

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

LUCAS BARBOSA DE AMORIM

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE EMBARCAÇÕES NA CONDIÇÃO ESTÁTICA
E INTACTA

Joinville
2020

LUCAS BARBOSA DE AMORIM

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE EMBARCAÇÕES NA CONDIÇÃO ESTÁTICA
E INTACTA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Naval, no curso
Engenharia Naval da Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin
Tancredi

Joinville
2020

Lucas Barbosa de Amorim

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE EMBARCAÇÕES NA CONDIÇÃO ESTÁTICA
E INTACTA

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Naval” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 04 de dezembro de 2020.

Prof^ª. Viviane Lilian Soethe Parucker
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Me. Luiz Eduardo Bueno Minioli
Membro da banca
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Membro da banca
Universidade Federal de Santa Catarina

*O conhecimento fala,
a sabedoria escuta.*

Jimi Hendrix

RESUMO

Os estudos voltados para a estabilidade são essenciais no desenvolvimento de um projeto naval, pois representam uma grande parcela da segurança e do desempenho da embarcação. Perturbações ambientais podem, em casos críticos, causar emborcamento com possíveis danos materiais, ambientais e, até mesmo, a perda de vidas humanas. Este trabalho concentra esforços na análise da estabilidade transversal estática de embarcações, as quais se encontram na condição intacta. O texto apresenta uma discussão teórica sobre a questão e propõe o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para uso no ensino de engenharia, além de permitir a arquitetos, projetistas e pesquisadores o desenvolvimento de trabalhos nessa área. A ferramenta, denominada Barbosa's, foi desenvolvida com uso da interface Delphi 10.2.3 e permite cálculos de equilíbrio hidrostático e análises de estabilidade estática a grandes ângulos (determinação da curva \overline{GZ}). As geometrias analisadas são limitadas a embarcações monocascos, desprovidas de apêndices e cuja superfície do casco seja descrita por um arquivo de texto contendo a tabela de cotas da embarcação. Para a validação do trabalho foi realizado um comparativo entre os resultados obtidos na ferramenta desenvolvida e no programa MAXSURF considerando duas geometrias de casco e 3 condições de carga aplicadas a cada uma das geometrias. Os erros obtidos em todas as análises foram inferiores a 1% (ou numericamente não significativos), evidenciando o sucesso do desenvolvimento proposto.

Palavras-chave: Arquitetura naval. Equilíbrio hidrostático. Estabilidade transversal. Curva de restauração. Ferramenta computacional.

ABSTRACT

Studies on vessel stability are essential to the development of naval projects, as they represent a large portion of the vessel's safety and performance. Environmental disturbances can, in critical cases, cause capsizing and lead to possible material and environmental damage and even loss of human lives. This work concentrates efforts on the analysis of the static transverse stability of vessels, which are in the intact condition. The text presents a theoretical discussion on the issue and proposes the development of a computational tool to assist the study of naval stability in engineering teaching, in addition to allowing architects, designers and researchers to develop works in this field. The tool, called Barbosa's, was developed using Delphi 10.2.3 interface and allows performing hydrostatic balance calculations and static stability analysis at wide angles (determination of the \overline{GZ} curve). The analyzed geometries are limited to mono-hull vessels, without appendages and whose hull surface is described by a text file with the vessel's quota table. In order to validate the tool, a comparison was made between the results obtained in the developed tool and in the MAXSURF program, considering two hull geometries and 3 load conditions applied to each geometry. The errors obtained in all analyzes were less than 1% (or numerically not significant), showing the success of the proposed development.

Keywords: Naval architecture. Hydrostatic balance. Transverse stability. Restoration curve. Computational tool.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Embarcação Ali Aga emborcando	15
Figura 2 - Movimentos e ângulos da embarcação	16
Figura 3 - Estabilidade Positiva e Negativa	20
Figura 4 - Altura Metacêntrica	21
Figura 5 - Pontos importantes à estabilidade	23
Figura 6 - Definição de \overline{BM}	25
Figura 7 - Fluxograma do Processo Iterativo	28
Figura 8 - Método da Bisseção	29
Figura 9 - Método de Newton-Raphson	30
Figura 10 - Metodologia adotada	33
Figura 11 - Realocação do Navio	35
Figura 12 - Organizando Cotas das Balizas	36
Figura 13 - Embarcação Importada	37
Figura 14 - Balizas com Áreas Desconexas	38
Figura 15 - Superfície Triangular	38
Figura 16 - Gradeamento Mesh entre Balizas	39
Figura 17 - Superfície Entre Duas Balizas	39
Figura 18 - Superfície de Casco Deformada	40
Figura 19 - Balizas Padronizadas com 5 Pontos Interpolados	41
Figura 20 - Balizas Padronizadas com 200 Pontos Interpolados	42
Figura 21 - Pesqueiro com 100 painéis entre balizas	42
Figura 22 - Variando o Ângulo de Trim	43
Figura 23 - Duas Partes Submersas Separadamente	45
Figura 24 - Ponto Interpolado na Linha d'água	45
Figura 25 - Balizas Parcialmente Submersas	47
Figura 26 - Valores Nulos da SAC(x)	48
Figura 27 - Eixo de Rotação do Navio para ângulos de Banda	49
Figura 28 - Eixo de Rotação do Navio para ângulos de Trim	49
Figura 29 - Rotacionando Ponto Arbitrário	50
Figura 30 - Equilíbrio de LCG e LCB Errado	52
Figura 31 - Equilíbrio de LCG e LCB Correto	53
Figura 32 - LCB's de Equilíbrio	53
Figura 33 - LCB de Convergência	54
Figura 34 - Fluxograma dos Métodos de Solução de Raízes	55
Figura 35 - Método de Newton-Raphson na Curva de Deslocamento	55
Figura 36 - Método de Newton-Raphson na Curva de LCB	56
Figura 37 - Superfície de Deslocamento	58
Figura 38 - "Variação de Calado" e "Trim"	59
Figura 39 - Superfície de LCB	60
Figura 40 - Projeção da Curva de Equilíbrio	61
Figura 41 - Cruzamento das Curvas de Equilíbrio	62
Figura 42 - Aplicação dos Métodos de Solução de Raízes	62
Figura 43 - Aumentar Velocidade de Convergência	63
Figura 44 - Convergência Lenta	64
Figura 45 - Divergência da Solução	65
Figura 46 - Mais de Uma Resposta	66
Figura 47 - Calado nas Perpendiculares e na Meia Nau	67
Figura 48 - LCB e VCB Medidos em Diferentes Sistemas	67

Figura 49 - Braço \overline{GZ}	69
Figura 50 - Curva \overline{GZ}	70
Figura 51 - Integração da Curva \overline{GZ}	71
Figura 52 - Unidades Adotadas no MAXSURF	72
Figura 53 - Parâmetros dos Coeficientes de Forma no MAXSURF	73
Figura 54 - Vistas do Pesqueiro no MAXSURF Stability	74
Figura 55 - Vistas do Pesqueiro na Ferramenta Desenvolvida	75
Figura 56 - Vistas do Rebocador no MAXSURF Stability	75
Figura 57 - Vistas do Rebocador na Ferramenta Desenvolvida	76
Figura 58 - Equilíbrio do Pesqueiro	77
Figura 59 - Equilíbrio do Hydra	77
Figura 60 - Curvas SAC(x)	79
Figura 61 - Curvas \overline{GZ}	80
Figura 62 - Interface Inicial	85
Figura 63 - Sub Painel de Importação do Navio	86
Figura 64 - Sub Painel de Dados de Entrada	87
Figura 65 - Interface Secundária da Análise de Equilíbrio	88
Figura 66 - Visualização da Embarcação na Análise Detalhada	89
Figura 67 - Sub Painel de Análise a Grandes Ângulos	90
Figura 68 - Sub Painel de Critérios da IMO	91
Figura 69 - Resultados dos Critérios da IMO	91
Figura 70 - Painel de Visualização 1	92
Figura 71 - Painel de Resultados	93
Figura 72 - Painel de Gráficos	96
Figura 73 - Coordenadas Painel de Gráficos	96
Figura 74 - Recorte na Aba de Exportação	97
Figura 75 - Resultados Exportados em Arquivo de Texto	97
Figura 76 - Ângulo de Visualização	98
Figura 77 - Configuração "Generate Grid from Markers"	100
Figura 78 - Configuração "Generate TriMesh"	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de IMO	27
Tabela 2 - Detalhamento dos Coeficientes de Forma no Barbosa's	69
Tabela 3 - Dimensões Principais	74
Tabela 4 - Detalhamento Dados de Entrada	76
Tabela 5 - Dados Hidrostáticos do Pesqueiro na Primeira Análise	78
Tabela 6 - Critérios da IMO do Pesqueiro na Primeira Análise	81
Tabela 7 - Dados Hidrostáticos do Pesqueiro na Segunda Análise	102
Tabela 8 - Dados Hidrostáticos do Pesqueiro na Terceira Análise	102
Tabela 9 - Dados Hidrostáticos do Rebocador na Primeira Análise	103
Tabela 10 - Dados Hidrostáticos do Rebocador na Segunda Análise	103
Tabela 11 - Dados Hidrostáticos do Rebocador na Terceira Análise	104
Tabela 12 - SAC(x) do Pesqueiro na Primeira Análise	105
Tabela 13 - SAC(x) do Pesqueiro na Segunda Análise	106
Tabela 14 - SAC(x) do Pesqueiro na Terceira Análise	107
Tabela 15 - SAC(x) do Rebocador na Primeira Análise	108
Tabela 16 - SAC(x) do Rebocador na Segunda Análise	109
Tabela 17 - SAC(x) do Rebocador na Terceira Análise	110
Tabela 18 - Braço \overline{GZ} do Pesqueiro na Primeira Análise	111
Tabela 19 - Braço \overline{GZ} do Pesqueiro na Segunda Análise	112
Tabela 20 - Braço \overline{GZ} do Pesqueiro na Terceira Análise	113
Tabela 21 - Braço \overline{GZ} do Rebocador na Primeira Análise	114
Tabela 22 - Braço \overline{GZ} do Rebocador na Segunda Análise	115
Tabela 23 - Braço \overline{GZ} do Rebocador na Terceira Análise	116
Tabela 24 - Critérios da IMO do Pesqueiro na Segunda Análise	117
Tabela 25 - Critérios da IMO do Pesqueiro na Terceira Análise	117
Tabela 26 - Critérios da IMO do Rebocador na Primeira Análise	117
Tabela 27 - Critérios da IMO do Rebocador na Segunda Análise	117
Tabela 28 - Critérios da IMO do Rebocador na Terceira Análise	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CB	Centro de Flutuação
CG	Centro de Gravidade
DNV	Det Norske Veritas (The Norwegian Veritas)
DUNA	Desafio Universitário de Nautidesign
IMO	International Maritime Organization
LCB	Posição Longitudinal do Centro de Flutuação
LCF	Posição Longitudinal do Centro da Área de Flutuação
LCG	Posição Longitudinal do Centro de Gravidade
TCB	Posição Transversal do Centro de Flutuação
TCG	Posição Transversal do Centro de Gravidade
VCB	Posição Vertical do Centro de Flutuação
VCG	Posição Vertical do Centro de Gravidade

LISTA DE SÍMBOLOS

\overline{GM}	Altura Metacêntrica
\overline{GZ}	Braço de endireitamento perpendicular à linha de ação das forças peso e flutuação
\overline{KG}	Altura do Centro de Gravidade a partir da quilha
$\overline{G_0Z_0}$	Braço de endireitamento perpendicular à linha de ação das forças peso e flutuação, considerando \overline{KG} igual a zero
m	Uma massa qualquer dentro do navio
$V_{deslocado}$	Volume de água que o navio desloca
ρ_{fluido}	Massa específica do fluido
\overline{KB}	Altura do Centro de Flutuação a partir da quilha
M	Ponto no espaço que representa o Metacentro
$\delta\varphi$	Pequeno ângulo de banda ou trim
G	Ponto no espaço que representa o Centro de Gravidade
\overline{BM}	Raio Metacêntrico
$SAC(x)$	Curva de áreas seccionais
z	Coordenada vertical
x	Coordenada longitudinal
y	Coordenada transversal
$z_c(x)$	Altura do centróide da baliza submersa em uma dada posição longitudinal
v	Volume da cunha imersa durante a rotação do navio
g_1	Centro Geométrico do volume da cunha emersa
g_2	Centro Geométrico do volume da cunha submersa
n	Número de vértices do polígono
B	Ponto no espaço que representa o Centro de Flutuação
B_1	Ponto no espaço que representa o Centro de Flutuação após uma rotação de $\delta\varphi$
$\overline{g_1g_2}$	Distância entre os pontos g_1 e g_2
$\overline{BB_1}$	Distância entre os pontos B e B_1
$A_{cunha}(x)$	Área da cunha transversal em função de x
$\overline{g_1g_2}(x)$	Distância entre os pontos g_1 e g_2 em função de x
$y(x)$	Meia boca na linha d'água em função de x
I_T	Momento de inércia de primeira ordem da área de flutuação em relação ao eixo x
y_c	Coordenada transversal do centróide
z_c	Coordenada vertical do centróide
L_{WL}	Comprimento na linha d'água

C_B	Coeficiente de Bloco
C_P	Coeficiente Prismático
C_M	Coeficiente de Seção Mestra
C_{WP}	Coeficiente do Plano de Linha d'água
\overline{BM}_T	Raio metacêntrico transversal
\overline{GM}_T	Altura metacêntrica transversal
$N_{PAINÉIS}$	Número de painéis
N_{PONTOS}	Número de pontos
L_{OA}	Comprimento total da embarcação
$Z'(x)$	Cota vertical do ponto rotacionado
Δ_Z	Varição de calado
Θ_{trim}	Ângulo de trim
θ	Ângulo de banda
β	Ângulo relativo inicial
R	Raio da coordenada polar
$GM_{corrigido}$	Altura metacêntrica corrigida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2 FUNDAMENTOS DA ESTABILIDADE	19
2.1 ESTABILIDADE INICIAL	19
2.1.1 Estimativa de Pesos e Centros	22
2.1.2 Cálculo do Metacentro	23
2.2 ESTABILIDADE ESTÁTICA A GRANDES ÂNGULOS	26
2.3 ANÁLISE DOS CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE DA IMO	27
2.4 MÉTODOS NUMÉRICOS	27
2.4.1 Métodos de Solução de Raízes	27
2.4.1.1 Método da Bisseção	29
2.4.1.2 Método de Newton-Raphson	30
2.4.2 Método do Cálculo de Área de Gauss	31
3 METODOLOGIA	32
4 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	34
4.1 IMPORTAÇÃO DO CASCO	34
4.1.1 Restrições na Importação	37
4.2 IMPLEMENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO CASCO	38
4.3 VARIAÇÃO DE TRIM E CALADO NA ANÁLISE	43
4.4 INTEGRAÇÃO NUMÉRICA DAS BALIZAS	44
4.5 ROTAÇÃO DOS PONTOS NO SISTEMA DE COORDENADAS	48
4.6 EQUILÍBRIO DA EMBARCAÇÃO	50
4.6.1 Equilíbrio Longitudinal das Forças	52
4.6.2 Métodos Numéricos de Obtenção de Raízes	54
4.6.3 Critérios de Parada	57
4.6.4 Modo de Análise Detalhada	57
4.6.5 Velocidade de Convergência	63
4.6.6 Dificuldades de Convergência	64
4.7 DADOS HIDROSTÁTICOS	66
4.7.1 Coeficientes de Forma	68
4.8 ESTABILIDADE A GRANDES ÂNGULOS	69
4.8.1 Critérios da IMO	70
4.9 OUTRAS FUNCIONALIDADES	71
5 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA	72
5.1 CONFIGURAÇÃO DO MAXSURF STABILITY	72
5.2 ANÁLISES	74

6 CONCLUSÕES	82
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE A - MANUAL DA FERRAMENTA	85
APÊNDICE B - IMPORTAÇÃO DA TABELA DE COTAS NO MAXSURF	100
APÊNDICE C - TABELAS DOS RESULTADOS DAS VALIDAÇÕES	102

1 INTRODUÇÃO

Cerca de 75% do planeta é coberto por rios, lagos e mares, nos quais navegam milhares de embarcações, dos mais variados tipos, tamanhos e aplicações. Diferentemente das estruturas fixas, essas embarcações flutuam, sofrendo movimentos em razão de perturbações ambientais. Portanto, a negligência nos cuidados com a análise da estabilidade de embarcações pode acarretar emborcamentos, prejuízos financeiros ou a perda de vidas humanas.

Como exemplo dos riscos associados aos problemas na estabilidade de embarcações, na Figura 1 é mostrado o emborcamento da embarcação de carga Ali Aga, ocorrido em virtude de um carregamento incorreto no porto.

Figura 1 - Embarcação Ali Aga emborcando



Fonte: MARITIME HERALD, 2017

Para serem seguras e funcionais, as embarcações devem respeitar ao menos duas importantes condições. A primeira condição diz respeito ao equilíbrio: em sistemas físicos, o estado de equilíbrio ocorre quando a resultante das forças e a resultante dos momentos aplicados em um corpo rígido são nulas. A segunda propriedade diz respeito à estabilidade do equilíbrio, que engloba a capacidade de um sistema físico recuperar seu equilíbrio inicial após a variação da sua posição devido a uma perturbação qualquer.

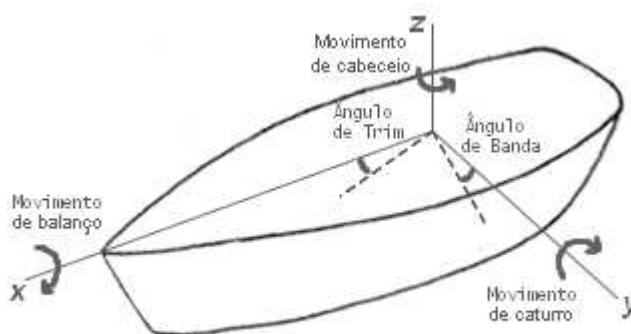
De acordo com Lewis (1988), as principais perturbações que incidem em uma embarcação incluem ventos, ondas, reboque de cargas externas, inércia devido à

guinada, encalhe, tração em cabos de guincho, movimentação de cargas à bordo, aprisionamento de água no convés (ou porões), entre outros.

Na Engenharia Naval, a estabilidade de uma embarcação é analisada considerando-se a ocorrência de inclinações nas direções transversal e longitudinal do casco. Uma vez perturbado, o navio adquire um ângulo de banda, na primeira direção, e/ou um ângulo de trim, na segunda (Figura 2).

Em embarcações monocasco de superfície, a estabilidade transversal tende a ser crítica em relação à estabilidade longitudinal, uma vez que o momento restaurador resultante de inclinações longitudinais é consideravelmente maior (LEWIS, 1988). Por este motivo, este trabalho prioriza a análise da estabilidade transversal de uma embarcação.

Figura 2 - Movimentos e ângulos da embarcação



Fonte: O Autor

Durante a fase conceitual do projeto de um navio, são concebidas as características fundamentais da embarcação. Nessa fase, devido à baixa quantidade de informações disponíveis, a estabilidade é avaliada calculando-se a altura metacêntrica (\overline{GM}) do casco, tal como discutido em trabalhos clássicos como o de Barrass (2004), Watson (1998) e Lewis (1988).

Já na etapa preliminar, o casco da embarcação é modelado, permitindo um estudo mais amplo das características associadas à estabilidade transversal do projeto. Tal análise consiste na determinação do braço de endireitamento (\overline{GZ}) entre as linhas de ação das forças peso e flutuação, considerando diferentes ângulos de inclinação do casco.

Nas etapas mais avançadas de um projeto naval podem ser realizadas diversas análises, relacionadas a regimes dinâmicos ou estáticos que incluem

diversos fatores que podem emborcar o casco, além de considerar eventuais avarias da embarcação. Por limitação de tempo, neste trabalho não serão consideradas as condições dinâmicas e nem eventuais avarias na análise da estabilidade transversal. No entanto, o leitor interessado pode encontrar farta documentação sobre esses assuntos em Lewis (1988).

Do ponto de vista operacional, as análises de estabilidade de embarcações exigem a integração de volumes submersos de geometrias complexas considerando diferentes ângulos de inclinação. Embora sejam tarefas que possam ser realizadas manualmente, o desenvolvimento de ferramentas computacionais automatizadas auxilia substancialmente esse processo.

Atualmente existem diversos programas que realizam o estudo de estabilidade de embarcações (Orca, MAXSURF, DELFTship, entre outros). No entanto, essas ferramentas possuem elevado custo, sendo inviável em diversos casos, especialmente àqueles ligados ao ensino e à pesquisa. Além disso, a integração de tais ferramentas com algoritmos automatizados para o desenho de casco é lenta e difícil, motivando o desenvolvimento de soluções próprias para a análise de estabilidade transversal de embarcações (OHANA; MOREIRA, 2019).

Desta forma, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta que, a um só tempo, fornece sustentação à comunidade acadêmica na didática do aprendizado em sala de aula, e possibilita arquitetos, projetistas e pesquisadores a investigarem questões associadas à estabilidade transversal durante a fase preliminar do projeto de embarcações.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma ferramenta computacional capaz de realizar a análise de estabilidade transversal estática de embarcações na condição intacta, utilizando o ambiente e linguagem Delphi (versão 10.2.3).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para realizar o objetivo geral, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- a. Desenvolver uma interface gráfica capaz de receber informações e comandos do usuário que permitam descrever a embarcação a ser analisada;
- b. Desenvolver um procedimento para a descrição da geometria de cascos usando a tabela de cotas;
- c. Desenvolver o cálculo da altura metacêntrica (\overline{GM}) a partir da altura do centro de gravidade (\overline{KG}) fornecida pelo usuário;
- d. Desenvolver o algoritmo para a análise do braço de endireitamento na quilha ($\overline{G_0Z_0}$) a partir da inclinação do casco em diferentes ângulos de banda, considerando diferentes deslocamentos;
- e. Desenvolver uma interface de visualização da curva de estabilidade estática (\overline{GZ} x ângulo de banda) para as condições definidas pelo usuário;
- f. Desenvolver o algoritmo de análise dos critérios de estabilidade da International Maritime Organization (IMO) a partir da curva de estabilidade estática.

2 FUNDAMENTOS DA ESTABILIDADE

Conforme discutido na introdução, para serem seguras e funcionais, as embarcações devem possuir estabilidade transversal capaz de atender aos critérios estabelecidos por Sociedades Classificadoras e órgãos fiscalizadores.

Para ser considerada estável, uma embarcação deve restaurar seu equilíbrio inicial ao sofrer eventuais perturbações. Neste caso, uma vez que tais perturbações cessem, os ângulos iniciais (banda e/ou trim) devem diminuir até que a embarcação alcance novamente a condição inicial de equilíbrio. Embarcações instáveis, por sua vez, tendem a não retornar à posição de equilíbrio, resultando no emborcamento do casco.

Conforme destacado por Lewis (1988), os dois protagonistas que afetam a estabilidade estática de um navio são a geometria do casco submerso e a distribuição de peso ao longo da embarcação.

2.1 ESTABILIDADE INICIAL

É importante destacar que a segurança de uma embarcação não está necessariamente associada ao aumento do momento de endireitamento máximo do casco.

Existem vantagens e desvantagens associadas à magnitude do momento restaurador a que um navio está sujeito. Valores excessivos de restauração garantem a estabilidade do sistema, mas resultam em acelerações elevadas que podem causar maior desgaste nas amarrações das cargas (DOKKUM, 2008), danos a equipamentos, enjoos e até mesmo acidentes a bordo, comprometendo a segurança. Já valores reduzidos, por exemplo, favorecem o conforto de passageiros através de um balanço transversal mais suave.

Dois fatores principais devem ser levados em consideração: o equilíbrio vertical de forças agindo em uma embarcação e o local de ação de tais forças. O primeiro fator é descrito pela Equação 1, a qual representa a igualdade entre a somatória do peso de todas as massas presentes na embarcação com o peso do fluido deslocado pelo casco.

$$\sum_{i=1}^n m_i = \nabla \cdot \rho_{fluido} \quad (1)$$

Efetivamente, para o equilíbrio do navio, é necessário que tanto a somatória das forças quanto a somatória dos momentos agindo na embarcação devam ser nulas. Portanto, há a necessidade das linhas de ação das forças peso e flutuação estarem sobrepostas. Para isso, as Equações 2 e 3 devem ser atendidas. Ou seja, para que não existam momentos, o centro de flutuação (B) e o centro de massa (G) devem possuir a mesma posição transversal (Equação 2) e longitudinal (Equação 3).

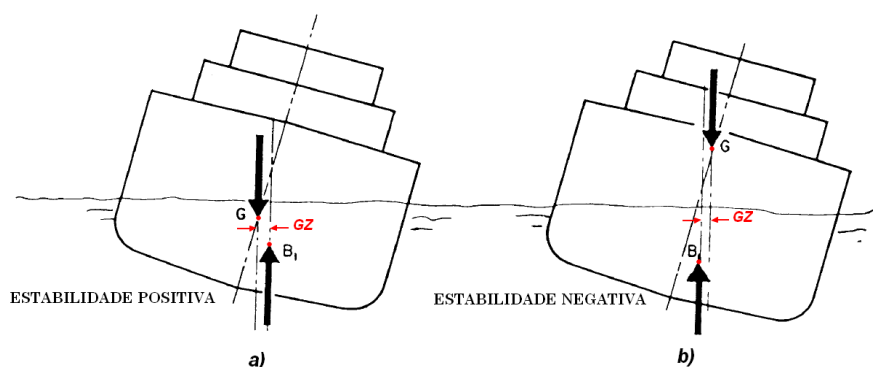
$$TCG = TCB \quad (2)$$

$$LCG = LCB \quad (3)$$

Por fim, é importante observar que a posição vertical do centro de massa (\overline{KG}) e do centro de flutuação (\overline{KB}) não provoca momento, mas afeta sensivelmente a estabilidade do equilíbrio de forças, tal como será visto a seguir.

O tipo de estabilidade de um sistema pode ser intuitivamente definido pela posição em que os centros se encontram após a ocorrência de pequenos ângulos de inclinação (Figura 3). A depender do valor de \overline{KG} , a embarcação pode desenvolver um momento restaurador (Figura 3a) (estabilidade positiva) ou um momento emborcador (Figura 3b) (estabilidade negativa).

Figura 3 - Estabilidade Positiva e Negativa



Fonte: Adaptado de LEWIS (1988, p. 66)

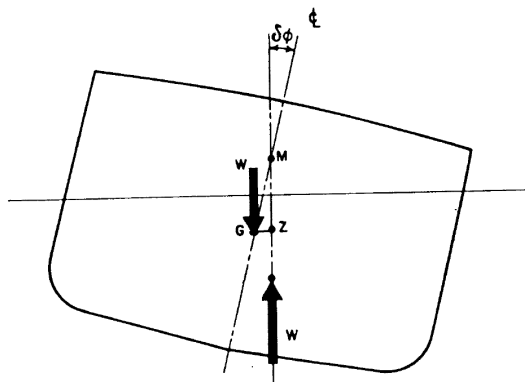
Para pequenos ângulos de banda, pode-se definir o conceito de altura metacêntrica \overline{GM} , a qual define o tipo de estabilidade inicial da embarcação. O metacentro (M) consiste em um ponto imaginário no espaço, o qual é definido pela intersecção de duas linhas de ação consecutivas da força de flutuação quando o corpo é rotacionado num pequeno ângulo $\delta\phi$. Portanto, classifica-se o \overline{GM} como sendo a distância vertical entre o centro de gravidade (G) e o metacentro (M) de uma embarcação.

De acordo com Lewis (1988), desde que não haja grandes variações no formato da área de flutuação na linha d'água, o \overline{GM} irá se manter praticamente estacionário ao longo dos sete a dez graus iniciais de inclinação. Pode-se ainda aproximar o valor de braço \underline{GZ} através da projeção de \overline{GM} , conforme a Equação 4, abaixo:

$$\overline{GZ} \approx \overline{GM} \cdot \sin(\delta\phi) \quad (4)$$

Para melhor compreensão da projeção de \overline{GM} , veja a Figura 4, a seguir. Quando o ponto M se encontra acima do ponto G, tem-se \overline{GM} positivo, e logo, estabilidade inicial positiva (Figura 4). Caso contrário, o \overline{GM} será negativo e a embarcação será instável.

Figura 4 - Altura Metacêntrica



Fonte: Adaptado de LEWIS (1988, p. 66)

Entendendo que o Metacentro (M) depende diretamente do volume deslocado e que o centro de Gravidade (G) depende da posição dos pesos a bordo do navio, a

seguir são apresentados os procedimentos para a operacionalização do cálculo de \overline{GM} .

2.1.1 Estimativa de Pesos e Centros

Por mais maçante e trabalhoso que possa ser o processo de obtenção dos pesos e centros, essa tarefa é de extrema importância nas fases iniciais do projeto de um navio. Tais informações são essenciais para a verificação e a adequação da estabilidade da embarcação.

Por exemplo, dependendo da presença ou não de um equilíbrio de pesos ao redor do plano diametral do navio, pode haver um ângulo inicial de banda diferente de zero, o qual afeta aspectos do desempenho da embarcação, tais como: resistência ao avanço, manobrabilidade, comportamento no mar etc.

Dessa forma, o projetista precisa determinar a posição do centro de gravidade da embarcação. Nesse caso, pode-se utilizar a formulação básica de ponderação dos centros de massas para obter os valores da posição longitudinal (LCG), vertical (VCG) e transversal (TCG) do centro de gravidade da embarcação, conforme as Equações 5, 6 e 7, respectivamente.

$$LCG = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \cdot lcg_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i)} \quad (5)$$

$$VCG = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \cdot vcg_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i)} \quad (6)$$

$$TCG = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \cdot tcg_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i)} \quad (7)$$

É importante destacar que existem inúmeras possibilidades de condições de carga e, por essa razão, o projeto da embarcação deve avaliar diversas condições de carga, buscando definir as condições potencialmente críticas.

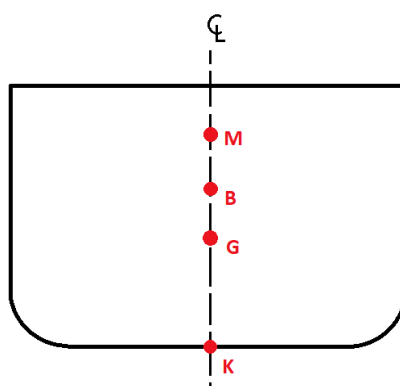
Esta é uma das razões de existir uma logística tão complexa no processo de carga e descarga de embarcações mercantes, tanto do ponto de vista de centro

gravitacional (estabilidade), quanto de distribuição de massa (impacto estrutural devido ao momento fletor da viga navio).

2.1.2 Cálculo do Metacentro

Conforme mostrado na Figura 5, pode-se estabelecer uma equação vetorial (Equação 8) formada pelas distâncias entre os principais pontos necessários à análise de estabilidade de um navio.

Figura 5 - Pontos importantes à estabilidade



Fonte: O Autor

Conforme definido na Equação (8), o valor de \overline{GM} de uma embarcação pode ser calculado através da somatória da altura do centro de flutuação (VCB ou \overline{KB}) com o raio metacêntrico (\overline{BM}) subtraída a altura do centro de gravidade (\overline{KG}).

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (8)$$

Primeiramente, o centro vertical de flutuação pode ser calculado através da integral ponderada das áreas submersas das balizas, ou seja, $SAC(x)$, pelas posições verticais dos centróides das geometrias submersas de cada baliza (Equação 9).

De forma similar, o centro longitudinal de flutuação (LCB) e o centro transversal de flutuação (TCB) podem ser obtidos utilizando-se as equações 10 e 11 respectivamente.

$$VCB = \frac{\int_0^L SAC(x) \cdot z_c(x) \cdot dx}{\int_0^L SAC(x) \cdot dx} \quad (9)$$

$$LCB = \frac{\int_0^L SAC(x) \cdot x_c(x) \cdot dx}{\int_0^L SAC(x) \cdot dx} \quad (10)$$

$$TCB = \frac{\int_0^L SAC(x) \cdot y_c(x) \cdot dx}{\int_0^L SAC(x) \cdot dx} \quad (11)$$

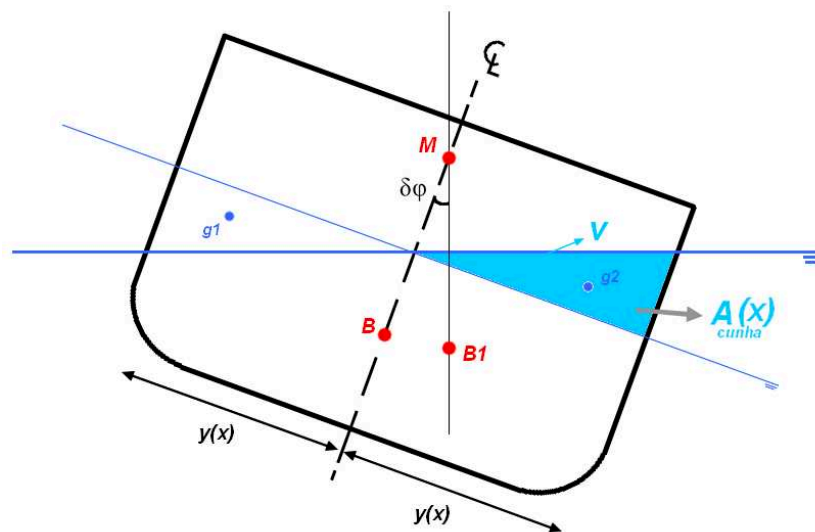
A altura do centro de gravidade (\overline{KG}) foi estabelecida no subcapítulo anterior. Portanto, resta determinar o raio metacêntrico (\overline{BM}) transversal para um dado corpo flutuante.

