54E+04	[N]		
Força horizontal no pescoço de gancho	1,78E+04	[N]		
Módulo da seção vertical requerido	7,19E+04	[mm ³]	7,18E+04	0,18%
Módulo da seção horizontal requerido	3,60E+04	[mm ³]	3,59E+04	0,18%

Fonte: Autor.

Figura 51 – Cruzeta

Fonte: Autor.

Figura 52 – Redução do módulo da seção do mastro.

Redução do módulo da seção do mastro				
Dados	Valor	Unidade		
Largura do furo	0	[mm]		
Espessura da parede	0	[mm]		
distância do eixo neutro	0	[mm]		

Dados	Valor	Unidade	Referência	Erro percentual
Redução do módulo de seção do mastro	0	[mm²]		

Fonte: Autor.