Considere que a Figura 6 retrata uma baliza em uma dada posição x de um navio inclinado à um ângulo pequeno¹ $\delta\phi$.

Após a rotação do corpo na água, o volume em cunha submergido v é numericamente igual ao volume, também em cunha, emergido, mantendo assim o deslocamento do navio constante. Os centróides desses volumes são identificados como g_1 e g_2 . Por outro lado, o centróide do volume submerso total (∇), que antes era B , agora é B_1 .

¹ Este ângulo pequeno se refere ao trecho de até 7 a 10 graus de banda onde a altura metacêntrica costuma se manter quase estacionário para pequenas variações do plano de linha d'água, conforme demonstrado por Lewis (1988).

Figura 6 - Definição de BM



Fonte: O Autor

Matematicamente, conforme demonstrado por Lewis (1988), pode-se provar que $\overline{g_1g_2}$ e $\overline{BB_1}$ são segmentos paralelos onde $\overline{BB_1}$ representa uma porcentagem de $\overline{g_1g_2}$ obtido pela ponderação de $\frac{v}{V}$ (Equação 12).

$$\overline{BB_1} = \left(\frac{v}{V}\right) \cdot \overline{g_1g_2} \quad (12)$$

Ao realizar a integração da área de seção da cunha $A_{cunha}(x)$ ponderada pela distância $\overline{g_1g_2}(x)$ ao longo do eixo x , obtém-se o valor absoluto de $v \cdot \overline{g_1g_2}$, conforme descrito pela Equação 13.

$$v \cdot \overline{g_1g_2} = \int_0^L \left\{ \left[y(x) * (y(x) \cdot \tan(\delta\phi)) * \frac{1}{2} \right] * \left[2 * \frac{2}{3} * y(x) \right] \right\} \cdot dx \quad (13)$$

O termo nos primeiros colchetes representa a área de seção da cunha e o dos segundos representa uma aproximação da distância $\overline{g_1g_2}(x)$. Portanto, sabendo que o momento de inércia (I_T) da área de flutuação em relação ao eixo x pode ser calculado (LEWIS, 1988) usando a Equação 14, é possível agrupar os três termos de coordenada transversal da Equação 13 para substituí-los por I_T .

$$I_T = \frac{2}{3} * \int_0^L y(x)^3 \cdot dx \quad (14)$$

Assumindo que para pequenos ângulos de banda o \overline{BM} pode ser calculado pela divisão de $\overline{BB_1}$ pela $\tan(\delta\varphi)$, ao manipular a Equação 13 obtém-se a Equação 15, a qual pode ser utilizada para o cálculo do raio metacêntrico.

$$\overline{BM} = \frac{I_T}{\nabla} \quad (15)$$

Por fim, o volume submerso do casco pode ser calculado integrando-se a curva $SAC(x)$, tal como mostrado na Equação 16.

$$Volume\ Submerso = \int_0^L SAC(x).dx \quad (16)$$

2.2 ESTABILIDADE ESTÁTICA A GRANDES ÂNGULOS

A análise da estabilidade estática a grandes ângulos pode ser definida como o estudo da variação do braço de endireitamento \overline{GZ} em função da inclinação transversal da embarcação.

Tradicionalmente este processo utiliza uma abordagem quasi-estática, na qual cada ângulo de banda é analisado utilizando-se uma aproximação estática da configuração analisada.

Nesse processo a condição de equilíbrio deve ser verificada para cada ângulo de banda analisado. Primeiramente é necessário que a somatória das forças verticais seja nula. Considerando que as únicas forças envolvidas são o peso e a flutuação, as quais possuem sentidos opostos, essas devem ser numericamente idênticas. Para isso, altera-se o calado de forma a modificar o deslocamento até que o equilíbrio seja alcançado.

Por fim, para que não exista momento longitudinal, é necessário que a posição da linha de ação das duas forças seja a mesma. Ou seja, para um sistema de coordenadas fixo no espaço, o LCB deve ser igual ao LCG. Para isso, altera-se o ângulo de trim de forma a manipular o LCB até que o equilíbrio seja alcançado.

Em resumo, para cada ângulo de banda discretizado na análise, deve-se encontrar uma condição específica de calado e trim que resulte no equilíbrio das forças verticais e dos momentos longitudinais.

Após estas duas condições serem atendidas pode-se calcular a distância transversal entre as forças.

2.3 ANÁLISE DOS CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE DA IMO

A avaliação da estabilidade de uma embarcação consiste na aplicação de critérios definidos por autoridades marítimas, organizações internacionais, convenções e Sociedades Classificadoras. Para o presente trabalho serão utilizados os critérios destinados à análise da estabilidade transversal intacta de embarcações mercantes sujeitas a grandes ângulos de inclinação publicados na resolução MSC.267(85) (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, 2008).

Tais critérios são relacionados à valores absolutos da curva \overline{GZ} tomados em ângulos de banda críticos, além de valores de áreas abaixo da curva. A Tabela 1 contém as definições dos seis critérios utilizados.

Tabela 1 - Critérios de IMO

Nº do Critério	1	2	3	4	5	6
Condição	$0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$	$0^\circ \leq \theta \leq \alpha_{\text{Ang. Crítico}}^*$	$30^\circ \leq \theta \leq \alpha_{\text{Ang. Crítico}}^*$	$\theta = 30^\circ$	$\max(GZ)$	GM Inicial
Requisito	$A \geq 0,055$ [m.rad]	$A \geq 0,090$ [m.rad]	$A \geq 0,030$ [m.rad]	$GZ \geq 0,20$ [m]	$\theta \geq 30^\circ$	$GMt \geq 0,15$ [m]
* $\alpha_{\text{Ang. Crítico}}$ é o mínimo entre ângulo de emborcamento e 40°						

Fonte: O Autor

2.4 MÉTODOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados os principais métodos numéricos utilizados neste trabalho.

2.4.1 Métodos de Solução de Raízes

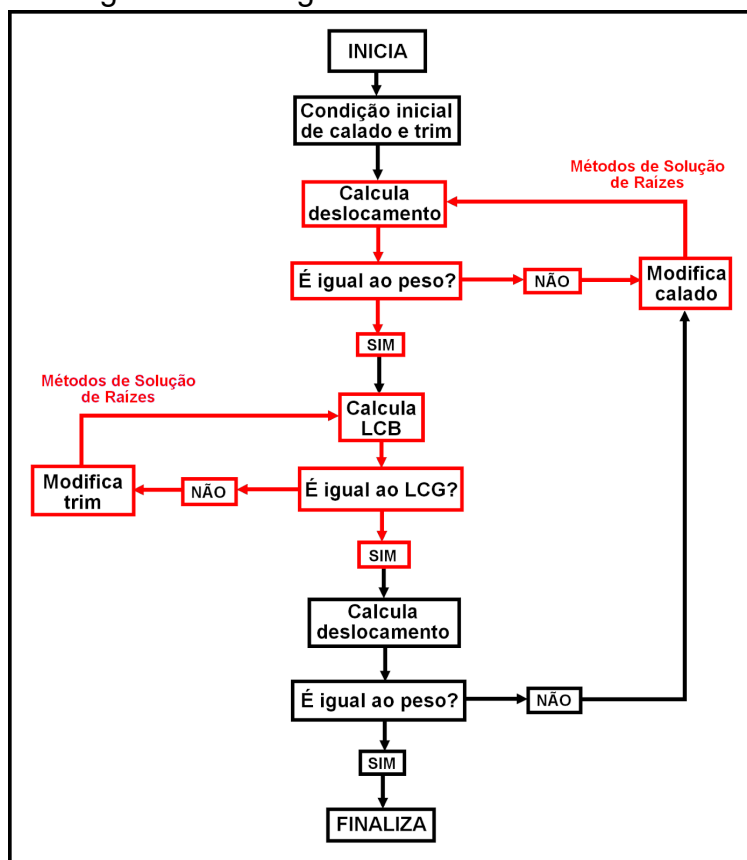
A determinação correta do calado e do ângulo de trim que equilibram a embarcação para uma dada condição de carga é um processo iterativo que requer um algoritmo de busca de solução.

No sistema desenvolvido, esse problema é resolvido aplicando-se um método de solução de raízes que determina os valores das variáveis (trim e calado) para que ambas as condições de equilíbrio (Equações 1 e 3) sejam satisfeitas simultaneamente.

Deve-se compreender que por mais que o calado seja modificado exclusivamente para atingir o deslocamento requerido ao equilíbrio, o LCB também sofre variação. De forma análoga, por mais que o trim seja modificado exclusivamente para atingir um LCB igual ao LCG, o deslocamento também sofre variação.

Por essa razão, existe a necessidade da aplicação de um processo iterativo que corrija simultaneamente o equilíbrio entre as intensidades e as posições longitudinais das forças. Na Figura 7 é mostrado um fluxograma simplificado do processo iterativo necessário ao equilíbrio do navio.

Figura 7 - Fluxograma do Processo Iterativo



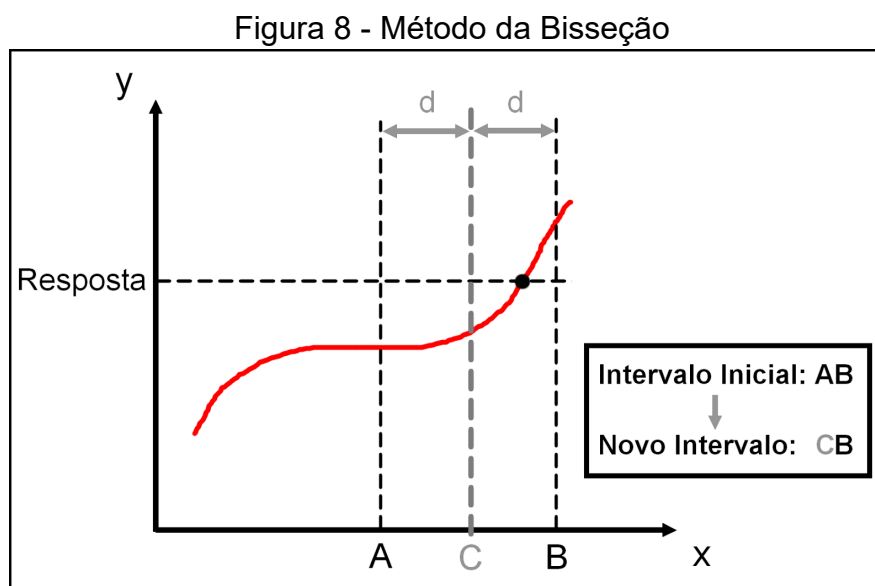
Fonte: O Autor

Para esse propósito utilizou-se nos locais marcados em vermelho (Figura 7) o método da bisseção e o método de Newton-Raphson, os quais são apresentados a seguir.

2.4.1.1 Método da Bisseção

Esta é uma técnica que permite obter a raiz de uma função contínua qualquer, considerando um intervalo de domínio e garantindo que exista apenas uma raiz no intervalo considerado.

Portanto, um dos extremos deste intervalo inicial deve possuir imagem menor do que a resposta desejada, enquanto o outro deve possuir uma imagem maior. Partindo desta hipótese e seguindo o procedimento mostrado na Figura 8, divide-se o intervalo pela metade e identifica-se onde está a resposta desejada; comparando as imagens dos extremos do intervalo com a do meio.



Fonte: O Autor

A partir do resultado obtido, define-se um novo intervalo que corresponde à metade do tamanho e que possui as mesmas hipóteses do intervalo original. Esse processo é repetido até que o tamanho do intervalo atenda ao critério de convergência estabelecido para o processo.

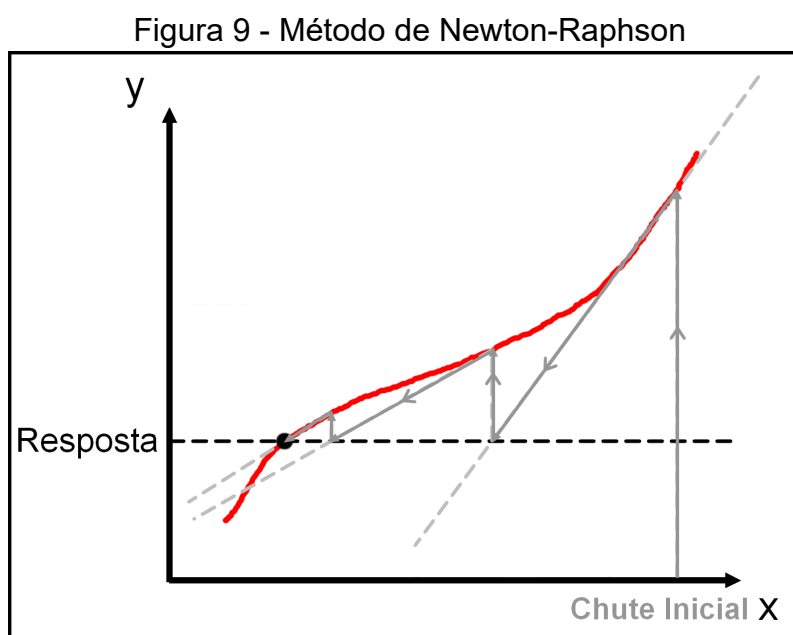
2.4.1.2 Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson, assim como o método da bisseção, possui uma representação geométrica, a qual é mostrada na Figura 9.

Esta técnica possui uma velocidade de convergência consideravelmente alta (AMARAL; SOUZA; CATALAN, 2015), ou seja, necessitam-se menos iterações para atingir um mesmo critério de convergência quando comparado ao método da bisseção.

Por outro lado, este método pode apresentar divergências a depender do chute inicial fornecido ao algoritmo (AMARAL; SOUZA; CATALAN, 2015). É por essa razão que o programa desenvolvido utiliza o método de Newton-Raphson para uma convergência mais rápida, e o método da bisseção como alternativa empregada nos casos em que ocorre a divergência no primeiro método.

Basicamente, o método de Newton-Raphson se resume a escolher um chute inicial no eixo das abscissas, calcular a imagem da função neste domínio, calcular a equação da reta tangente neste ponto da função e estabelecer como novo chute inicial aquele valor das abscissas que retorna uma imagem na reta tangente igual a resposta desejada. Esse processo é repetido iterativamente até obter-se a aproximação desejada da resposta.



Fonte: O Autor

2.4.2 Método do Cálculo de Área de Gauss

O método do cálculo de área de Gauss é uma formulação elaborada para o cálculo de área e do centróide de polígonos descritos por meio das coordenadas x e y de seus vértices.

Como todas as figuras analisadas neste projeto podem ser descritas por um conjunto de vértices e segmentos de retas, este método torna-se extremamente útil.

De acordo com Madeira (2009), a área pode ser calculada usando-se a Equação 17, enquanto as Equações 18 e 19 podem ser utilizadas para o cálculo das coordenadas do centróide do polígono.

É importante destacar que ambas as formulações requerem que o último vértice n seja o mesmo que o primeiro, fechando o polígono. Para o caso da baliza, onde a ordenação dos pontos começa de um bordo e segue o perímetro até o outro bordo, deve-se rearranjar este vetor para que a ordenação comece e termine em um mesmo ponto.

$$Área = \frac{1}{2} * \sum_{i=0}^{n-1} (x_i \cdot y_{i+1} - x_{i+1} \cdot y_i) \quad (17)$$

$$c_x = \frac{1}{6 \cdot Área} * \sum_{i=0}^{n-1} [(x_i + x_{i+1}) * (x_i \cdot y_{i+1} - x_{i+1} \cdot y_i)] \quad (18)$$

$$c_y = \frac{1}{6 \cdot Área} * \sum_{i=0}^{n-1} [(y_i + y_{i+1}) * (x_i \cdot y_{i+1} - x_{i+1} \cdot y_i)] \quad (19)$$

3 METODOLOGIA

Este capítulo visa apresentar a metodologia utilizada com a finalidade de alcançar os objetivos propostos.

De acordo com Tumelero (2018), a metodologia de um projeto deve conter a descrição do processo e procedimentos; das técnicas e ferramentas utilizadas no desenvolvimento a ser realizado. Destaca-se que em se tratando de metodologias, não existe uma definição única que garanta o sucesso, pois cada projeto possui um conjunto de necessidades e metas diferentes de desenvolvimento.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma para análise da estabilidade transversal de embarcações.

A criação de uma ferramenta computacional é um processo que demanda tempo e paciência. Apesar de se tratar muitas vezes de um caminho repleto de tentativas e erros, os procedimentos devem ser tais que auxiliem na construção da ferramenta da forma mais eficiente possível. É através desta competência que o tempo de programação pode ser reduzido e, conseqüentemente, proporcionar o constante aperfeiçoamento da ferramenta.

O desenvolvimento proposto pode ser dividido em 3 módulos principais, os quais são baseados nos fundamentos teóricos apresentados no Capítulo 2. Na Figura 10 é apresentada uma esquematização da metodologia empregada, incluindo os processos, as técnicas e a ferramenta utilizada.

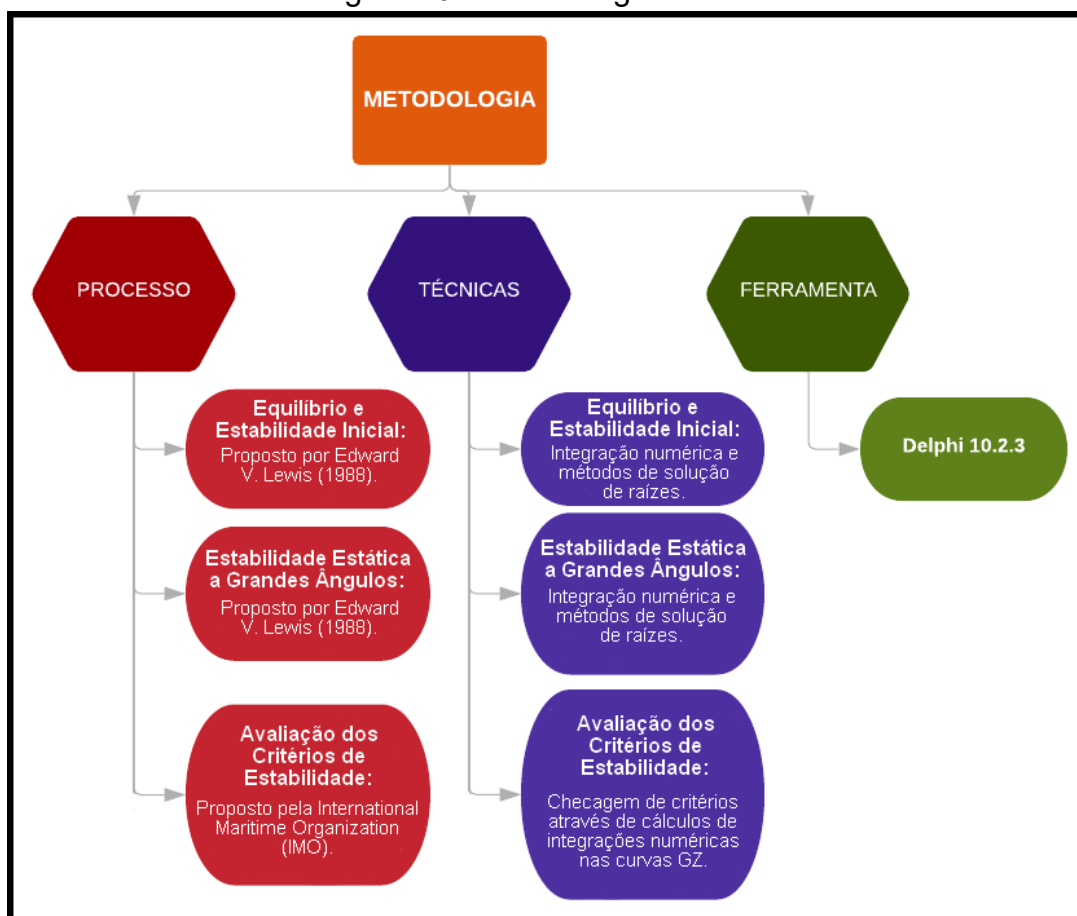
O módulo 1 (equilíbrio inicial) é responsável por, dada uma condição de carga e uma geometria de casco, calcular o calado e o trim necessários ao equilíbrio estático da embarcação a partir do uso de um método de solução de raízes (bisseção ou Newton-Raphson). É importante destacar que esse processo realiza cálculos de integração numérica utilizando o cálculo de áreas de Gauss e/ou o método de trapézios, na geometria do casco, a qual é descrita por uma tabela de cotas.

A partir da integração numérica das balizas da embarcação, diversas propriedades hidrostáticas do casco são calculadas.

A técnica de integração numérica utilizada no segundo módulo de análise de estabilidade estática a grandes ângulos é similar à do módulo 1. A única diferença é que o processo é repetido inúmeras vezes considerando diferentes ângulos de banda da embarcação.

Por fim, o terceiro módulo realiza a análise do gráfico \overline{GZ} obtido com auxílio do módulo 2, verificando a aplicação dos critérios de estabilidade descritos em 2.3.

Figura 10 - Metodologia adotada



Fonte: O Autor

Uma vez finalizado o desenvolvimento, inicia-se a fase de verificação e validação do programa. O processo de verificação escolhido foi a comparação dos resultados obtidos no algoritmo desenvolvido com aqueles obtidos usando uma ferramenta consolidada e bem documentada na literatura.

Neste caso realizou-se o comparativo com os resultados obtidos usando o programa MAXSURF e considerando uma geometria padronizada descrita pela mesma tabela de cotas.

Por fim, é necessário destacar que a ferramenta de programação utilizada é a Delphi 10.2.3, a qual implementa a linguagem Object Pascal. A licença utilizada é a versão gratuita (Community Edition), disponibilizada por um ano pela Embarcadero, empresa proprietária da ferramenta.

4 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

A ferramenta computacional desenvolvida recebeu o nome “Barbosa’s” e pode ser executada apenas no sistema operacional Windows 10. Este capítulo aborda as etapas tomadas na programação e a explicação das principais funções disponíveis na ferramenta. Também serão feitos comentários quanto às restrições e modos de funcionamento do programa.

No Apêndice A, encontra-se um manual do programa confeccionado pelo autor para facilitar o entendimento da interface desenvolvida. Este capítulo destina-se a apresentar os aspectos técnicos do desenvolvimento realizado, incluindo: equacionamentos e métodos de cálculo, restrições de uso e orientações sobre o comportamento da ferramenta.

4.1 IMPORTAÇÃO DO CASCO

A importação da geometria é feita a partir da leitura de um arquivo de texto que contém as coordenadas x , y e z dos pontos que descrevem as diversas balizas de uma embarcação. Cada linha armazena as 3 cotas de um ponto, as quais devem estar separadas por espaço, vírgula ou ponto e vírgula. Para separar casas decimais deve-se utilizar ponto. Também é necessário observar que o uso de tabulação na separação das coordenadas (tecla “Tab”) não é aceita pelo programa.

É importante destacar que o programa não possui a possibilidade de ajuste de unidades. Portanto, o usuário deve considerar a unidade de comprimento utilizada na tabela de cotas, mantendo a coerência ao longo de todo o uso do sistema.

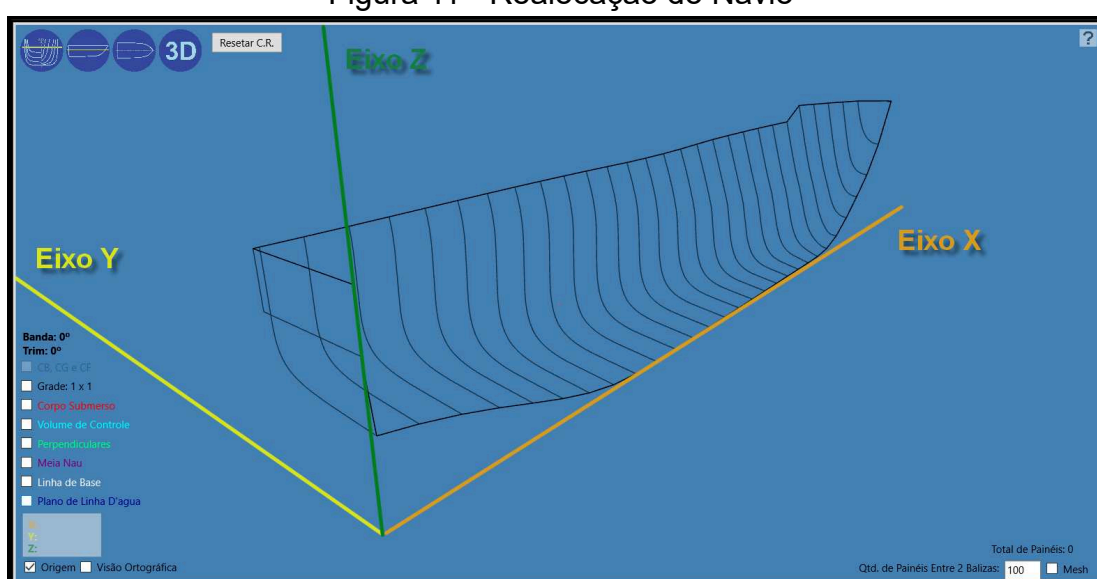
Nesse caso, se os valores estiverem, por exemplo, em metros, as medidas de área e volume serão expressas em metros quadrados e metros cúbicos, respectivamente. Além disso, é necessário que os parâmetros de entrada tais como calado e/ou coordenadas do centro de gravidade (CG) sejam fornecidos em metros. Já a densidade da água deve ser fornecida, nesse caso, com a unidade de volume expressa em metros cúbicos.

É importante destacar que o programa somente conseguirá reconhecer corretamente a geometria da embarcação se a tabela de cotas contiver apenas um dos bordos do casco, não importando qual seja.

Considerando que o arquivo de texto pode conter os pontos ordenados de forma aleatória, é crucial que o programa trate os valores de forma que o método numérico de integração descrito na seção 2.4.2 possa ser utilizado.

O primeiro passo trata do posicionamento dos pontos em relação à origem do sistema de coordenadas utilizado neste trabalho (Figura 11) onde a embarcação se encontra com a proa direcionada ao lado positivo do eixo x , com o espelho de popa na cota x igual a 0, o plano diametral estando no plano $x-z$ com o bordo importado orientado no sentido positivo do eixo y e o ponto mais baixo da quilha na cota z igual a 0.

Figura 11 - Realocação do Navio



Fonte: O Autor

Em seguida, o programa armazena os pontos de cada meia baliza em diferentes vetores correspondendo aos diferentes valores x utilizados na tabela de cotas.

Inicialmente pretendia-se organizar os pontos de cada meia baliza de forma crescente em relação às cotas y ou às cotas z . Com o tempo, esta ideia se mostrou ineficaz em alguns casos, como no exemplo da Figura 12.

Embora a geometria da baliza mostrada na figura não seja usual, esta facilita o entendimento do erro deste método de ordenação. Claramente, organizar os pontos considerando um crescimento das cotas y ou das cotas z não é sempre eficaz. A solução encontrada foi ordenar os pontos por proximidade.

Figura 12 - Organizando Cotas das Balizas



Fonte: O Autor

Para isso, o programa escolhe como ponto “*pivot*” inicial aquele que se encontra na quilha (ponto de menor cota y). Este ponto será registrado como o primeiro elemento de um novo vetor de armazenagem.

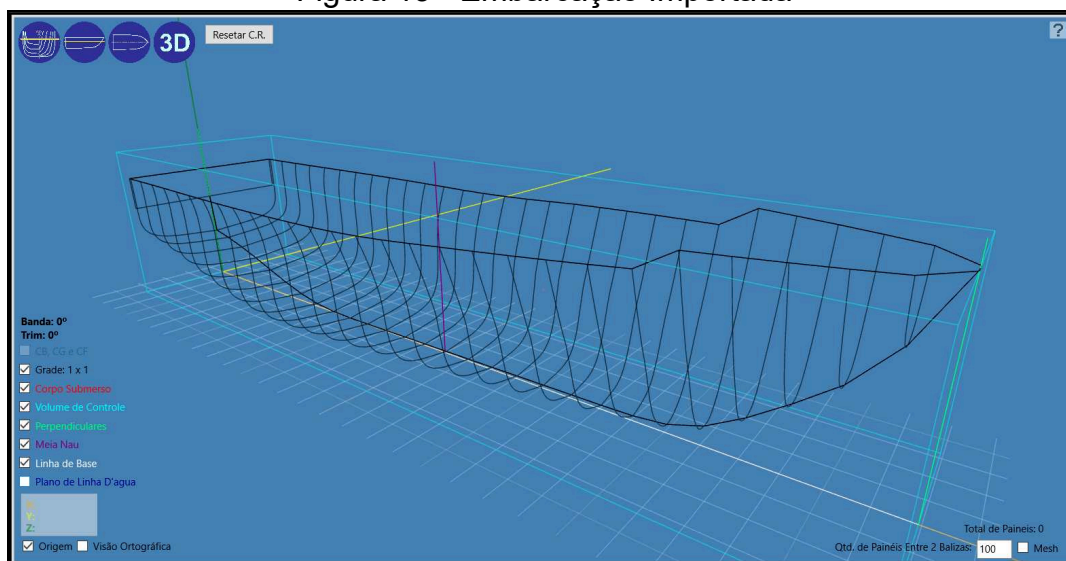
Em seguida, dentro de um laço de iteração, compara-se a distância entre o ponto “*pivot*” e cada um dos demais pontos que descrevem a baliza. O ponto mais próximo é então transferido para a última posição do vetor de armazenagem e em seguida é definido como novo ponto “*pivot*”, reiniciando o ciclo até que todos os pontos estejam ordenados por proximidade.

Somente quando todas as meias balizas estiverem organizadas é que o programa duplica a tabela de cotas trocando apenas o sinal da cota y dos elementos repetidos com o objetivo de obter os dois bordos do casco para as análises. Vale notar que a ordenação em cada baliza é manipulada para iniciar não mais na quilha, mas sim no convés de um bordo, seguindo o contorno da baliza até alcançar o convés no outro bordo.

Por último, por uma questão estética, o programa identifica em cada uma das balizas as cotas da borda e da quilha, as quais são armazenadas em um vetor que descreve a linha do convés e outro vetor que descreve a linha da quilha da embarcação.

O resultado final do processo de importação e tratamento da geometria do casco pode ser visto no exemplo mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Embarcação Importada



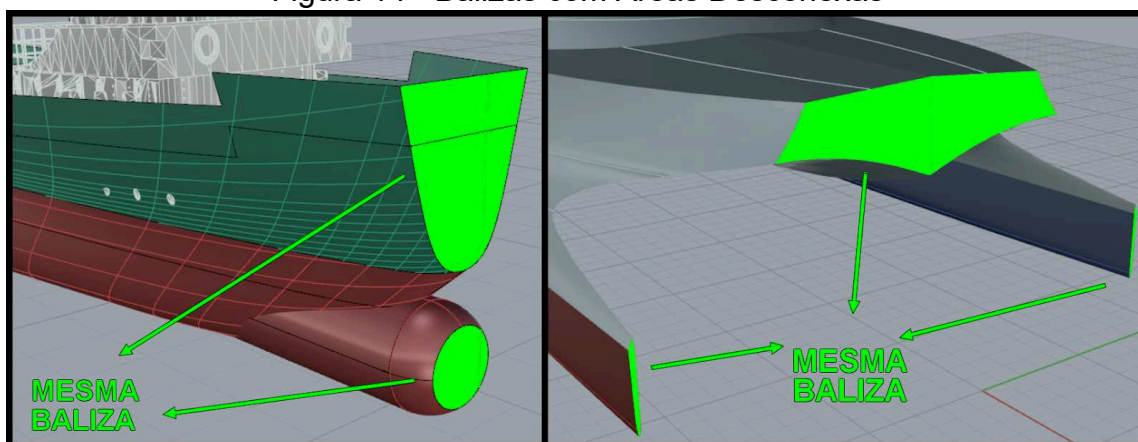
Fonte: O Autor

4.1.1 Restrições na Importação

O programa possui algumas limitações que inviabilizam o processamento correto dos dados importados. As principais restrições são:

- Admite-se importar apenas balizas de um bordo do navio;
- Admite-se apenas arquivos de texto com a tabela de cotas do navio;
- Cada linha do arquivo deve conter coordenadas x , y e z de um ponto;
- Para separar casas decimais no arquivo de texto deve-se utilizar ponto (.);
- Para separar os valores na mesma linha do arquivo de texto deve-se utilizar vírgula (,) ou ponto e vírgula (;) ou espaço;
- O programa não consegue processar embarcações que possuam em uma mesma baliza duas áreas desconexas (Figura 14). Isso significa que não é possível trabalhar com cascos que possuam: bulbo, tubo telescópico, quilhas prolongadas (em caso de veleiros), entre outros apêndices externos ao casco;
- O programa só conseguirá processar navios monocascos. Catamarãs, trimarãs e plataformas não podem ser analisados.

Figura 14 - Balizas com Áreas Desconexas



Fonte: O Autor

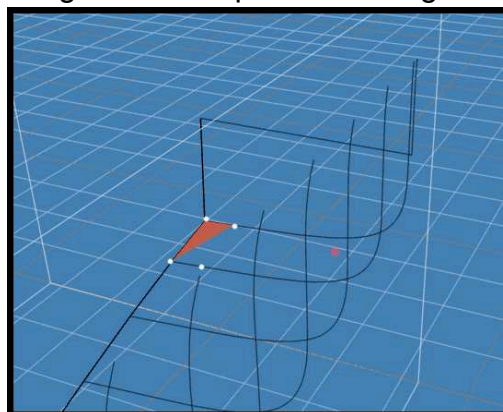
4.2 IMPLEMENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO CASCO

Após a importação da tabela de cotas no programa, o visualizador encontra-se de forma semelhante ao contido na Figura 13 localizada na seção 4.1. É possível identificar as balizas, a linha de quilha e a linha do convés da embarcação.

De forma a permitir uma visualização renderizada da superfície do casco, resolveu-se implementar uma rotina que modele uma superfície contínua ao longo do plano de balizas da embarcação usando a técnica conhecida como *Mesh Grid*.

A ideia desta técnica consiste em realizar um gradeamento entre os pontos de duas balizas subsequentes, onde a cada 3 pontos (2 de uma baliza e 1 da outra) será formada uma superfície triangular (Figura 15).

Figura 15 - Superfície Triangular

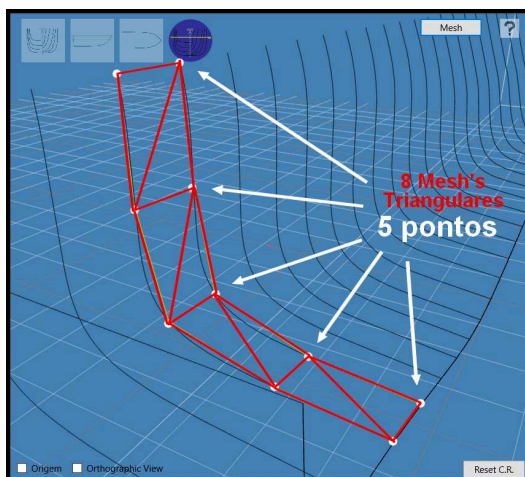


Fonte: O Autor

Nessa mesma imagem é possível observar que, entre duas balizas subsequentes e a cada 2 pontos de cada uma, são definidas duas superfícies triangulares para renderizar o casco.

Portanto, seguindo essa modelagem, as superfícies que definem o casco são limitadas pelas arestas desenhadas em vermelho na Figura 16.

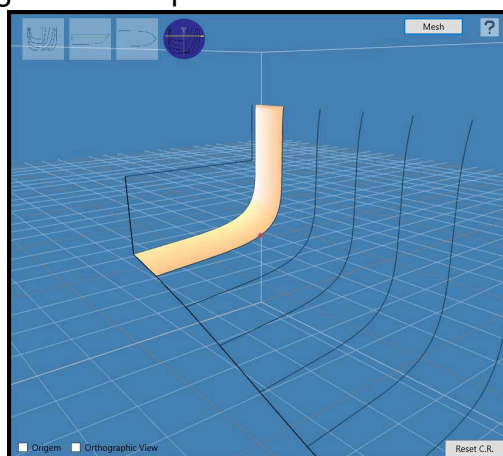
Figura 16 - Gradeamento Mesh entre Balizas



Fonte: O Autor

Uma vez definidas as superfícies, o próprio sistema realiza a renderização, com a vantagem de utilizar a GPU² do computador (Figura 17).

Figura 17 - Superfície Entre Duas Balizas

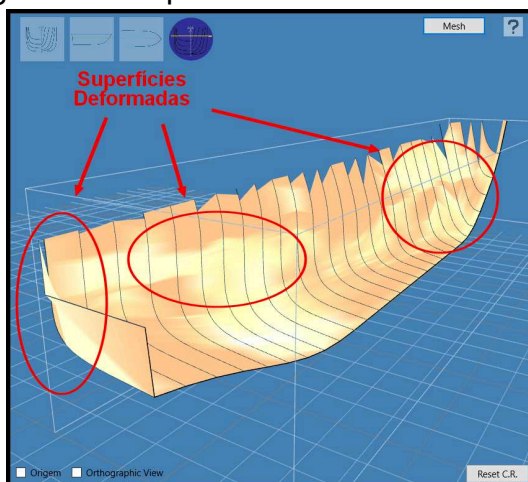


Fonte: O Autor

² A GPU corresponde ao processador da placa de vídeo do computador destinado especificamente a aplicações gráficas, tornando a ferramenta mais rápida e funcional.

Embora o procedimento descrito tenha uma implementação fácil e ofereça uma alternativa eficiente para a renderização do casco, o resultado obtido pode apresentar problemas quando duas balizas subsequentes possuem um número diferente de pontos ou possuem poucos pontos discretizados, resultando numa superfície de casco demasiadamente deformada (Figura 18).

Figura 18 - Superfície de Casco Deformada



Fonte: O Autor

A solução desenvolvida para esse problema consistiu em definir um novo conjunto padronizado de pontos, os quais são calculados a partir da interpolação dos pontos originalmente importados. Estes elementos interpolados seguem as seguintes diretrizes:

- Todas as balizas devem possuir a mesma quantidade de pontos;
- Em uma mesma baliza, todos os pontos devem estar igualmente espaçados ao longo do perímetro estabelecido pelo conjunto original de pontos;

O número de painéis triangulares gerados entre duas balizas subsequentes pode ser calculado utilizando-se a Equação 20.

$$N_{PAINÉIS} = (N_{PONTOS} - 1) * 2 \quad (20)$$

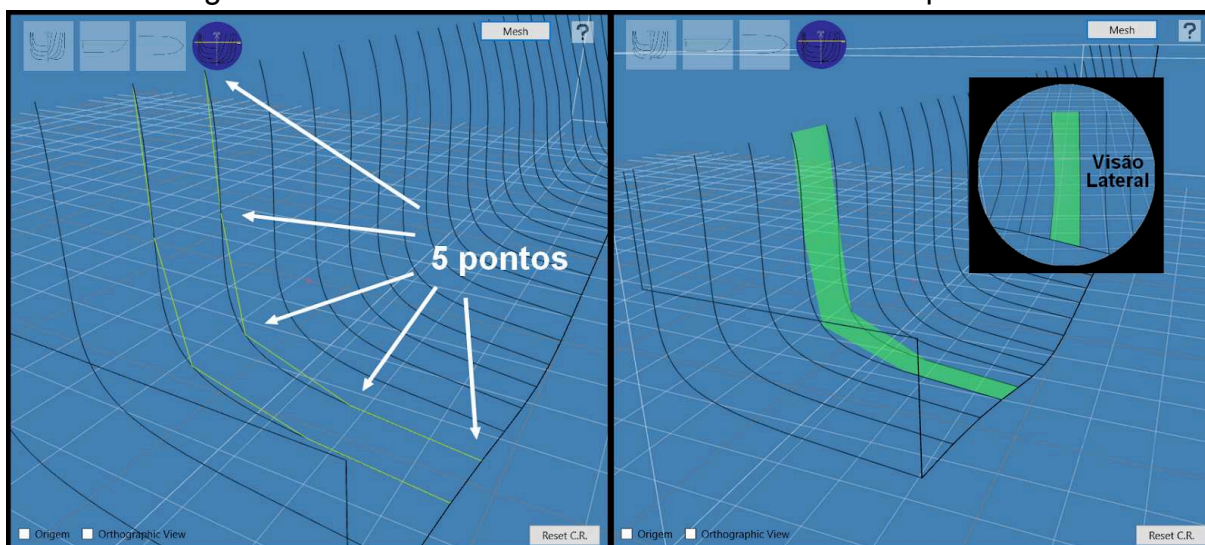
Portanto, foi elaborado uma rotina que recebe do usuário o número de painéis desejados a cada duas balizas e com isso realiza-se a interpolação com os N_{PONTOS} (calculados a partir do número de painéis), padronizando a quantidade de pontos por baliza.

Por fim, as balizas do espelho de popa e de proa formam as eventuais superfícies transversais que completam o casco da embarcação.

Vale ressaltar que quanto maior o número de painéis definidos pelo usuário, maior o número de pontos e, claramente, mais suave fica a superfície exigindo, no entanto, mais recurso computacional para a renderização do casco.

Para melhor visualizar esse comportamento, observa-se que na Figura 19, as balizas foram discretizadas com apenas 5 pontos resultando em uma superfície composta por 8 painéis. Nesse caso, observa-se que, para a curvatura em questão, a qualidade da superfície do casco se mostra grosseira.

Figura 19 - Balizas Padronizadas com 5 Pontos Interpolados

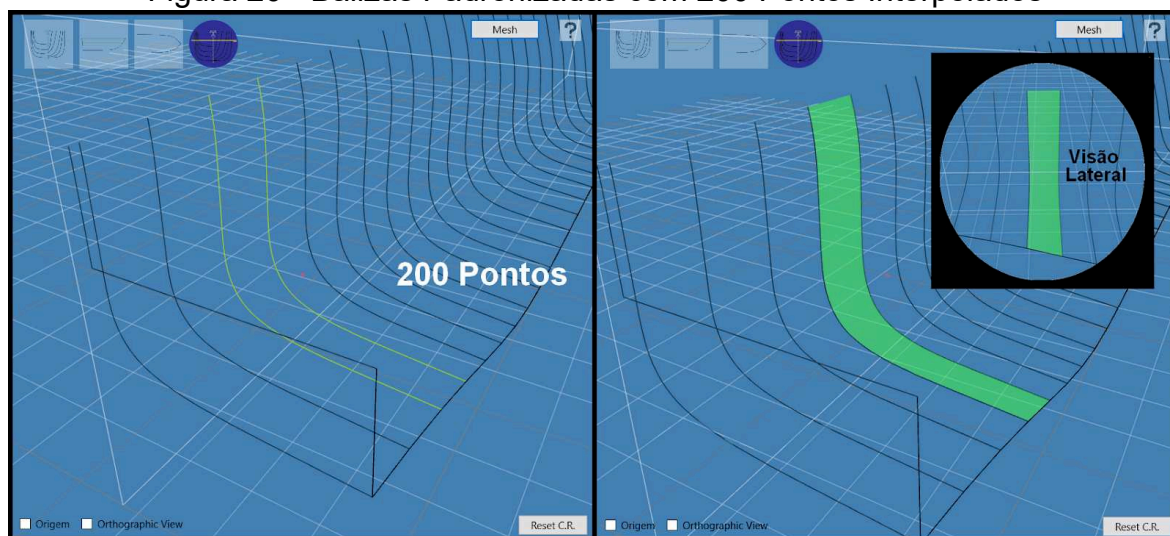


Fonte: O Autor

No entanto, na Figura 20, a mesma geometria importada é renderizada usando 200 pontos por baliza, resultando em uma superfície de casco muito mais suave e próxima da realidade.

Buscando um compromisso entre a qualidade da renderização e o custo computacional do processo, o programa utiliza como valor padrão 100 painéis por seção, o que resulta em 51 pontos interpolados em cada baliza. No entanto, o usuário pode alterar essa configuração de acordo com suas preferências.

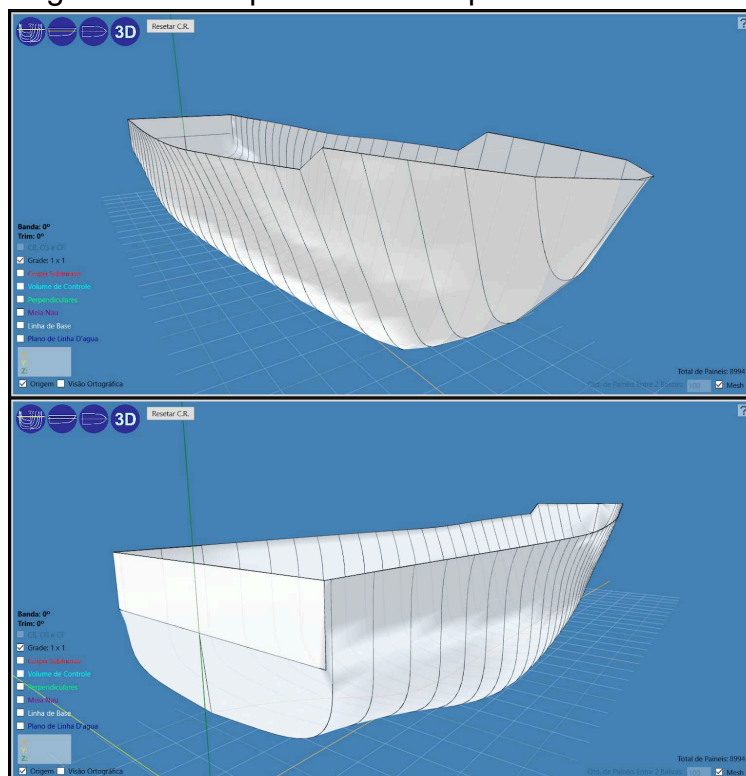
Figura 20 - Balizas Padronizadas com 200 Pontos Interpolados



Fonte: O Autor

Na Figura 21 é mostrado um exemplo de superfície gerada em um casco de um pesqueiro. Com 100 painéis entre balizas como parâmetro de entrada, o processo de renderização resultou em um total de 8994 painéis na embarcação.

Figura 21 - Pesqueiro com 100 painéis entre balizas



Fonte: Autor

4.3 VARIAÇÃO DE TRIM E CALADO NA ANÁLISE

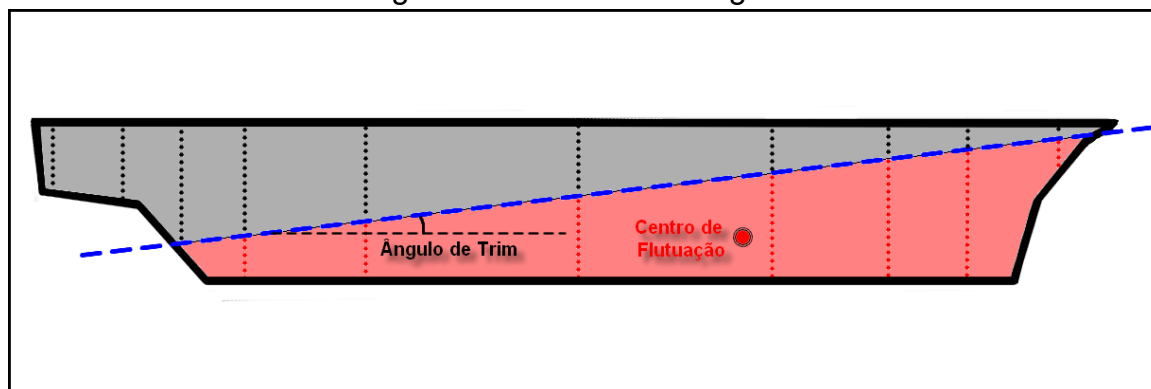
Conforme amplamente discutido na fundamentação teórica, antes das análises de estabilidade, o sistema deve buscar a configuração de equilíbrio referente à condição de carga definida; determinando os valores de trim e calado que satisfazem ambas as equações de equilíbrio (equações 1 e 3).

O calado da embarcação pode ser variado de duas maneiras distintas: modificando a cota z de todos os pontos que formam as balizas ou modificando a cota z do plano de linha d'água. Para efeitos de cálculo de dados hidrostáticos, os dois métodos são efetivos.

Dentro das funções numéricas para solução de raízes, seja através do método da bisseção ou de Newton-Raphson, o calado varia diversas vezes até alcançar-se a resposta correta. Por essa razão, o programa modifica a cota z do plano de linha d'água durante os cálculos, reduzindo o custo computacional do processo.

Quanto a questão do trim, a forma mais simples e rápida de simular sua variação é através da rotação da linha d'água e não da embarcação em si. Portanto, conforme visto na Figura 22, percebe-se que a embarcação fica numa posição fixa enquanto o ângulo da linha d'água é quem varia em torno de um eixo paralelo ao eixo y com coordenada longitudinal igual a " $L_{OA}/2$ "³ até que o equilíbrio seja alcançado.

Figura 22 - Variando o Ângulo de Trim



Fonte: O Autor

³ Na realidade, este eixo de rotação se encontra em LCF. Porém, como este valor se altera todas as vezes que ocorrem variações de calado e/ou trim, é complicado implementar esta configuração em métodos numéricos de equilíbrio de embarcações. Comumente o LCF é aproximado por $L_{OA}/2$ e compensa-se essa aproximação com a aplicação de um processo iterativo de correção entre calado e trim.

Na equação 21 é mostrada a formulação empregada para obter-se a cota z da linha d'água em uma determinada posição longitudinal a depender de uma dada variação de calado e ângulo de trim.

$$Z'(x) = Z_{ORIGINAL} + \Delta_Z + \left(\frac{L_{OA}}{2} - x\right) * \tan(\Theta_{trim}) \quad (21)$$

Para efeito visual, a plotagem do casco reflete a atuação real da embarcação, ou seja, o plano de linha d'água será fixo, enquanto o casco é movimentado de acordo com o comportamento da embarcação na situação de equilíbrio.

A cada plotagem, os pontos discretizados das balizas sofrem uma mudança na cota z resultante do movimento vertical da embarcação (ajuste de calado) e da rotação em torno de um eixo paralelo ao eixo y (ajuste de trim). O equacionamento utilizado para a rotação dos pontos no espaço será apresentado na seção 4.5.

4.4 INTEGRAÇÃO NUMÉRICA DAS BALIZAS

Para que o programa consiga calcular o deslocamento e o centro de flutuação, em uma dada condição de calado, trim e banda; necessita-se calcular as áreas submersas para cada baliza e integrá-las longitudinalmente ao longo do casco.

É importante apontar que todas as integrações realizadas neste programa são calculadas utilizando-se o método de áreas de trapézios.

Como primeiro passo, o programa deve calcular a área e o centróide de cada baliza através de laços iterativos varrendo todos os pontos submersos. Para cada baliza o programa realiza os seguintes passos:

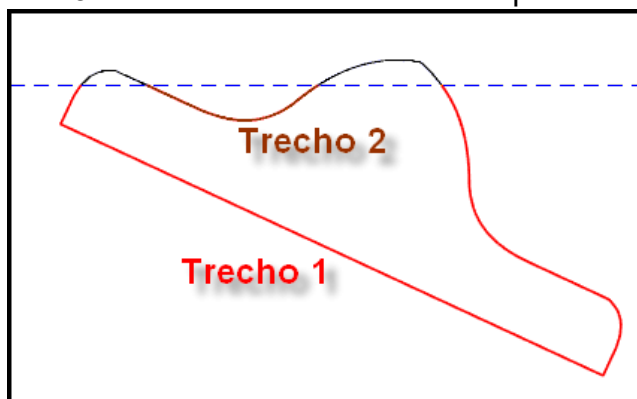
- Identifica os pontos que se encontram submersos e armazena a posição de cada um deles;
- Identifica se alguma das bordas se encontra submersa, e se sim, reorganiza a ordem dos pontos para futura interpolação;
- Identifica qual das três situações a baliza se encontra: inteiramente emersa, inteiramente submersa ou parcialmente submersa.

Com estes dados prontos, o programa segue um procedimento específico dependendo da situação em que a baliza se encontra.

➤ Baliza parcialmente submersa:

- Com os pontos submersos conhecidos, identifica-se caso haja um, dois ou mais trechos do perímetro da baliza submersos (Figura 23).

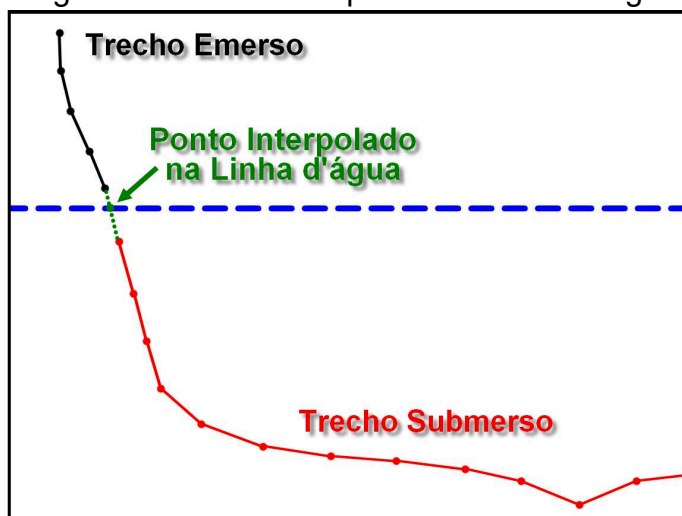
Figura 23 - Duas Partes Submersas Separadamente



Fonte: O Autor

- Para cada trecho submerso, interpola-se linearmente o ponto imediatamente abaixo da cota z da linha d'água, e o imediatamente acima, de forma a encontrar o ponto exatamente na cota z da linha d'água e acrescentá-lo ao conjunto de pontos submersos (Figura 24);

Figura 24 - Ponto Interpolado na Linha d'água

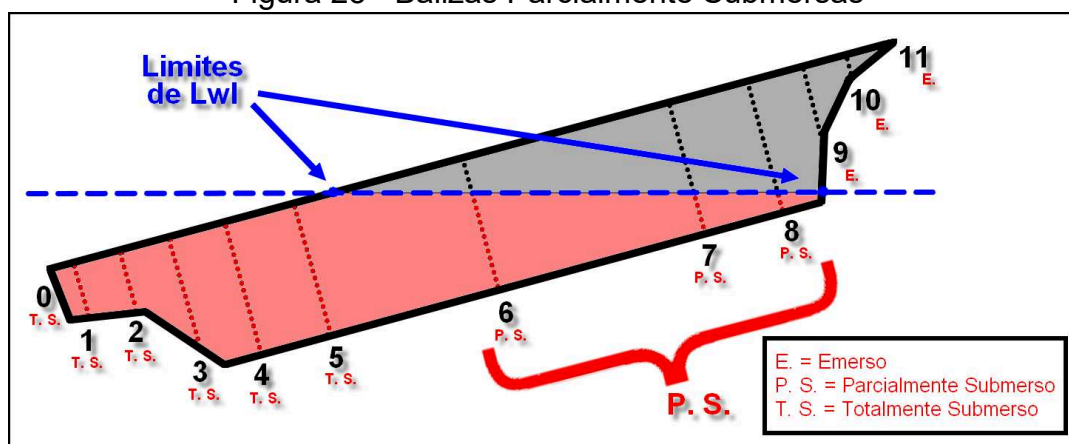


Fonte: O Autor

- Salvam-se os pontos na cota z da linha d'água em um vetor para posteriormente garantir a plotagem do plano de linha d'água. No caso da Figura 23, onde o plano de flutuação tecnicamente se divide em dois para uma mesma baliza, o programa armazena apenas os pontos mais externos, o que pode eventualmente acarretar consideráveis erros numéricos no cálculo do centro longitudinal da área de flutuação (LCF) e do raio metacêntrico (\overline{BM});
 - Para cada parte submersa da baliza calcula-se a posição do centróide e a área submersa utilizando o método de cálculo de área de Gauss;
 - Com todos os valores de área e centróide das diferentes partes da baliza, calcula-se a área total (somatória das áreas) e o centróide da baliza (média ponderada das diferentes partes submersas da baliza);
 - Calcula-se o perímetro de toda a parte submersa da baliza somando o comprimento dos segmentos de reta que interconectam os pontos para que, posteriormente, obtenha-se a área molhada da embarcação;
- Baliza inteiramente submersa:
- Neste caso, o vetor de pontos submersos é exatamente o vetor que armazena os pontos da baliza inteira. O programa segue diretamente para o cálculo da área submersa e do centróide utilizando o método de cálculo de área de Gauss;
 - Calcula-se o perímetro de toda a parte submersa da baliza somando os comprimentos dos segmentos de reta que a forma;
- Baliza inteiramente emersa:
- O vetor de pontos submersos é nulo. Portanto, a área submersa nesta baliza também será nula. Para efeitos de cálculo, evitando divisão de zero por zero, o centróide terá cotas unitárias. Tais valores não influenciarão nos resultados, uma vez que a área nula eliminará esta parcela do equacionamento.

Em seguida, o programa deve estabelecer os limites do comprimento de linha d'água (L_{WL}), ou seja, estabelecer as posições do ponto mais a ré e o ponto mais a vante do plano de linha d'água. Para isso, o programa precisa identificar as balizas que possuem a condição parcialmente submersa, conforme exemplo na Figura 25.

Figura 25 - Balizas Parcialmente Submersas



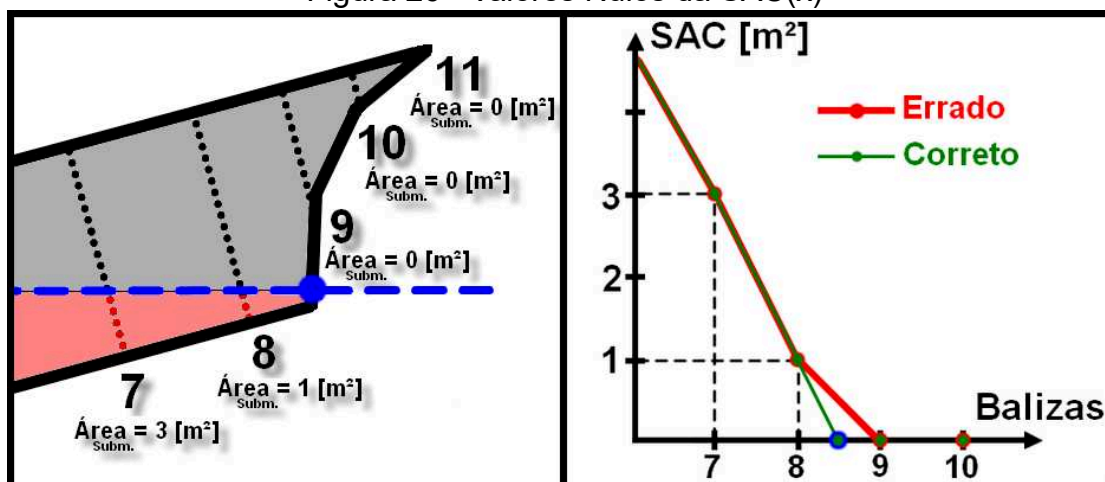
Fonte: O Autor

Desta forma, é possível descobrir entre quais balizas se encontram os limites de L_{WL} . Isso porque sabe-se que todas as balizas parcialmente submersas estão contidas nos limites do plano de flutuação. No caso da Figura 25, é possível identificar que os limites de L_{WL} encontram-se entre as balizas 5 e 6, e entre as balizas 8 e 9.

Além de obter L_{WL} , a determinação de tais limites facilita a correta integração da curva $SAC(x)$, como pode ser visto na Figura 26. É possível identificar no exemplo que a curva correta da $SAC(x)$ é aquela que alcança valor nulo entre as balizas 8 e 9 (plotado em verde), e não na baliza 9 (plotado em vermelho). Desta forma, previne-se um eventual erro numérico no cálculo do deslocamento e do centro de flutuação.

O método escolhido para a determinação dos limites de linha d'água consiste na interpolação linear. A posição inicial é definida pela interpolação da primeira baliza parcialmente submersa com a baliza anterior, enquanto a posição final é definida pela interpolação da última baliza parcialmente submersa com a baliza subsequente.

Figura 26 - Valores Nulos da SAC(x)



Fonte: O Autor

É importante que, para resultados mais condizentes com a realidade, o usuário discretize as balizas de forma a contemplar mudanças bruscas de geometria de casco. Ou seja, no corpo médio paralelo de uma embarcação mercante em que a geometria praticamente não varia, pode-se discretizar poucas balizas, aumentando a discretização nas regiões de popa e de proa do casco.

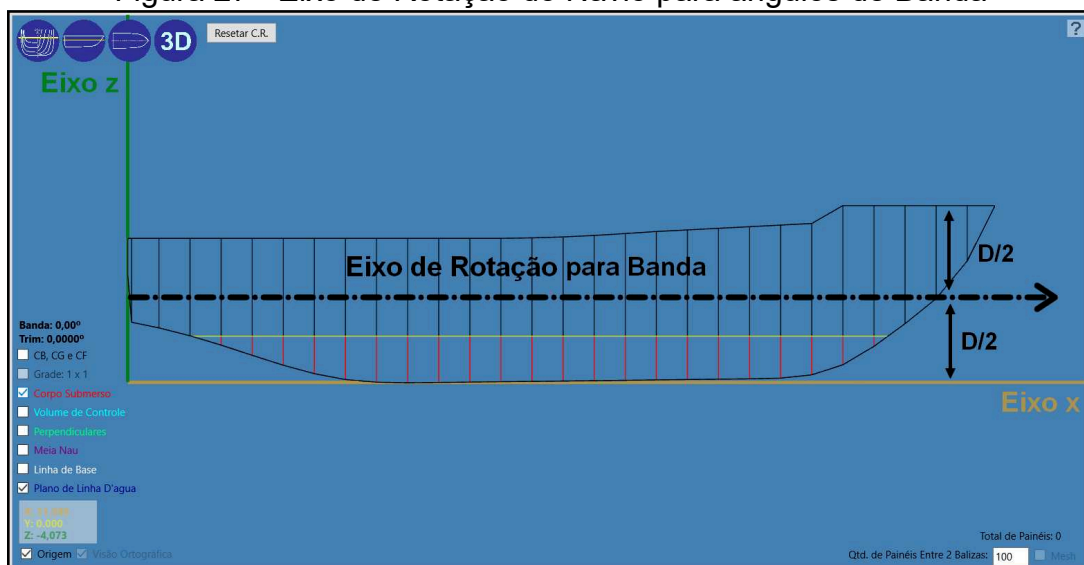
Nas regiões em que há mudanças bruscas de geometria, como um ressalto ou um vão no casco, é recomendável discretizar uma baliza imediatamente antes e outra imediatamente depois da descontinuidade do casco.

4.5 ROTAÇÃO DOS PONTOS NO SISTEMA DE COORDENADAS

Para calcular a curva de estabilidade estática do navio é necessário implementar o equacionamento que rotacione o casco, modificando assim o ângulo de banda da embarcação.

É importante observar que o eixo escolhido para rotacionar o navio foi o eixo paralelo ao eixo x localizado na coordenada y igual a 0 (plano diametral) e z igual a metade do pontal (Figura 27).

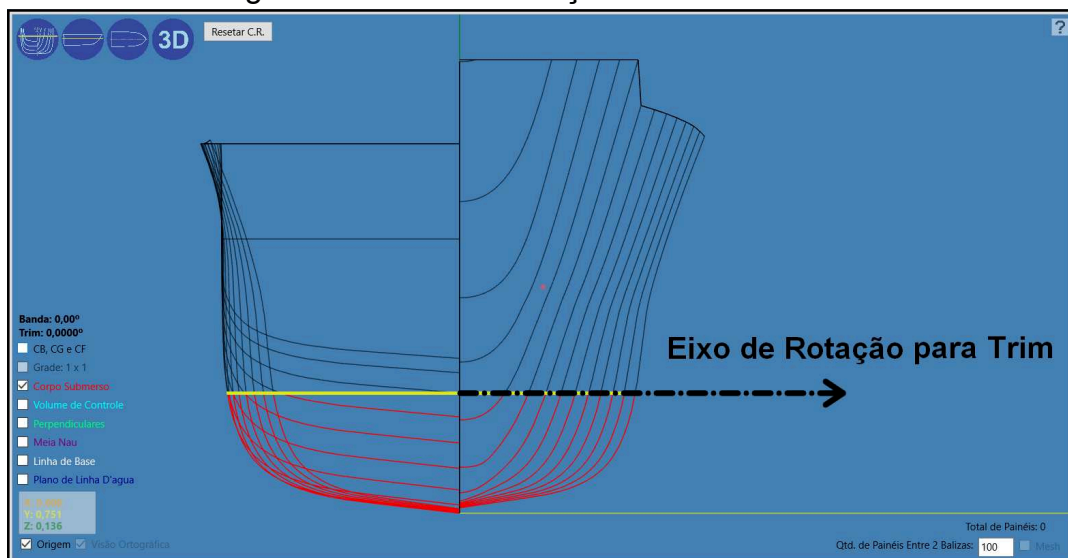
Figura 27 - Eixo de Rotação do Navio para ângulos de Banda



Fonte: O Autor

Por outro lado, para fornecer ângulo de trim, o eixo escolhido para rotacionar o navio foi o eixo paralelo ao eixo y localizado na coordenada x igual a metade do comprimento total do navio e z igual a altura da linha d'água (Figura 28).

Figura 28 - Eixo de Rotação do Navio de Trim



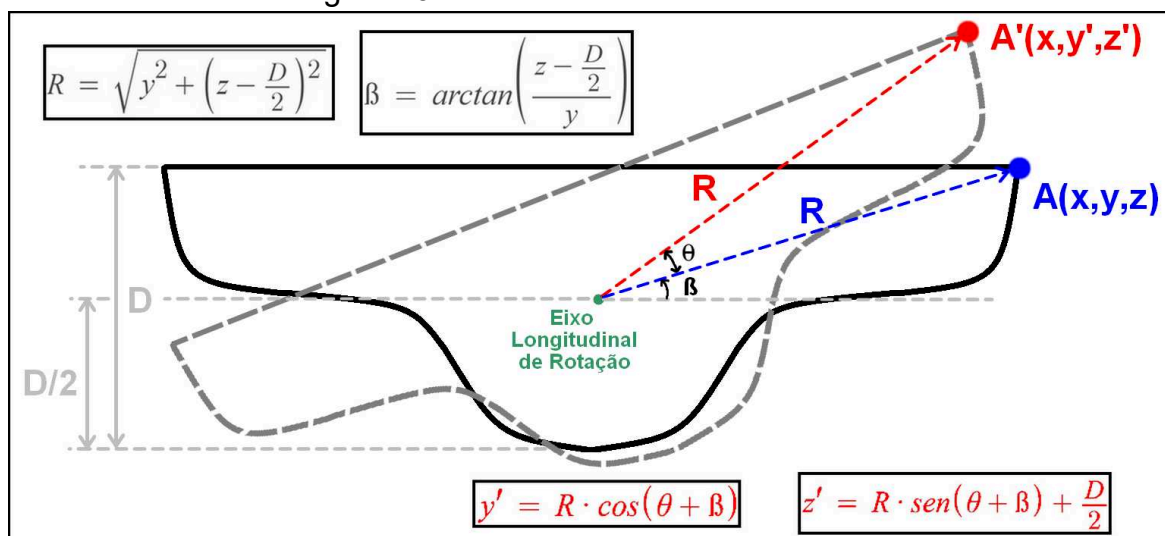
Fonte: O Autor

Para modelar esta proposição matemática, escolhe-se um ponto arbitrário. No caso do exemplo da Figura 29, escolheu-se o ponto na borda do navio, o qual possui coordenadas $A(x,y,z)$. Portanto, após a rotação, este ponto deve possuir as coordenadas $A'(x',y',z')$.

Para facilitar a rotação da geometria e a obtenção das novas coordenadas de um ponto, a ferramenta utiliza coordenadas polares.

Inicialmente calcula-se a distância entre o ponto a ser rotacionado e o eixo de rotação, a qual é chamada de raio R . Conforme pode ser visto na Figura 29, a coordenada polar do ponto rotacionado possui duas componentes: o ângulo de banda θ e o ângulo β que representa a inclinação inicial de R em relação ao eixo y .

Figura 29 - Rotacionando Ponto Arbitrário



Fonte: O Autor

Logo, por simples deduções matemáticas, obtém-se os equacionamentos dispostos na Figura 29 e que correspondem às novas coordenadas do ponto após a rotação do casco.

Por fim é importante destacar que o cálculo da posição dos pontos após a inclinação do navio na direção proa popa (trim) pode ser calculada de maneira rigorosamente análoga, considerando que o eixo de rotação será paralelo ao eixo y , com coordenadas x igual a $L_{OA}/2$ e z igual a altura da linha d'água

4.6 EQUILÍBRIO DA EMBARCAÇÃO

Para que o programa possa calcular a posição de equilíbrio da embarcação, o usuário deve fornecer duas características associadas à condição de carga a ser analisada:

- O peso total da embarcação;

➤ A posição do centro de gravidade;

Destaca-se que a distribuição de carga ao longo do navio tem pouca relevância na análise de estabilidade de uma embarcação, visto que essa pode ser substituída por uma única força aplicada no centro de gravidade do navio.

O programa disponibiliza duas formas para a definição do peso do navio: através da indicação do deslocamento ou através da definição de um calado inicial.

A posição do centro de gravidade tem impacto direto na definição do ângulo de trim de equilíbrio. Por essa razão, o programa disponibiliza duas possibilidades de análise: considerando o ângulo de trim livre ou como um valor fixo, o qual deve ser fornecido pelo usuário.

A configuração da condição de carga a ser analisada deve ser definida no Painel de Dados de Entrada, considerando que, no caso do centro de gravidade, o usuário deve fornecer apenas os valores de LCG e VCG, visto que o programa não equilibra o navio transversalmente, assumindo sempre que o TCG é nulo, ou seja, o centro de gravidade se encontra no plano diametral do navio.

Se a opção “Calado Sem Trim” estiver selecionada e ao mesmo tempo a opção “Trim Fixo” for escolhida, então o programa define o peso do navio através do cálculo do volume submerso para o calado fornecido, considerando o navio sem ângulo de trim e/ou banda. Posteriormente o programa ajusta o ângulo de trim para o valor fixado pelo usuário, e altera o calado inicial até que o equilíbrio seja alcançado.

De forma análoga, se a opção “Calado Sem Trim” estiver selecionada e ao mesmo tempo for escolhida a opção “Trim Livre”, o programa define o peso da embarcação e posteriormente ajusta o trim e o calado iterativamente até encontrar a configuração de equilíbrio.

É importante destacar que numa condição real, com comportamento dinâmico e transiente, o calado e o trim se ajustam de forma simultânea até o equilíbrio. No entanto, nas análises quasi-estáticas utilizadas neste trabalho, aborda-se um parâmetro por vez, de forma iterativa.

Portanto, para encontrar o equilíbrio é necessário estabelecer uma técnica numérica de obtenção de raízes a qual será empregada para dois objetivos, hora para modificar o calado (ajustar equilíbrio de forças verticais), hora para modificar o trim (ajustar equilíbrio de momentos longitudinais), conforme tratado na seção 2.4.1.

Existem casos em que este processo iterativo não convergirá para o equilíbrio. As razões podem ser as mais variadas: desde o comportamento em si do processo iterativo até mesmo a dificuldade em atingir a resposta em um dos dois parâmetros, comumente, o trim. Tais ocorrências serão discutidas nas seções 4.6.2 e 4.6.6.

4.6.1 Equilíbrio Longitudinal das Forças

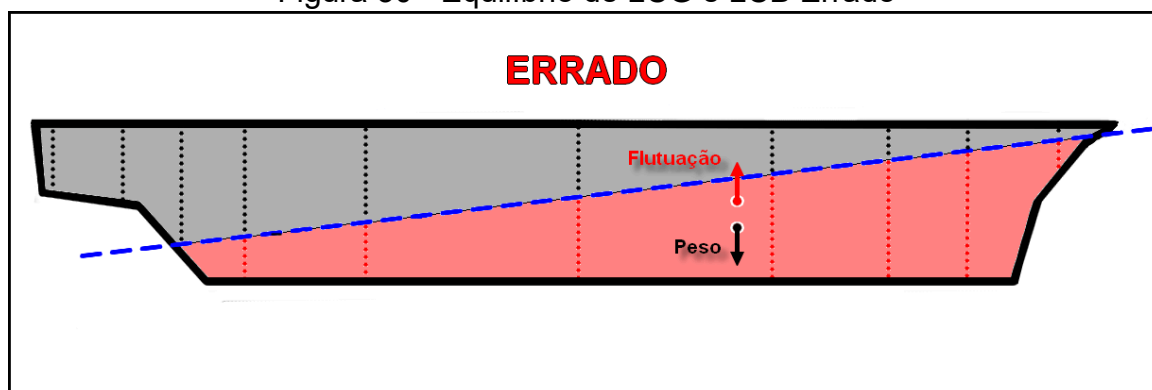
É importante observar que, nos casos em que a embarcação possui ângulo de trim diferente de zero, deve-se ter especial atenção às linhas de ações da força peso e da flutuação.

Conforme visto na seção 4.3, a estratégia utilizada pelo programa para modificar o trim consiste em manter a embarcação parada enquanto a linha d'água é rotacionada.

No entanto, ao rotacionar a linha d'água é necessário observar que a direção da força peso e da força de flutuação também devem ser rotacionadas, pois tais forças são sempre perpendiculares ao plano de linha d'água.

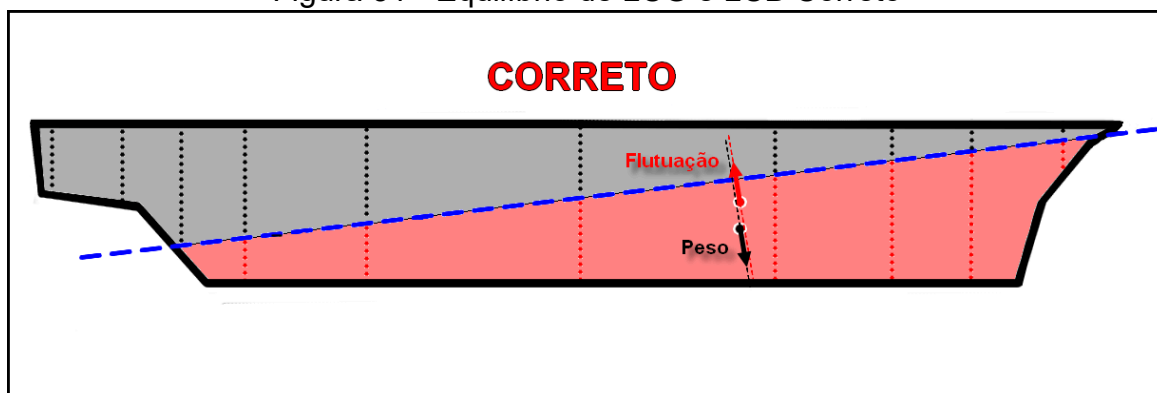
Na Figura 30 é mostrado um diagrama de forças que, embora pareça equilibrado, apresenta justamente o erro de não considerar a rotação da linha de ação das forças verticais. Por outro lado, na Figura 31, o diagrama de forças está correto, com as forças verticais atuando ortogonais ao plano de linha d'água.

Figura 30 - Equilíbrio de LCG e LCB Errado



Fonte: O Autor

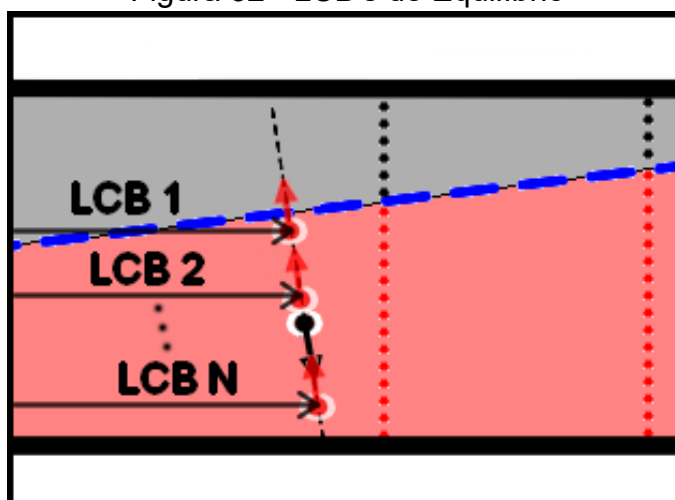
Figura 31 - Equilíbrio de LCG e LCB Correto



Fonte: O Autor

Conforme pode ser visto na Figura 32, percebe-se que existem infinitas posições do centro de flutuação (CB) em uma mesma linha vertical de ação. O problema em questão está em estabelecer um valor para qual o LCB deve convergir. A solução adotada⁴ foi estabelecer que o LCB deve ser medido sempre na altura do VCB (Figura 33).

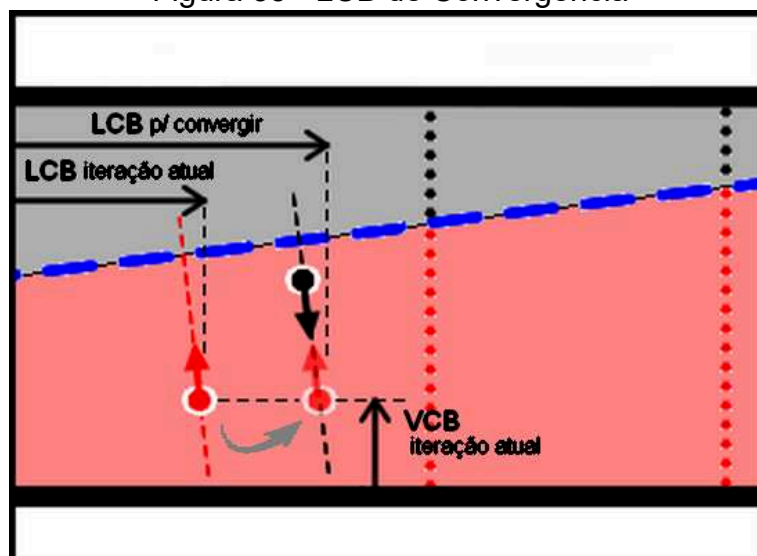
Figura 32 - LCB's de Equilíbrio



Fonte: O Autor

⁴ Outra solução encontrada na literatura consiste em rotacionar a perpendicular referente ao espelho de popa e medir a distância LCB em relação a esse eixo local de referência.

Figura 33 - LCB de Convergência



Fonte: O Autor

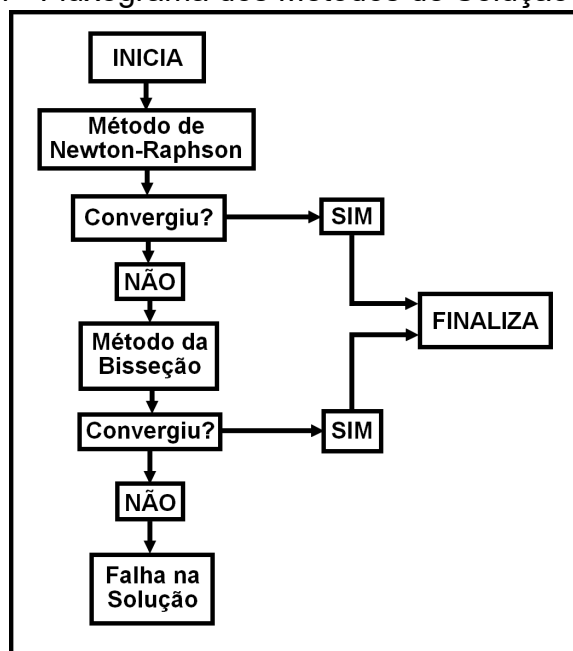
Logo, percebe-se que o LCB de equilíbrio varia com o trim. Isso ocorre justamente porque, a cada ângulo, tanto a inclinação da linha de ação da força peso em relação ao navio quanto o VCB se modificam. Essa combinação de fatores faz com que, diferentemente da situação de calado e deslocamento, no caso de trim e LCB, a resposta para o equilíbrio seja diferente para cada ângulo de trim.

4.6.2 Métodos Numéricos de Obtenção de Raízes

Conforme já estabelecido na seção 2.4, o programa utiliza duas técnicas numéricas de obtenção de raízes durante o cálculo do equilíbrio de uma embarcação: o método de Newton-Raphson e o método da bisseção. A Figura 34 exemplifica um fluxograma da aplicação dos dois métodos no programa.

Destaca-se que nos locais do fluxograma onde é avaliado se houve convergência, essa é relativa ao equilíbrio do navio e, portanto, ao equilíbrio da flutuação e do LCB. Desta forma, apenas uma técnica numérica é sempre utilizada para a correção dos dois parâmetros. Isso significa que o programa aplica somente o método da bisseção ou somente o método de Newton-Raphson e nunca um método para cada parâmetro.

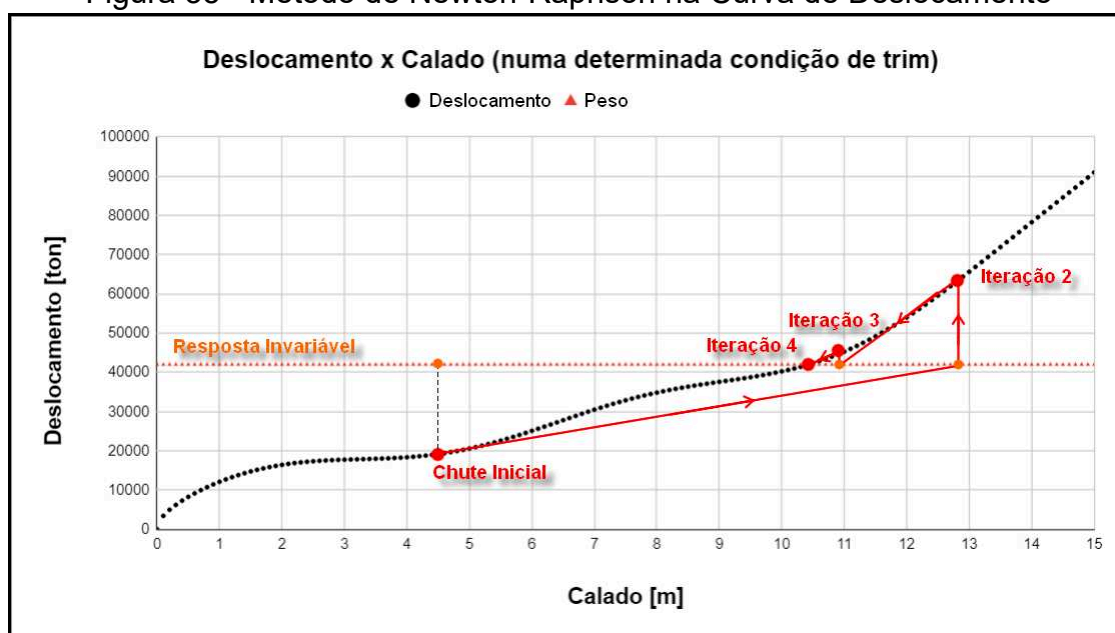
Figura 34 - Fluxograma dos Métodos de Solução de Raízes



Fonte: O Autor

Na Figura 35 é mostrado um exemplo de variação do deslocamento em função do calado de uma embarcação. Percebe-se que o valor do peso do navio é descrito por uma linha horizontal pois esse não é afetado pelo valor do calado. A aplicação do método de Newton-Raphson é representada pelo percurso das setas vermelhas, indicando a convergência da resposta.

Figura 35 - Método de Newton-Raphson na Curva de Deslocamento



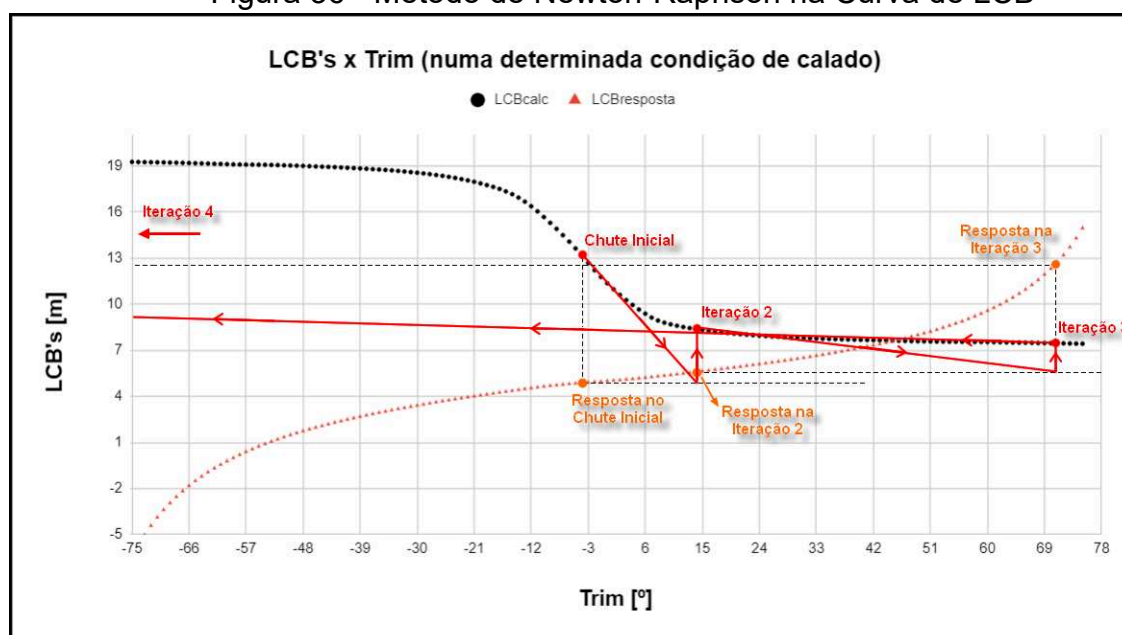
Fonte: O Autor

Conforme descrito na fundamentação teórica, essa técnica é fortemente influenciada pelo chute inicial da solução. Destaca-se que não foi implementada a mudança deste chute em casos de divergência, o que pode representar uma melhoria de desempenho a ser implementada em futuras versões do programa.

No entanto, ao observar a variação do LCB em função do ângulo de trim (Figura 36), percebe-se que o valor do LCG não é uma linha horizontal como visto no caso do peso (Figura 35). Nesse caso, trata-se de uma função não linear, a qual eventualmente cruza a curva em análise.

Desta forma, em cada iteração o valor de resposta a ser fornecido ao método de Newton-Raphson se altera e, portanto, pode acontecer, como no exemplo da Figura 36, de o programa não convergir.

Figura 36 - Método de Newton-Raphson na Curva de LCB



Fonte: O Autor

Nesses casos, o método de Newton-Raphson apresenta certa dificuldade para atingir a resposta desejada. Por essa razão, ao perceber tal comportamento, o programa altera o método de resolução para o da bisseção. Nesse caso, desde que seja garantido que o intervalo inicial contenha a resposta desejada, o método convergirá.

Existem ainda casos em que a curva de LCB por trim atinge picos e vales, dificultando assim a resolução pois o método da bisseção pode ficar preso em mínimos locais, conforme será melhor detalhado mais adiante.

Em geral, observou-se que as maiores dificuldades de convergência acontecem quando se utiliza um LCG pouco realista, o que resulta em grandes ângulos de trim, os quais também são pouco realistas.

4.6.3 Critérios de Parada

Ao utilizar um método de solução de raízes, é necessário estabelecer critérios de parada. Existem dois tipos principais de critérios: um para quando o processo converge e outro para quando o processo diverge.

O primeiro tem impacto direto no erro obtido nas soluções, ou seja, define qual o valor limite de proximidade da resposta para que se encerrem os cálculos.

Tanto para deslocamento quanto para LCB, definiu-se que o erro relativo não pode ser maior do que 0,0001%. Isso quer dizer que em cada iteração calcula-se um erro relativo de acordo com a Equação 22, e compara-se este valor com 0,0001%. Se for maior, segue-se para a próxima iteração, se for menor, interrompe-se o laço.

$$Erro\ Relativo = 100 * \frac{|Resultado_{ATUAL} - Resposta_{EQUILÍBRIO}|}{Resposta_{EQUILÍBRIO}} \quad (22)$$

Já no caso em que o programa não consegue convergir, arbitrou-se um número de iterações limite para que se interrompa o laço.

Primeiramente, utilizando-se o método de Newton-Raphson, ao atingir 100 iterações sem que o erro relativo seja menor que 0,0001%, interrompe-se o laço e aplica-se o método da bisseção.

Caso o segundo método também não esteja convergindo, o procedimento tomado é idêntico ao anterior: após 100 iterações sem sucesso, interrompe-se o laço. Com os dois métodos incapazes de convergir, o programa declara falha na solução.

Existe ainda um critério de parada alternativo que impede que o trim calculado ultrapasse, em módulo, o valor de 75°. Isso foi implementado pois percebeu-se um comportamento anormal da solução sempre que o trim começa a se aproximar de 90°, o que representa uma solução completamente irreal.

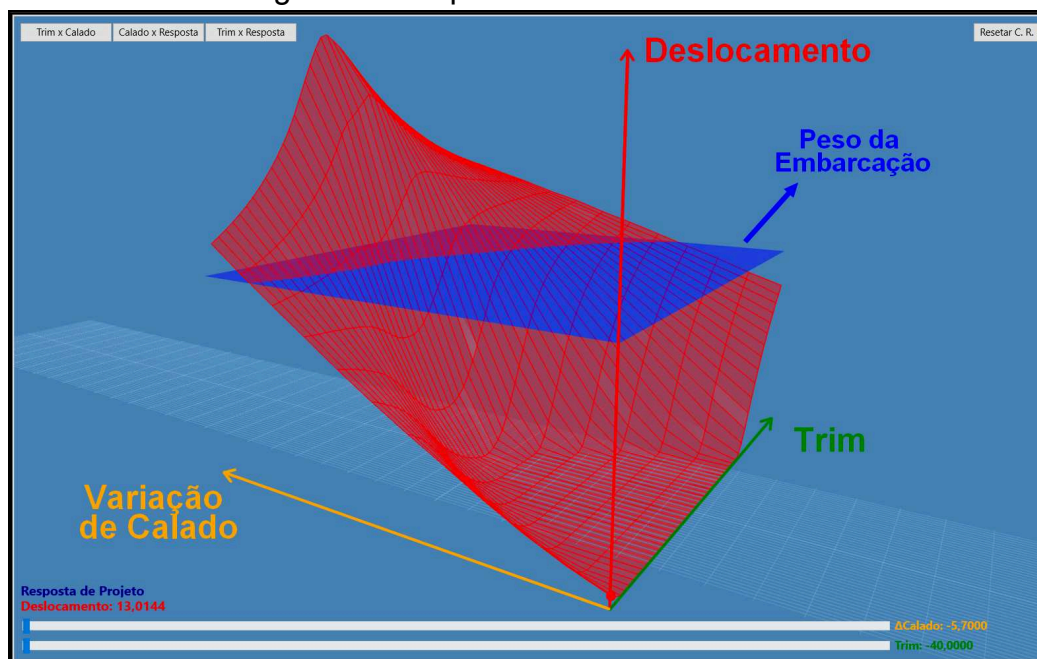
4.6.4 Modo de Análise Detalhada

No Sub Painel de Dados de Entrada, existe uma caixa de seleção que permite acionar o modo de análise detalhada. Utilizando essa ferramenta adicional, alguns comentários importantes sobre o funcionamento dos métodos de obtenção de raízes, podem ser realizados.

Esse modo de análise permite ao usuário verificar visualmente como o deslocamento e o LCB de uma dada embarcação se comportam em diversas condições de trim e calado.

Na Figura 37 é mostrado um gráfico tridimensional em vermelho no qual os dois eixos horizontais representam a “variação de calado” e o ângulo de trim, enquanto o eixo vertical representa o deslocamento da embarcação.

Figura 37 - Superfície de Deslocamento



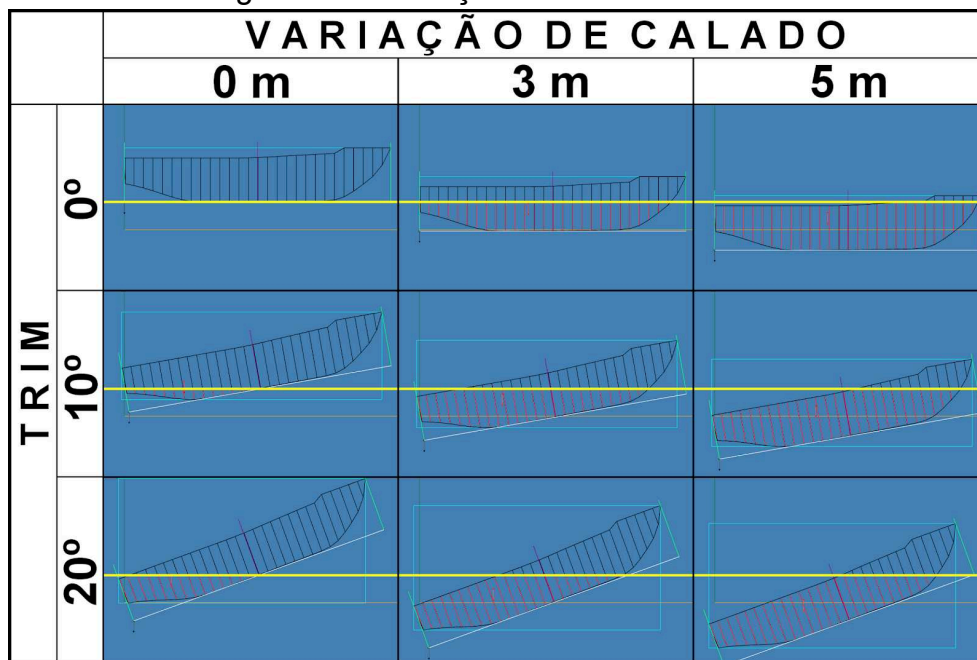
Fonte: O Autor

O termo “variação de calado”, é designado desta forma porque estes valores não representam o calado absoluto da embarcação. Neste caso a ideia é que para cada valor de calado em condição de trim nulo, aplicam-se diferentes rotações ao navio, modificando seu trim e armazenando o valor calculado de deslocamento e LCB.

Com essa variação de trim, o calado absoluto se altera, mas o programa considera que a “variação de calado” em si não ocorreu e é por essa razão que se utiliza essa denominação. Para melhor compreensão, é possível observar na Figura

38 a condição de 0 metros de “variação de calado” e 20° de trim. Por mais que haja um calado absoluto de aproximadamente 2 metros, o valor de “variação de calado” é considerado nulo.

Figura 38 - “Variação de Calado” e “Trim”

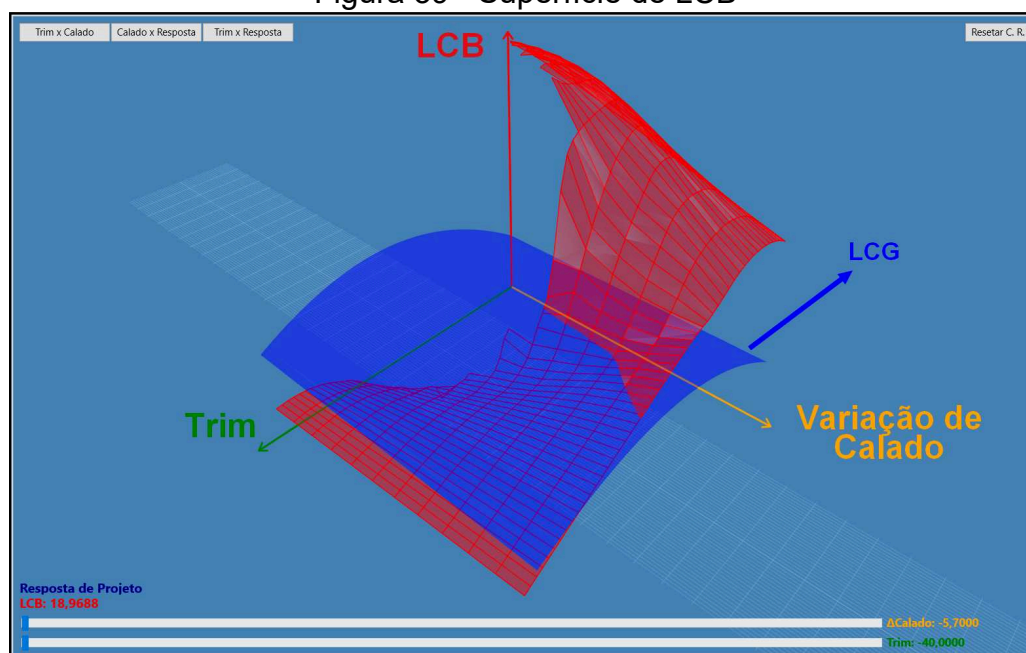


Fonte: O Autor

Portanto, a interpretação do gráfico na Figura 37 é a seguinte: para cada combinação de ângulo de trim e “variação de calado” da embarcação em análise, a superfície vermelha armazena o resultado de deslocamento. De forma análoga, no gráfico da Figura 39 é mostrado o comportamento do LCB em função da “variação de calado” e do ângulo de trim de uma embarcação.

Neste segundo caso, percebe-se uma descontinuidade na superfície vermelha evidenciando a inexistência de LCB para algumas combinações do domínio. Isso deve-se ao fato de que, nessas ocorrências, a embarcação se encontra totalmente acima da linha d’água e, portanto, não há volume submerso. É por isso que no gráfico de deslocamento (Figura 37), nessa mesma região de domínio, a superfície se encontra num vale, apresentando formato plano e horizontal. No caso, estes valores de deslocamento são nulos pois não há corpo submerso.

Figura 39 - Superfície de LCB



Fonte: O Autor

Na Figura 37 o plano horizontal representado em azul descreve o peso da embarcação, o qual não é afetado pela mudança de calado ou trim do casco. Já na Figura 39, a superfície representada em azul descreve o LCG da embarcação, o qual, por sua vez, sofre influência do ângulo de trim do casco. Isso ocorre, pois, ao sofrer uma inclinação longitudinal, a distância entre o LCG e o espelho de popa da embarcação permanece a mesma, mas, no entanto, a projeção no plano de linha d'água dessa distância muda.

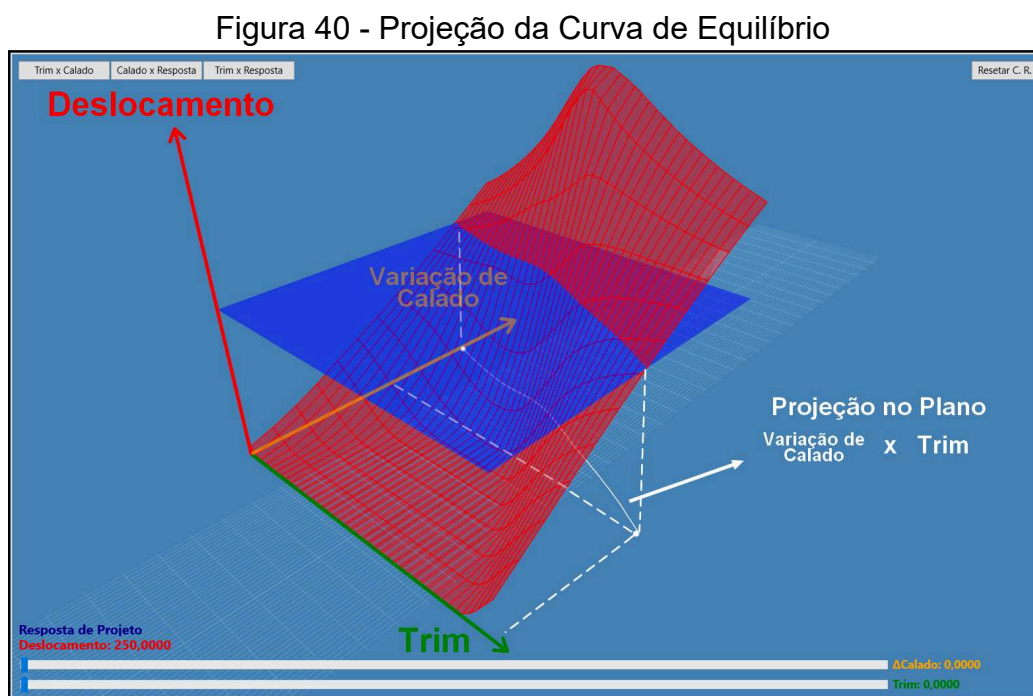
Uma vez compreendido o significado e a construção das superfícies contidas nas Figuras 37 e 39, deve-se entender o procedimento desenvolvido para a determinação da intersecção das superfícies e o cruzamento das curvas de equilíbrio⁵.

Como entende-se que as superfícies azuis representam os valores de peso e LCG; e que as superfícies vermelhas representam os valores de deslocamento e LCB em diversas condições de trim e calado, conclui-se que a intersecção entre uma superfície vermelha e a sua respectiva superfície azul constituem uma linha em que existe o equilíbrio entre os parâmetros.

⁵ É importante notar que este “cruzamento das curvas de equilíbrio” não possui nenhuma relação com as curvas cruzadas de estabilidade, a qual este programa não fornece. De forma geral, como as curvas cruzadas de estabilidade estão associadas ao comportamento da curva GZ para diversos deslocamentos, o usuário pode extrair manualmente cada curva GZ e agrupar os dados em outro programa para obter as curvas cruzadas.

Uma forma alternativa de interpretação é que existem infinitas combinações de trim e calado que irão resultar num deslocamento igual ao peso. De maneira análoga, existem infinitas combinações que retornarão equilíbrio entre LCB e LCG.

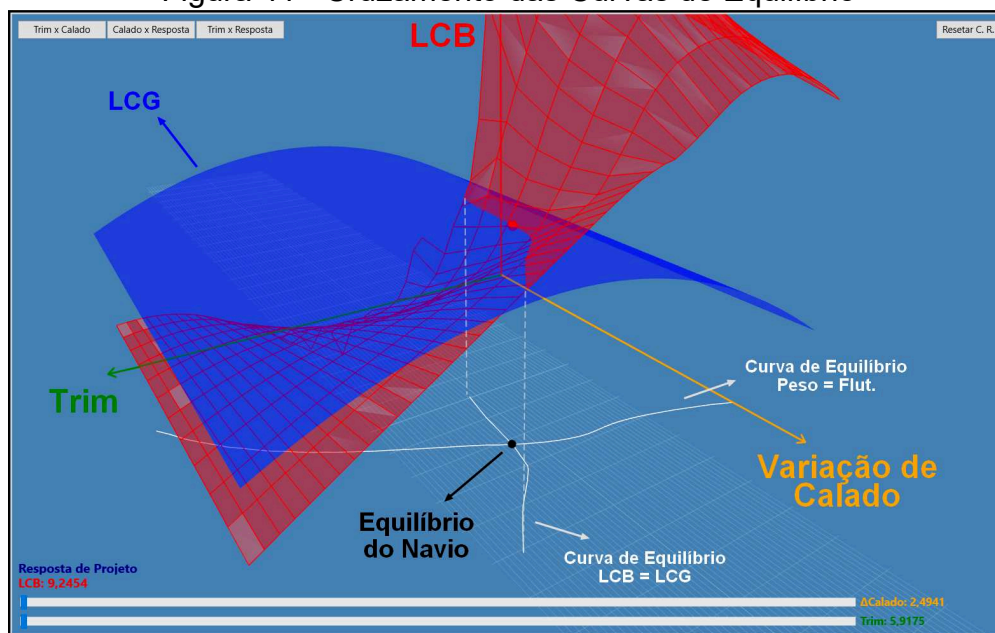
No exemplo da Figura 40 observa-se a projeção da curva de intersecção no caso do deslocamento.



Desta forma, a projeção evidencia uma curva 2D plotada nos eixos de “variação de calado” e “trim”, a qual representa infinitas combinações que resultam num deslocamento numericamente igual ao peso. Exatamente o mesmo pode ser realizado para o caso de LCG e LCB, obtendo-se uma curva 2D projetada nos eixos horizontais que representam as combinações nas quais existe o equilíbrio dos momentos.

Na Figura 41 é mostrado o gráfico tridimensional de LCB e LCG, com a projeção da curva de equilíbrio nos eixos horizontais. Também se encontra plotado a projeção da curva de equilíbrio de peso e flutuação, obtida na Figura 40.

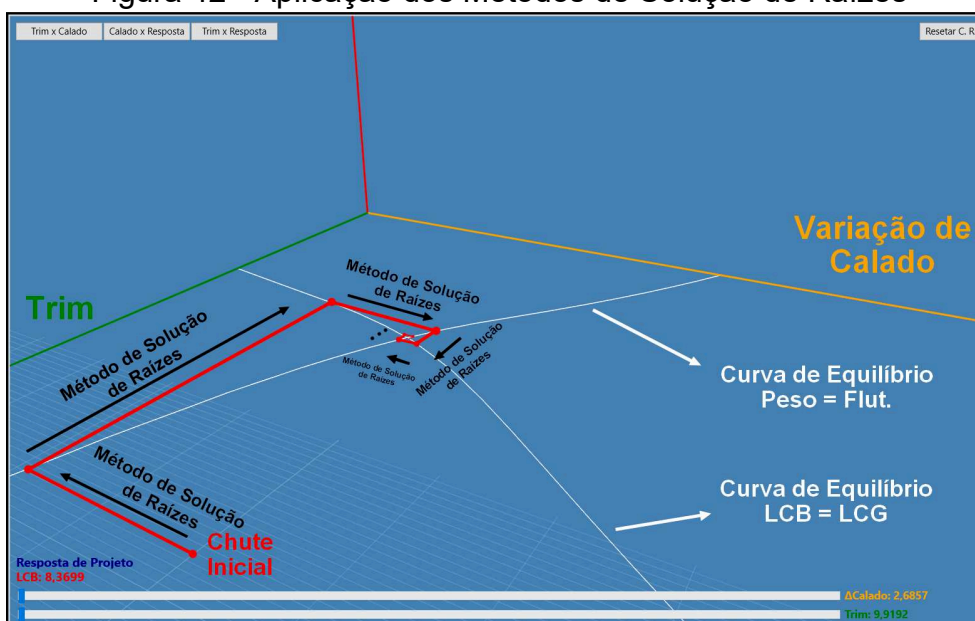
Figura 41 - Cruzamento das Curvas de Equilíbrio



Fonte: O Autor

Portanto, percebe-se que existe um ponto específico em que as duas curvas projetadas se cruzam, evidenciando uma condição única de “trim” e “variação de calado” em que existe equilíbrio tanto entre a intensidade das forças quanto entre as suas posições longitudinais. É exatamente esta condição de equilíbrio que precisa ser encontrada através dos métodos de solução de raízes conforme mostrado na Figura 42.

Figura 42 - Aplicação dos Métodos de Solução de Raízes



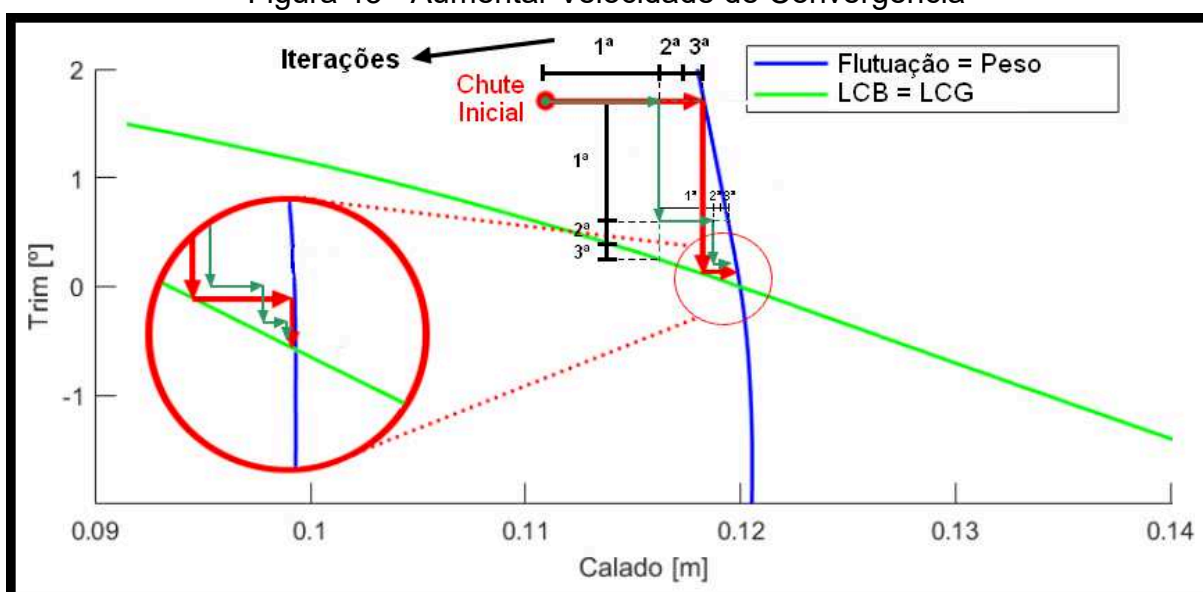
Fonte: O Autor

4.6.5 Velocidade de Convergência

Com a utilização do modo de análise detalhada, o autor percebeu um comportamento interessante. Ao aplicar o método de Newton-Raphson para o deslocamento, usualmente se levam poucas iterações para haver uma aproximação satisfatória. Essa quantidade de iterações varia com a geometria do casco, as condições de peso e LCG, o chute inicial, entre outros parâmetros.

O fato relevante que possibilitou um aumento na velocidade de convergência é que, após a primeira iteração, o método atinge uma aproximação expressa para a resposta, em alguns casos chegando a menos de 1% de erro. Portanto, decidiu-se que ao invés de deixar o programa utilizar várias iterações para atingir cada equilíbrio, deve-se calcular apenas uma iteração de Newton-Raphson por vez, alternando constantemente entre os parâmetros (calado e trim). Para melhor entendimento, vide Figura 43 a seguir.

Figura 43 - Aumentar Velocidade de Convergência



Fonte: O Autor

As setas identificadas em vermelho na figura representam um exemplo arbitrário de 3 iterações para atingir o equilíbrio, seja de flutuação ou LCB. Em verde escuro estão as setas que representam a nova estratégia, onde cada uma delas representa apenas uma iteração.

Percebe-se que, na Figura 43, para alcançar praticamente a mesma proximidade do ponto de cruzamento das curvas de equilíbrio, a nova estratégia em verde escuro leva apenas 66,66% das iterações da estratégia original em vermelho.

Na prática, com aplicações reais no programa, obteve-se uma diminuição no tempo de processamento, em alguns casos, de mais de 28%.

4.6.6 Dificuldades de Convergência

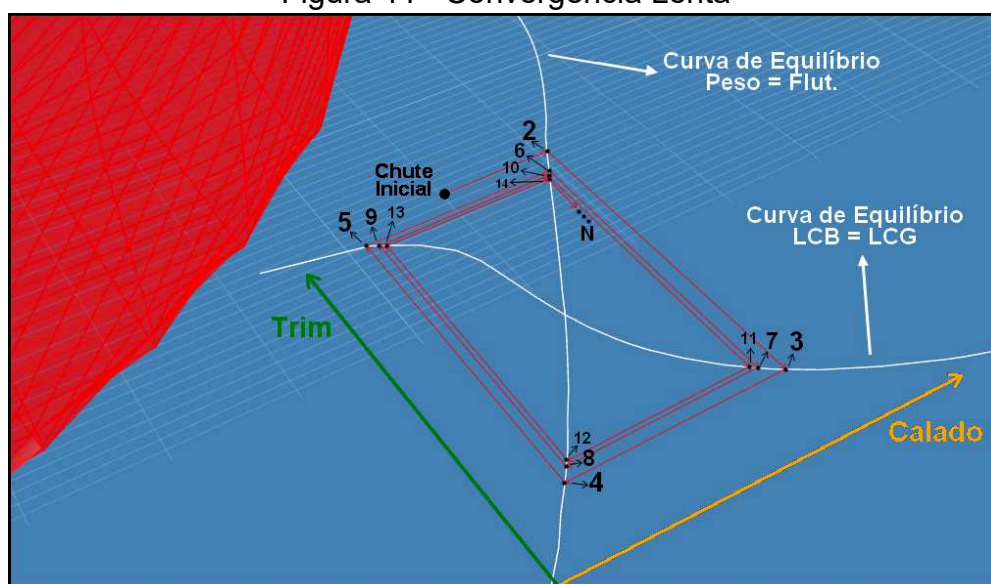
O objetivo desta seção é apresentar os principais obstáculos encontrados neste trabalho, evidenciando oportunidades de melhoria deste projeto.

É importante destacar que tais dificuldades estão relacionadas ao comportamento iterativo associado ao equilíbrio do LCB e do deslocamento.

Para facilitar a visualização e, portanto, o entendimento das complicações da convergência iterativa, não está sendo utilizado a estratégia descrita em 4.6.5.

A primeira dificuldade a ser destacada, trata-se de uma ocorrência onde há convergência, porém de forma não satisfatória. Existem casos em que por mais que haja uma tendência de se aproximar da resposta, este processo se torna excessivamente lento, o que eventualmente acarreta a interrupção dos cálculos devido ao número excessivo de iterações (Figura 44).

Figura 44 - Convergência Lenta

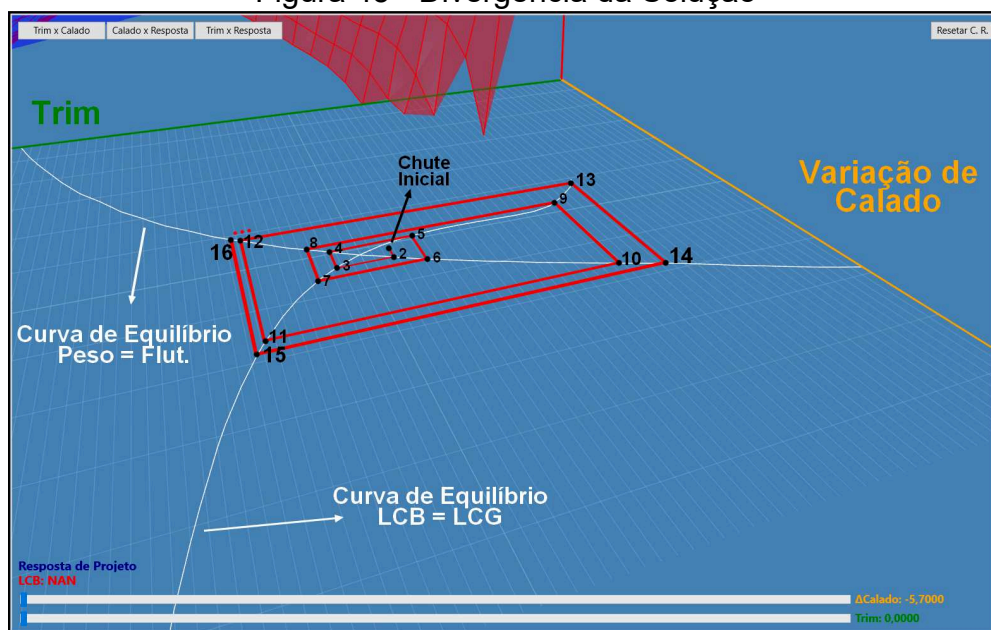


Fonte: O Autor

O autor considerou implementar uma não interrupção dos cálculos em tais eventos onde há convergência lenta. Contudo, percebeu-se que o custo computacional poderia se tornar excessivamente alto em certos casos. Desta forma, resolveu-se manter a interrupção baseada no número de iterações.

A segunda dificuldade trata-se da possibilidade de haver uma divergência neste processo. Em muitos casos, a combinação das duas curvas de equilíbrio pode levar ao comportamento mostrado na Figura 45.

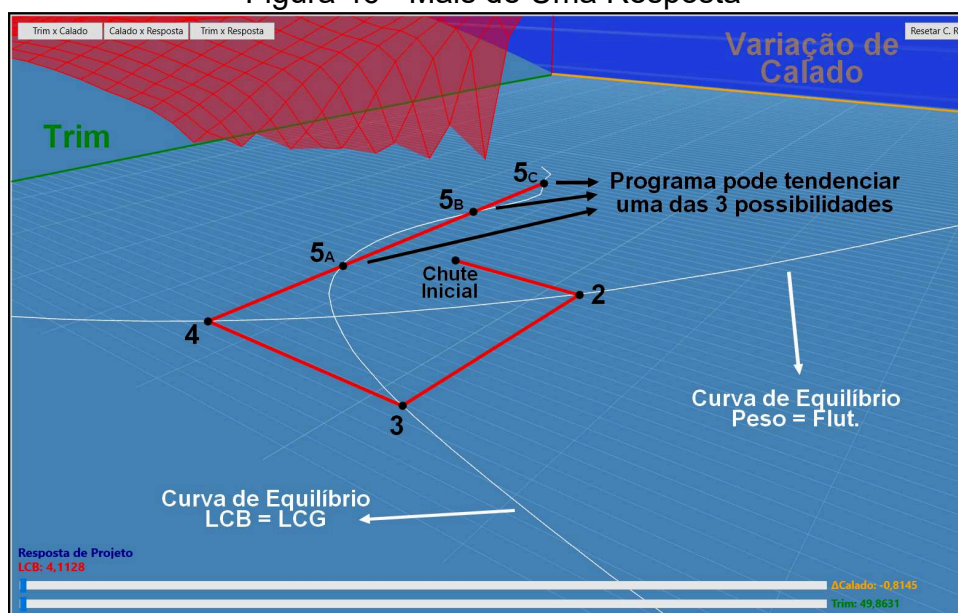
Figura 45 - Divergência da Solução



Fonte: O Autor

Por último, se encontra o caso em que há mais de uma resposta para o trim. Nessas ocorrências, o programa, seja pelo método de Newton-Raphson ou da bissecção, pode ficar preso em um ponto que se afasta da solução. Portanto, o algoritmo entra em looping infinito e a falha da solução é declarada (Figura 46).

Figura 46 - Mais de Uma Resposta



Fonte: O Autor

4.7 DADOS HIDROSTÁTICOS

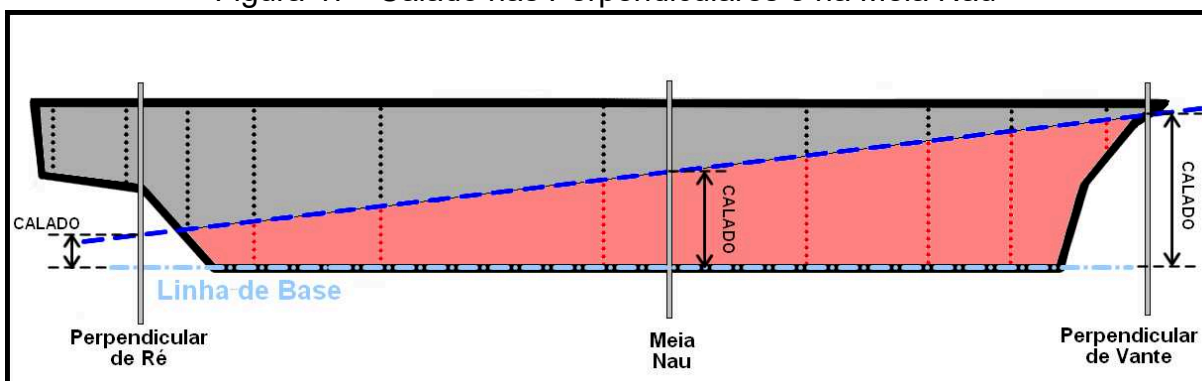
Logo após a importação da tabela de cotas de uma embarcação, com todos os vetores devidamente organizados, o programa calcula o comprimento total, a boca e o pontal da embarcação. Para isso, realiza-se a subtração entre o ponto de maior coordenada e o de menor coordenada longitudinal, transversal e vertical, respectivamente.

Como explicado anteriormente, os pontos que formam o plano de flutuação do navio, em uma dada condição de carga, são armazenados em um vetor exclusivo. Portanto, para definir o comprimento na linha d'água subtrai-se o valor da menor cota longitudinal do valor da maior cota longitudinal existentes nesse vetor.

A boca máxima submersa é calculada de forma semelhante à boca do navio, porém considerando apenas os pontos submersos.

Para a obtenção dos calados nas perpendiculares de ré e de vante, na meia nau e no LCF, consideram-se os valores medidos ortogonalmente à linha de base. Isso é o equivalente a considerar a embarcação estática no espaço, movimentar a linha d'água para fornecer trim e calado, e extrair as distâncias verticais entre a linha de base e a linha d'água em cada uma dessas posições longitudinais (Figura 47).

Figura 47 - Calado nas Perpendiculares e na Meia Nau



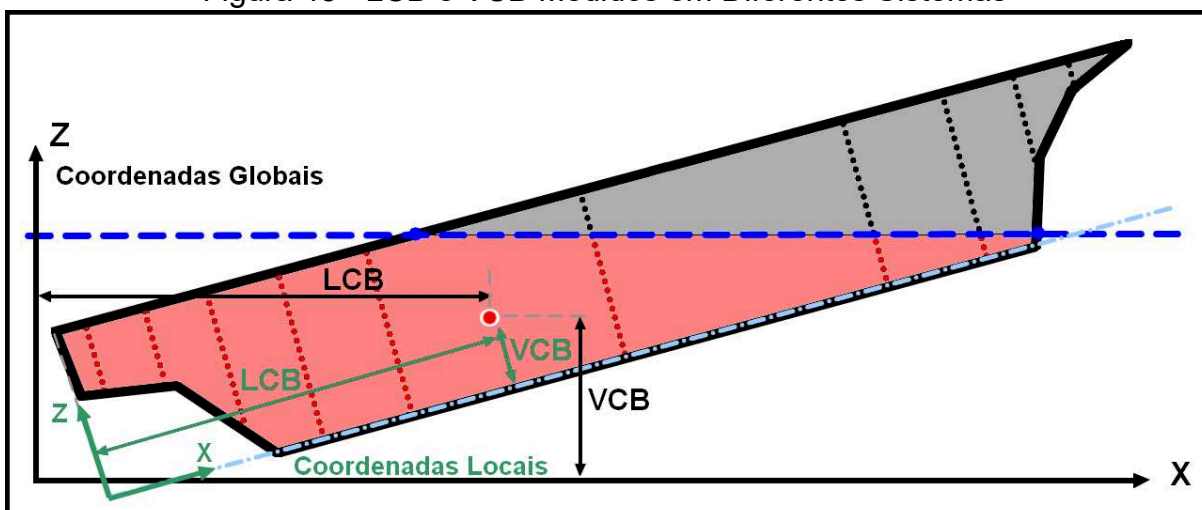
Fonte: O Autor

O calado absoluto refere-se à distância medida do ponto da embarcação de menor cota vertical até a posição do plano de linha d'água, ambos medidos no sistema global.

Valores como LCF, LCB e VCB, calculados pela integração do volume submerso, são fornecidos tanto no sistema de coordenadas global quanto no sistema de coordenadas local solidário à embarcação (Figura 48) através das dimensões perpendiculares ao espelho de popa (LCB e LCF) e perpendiculares à linha de base (VCB).

A área do plano de flutuação é calculada usando o método de cálculo de área de Gauss aplicado para a integração dos pontos localizados no plano de linha d'água.

Figura 48 - LCB e VCB Medidos em Diferentes Sistemas



Fonte: O Autor

A área molhada do navio é calculada como a somatória de três parcelas: a área do espelho de popa; a área do espelho de proa; e a integral longitudinal dos contornos submersos de cada baliza.

O raio metacêntrico transversal do navio é calculado considerando o momento de inércia da área de linha d'água tomado em relação ao eixo longitudinal dividido pelo deslocamento volumétrico do casco. O momento de inércia, por sua vez, é calculado através da integração das cotas transversais cúbicas dos pontos pertencentes ao plano de flutuação (Equação 14).

A altura metacêntrica pode ser definida através da somatória da altura do centro de flutuação com o raio metacêntrico subtraindo-se a altura do centro de gravidade (Equação 8). É importante notar que, no programa, esta altura metacêntrica é denominada $GM_{\text{corrigido}}$ justamente porque as alturas \overline{KB} e \overline{KG} estão sendo consideradas no sistema de coordenadas global.

Caso fosse utilizado as medidas no sistema solidário à embarcação (local), a somatória não faria sentido espacial visto que o \overline{BM}_T foi calculado perpendicularmente ao plano de linha d'água.

4.7.1 Coeficientes de Forma

Entre as funções já apresentadas, o programa desenvolvido ainda calcula quatro coeficientes de forma para a embarcação sendo eles: o coeficiente de bloco (C_B), o coeficiente prismático longitudinal (C_P), o coeficiente de seção mestra (C_M) e o coeficiente do plano de linha d'água (C_{WP}).

É necessário destacar que alguns parâmetros utilizados para estes cálculos não são aqueles dispostos na NBR 8035 sobre arquitetura naval (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1989) e por essa razão, são detalhados na Tabela 2.

Tabela 2 - Detalhamento dos Coeficientes de Forma no Barbosa's

Coeficiente	Sigla	Formulação	Observações
Coeficiente de Bloco	C_B	$\frac{\Delta_{volumétrico}}{L*B*T}$	L: Comprimento na linha d'água. B: Boca máxima submersa. T: Calado absoluto
Coeficiente Prismático	C_P	$\frac{\Delta_{volumétrico}}{L*A}$	L: Comprimento na linha d'água. A: Máxima SAC(x) calculada.
Coeficiente de Seção Mestra	C_M	$\frac{SAC(x)_{MÁXIMA}}{B*T}$	B: Boca submersa máxima na seção T: Calado na seção
Coeficiente do Plano de Linha d'água	C_{WP}	$\frac{A_{WP}}{B*L}$	L: Comprimento na linha d'água B: Boca máxima no plano de flutuação

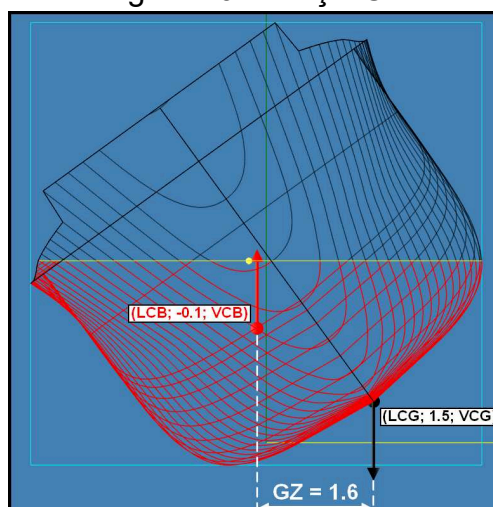
Fonte: O Autor

4.8 ESTABILIDADE A GRANDES ÂNGULOS

Ao iniciar a análise de estabilidade à grandes ângulos, o programa calcula o braço de endireitamento (ou emborcamento) para diversos ângulos de banda, cujo intervalo pode ser definido pelo usuário.

Desta forma, o programa irá rotacionar o casco em cada ângulo de banda discretizado e realizar o equilíbrio peso/flutuação e LCB/LCG. Após este equilíbrio ser atingido, extrai-se o valor de \overline{GZ} daquela condição de banda através da diferença entre as coordenadas transversais da força peso e da força de flutuação.

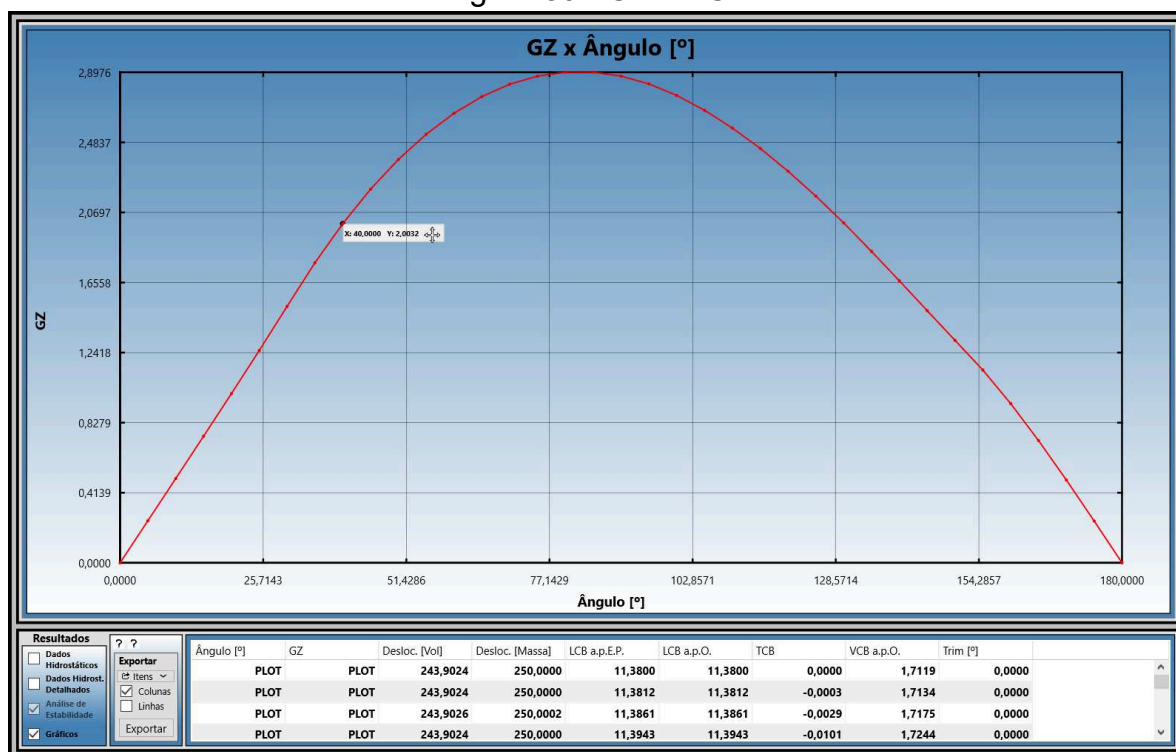
Na Figura 49 é mostrado um exemplo de uma embarcação com 36° de banda. Neste exemplo, o CG se encontra no ponto mais baixo da quilha, enquanto a distância \overline{GZ} é marcada em branco.

Figura 49 - Braço \overline{GZ} 

Fonte: O Autor

Após o fim da análise, os resultados podem ser acessados no painel de resultados, enquanto os gráficos (Figura 50) são exibidos ao se selecionar a opção “Gráficos” deste mesmo painel.

Figura 50 - Curva \overline{GZ}



Fonte: O Autor

4.8.1 Critérios da IMO

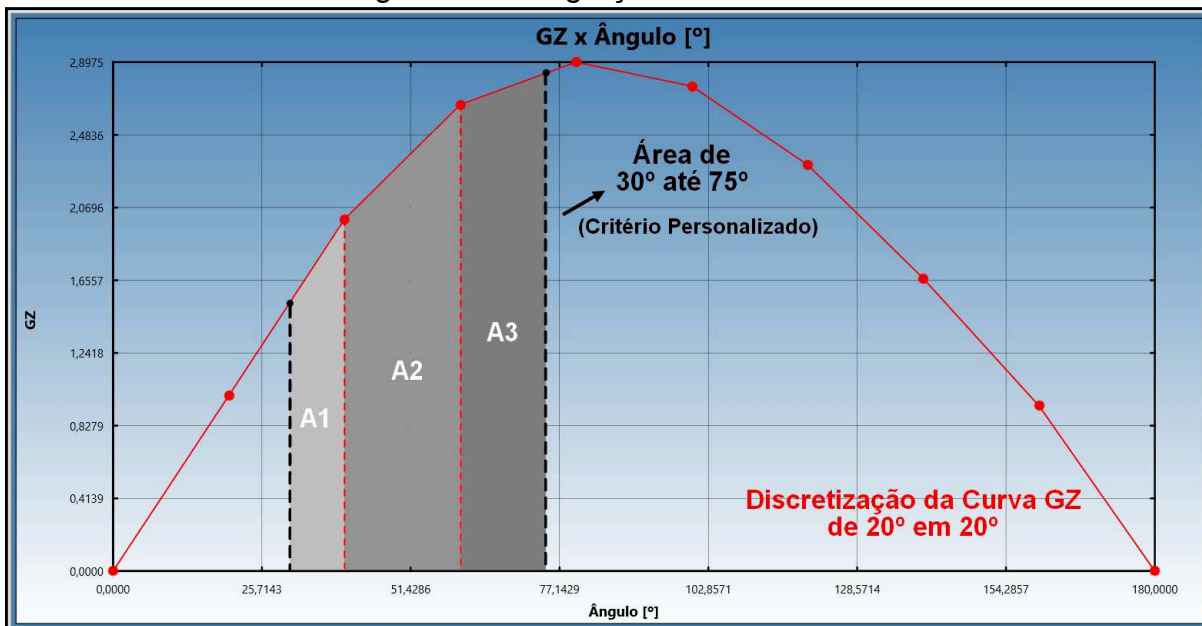
Ainda no painel de análises, o usuário pode verificar os critérios da IMO aplicados à curva de estabilidade calculada para a embarcação na condição de carga definida pelo usuário.

Nesse caso existe a possibilidade de se utilizar os critérios originais publicados pela IMO na resolução MSC.267(85) (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, 2008), além da opção de personalizar os critérios a serem verificados, modificando-se os limites permitidos para cada critério.

As integrações realizadas na curva \overline{GZ} são calculadas usando a regra de trapézios com os valores e espaçamentos de banda definidos pelo usuário (abscissas dos pontos vermelhos na Figura 51). Nessa figura, o usuário definiu os ângulos de banda, para a curva de estabilidade, partindo de 0° até 180° com um

passo de 20°. Portanto, os valores de banda discretizados pelo usuário não contêm os limites do critério personalizado (dois pontos pretos) de 30° e 75°. Por esse motivo, os valores de \overline{GZ} nesses dois ângulos são calculados pela interpolação linear entre os pontos vizinhos. A somatória das áreas A1, A2 e A3, na Figura 51, retorna a área do critério personalizado.

Figura 51 - Integração da Curva \overline{GZ}



Fonte: O Autor

4.9 OUTRAS FUNCIONALIDADES

Além das funcionalidades já descritas neste relatório, o programa desenvolvido permite ainda a visualização em projeção ortográfica, a verificação da posição do ponteiro do mouse no visualizador e o cruzamento das curvas de equilíbrio, cujos detalhes podem ser vistos na seção 4 do Apêndice A.

5 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA

Conforme descrito no capítulo 3, para validar o desenvolvimento realizado, utilizou-se uma comparação de resultados entre a ferramenta desenvolvida e o programa MAXSURF Stability, o qual já é consolidado no mercado. A licença do MAXSURF utilizada foi a licença acadêmica disponibilizada pela Universidade Federal de Santa Catarina.

5.1 CONFIGURAÇÃO DO MAXSURF STABILITY

Primeiramente, deve-se esclarecer alguns aspectos utilizados no MAXSURF de forma a permitir futuras reproduções desta validação. Na Figura 52 é mostrado o sistema de unidades utilizadas pelo programa durante as análises.

Figura 52 - Unidades Adotadas no MAXSURF

The image shows a dialog box titled "Units" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is organized into several sections, each with a title and a list of radio button options:

- Length Units?**
 - Metres
 - Centimetres
 - Millimetres
 - Feet & Inches
 - Decimal Feet
 - Inches
- Mass (Weight) Units?**
 - Tonnes
 - Kilograms
 - Kilopound Force (kip, $g=9.80665 \text{ m/s}^2$)
 - Long Tons
 - Pounds
- Force (Resistance)**
 - Newtons (N)
 - Kilonewtons (kN)
 - Pounds Force (lbf)
 - Kilopound Force (kip)
- Speed Units?**
 - Knots (International)
 - km per Hour (km/h)
 - Miles per Hour (mph)
 - Metres per Second (m/s)
 - Feet per Second (ft/s)
- GZ Area Angular Measurement Units ?**
 - Radians (rad)
 - Degrees (deg)
- Volume / Capacity Units ?**
 - use Length units
 - Litre
 - Imperial Gallon
 - US liquid Gallon

At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Fonte: MAXSURF Stability

Portanto, como a ferramenta deste trabalho não possui configuração de unidades, já que os dados de entrada são os mesmos nos dois programas, os resultados na ferramenta desenvolvida estarão nas mesmas unidades dos resultados do MAXSURF. Destaca-se ainda que a massa específica da água, em ambas as plataformas, foi de 1,025 toneladas por metro cúbico.

Os parâmetros utilizados na definição das dimensões e coeficientes de forma nos cálculos hidrostáticos foram definidos conforme mostrado na Figura 53.

Figura 53 - Parâmetros dos Coeficientes de Forma no MAXSURF

Hydrostatic Coefficient Calculation Parameters

Length for Coefficients

- Length Between Perpendiculars
- Waterline Length
- Maximum Length

Beam for Coefficients

- Largest Beam on WL
- Beam on WL amidships
- Beam on WL at largest Sec. Area
- Maximum Beam

Draft for Coefficients

- Greatest immersed depth
- Immersed depth amidships
- Immersed depth at largest Sec. Area
- Draft to Baseline (amidships)
- Draft Extents

Sectional Area for Coefficients

- Largest Sectional Area
- Sectional Area amidships

LCB, LCF

Origin

- From Zero Point
- From Midships
- From Aft Perp
- From Fwd Perp
- From middle of actual waterline
- From aft end of actual waterline
- From fwd end of actual waterline

Direction

- Positive fwd
- Positive aft

Measurement

- Dimensional length
- Percentage of Length for Coefficients

Area coefficient

- Beam and draft for coefficients
- Beam and draft at area station

OK Cancel

Fonte: MAXSURF Stability

Vale notar que o parâmetro boca utilizado no cálculo dos coeficientes de forma não é exatamente o mesmo daquele utilizado na ferramenta desenvolvida conforme o disposto na seção 4.7.1. A boca utilizada pelo MAXSURF nos coeficientes é a máxima boca na linha d'água. Por outro lado, no programa desenvolvido, utiliza-se a boca máxima submersa. Usualmente, os dois parâmetros possuem valores consideravelmente próximos, porém, para geometrias diferenciadas, podem ocorrer variações.

5.2 ANÁLISES

Foram escolhidas duas embarcações para a validação da ferramenta Barbosa's. A primeira corresponde a um pesqueiro industrial de 28 metros de comprimento projetada pelo autor em uma das disciplinas do curso de Engenharia Naval. A segunda embarcação escolhida foi a de um rebocador em escala reduzida pertencente à equipe Hydra do Desafio Universitário de Nautidesign (DUNA) de 2018. As dimensões principais de ambas as embarcações são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensões Principais

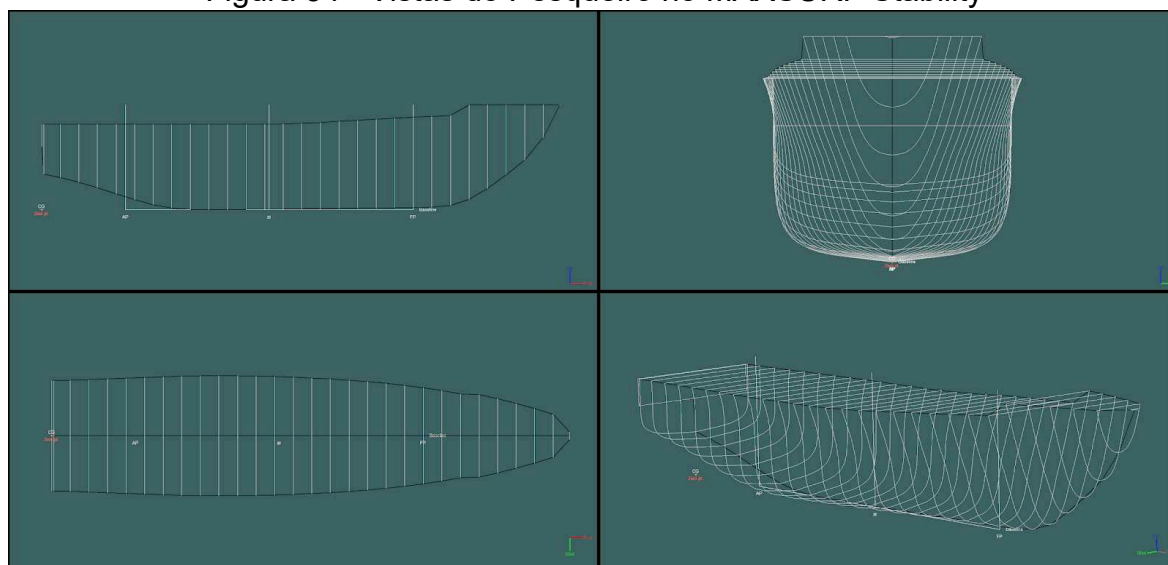
Pesqueiro	Loa [m]	Boca [m]	Pontal [m]
	27,8800	6,5004	5,7011
Hydra	Loa [m]	Boca [m]	Pontal [m]
	0,9980	0,3198	0,2004

Fonte: O Autor

Usando o procedimento de importação descrito no Apêndice B obtém-se o modelo da embarcação no programa MAXSURF cujas vistas lateral, frontal, superior e a perspectiva 3D podem ser vistas na Figura 54 (Pesqueiro) e Figura 56 (Hydra).

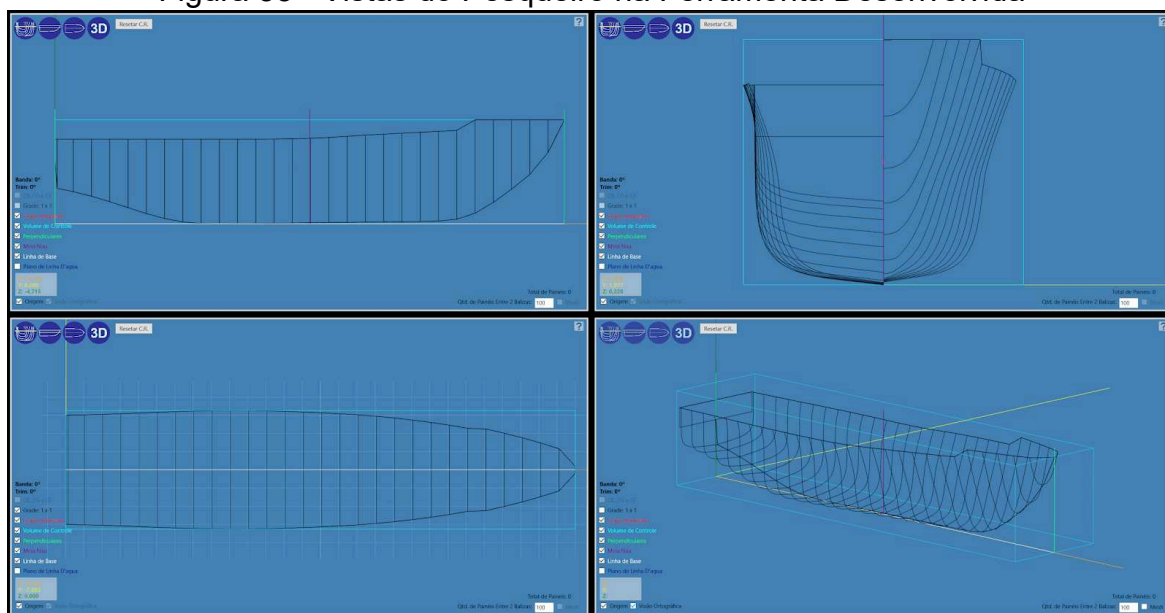
As mesmas geometrias podem ser visualizadas na ferramenta desenvolvida e cujas vistas são mostradas na Figura 55 (Pesqueiro) e Figura 57 (Hydra).

Figura 54 - Vistas do Pesqueiro no MAXSURF Stability



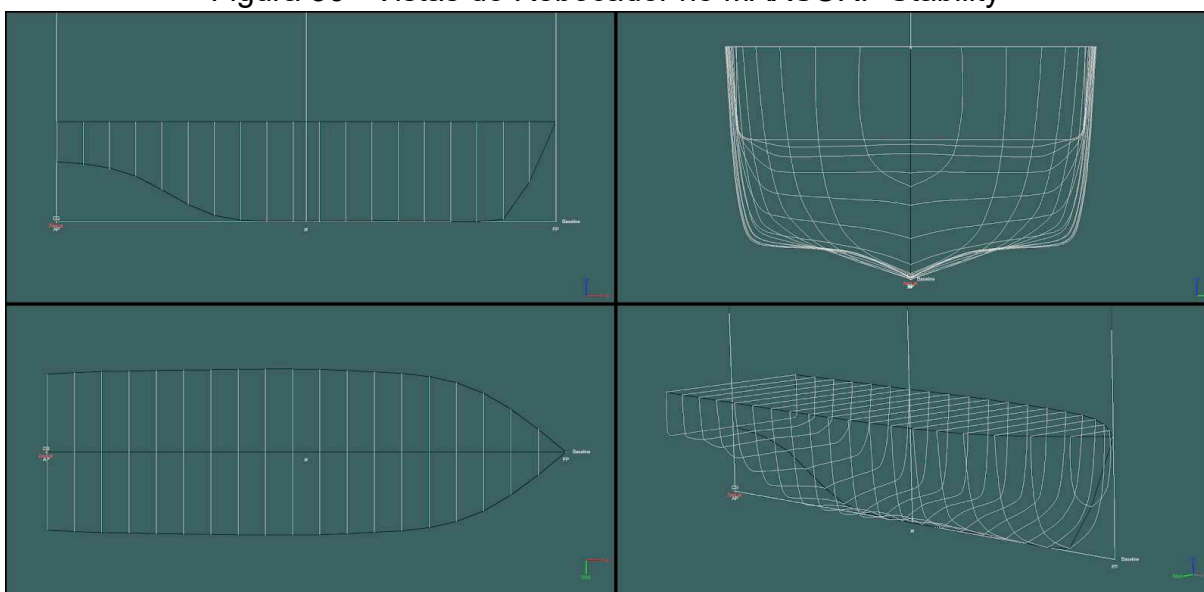
Fonte: MAXSURF Stability

Figura 55 - Vistas do Pesqueiro na Ferramenta Desenvolvida



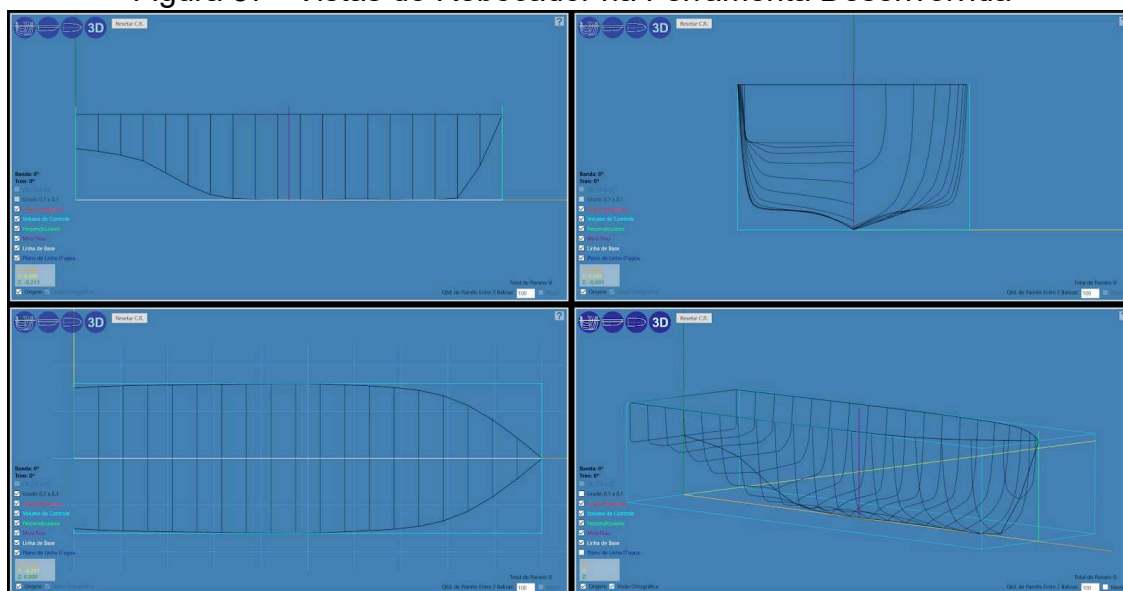
Fonte: O Autor

Figura 56 - Vistas do Rebocador no MAXSURF Stability



Fonte: MAXSURF Stability

Figura 57 - Vistas do Rebecador na Ferramenta Desenvolvida



Fonte: O Autor

Para a verificação da ferramenta desenvolvida foram realizadas um total de 6 análises. Para cada embarcação estudada, foram analisadas três condições de carga diferentes, as quais acarretam ângulos de trim positivos, negativos ou próximos de zero.

Para facilitar a visualização e a análise, algumas figuras foram agrupadas de forma a exibir os resultados das 6 análises simultaneamente. O detalhamento dos dados de entrada utilizados em cada uma das análises é apresentado na Tabela 4.

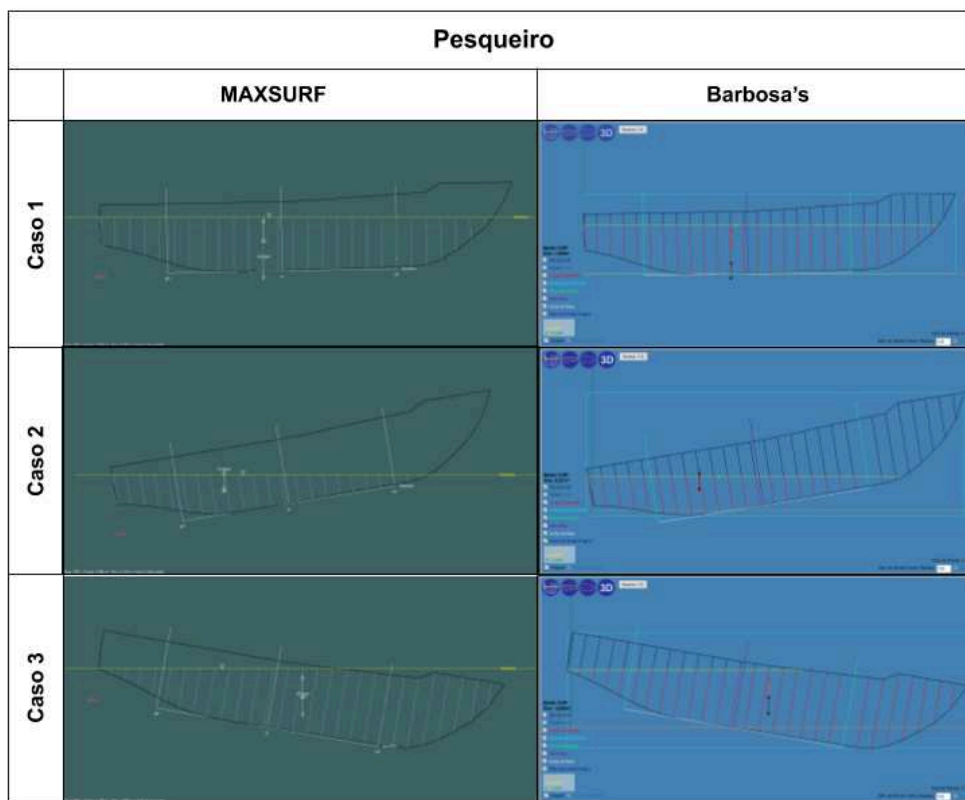
Tabela 4 - Detalhamento Dados de Entrada

Detalhamento Dados de Entrada						
	Pesqueiro			Hydra		
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Deslocamento [ton]	350	200	400	0,005	0,03	0,015
Dens. H2O [ton/m³]	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025
Trim Livre	X	X	X	X	X	X
LCG [m]	11	8	14,3	0,3	0,5	0,65
VCG [m]	0,8	3	2,5	0,1	0,08	0,05
P. P. Vante [m]	20	20	20	0,9	0,9	0,9
P. P. Ré [m]	4,5	4,5	4,5	0,1	0,1	0,1

Fonte: O Autor

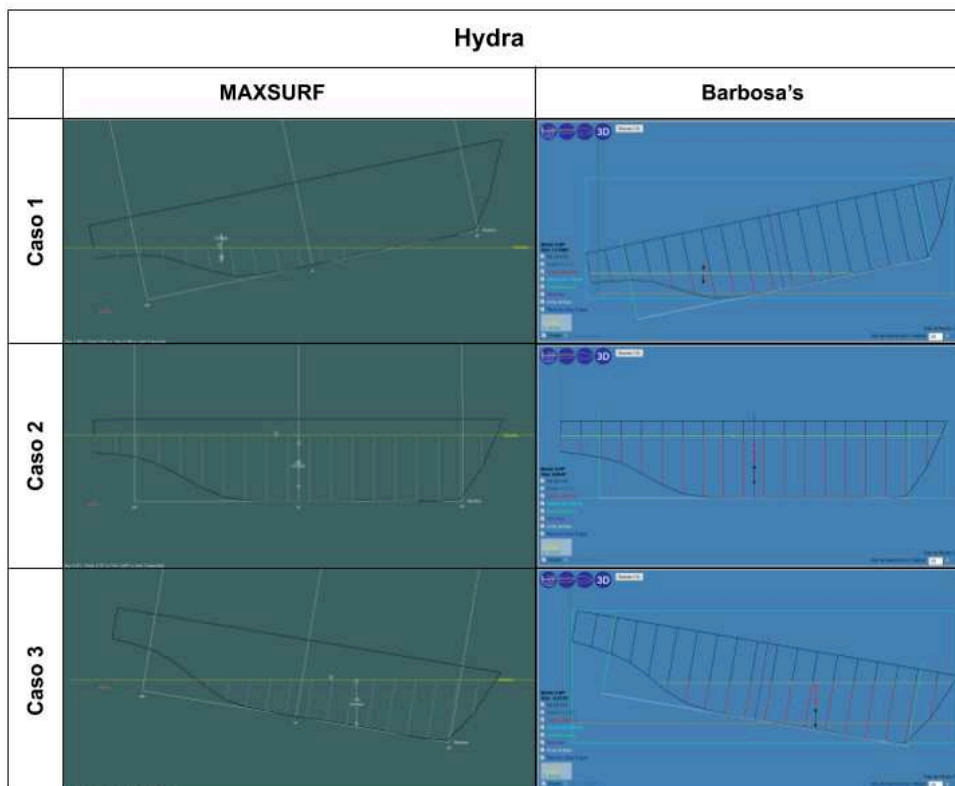
As condições hidrostáticas na condição de equilíbrio determinadas por cada um dos programas podem ser visualizadas na Figura 58 (Pesqueiro) e na Figura 59 (Hydra).

Figura 58 - Equilíbrio do Pesqueiro



Fonte: MAXSURF Stability

Figura 59 - Equilíbrio do Hydra



Fonte: O Autor

A comparação dos resultados hidrostáticos obtidos em ambos os programas são dispostos na forma de 6 tabelas. Para o pesqueiro, no primeiro caso de condição de carga, percebe-se que o erro máximo relativo é de aproximadamente 1,4 % no valor do trim (Tabela 5). De forma geral, não se trata de uma diferença expressiva, a qual provavelmente decorre dos diferentes critérios de convergência do equilíbrio e/ou discretizações utilizadas por cada um dos programas.

De forma comparativa ao obtido no MAXSURF é possível identificar que o \overline{BM}_T calculado no Barbosa's possui uma diferença numérica pouco significativa que é causada justamente pela diferença dos métodos de interpolação utilizados pelos programas.

É importante destacar que na ferramenta desenvolvida, a interpolação utilizada é linear, enquanto no MAXSURF há uma aproximação mais realista do plano de flutuação através de uma interpolação não linear. Esta diferença causa uma pequena disparidade no valor do raio metacêntrico, e, por conseguinte, na altura metacêntrica.

Tabela 5 - Dados Hidrostáticos do Pesqueiro na Primeira Análise

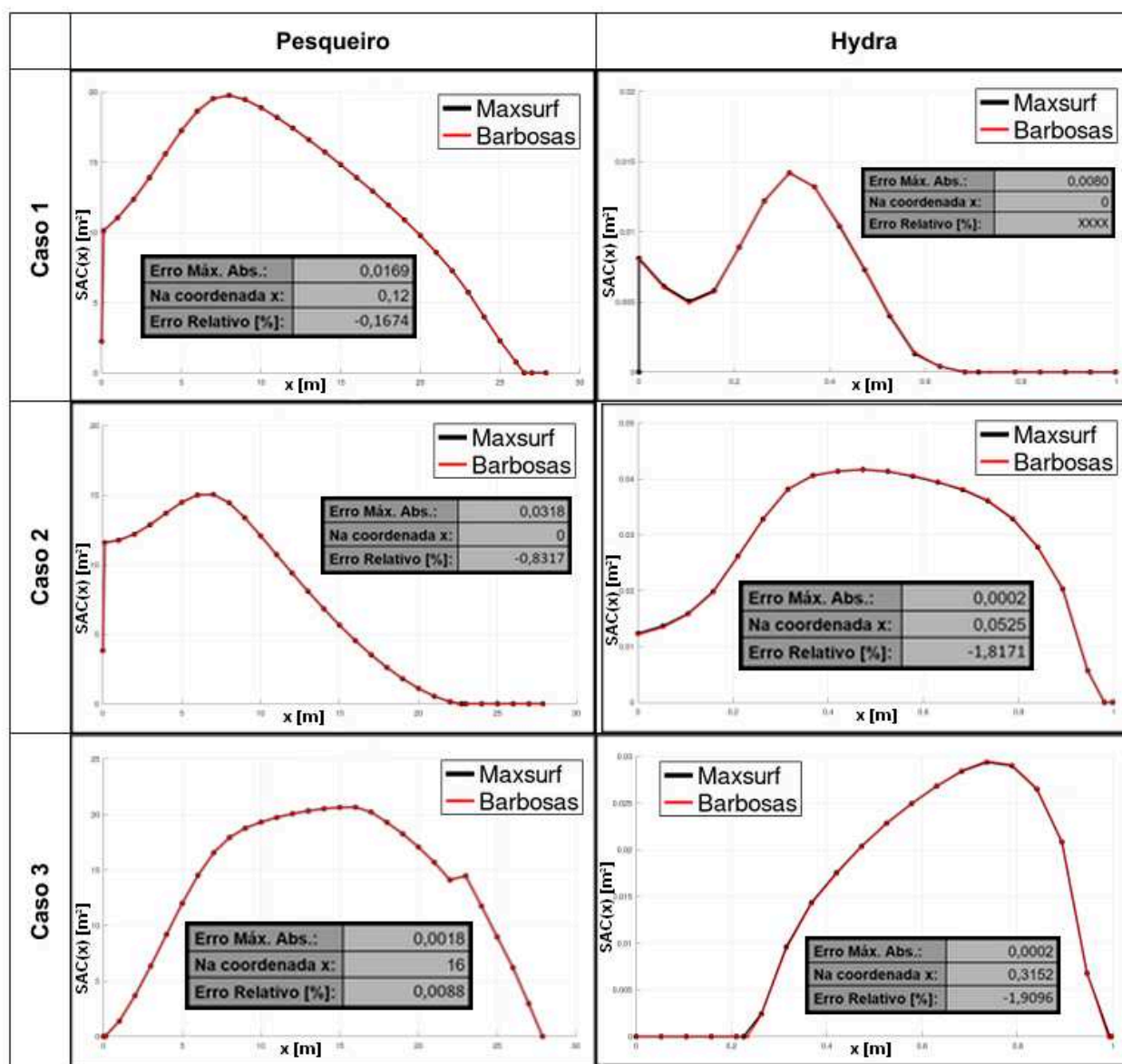
Resultados de Dados Hidrostáticos				
	Maxsurf	Barbosa's	Erro Absoluto	Erro [%]
1) Trim [°]	1,0237	1,0094	-0,0143	-1,3969
2) Dens. H2O [ton/m³]	1,0250	1,0250	0,0000	0,0000
3) Deslocamento [ton]	350,0000	350,0001	0,0001	0,0000
4) Lwl [m]	26,5330	26,5363	0,0033	0,0124
5) Boca Máxima Submersa [m] *	5,9800	5,9802	0,0002	0,0033
6) Calado na P. P. Ré [m]	3,7420	3,7406	-0,0014	-0,0374
7) Calado na M. N. [m]	3,6040	3,6040	0,0000	0,0000
8) Calado na P. P. Vante [m]	3,4650	3,4675	0,0025	0,0722
9) Calado em LCF [m]	3,6180	3,6188	0,0008	0,0221
10) LCB (a partir do E. P.) [m]	11,0240	11,0238	-0,0002	-0,0018
11) LCF (a partir do E. P.) [m]	11,4470	11,4099	-0,0371	-0,3241
12) KB (a partir da L. B.) [m]	2,1510	2,1507	-0,0003	-0,0139
13) Área Plano de Flutuação [m²]	130,4360	130,1183	-0,3177	-0,2436
14) Área Molhada [m²]	244,7970	242,2579	-2,5391	-1,0372
15) Cb	0,5880	0,5877	-0,0003	-0,0510
16) Cp	0,6510	0,6515	0,0005	0,0768
17) Cm	0,9050	0,9044	-0,0006	-0,0663
18) Cwp	0,8220	0,8199	-0,0021	-0,2555
19) BMt [m]	0,9140	0,9143	0,0003	0,0328
20) GMt (Corrigido) [m]	2,2650	2,2652	0,0002	0,0088
	Erro [%] Max.:	1,3969	em	1) Trim [°]

Fonte: O Autor

As tabelas com a comparação dos dados hidrostáticos entre os dois programas para os outros 5 casos analisados podem ser vistas no Apêndice C.

Na Figura 60 são comparados os resultados do cálculo da curva SAC(x) obtida em cada um dos programas para todos os 6 casos analisados. Percebe-se que, visualmente, há uma aproximação satisfatória entre as duas curvas indicando uma condição de equilíbrio equivalente entre as duas ferramentas.

Figura 60 - Curvas SAC(x)



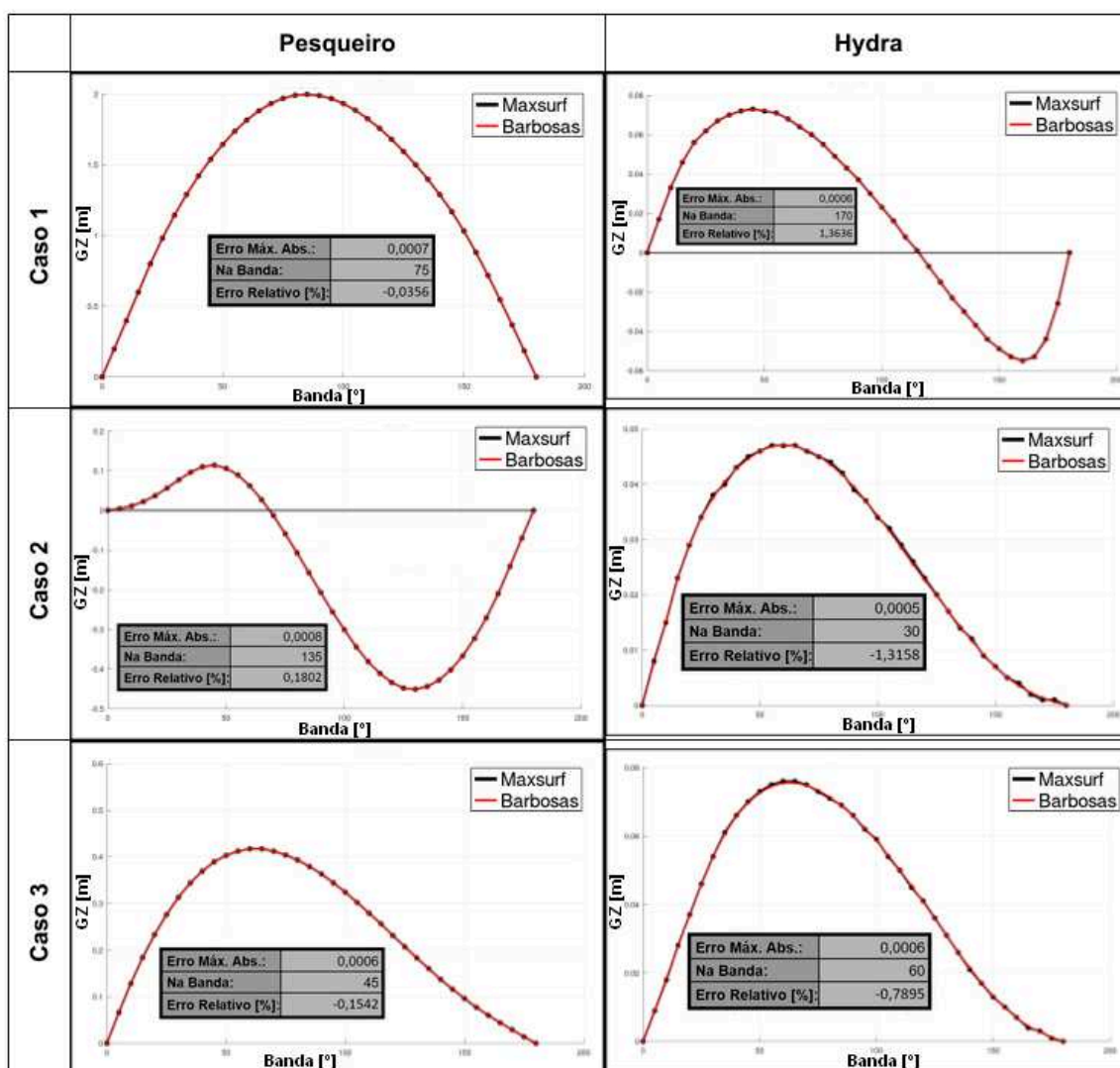
Fonte: O Autor

No Apêndice C podem ser vistas as 6 tabelas com os valores numéricos destes gráficos bem como o erro percentual entre os dois programas. É importante notar, que, numericamente, quando os dados se aproximam de zero, os erros

percentuais podem alcançar valores muito altos. Porém, numa forma absoluta, estes erros são considerados irrelevantes para um projeto naval.

Para a análise de estabilidade a grandes ângulos utilizou-se uma discretização de ângulos de banda que vai de 0° à 180° com um passo de 5° , totalizando 37 ângulos para a curva \overline{GZ} . Os resultados da comparação das curvas \overline{GZ} calculadas em ambas as ferramentas, para os 6 casos, podem ser vistos nos gráficos da Figura 61. Observa-se que, por exemplo, no primeiro caso do pescueiro, o erro máximo relativo observado foi de 0,0356% no ângulo de 75° .

Figura 61 - Curvas \overline{GZ}



Fonte: O Autor

Devido à considerável proximidade entre as curvas nos dois programas, identifica-se que a ferramenta desenvolvida atende aos objetivos propostos, sendo uma alternativa eficaz para a análise de estabilidade de embarcações.

Por fim, na Tabela 6, encontram-se as análises relativas à aplicação dos critérios de estabilidade da IMO realizadas por ambos os programas na primeira condição de carga analisada para o pesqueiro.

Tabela 6 - Critérios da IMO do Pesqueiro na Primeira Análise

CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE - EMBARCAÇÕES MERCANTES - IMO						
Critérios			Resultados		Erro	
Condição	Requisito		Maxsurf	Barbosa's	Erro	Erro [%]
1) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 30^\circ$	$A \geq 0,055$ [m.rad]	0,3096	0,3093	-0,0003	-0,0969
2) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,090$ [m.rad]	0,5342	0,5337	-0,0005	-0,0936
3) $\theta \geq 30^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,030$ [m.rad]	0,2246	0,2244	-0,0002	-0,0890
4) $\theta = 30^\circ$		$GZ \geq 0,20$ [m]	1,1490	1,1428	-0,0062	-0,5396
5) Max(GZ)		$\theta \geq 30^\circ$	84,5000	85,0000	0,5000	0,5917
6) GM inicial		$GMt \geq 0,15$ [m]	2,2650	2,2652	0,0002	0,0088

Fonte: O Autor

O maior erro relativo encontrado nesse caso refere-se ao ângulo de máximo \overline{GZ} . O motivo principal para esta disparidade é que o MAXSURF interpola os valores discretizados de forma não linear na tentativa de obter resultados mais acurados sem a necessidade de uma maior discretização de ângulos ao longo de toda a curva \overline{GZ} . O programa Barbosa's não realiza esta interpolação.

Por este motivo, o MAXSURF atingiu um valor não múltiplo de 5° , no caso, $84,5^\circ$, enquanto o Barbosa's encontrou um dos valores discretizados, no caso, 85° . Logo vislumbra-se uma possibilidade de aperfeiçoamento a ser implementada em futuras versões do programa.

As análises relativas à aplicação dos critérios de estabilidade da IMO para os outros 5 casos se encontram no Apêndice C.

6 CONCLUSÕES

Conforme descrito ao longo deste trabalho, o estudo da interação entre a geometria de um casco e a distribuição de pesos a bordo é essencial para uma análise aprofundada da estabilidade estática de uma embarcação.

Quando se trata de estabilidade, a fase de projeto preliminar possui grande importância, pois é nela que o projetista define os principais aspectos associados ao desempenho e à segurança do projeto.

Nesse contexto, esta monografia apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de realizar cálculos de equilíbrio hidrostático e de estabilidade estática a grandes ângulos a partir da importação da tabela de cotas de uma embarcação.

Além disso, uma análise aprofundada sobre a aplicação de métodos de solução de raízes na busca numérica pelo equilíbrio de um navio (seção 4.6.6) foi realizada.

A ferramenta foi desenvolvida para uso em sala de aula e para o auxílio na formação de engenheiros e arquitetos navais.

Em virtude dos resultados obtidos no capítulo 5, considera-se que os objetivos propostos para o trabalho foram devidamente alcançados. Apesar de alguns pequenos erros numéricos devido à diferença na metodologia de cálculo entre o Barbosa's e o MAXSURF, os resultados obtidos de \overline{GM} e de \overline{GZ} entre os dois programas foram consideravelmente próximos, consolidando a funcionalidade da ferramenta desenvolvida.

Conforme apontado no decorrer do trabalho, alguns itens não solucionados ficam como sugestões futuras, em especial os apontamentos associados às dificuldades na convergência que foram descritos na seção 4.6.6.

Apesar do aparente sucesso no desenvolvimento desta ferramenta, as análises realizadas são apenas a ponta do *iceberg* quando comparadas à enorme quantidade de estudos não apenas estáticos, mas também dinâmicos em situações intactas e avariadas considerando cálculos determinísticos e probabilísticos. Desta forma, sugere-se o aprimoramento dessa ferramenta a fim de disponibilizar para a comunidade acadêmica um programa de análises de estabilidade de embarcações cada vez mais completo e versátil.

Recomenda-se, ainda, que este programa seja amplamente utilizado pela comunidade acadêmica a fim de se obter uma constante avaliação sobre a funcionalidade, a validação e a identificação de possíveis erros.

Como observação final para esta monografia, destaca-se a importância do uso consciente de uma ferramenta computacional, onde o usuário deve compreender e dominar os modelos, hipóteses e limitações associadas a essas ferramentas. Além da importância do incentivo para o desenvolvimento de novos programas que auxiliem no aprendizado e no amadurecimento de conceitos relacionados à Engenharia Naval e em muitas outras áreas do conhecimento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8035**: Arquitetura naval – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

BARRASS, C. B. **Ship Design and Performance**: for masters and mates. [S.l.]: Elsevier, 2004. v. 1.

AMARAL, Cleyton; SOUZA, Marcus; CATALAN, Thiago,. Um Estudo do Método de Newton-Raphson. **Matemática e Estatística em Foco**, v.3, n.1, p. 65-72, 2015.

DOKKUM, K. V.; KATEN, H. T.; KOOMEN, K.; PINKSTER, J. **Ship Stability**. [S.l.]: Netherlands: Dokmar, 2008. v. 3.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **International code on intact stability**: res. MSC.267(85). London, UK, 2008. Disponível em <https://www.navcen.uscg.gov/pdf/marcomms/imo/msc_resolutions/MSC267.pdf> Acesso em: 20 out. 2020.

LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture**: Second Revision. [S.l.]: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988. v. 1.

MADEIRA, Daniel. A centróide de um polígono. **Dan Scientia**: Ciências Matemáticas, Físicas e Computacionais, 2009. Disponível em: <<http://dan-scientia.blogspot.com/2009/10/centroide-de-um-poligono.html>> Acesso em 19 out. 2020.

MARITIME HERALD. **General cargo ship Ali Aga capsized and sank at Port of Celebi Bandırma in Turkey**. 2017. 1 fotografia. Disponível em: <<https://www.maritimeherald.com/2017/general-cargo-ship-ali-aga-capsized-sank-port-celebi-bandirma-turkey/>>. Acesso em: 25 set. 2020.

OHANA, M. G. J.; MOREIRA, W. S. F. Validação por comparação de planilha para cálculo de estabilidade intacta com software comercial utilizando os critérios imo. **Seminário Internacional de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior**, Brasília, p. 1 – 8, 2019.

TUMELERO, N. **Metodologia do TCC: como delimitar com lista de exemplos**. 2018. Disponível em: <<https://blog.mettzer.com/metodologia-tcc/>> Acesso em: 13 nov. 2019.

WATSON, D. G. M. **Practical Ship Design**. [S.l.]: Elsevier, 1998. v. 1.

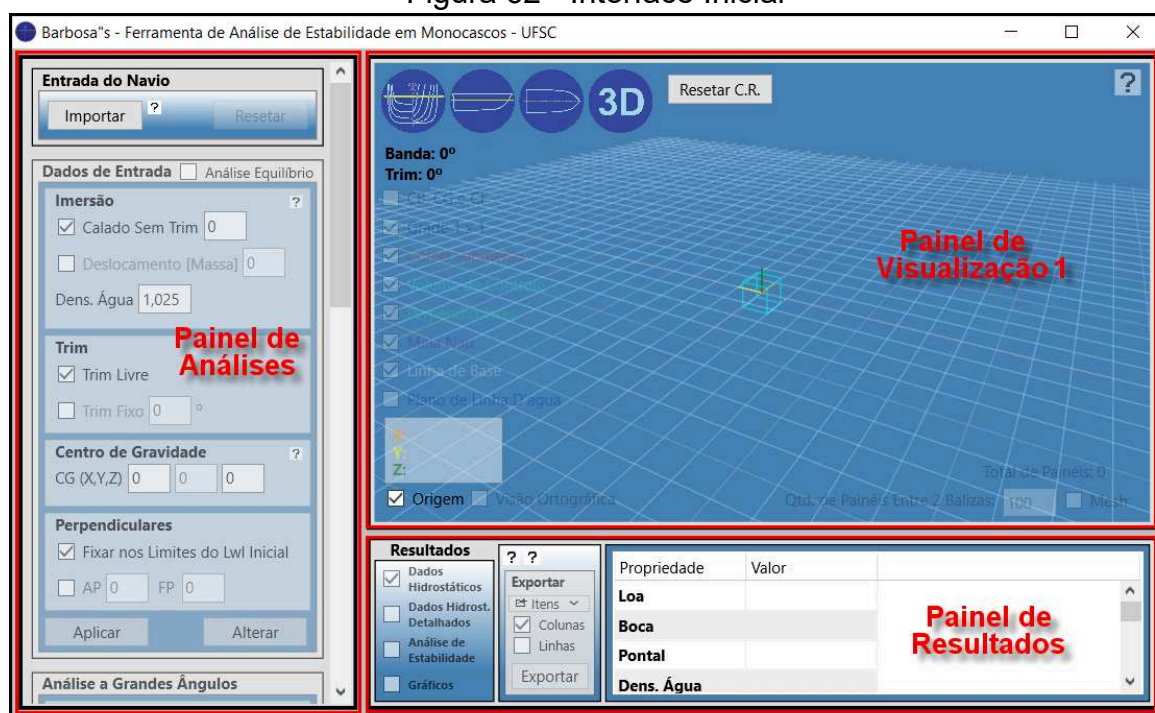
APÊNDICE A - MANUAL DA FERRAMENTA

Ao executar o programa, o usuário encontrará 3 painéis principais (Figura 62). São estes:

- Painel de Análises;
- Painel de Visualização 1;
- Painel de Resultados.

Conforme indicado na Figura 62, é possível identificar que o Painel de Análises contém sub painéis acessíveis por meio de uma barra de rolagem vertical.

Figura 62 - Interface Inicial



Fonte: O Autor

A seguir, cada um dos painéis será detalhado.

A.1 Painel de Análises

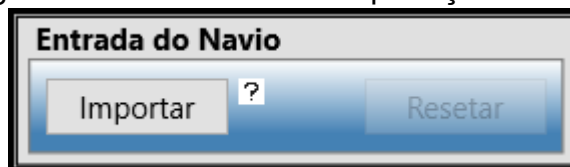
O Painel de Análises contém, conforme mencionado anteriormente, os seguintes sub painéis:

- Sub Painel de Importação do Navio;
- Sub Painel de Dados de Entrada;
- Sub Painel de Análise a Grandes Ângulos;
- Sub Painel de Critérios da IMO;
- Sub Painel de Resultados Associados aos Critérios da IMO.

A.1.1 Sub Painel de Importação do Navio

O Sub Painel de Importação do Navio é simples, com poucos componentes e possui o único propósito de importar e tratar a geometria do casco da embarcação a ser analisada. De acordo com a Figura 63 a seguir, encontram-se apenas 3 botões:

Figura 63 - Sub Painel de Importação do Navio



Fonte: O Autor

O botão "Importar" é utilizado para selecionar um arquivo de texto que contenha as cotas dos pontos que discretizam as balizas do navio.

O botão "Resetar" é utilizado para restaurar o programa para a condição inicial onde nenhuma embarcação foi importada, ou seja, o visualizador, todos os resultados e os parâmetros indicados nas análises serão deletados e/ou retornados para o estado padrão do programa.

O pequeno botão central com o símbolo de interrogação pode ser usado para acessar uma janela indicando orientações sobre limitações da importação que serão descritas a seguir.

A.1.2 Sub Painel de Dados de Entrada

Este sub painel possui o objetivo de receber os dados de entrada para a embarcação em análise. Neste momento, o usuário tem a possibilidade de seguir de duas formas: inserir os parâmetros iniciais ou entrar no modo de análise detalhada.

Conforme a Figura 64, nota-se uma caixa de seleção, indicada em vermelho, a qual permite entrar ou sair do modo de análise detalhada. Esta opção permite, de forma didática, uma visualização alternativa sobre o comportamento numérico usado na ferramenta para encontrar o equilíbrio da embarcação.

Figura 64 - Sub Painel de Dados de Entrada

Dados de Entrada Análise Equilíbrio

Imersão ?

Calado Sem Trim 0

Deslocamento [Massa] 0

Dens. Água 1,025

Trim

Trim Livre

Trim Fixo 0 °

Centro de Gravidade ?

CG (X,Y,Z) 0 0 0

Perpendiculares

Fixar nos Limites do Lwl Inicial

AP 0 FP 0

Aplicar Alterar

Fonte: O Autor

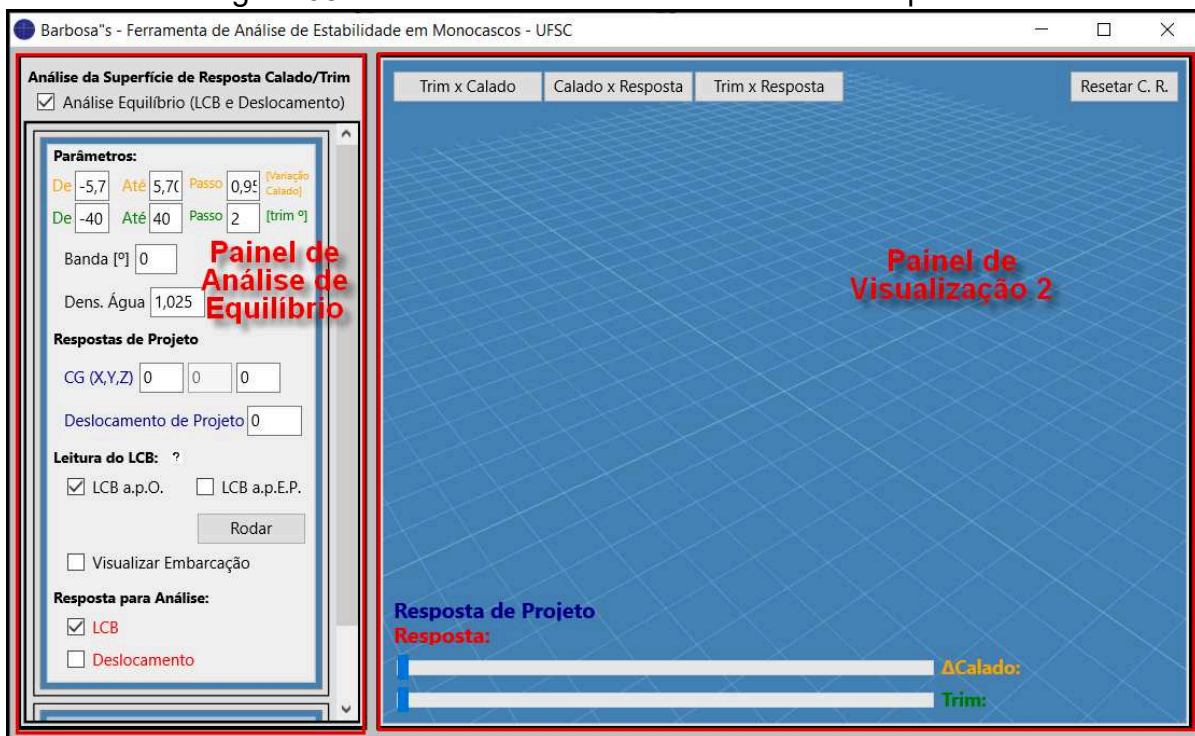
É interessante observar que a análise detalhada permite, por exemplo, uma maior compreensão dos diversos métodos de solução de raízes (Bisseção e Newton-Raphson) aplicados na busca dos valores de calado e trim que resultam no equilíbrio da embarcação.

De toda forma, após a finalização do programa proposto neste trabalho, percebeu-se que essa ferramenta complementar pode ser útil para os usuários que procuram entender o funcionamento da análise de equilíbrio numérica. Portanto, ao invés de descartar este componente, decidiu-se mantê-lo parte integrante do programa.

Portanto, ao marcar a caixa de seleção da “Análise Equilíbrio”, todos os 3 painéis iniciais da interface são sobrepostos por 2 novos painéis (Figura 65). São estes:

- Painel de Análise de Equilíbrio;
- Painel de Visualização 2.

Figura 65 - Interface Secundária da Análise de Equilíbrio



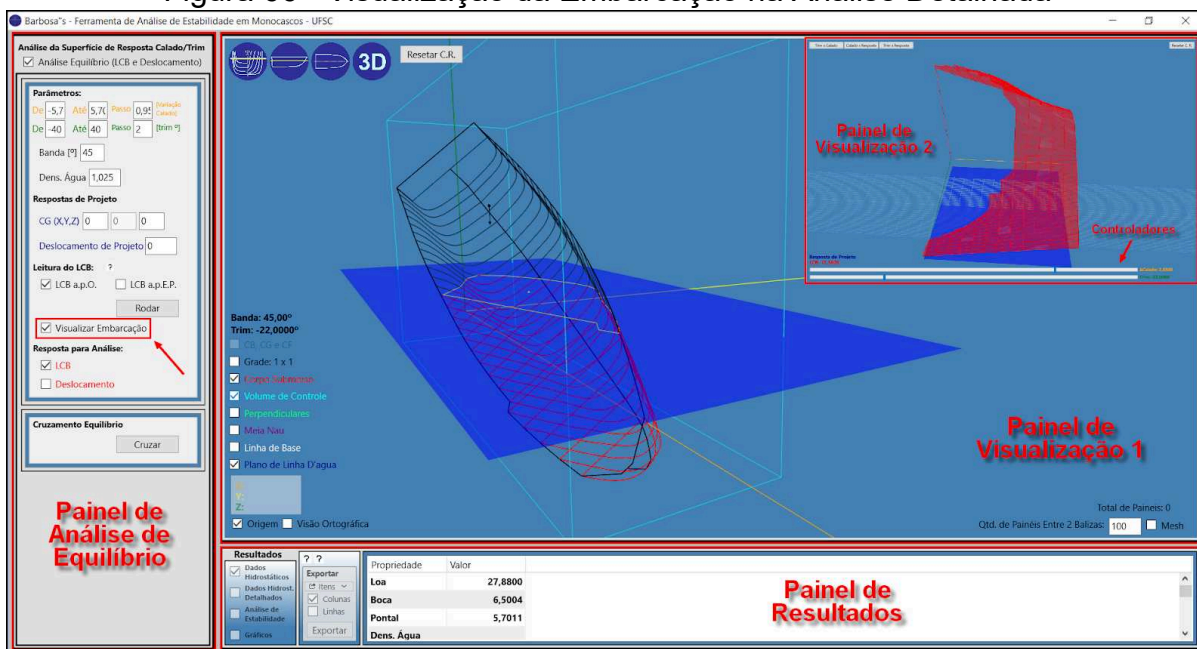
Fonte: O Autor

No Painel de Análise de Equilíbrio o usuário deve fornecer dados sobre a discretização para a variação de calado e de trim, um ângulo de banda específico para o equilíbrio, a densidade da água, o centro de gravidade de projeto, o deslocamento de projeto, forma de medição do LCB, visualização da embarcação, visualização da resposta de LCB (ou Deslocamento) e, por último, a opção de realizar o cruzamento das curvas de equilíbrio.

Ainda no Painel de Análise de Equilíbrio é importante notar que a caixa de seleção “Visualizar Embarcação” pode ser utilizada para verificar o comportamento da embarcação em uma dada condição de calado e trim fornecida através do Painel de Visualização 1 (Figura 66).

Retornando ao Sub Painel de Dados de Entrada na Figura 64, nesta etapa, o usuário fornecerá parâmetros que terão impacto direto nas condições de imersão e de trim do navio em equilíbrio inicial. Também podem ser definidas a localização desejada para as perpendiculares de ré e de vante.

Figura 66 - Visualização da Embarcação na Análise Detalhada



Fonte: O Autor

No primeiro bloco do Sub Painel de Dados de Entrada, deve-se fornecer os critérios de imersão, ou seja, critérios que definirão o deslocamento do projeto. Isso pode ser realizado fornecendo um valor de calado inicial ou um valor de deslocamento. É neste bloco que também é possível definir a massa específica da água.

No segundo bloco, deve ser informado se, durante os cálculos, o programa deve sempre buscar o equilíbrio entre LCB e LCG através da modificação do trim, ou se deve manter um valor fixo de trim e corrigir apenas o deslocamento dentro das análises.

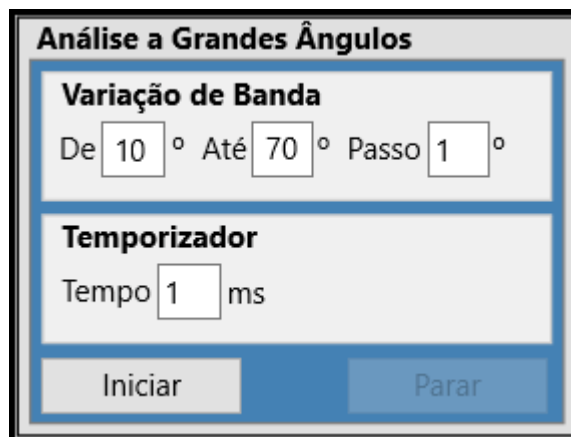
No terceiro bloco, há espaço para a definição da posição do centro de gravidade do navio. Por fim, no quarto bloco, deve-se indicar se as perpendiculares serão definidas pelos limites de L_{WL} no equilíbrio inicial, ou se o usuário deseja fornecer algum outro valor.

A.1.3 Sub Painel de Análise a Grandes Ângulos

Neste sub painel, o usuário pode definir a discretização desejada de ângulos de banda para a análise de estabilidade à grandes ângulos (Figura 67).

Além dos ângulos, o usuário pode definir um valor em milissegundos, o qual corresponde ao intervalo de tempo para a simulação de cada ângulo de banda. O único propósito deste parâmetro é adaptar a animação de rotação do navio à velocidade desejada pelo usuário. O valor padrão definido pelo programa é de 1 milissegundo.

Figura 67 - Sub Painel de Análise a Grandes Ângulos



Análise a Grandes Ângulos

Variação de Banda
De ° Até ° Passo °

Temporizador
Tempo ms

Iniciar Parar

Fonte: O Autor

Para verificar a configuração de equilíbrio da embarcação em um único ângulo de banda específico, basta definir o limite superior e inferior de análise para o mesmo valor e modificar o temporizador para o tempo desejado. Para retornar, interrompa a análise ou aguarde o fim do temporizador.

A.1.4 Sub Painel de Critérios da IMO

Este sub painel somente será liberado para uso após a realização da análise de estabilidade a grandes ângulos. Os valores apresentados como padrão para esta análise condizem com os critérios de estabilidade transversal intacta a grandes ângulos relativos à curva do braço de endireitamento, publicados na resolução MSC.67(85) (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, 2008).

Conforme pode ser visto na Figura 68, percebe-se que também existe a possibilidade do usuário personalizar os critérios de acordo com o que deseja-se adotar na análise.

Figura 68 - Sub Painel de Critérios da IMO

Fonte: O Autor

A.1.5 Sub Painel de Resultados dos Critérios da IMO

O último sub painel do Painel de Análises consiste de uma única caixa de texto não editável, na qual são registrados os resultados referentes à aplicação dos critérios da IMO na condição de carga analisada, conforme o exemplo na Figura 69.

Figura 69 - Resultados dos Critérios da IMO

```

=====
ANALISE DE CRITERIOS DA IMO
=====
-----
Critério 1 - Área(0º~30º) >= 0,055:
  REPROVADO: Área(0º~30º) = 0,0368 < 0,055
-----
Critério 2 - Área(0º~40º) >= 0,090:
  REPROVADO: Área(0º~40º) = 0,0716 < 0,090
-----
Critério 3 - Área(30º~40º) >= 0,030:
  APROVADO: Área(30º~40º) = 0,0348 >= 0,030
-----
Critério 4 - GZ(30º) >= 0,20:
  REPROVADO: GZ(30º) = 0,1708 < 0,20
-----
Critério 5 - max(GZ) em theta >= 30º:
  APROVADO: max(GZ) = 0,2478 em theta = 55,0000 >= 30
-----
Critério 6 - GM Inicial > 0,15:
  APROVADO: GM Inicial (reta tangente no gráfico) = 0,2149 >= 0,15
  APROVADO: GMT (obtido com KB + BM - KG) = 0,1799 >= 0,15
-----
=====

```

Fonte: O Autor

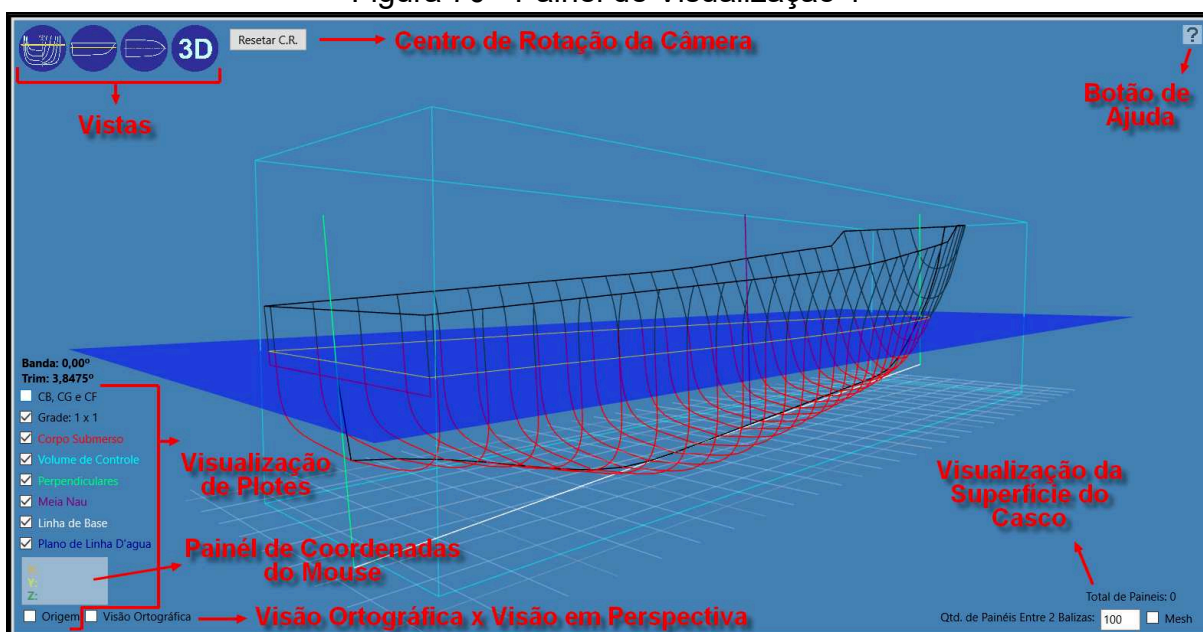
A.2 Painel de Visualização 1

O Painel de Visualização 1 corresponde a maior parte da tela do programa e é responsável pela visualização da geometria da embarcação, bem como das configurações de equilíbrio para cada ângulo de banda analisado.

Internamente o sistema utiliza um componente TViewport3D, o qual é parte da estrutura visual *FireMonkey* disponibilizada pela plataforma Delphi.

O visualizador possui diversos botões com diferentes funcionalidades conforme pode ser visto na Figura 70. Os 4 botões redondos na parte superior esquerda permitem alternar entre a vista lateral, frontal, de topo e/ou da perspectiva 3D da embarcação. Já o botão “Resetar C.R.” pode ser utilizado para redefinir o centro de rotação da câmera para o meio do navio, centralizando assim a visualização da embarcação na tela.

Figura 70 - Painel de Visualização 1



Fonte: O Autor

Na lateral estão dispostas caixas de seleção que permitem ao usuário ativar e desativar a plotagem de diversos elementos gráficos, tais como: centro de flutuação, centro de gravidade, centro da área do plano de flutuação, gradeamento, o corpo submerso do navio, o volume de controle, as perpendiculares, linha de meia nau (exatamente entre as perpendiculares), a linha de base, o plano de linha d'água e a

origem do sistema 3D, bem como a identificação das direções positivas dos eixos x , y e z .

Também consta na parte inferior esquerda um pequeno painel com as coordenadas x , y e z do mouse e uma caixa de seleção que permite alternar entre vista em perspectiva ou ortográfica⁶.

Na parte superior direita há um botão com uma interrogação que, ao ser clicado, fornece dicas de uso do visualizador.

Por último, na parte inferior direita existe uma caixa de texto que permite ao usuário definir a quantidade de painéis entre duas balizas, além de uma caixa de seleção que torna visível ou invisível a superfície do casco. A quantidade de painéis e a forma como o programa cria a superfície serão detalhados ao longo deste trabalho de conclusão de curso.

É importante destacar que o usuário pode interagir com o visualizador usando o botão esquerdo do mouse para arrastar/movimentar o ponto de rotação da câmera, o direito para rotacionar a câmera em torno do seu ponto de rotação e o roldador do mouse para aumentar ou diminuir o zoom⁷.

A.3 Painel de Resultados

Após a realização das análises, os resultados são apresentados dentro do Painel de Resultados (Figura 71), o qual está localizado na parte inferior do programa.

Figura 71 - Painel de Resultados

Resultados		Tabela de Resultados			
<input type="checkbox"/> Dados Hidrostáticos	? ? Exportar <input type="checkbox"/> Itens <input checked="" type="checkbox"/> Colunas <input type="checkbox"/> Linhas Exportar	Posição X	SAC(X)	Centroide Ysub	Centroide Zsub
<input checked="" type="checkbox"/> Dados Hidrost. Detalhados		0,0000	1,1431	0,0000	3,72 [^]
<input type="checkbox"/> Análise de Estabilidade		0,1200	8,9799	0,0000	3,04 [!]
<input type="checkbox"/> Gráficos		1,0000	9,6938	0,0000	2,93 [∨]

Fonte: O Autor

⁶ Estas vistas têm relação com a forma de representação dos elementos. O modo ortográfico representa um objeto através de sua projeção exata de forma que não haja mudança de escala em toda a plotagem. Já o modo em perspectiva reproduz este mesmo objeto a partir de um panorama onde há mudança de escala entre objetos mais próximos e mais distantes do observador de forma a estabelecer uma noção de profundidade.

⁷ Para variar o zoom de forma mais rápida, deve-se segurar a tecla "Ctrl".

Conforme pode ser visto na Figura 71, localizado à esquerda do painel de resultados, existem quatro caixas de seleção. As 3 superiores indicam diferentes tipos de resultados a serem visualizados. Ao selecionar a caixa de “Dados Hidrostáticos” são expostos os diversos resultados obtidos para a condição de equilíbrio analisada, sendo eles:

- Dimensões Principais: Loa, boca e pontal;
- Densidade da água;
- Deslocamento volumétrico e mássico;
- Comprimento na linha d’água (L_{WL});
- Boca máxima submersa;
- Calado medido ortogonalmente à linha de base na perpendicular de vante, perpendicular de ré, na meia nau e em LCF;
- Calado absoluto do navio;
- LCB e LCF medidos ortogonalmente ao plano do espelho de popa e medidos em relação à origem do sistema;
- Centro Transversal de Flutuação (TCB);
- VCB medido ortogonalmente à linha de base e em relação à origem do sistema;
- Área do plano de flutuação;
- Área molhada da embarcação;
- Coeficientes de forma: C_B , C_P , C_M e C_{WP} ;
- Raio metacêntrico transversal (\overline{BM}_T);
- Altura metacêntrica transversal (\overline{GM}_T) (corrigido).

Após o equilíbrio da embarcação, também podem ser apresentados um segundo conjunto de resultados, os quais podem ser visualizados marcando-se a caixa “Dados Hidrostáticos Detalhados”. Com essa opção marcada o usuário pode visualizar os resultados em função da posição longitudinal como, por exemplo, a $SAC(x)$.

Portanto a primeira coluna de resultados contém diversas posições longitudinais e as demais colunas possuem algum valor hidrostático associado à coordenada longitudinal da embarcação. Nesta opção podem ser visualizados os seguintes resultados:

- Valor da área submersa ($SAC(x)$);
- Posição transversal do centróide (y_c) da respectiva baliza;
- Posição vertical do centróide (z_c) da respectiva baliza;
- Perímetro submerso da respectiva baliza.

A terceira caixa de seleção “Análise de Estabilidade” permite ao usuário visualizar os resultados referentes a estabilidade transversal considerando grandes ângulos de banda.

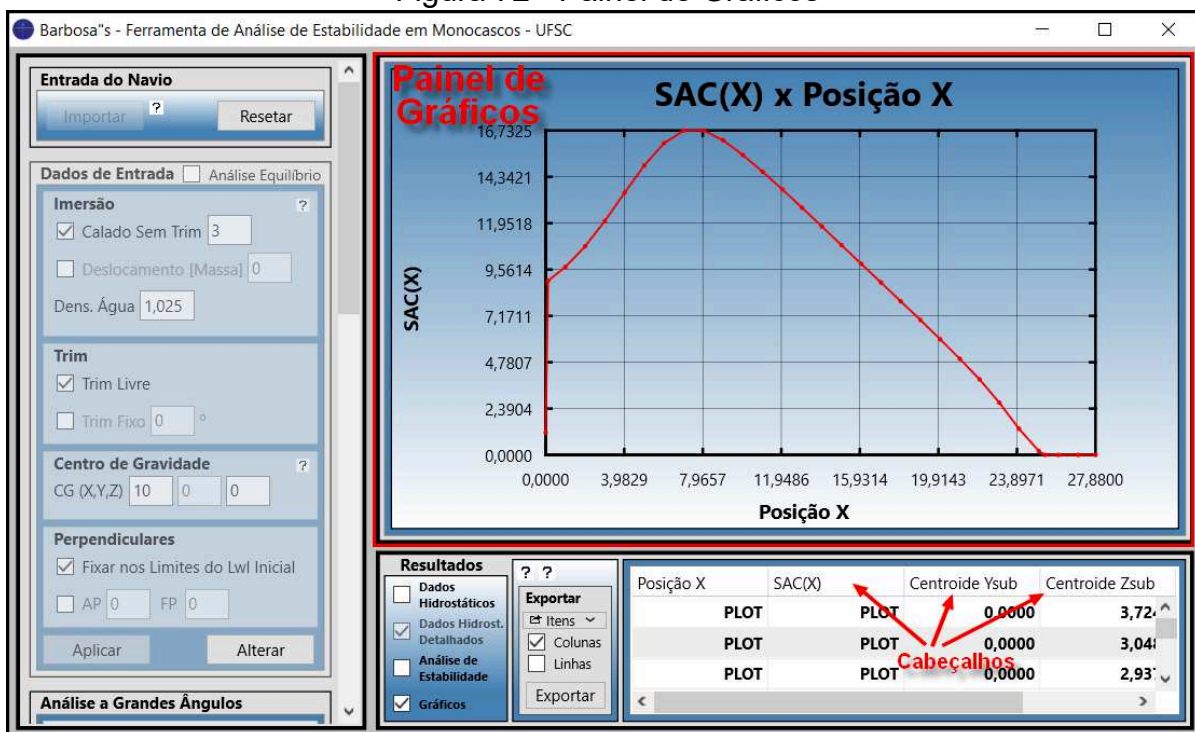
Assim como nos dados hidrostáticos detalhados, os resultados aqui estão dispostos em acordo com a primeira coluna (ângulo de banda). Os resultados disponíveis para cada condição de banda são:

- Braço de alavanca \overline{GZ} ;
- Deslocamento volumétrico e mássico;
- LCB medido a partir da popa e da origem do sistema;
- Centro transversal de flutuação (TCB);
- VCB medido a partir da origem do sistema;
- Ângulo de trim.

Por fim, a última caixa de seleção (“Gráficos”) permite ao usuário exibir no painel de visualização (Figura 72) resultados mostrados na forma gráfica.

A visualização dos gráficos só é aplicável aos resultados associados às opções “Dados Hidrostáticos Detalhados” em função da posição longitudinal e “Análise de Estabilidade” em função do ângulo de banda. A seleção do tipo de resultado a ser plotado pode ser feita clicando-se no título/cabeçalho de uma respectiva coluna exibida na tabela de resultados.

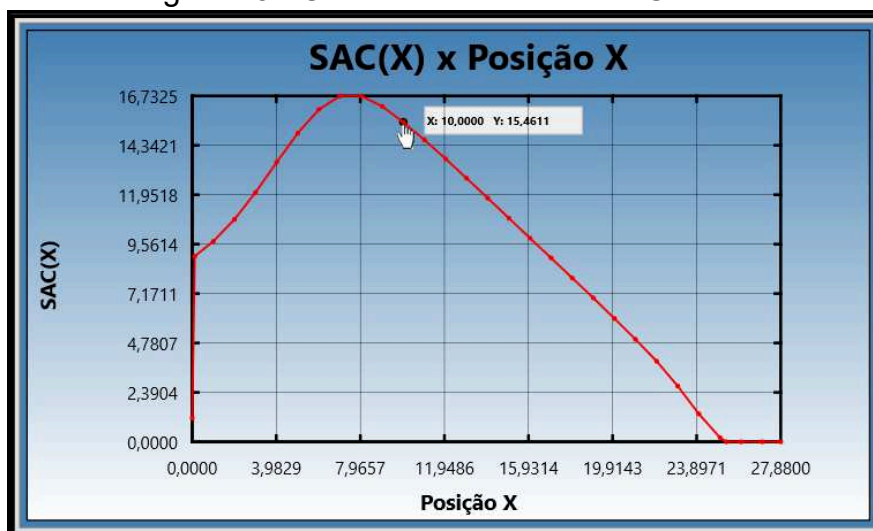
Figura 72 - Painel de Gráficos



Fonte: O Autor

Para melhor visualização e interpretação dos resultados dispostos no gráfico, o usuário poderá clicar em cima de qualquer um dos pontos da plotagem e, assim, um pequeno painel móvel contendo as coordenadas daquele ponto aparecerá (Figura 73).

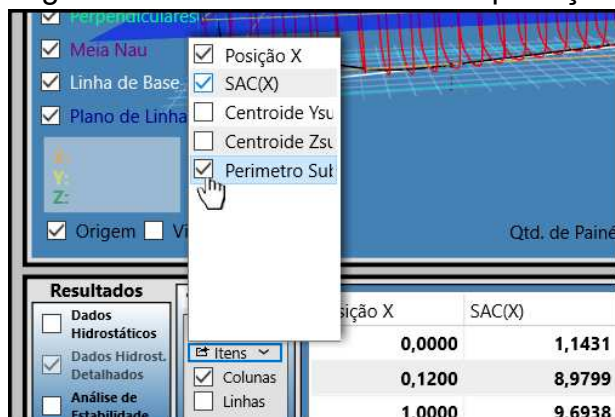
Figura 73 - Coordenadas Painel de Gráficos



Fonte: O Autor

Por fim, ainda no painel de resultados, o usuário pode exportar os resultados de interesse utilizando o agrupamento de caixas de seleção localizado à esquerda do painel (Figura 74).

Figura 74 - Recorte na Aba de Exportação

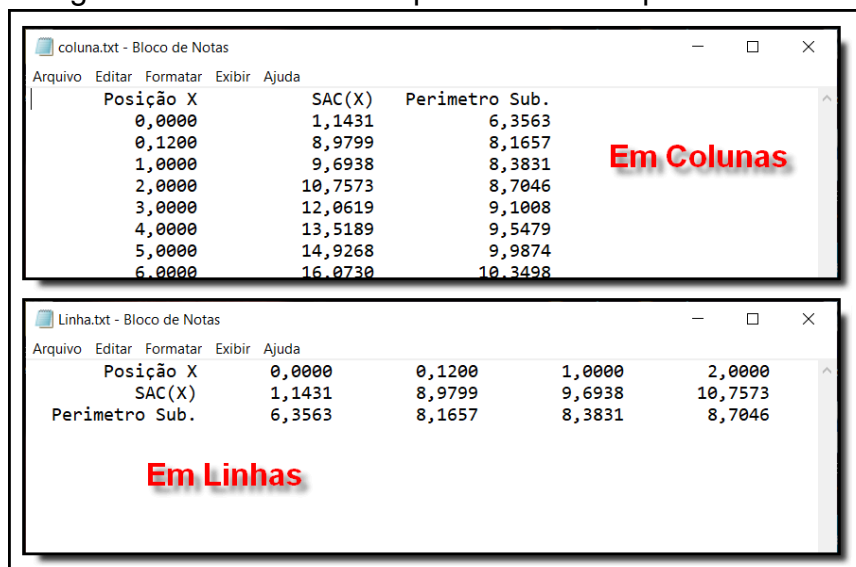


Fonte: O Autor

Além de selecionar o tipo de resultado, o usuário pode escolher a disposição dos resultados em colunas ou em linhas. O botão “Exportar” executa o procedimento de exportação permitindo ao usuário selecionar a pasta e o arquivo no qual os dados serão gravados.

Na Figura 75 são mostrados dois exemplos de exportação de resultados, uma em organizada em colunas e outra em linhas.

Figura 75 - Resultados Exportados em Arquivo de Texto



Fonte: O Autor

A.4 Outras Funcionalidades da Ferramenta

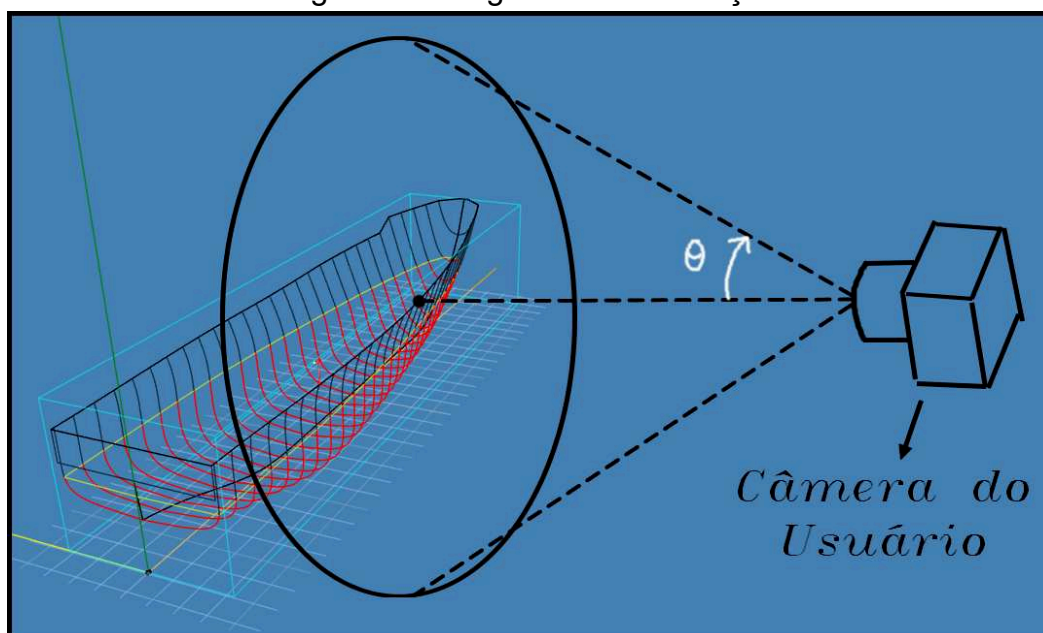
Nesta seção serão discutidas algumas outras funcionalidades da ferramenta desenvolvida.

A.4.1 Visualização em Projeção Ortográfica

Para ativar a função de visualização ortográfica, ou seja, em projeção, necessita-se entender dois conceitos no visualizador 3D: o ângulo de visualização da câmera e o fator de escala das plotagens.

O ângulo de visualização, é o equivalente ao ângulo da “lente da câmera”, isto é, o ângulo que define quanto de informação que a câmera consegue captar, conforme exemplificado pelo ângulo theta mostrado na Figura 76.

Figura 76 - Ângulo de Visualização



Fonte: O Autor

O modo de visualização padrão, em perspectiva, utiliza um ângulo de 45° de “lente da câmera”. Portanto, de forma a enxergar apenas uma projeção dos objetos, este ângulo deve se reduzir a zero. O problema encontrado é que ao anulá-lo, a quantidade de imagem captada se torna nula pois essa se resumirá a um ponto.

Tanto é que a linguagem Delphi em si apenas permite reduzir tal valor até um décimo de grau.

Portanto, a solução aplicada é uma aproximação da projeção ortográfica através do uso do valor mínimo possível de ângulo de visualização e, para evitar que a captura se reduza e se torne inviável de ser visualizada, deve-se diminuir a escala de todas as plotagens de forma proporcional para que caibam dentro da imagem captada.

Para este caso específico onde diminui-se o ângulo de 45° para $\frac{1}{10}^\circ$, o programa utiliza uma escala de $\frac{1}{450}$ nas plotagens enquanto o modo de projeção ortográfica estiver ativado.

A.4.2 Posição do Ponteiro do Mouse no Visualizador

Dentro do painel de visualização 3D do programa, na parte inferior esquerda existe uma caixa contendo coordenadas. Estes valores equivalem às coordenadas do mouse dentro do sistema cartesiano do visualizador (global).

Para que esta funcionalidade faça sentido, é necessário estar com o modo ortográfico ativado e ao mesmo tempo se encontrar em uma das vistas 2D.

A.4.3 Cruzamento das Curvas de Equilíbrio

No modo de análise detalhada, plotam-se as duas curvas nos eixos “trim” e “variação de calado”, e, no exato ponto em que as duas se cruzam, obtém-se a combinação de parâmetros que levam a embarcação ao equilíbrio.

Para identificar este ponto de cruzamento entre duas curvas das quais são formadas por pontos discretizados conectados por segmentos de reta, o programa cria dois laços “for”, um externo e um interno. O laço externo irá varrer os pontos da primeira curva e, a cada iteração, é analisado se há intersecção com qualquer um dos segmentos de reta da segunda curva através do laço interno.

Quando o programa encontra uma intersecção, calcula-se as coordenadas desse ponto de cruzamento, armazenando o resultado de trim e de variação de calado que definem a configuração de equilíbrio na condição de carga analisada.

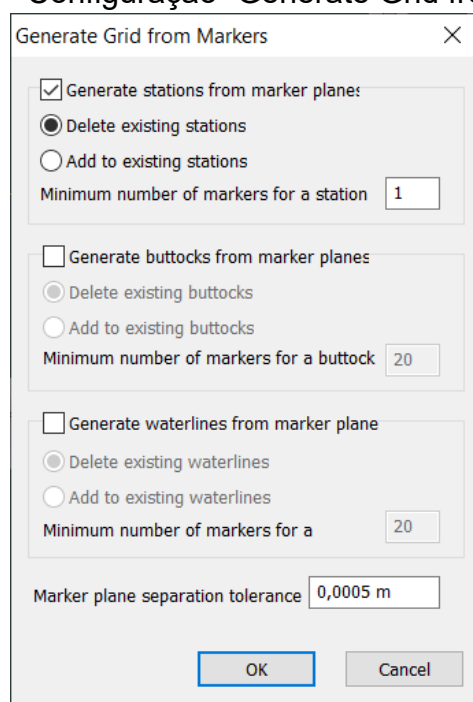
APÊNDICE B - IMPORTAÇÃO DA TABELA DE COTAS NO MAXSURF

Para importar uma tabela de cotas em 3 coordenadas no MAXSURF, necessita-se utilizar outro módulo denominado Modeler. Primeiramente, é necessário que as cotas, de apenas um bordo, estejam dispostas num arquivo de Excel ou planilhas Google, de forma que haja uma divisão em três colunas, uma para cada coordenada.

Em seguida, deve-se abrir o programa, clicar na aba superior “Window” e selecionar a opção “Markers” para abrir a janela de marcadores. Com essa janela aberta, deve-se clicar na aba superior “Markers” e selecionar “Add Marker...”. Por fim deve-se definir o número de pontos que serão importados.

Uma vez importados os pontos, deve-se selecionar aqueles a serem utilizados na modelagem. A seguir deve-se abrir a aba superior “Markers” e clicar em “Generate Design Grid from Markers...”. A configuração deve estar de acordo com a Figura 77. Ainda na mesma aba superior deve-se clicar em “Sort Markers within Stations”.

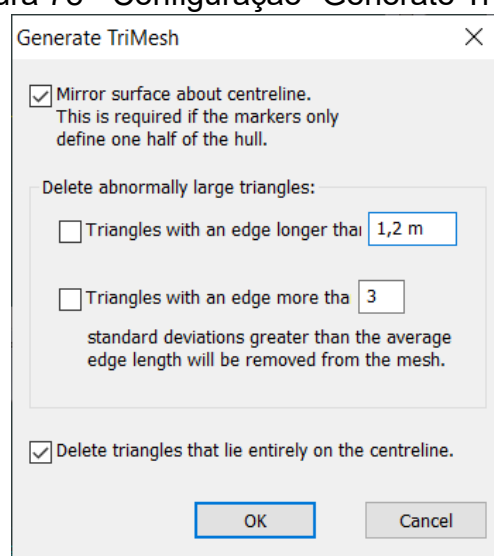
Figura 77 - Configuração “Generate Grid from Markers”



Fonte: MAXSURF Modeler

Por último, selecionam-se os pontos novamente, clica-se na aba superior “Markers” e escolhe-se a opção “Generate TriMesh Surface from Markers...” para gerar a superfície do casco utilizada nas análises, conforme a configuração mostrada na Figura 78.

Figura 78 - Configuração “Generate TriMesh”



Fonte: MAXSURF Modeler

Antes de salvar o arquivo do Modeler (“.msd”) e carregá-lo no MAXSURF Stability, deve-se definir a origem do sistema de coordenadas visando torná-la igual ao do programa desenvolvido. Ou seja, deve-se posicionar a origem no plano diametral, junto ao espelho de popa e no ponto mais baixo da quilha.

No MAXSURF Modeler, a definição da origem do sistema de coordenadas pode ser feita acessando a aba superior “Data” e selecionando-se a opção “Frame of Reference...”. A seguir deve-se configurar tanto a origem do sistema de coordenadas, quanto a posição das perpendiculares.

Nesta validação, foram utilizados 2 cascos diferentes sendo que, para cada um deles, analisou-se a diferença entre os resultados de equilíbrio, da curva \overline{GZ} e, por fim, a aplicabilidade dos critérios da IMO considerando 3 condições diferentes de peso e centro de gravidade.

APÊNDICE C - TABELAS DOS RESULTADOS DAS VALIDAÇÕES

Tabela 7 - Dados Hidrostáticos do Pesqueiro na Segunda Análise

Resultados de Dados Hidrostáticos				
	Maxsurf	Barbosa's	Erro Absoluto	Erro [%]
1) Trim [°]	9,2837	9,2517	-0,0320	-0,3447
2) Dens. H2O [ton/m³]	1,0250	1,0250	0,0000	0,0000
3) Deslocamento [ton]	200,0000	200,0001	0,0001	0,0001
4) Lwl [m]	22,7840	22,7976	0,0136	0,0597
5) Boca Máxima Submersa [m] *	5,9740	5,9736	-0,0004	-0,0067
6) Calado na P. P. Ré [m]	3,3520	3,3487	-0,0033	-0,0984
7) Calado na M. N. [m]	2,0850	2,0863	0,0013	0,0624
8) Calado na P. P. Vante [m]	0,8180	0,8239	0,0059	0,7213
9) Calado em LCF [m]	2,5590	2,5582	-0,0008	-0,0313
10) LCB (a partir do E. P.) [m]	7,7980	7,7982	0,0002	0,0026
11) LCF (a partir do E. P.) [m]	9,3490	9,3534	0,0044	0,0471
12) KB (a partir da L. B.) [m]	1,7630	1,7611	-0,0019	-0,1078
13) Área Plano de Flutuação [m²]	107,2850	107,3183	0,0333	0,0310
14) Área Molhada [m²]	163,9510	160,0687	-3,8823	-2,3680
15) Cb	0,5120	0,5115	-0,0005	-0,0977
16) Cp	0,5690	0,5692	0,0002	0,0351
17) Cm	0,9070	0,8955	-0,0115	-1,2679
18) Cwp	0,7880	0,7880	0,0000	0,0000
19) BMT [m]	1,2960	1,2961	0,0001	0,0077
20) GMt (Corrigido) [m]	0,0420	0,0408	-0,0012	-2,8571
	Erro [%] Max.:	2,8571	em	20) GMt (Corrigido) [m]

Fonte: O Autor

Tabela 8 - Dados Hidrostáticos do Pesqueiro na Terceira Análise

Resultados de Dados Hidrostáticos				
	Maxsurf	Barbosa's	Erro Absoluto	Erro [%]
1) Trim [°]	-9,8263	-9,8285	-0,0022	0,0224
2) Dens. H2O [ton/m³]	1,0250	1,0250	0,0000	0,0000
3) Deslocamento [ton]	400,0000	400,0003	0,0003	0,0001
4) Lwl [m]	16,5510	16,5480	-0,0030	-0,0181
5) Boca Máxima Submersa [m] *	6,0340	6,0346	0,0006	0,0099
6) Calado na P. P. Ré [m]	2,7640	2,7639	-0,0001	-0,0036
7) Calado na M. N. [m]	4,1060	4,1066	0,0006	0,0146
8) Calado na P. P. Vante [m]	5,4490	5,4492	0,0002	0,0037
9) Calado em LCF [m]	3,4590	3,4589	-0,0001	-0,0029
10) LCB (a partir do E. P.) [m]	14,2870	14,2870	0,0000	0,0000
11) LCF (a partir do E. P.) [m]	8,5130	8,5116	-0,0014	-0,0164
12) KB (a partir da L. B.) [m]	2,5750	2,5748	-0,0002	-0,0078
13) Área Plano de Flutuação [m²]	95,6320	95,6146	-0,0174	-0,0182
14) Área Molhada [m²]	324,4730	324,4258	-0,0472	-0,0145
15) Cb	0,7160	0,7157	-0,0003	-0,0419
16) Cp	1,1420	1,1417	-0,0003	-0,0263
17) Cm	0,7470	0,7364	-0,0106	-1,4190
18) Cwp	0,9580	0,9575	-0,0005	-0,0522
19) BMT [m]	0,7070	0,7070	0,0000	0,0000
20) GMt (Corrigido) [m]	0,7830	0,7829	-0,0001	-0,0128
	Erro [%] Max.:	1,4190	em	17) Cm

Fonte: O Autor

Tabela 9 - Dados Hidrostáticos do Rebocador na Primeira Análise

Resultados de Dados Hidrostáticos				
	Maxsurf	Barbosa's	Erro Absoluto	Erro [%]
1) Trim [°]	11,8786	11,7889	-0,0897	-0,7551
2) Dens. H2O [ton/m³]	1,0250	1,0250	0,0000	0,0000
3) Deslocamento [ton]	0,0050	0,0050	0,0000	0,0000
4) Lwl [m]	0,7070	0,7097	0,0027	0,3819
5) Boca Máxima Submersa [m] *	0,3000	0,3003	0,0003	0,1000
6) Calado na P. P. Ré [m]	0,1270	0,1262	-0,0008	-0,6299
7) Calado na M. N. [m]	0,0430	0,0427	-0,0003	-0,6977
8) Calado na P. P. Vante [m]	-0,0420	-0,0408	0,0012	-2,8571
9) Calado em LCF [m]	0,0860	0,0854	-0,0006	-0,6977
10) LCB (a partir do E. P.) [m]	0,2930	0,2933	0,0003	0,1024
11) LCF (a partir do E. P.) [m]	0,2950	0,2952	0,0002	0,0678
12) KB (a partir da L. B.) [m]	0,0680	0,0677	-0,0003	-0,4412
13) Área Plano de Flutuação [m²]	0,1740	0,1744	0,0004	0,2299
14) Área Molhada [m²]	0,1980	0,1905	-0,0075	-3,7879
15) Cb	0,3430	0,3412	-0,0018	-0,5248
16) Cp	0,4870	0,4848	-0,0022	-0,4517
17) Cm	0,7290	0,7138	-0,0152	-2,0850
18) Cwp	0,8190	0,8185	-0,0005	-0,0611
19) BMt [m]	0,2360	0,2365	0,0005	0,2119
20) GMt (Corrigido) [m]	0,2030	0,2035	0,0005	0,2463
	Erro [%] Max.:	3,7879	em	14) Área Molhada [m²]

Fonte: O Autor

Tabela 10 - Dados Hidrostáticos do Rebocador na Segunda Análise

Resultados de Dados Hidrostáticos				
	Maxsurf	Barbosa's	Erro Absoluto	Erro [%]
1) Trim [°]	0,1045	0,0045	-0,1000	-95,6938
2) Dens. H2O [ton/m³]	1,0250	1,0250	0,0000	0,0000
3) Deslocamento [ton]	0,0300	0,0300	0,0000	0,0000
4) Lwl [m]	0,9810	0,9812	0,0002	0,0204
5) Boca Máxima Submersa [m] *	0,3150	0,3147	-0,0003	-0,0952
6) Calado na P. P. Ré [m]	0,1610	0,1608	-0,0002	-0,1242
7) Calado na M. N. [m]	0,1610	0,1607	-0,0003	-0,1863
8) Calado na P. P. Vante [m]	0,1600	0,1607	0,0007	0,4375
9) Calado em LCF [m]	0,1610	0,1607	-0,0003	-0,1863
10) LCB (a partir do E. P.) [m]	0,5000	0,5000	0,0000	0,0000
11) LCF (a partir do E. P.) [m]	0,4470	0,4446	-0,0024	-0,5369
12) KB (a partir da L. B.) [m]	0,0990	0,0995	0,0005	0,5051
13) Área Plano de Flutuação [m²]	0,2710	0,2704	-0,0006	-0,2214
14) Área Molhada [m²]	0,4530	0,4413	-0,0117	-2,5828
15) Cb	0,5920	0,5898	-0,0022	-0,3716
16) Cp	0,7160	0,7154	-0,0006	-0,0838
17) Cm	0,8270	0,8268	-0,0002	-0,0242
18) Cwp	0,8780	0,8757	-0,0023	-0,2620
19) BMt [m]	0,0670	0,0669	-0,0001	-0,1493
20) GMt (Corrigido) [m]	0,0860	0,0864	0,0004	0,4651
	Erro [%] Max.:	95,6938	em	1) Trim [°]

Fonte: O Autor

Tabela 11 - Dados Hidrostáticos do Rebocador na Terceira Análise

Resultados de Dados Hidrostáticos				
	Maxsurf	Barbosa's	Erro Absoluto	Erro [%]
1) Trim [°]	-9,6173	-9,7218	-0,1045	1,0866
2) Dens. H2O [ton/m³]	1,0250	1,0250	0,0000	0,0000
3) Deslocamento [ton]	0,0150	0,0150	0,0000	0,0000
4) Lwl [m]	0,7670	0,7671	0,0001	0,0130
5) Boca Máxima Submersa [m] *	0,3050	0,3050	0,0000	0,0000
6) Calado na P. P. Ré [m]	0,0290	0,0278	-0,0012	-4,1379
7) Calado na M. N. [m]	0,0960	0,0964	0,0004	0,4167
8) Calado na P. P. Vante [m]	0,1640	0,1649	0,0009	0,5488
9) Calado em LCF [m]	0,1090	0,1095	0,0005	0,4587
10) LCB (a partir do E. P.) [m]	0,6460	0,6459	-0,0001	-0,0155
11) LCF (a partir do E. P.) [m]	0,5740	0,5766	0,0026	0,4530
12) KB (a partir da L. B.) [m]	0,0740	0,0737	-0,0003	-0,4054
13) Área Plano de Flutuação [m²]	0,1920	0,1900	-0,0020	-1,0417
14) Área Molhada [m²]	0,2800	0,2769	-0,0031	-1,1071
15) Cb	0,4010	0,3999	-0,0011	-0,2743
16) Cp	0,6490	0,6475	-0,0015	-0,2311
17) Cm	0,7920	0,7813	-0,0107	-1,3510
18) Cwp	0,8200	0,8118	-0,0082	-1,0000
19) BMT [m]	0,0840	0,0823	-0,0017	-2,0238
20) GMt (Corrigido) [m]	0,1080	0,1063	-0,0017	-1,5741
	Erro [%] Max.:	4,1379	em	6) Calado na P. P. Ré [m]

Fonte: O Autor

Tabela 12 - SAC(x) do Pesqueiro na Primeira Análise

SAC(x)				
Maxsurf		Barbosa's		Erro
X [m]	SAC(x) [m]	X [m]	SAC(x) [m]	[%]
0,0003	2,2394	0,0000	2,2226	-0,7495
0,1203	10,1058	0,1200	10,0889	-0,1674
1,0003	11,0347	1,0000	11,0191	-0,1412
2,0003	12,3419	2,0000	12,3278	-0,1142
3,0003	13,8895	3,0000	13,8770	-0,0901
4,0003	15,5889	4,0000	15,5779	-0,0703
5,0003	17,2396	5,0000	17,2300	-0,0557
6,0003	18,6283	6,0000	18,6203	-0,0431
7,0003	19,5227	7,0000	19,5160	-0,0344
8,0003	19,7550	8,0000	19,7498	-0,0263
9,0003	19,4592	9,0000	19,4557	-0,0181
10,0003	18,8787	10,0000	18,8766	-0,0113
11,0003	18,1855	11,0000	18,1848	-0,0036
12,0003	17,4168	12,0000	17,4176	0,0044
13,0003	16,5927	13,0000	16,5949	0,0131
14,0003	15,7265	14,0000	15,7301	0,0226
15,0003	14,8260	15,0000	14,8308	0,0324
16,0003	13,8949	16,0000	13,9007	0,0414
17,0003	12,9370	17,0000	12,9438	0,0525
18,0003	11,9364	18,0000	11,9440	0,0637
19,0003	10,8930	19,0000	10,9015	0,0778
20,0003	9,7696	20,0000	9,7785	0,0908
21,0003	8,5710	21,0000	8,5802	0,1075
22,0003	7,2638	22,0000	7,2730	0,1270
23,0003	5,7408	23,0000	5,7497	0,1557
24,0003	3,9830	24,0000	3,9914	0,2097
25,0003	2,2801	25,0000	2,2876	0,3306
26,0003	0,7619	26,0000	0,7677	0,7675
26,5169	0,0000	26,5321	0,0000	0,0000
27,0000	0,0000	27,0000	0,0000	0,0000
27,8800	0,0000	27,8800	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor

Tabela 13 - SAC(x) do Pesqueiro na Segunda Análise

SAC(x)				
Maxsurf		Barbosa's		Erro
X [m]	SAC(x) [m]	X [m]	SAC(x) [m]	[%]
0,0003	3,8187	0,0000	3,7869	-0,8317
0,1203	11,5807	0,1200	11,5491	-0,2730
1,0003	11,7441	1,0000	11,7155	-0,2435
2,0003	12,1818	2,0000	12,1567	-0,2063
3,0003	12,8611	3,0000	12,8394	-0,1691
4,0003	13,6937	4,0000	13,6755	-0,1327
5,0003	14,4788	5,0000	14,4639	-0,1026
6,0003	15,0041	6,0000	14,9927	-0,0758
7,0003	15,0442	7,0000	15,0362	-0,0534
8,0003	14,4467	8,0000	14,4420	-0,0323
9,0003	13,3677	9,0000	13,3666	-0,0086
10,0003	12,0675	10,0000	12,0695	0,0165
11,0003	10,7268	11,0000	10,7319	0,0473
12,0003	9,3911	12,0000	9,3991	0,0850
13,0003	8,0868	13,0000	8,0972	0,1286
14,0003	6,8351	14,0000	6,8478	0,1858
15,0003	5,6479	15,0000	5,6624	0,2563
16,0003	4,5426	16,0000	4,5582	0,3432
17,0003	3,5258	17,0000	3,5422	0,4655
18,0003	2,6093	18,0000	2,6258	0,6339
19,0003	1,7990	19,0000	1,8150	0,8871
20,0003	1,1036	20,0000	1,1182	1,3187
21,0003	0,5426	21,0000	0,5544	2,1777
22,0003	0,1436	22,0000	0,1506	4,8418
22,7335	0,0000	22,5011	0,0000	0,0000
23,0000	0,0000	23,0000	0,0000	0,0000
24,0000	0,0000	24,0000	0,0000	0,0000
25,0000	0,0000	25,0000	0,0000	0,0000
26,0000	0,0000	26,0000	0,0000	0,0000
27,0000	0,0000	27,0000	0,0000	0,0000
27,8800	0,0000	27,8800	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor

Tabela 14 - SAC(x) do Pesqueiro na Terceira Análise

SAC(x)				
Maxsurf		Barbosa's		Erro
X [m]	SAC(x) [m]	X [m]	SAC(x) [m]	[%]
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,1200	0,0000	0,1154	0,0000	0,0000
0,1203	0,0464	0,1200	0,0459	-1,0584
1,0003	1,3770	1,0000	1,3755	-0,1084
2,0003	3,6816	2,0000	3,6801	-0,0400
3,0003	6,3478	3,0000	6,3466	-0,0187
4,0003	9,1907	4,0000	9,1898	-0,0098
5,0003	11,9850	5,0000	11,9843	-0,0061
6,0003	14,5145	6,0000	14,5141	-0,0029
7,0003	16,5487	7,0000	16,5484	-0,0020
8,0003	17,9202	8,0000	17,9200	-0,0009
9,0003	18,7602	9,0000	18,7604	0,0011
10,0003	19,3054	10,0000	19,3058	0,0020
11,0003	19,7254	11,0000	19,7259	0,0027
12,0003	20,0605	12,0000	20,0613	0,0038
13,0003	20,3218	13,0000	20,3229	0,0053
14,0003	20,5148	14,0000	20,5162	0,0069
15,0003	20,6301	15,0000	20,6318	0,0083
16,0003	20,6544	16,0000	20,6562	0,0088
17,0003	20,2035	17,0000	20,2035	0,0000
18,0003	19,2874	18,0000	19,2874	0,0001
19,0003	18,2548	19,0000	18,2549	0,0005
20,0003	17,0583	20,0000	17,0584	0,0004
21,0003	15,6905	21,0000	15,6903	-0,0011
22,0003	14,1056	22,0000	14,1054	-0,0014
23,0003	14,4604	23,0000	14,4603	-0,0006
24,0003	11,7516	24,0000	11,7515	-0,0011
25,0003	8,9676	25,0000	8,9677	0,0007
26,0003	6,1980	26,0000	6,1979	-0,0015
27,0003	2,9651	27,0000	2,9650	-0,0024
27,8803	0,0067	27,8800	0,0067	0,5101

Fonte: O Autor

Tabela 15 - SAC(x) do Rebocador na Primeira Análise

SAC(x)				
Maxsurf		Barbosa's		Erro
X [m]	SAC(x) [m]	X [m]	SAC(x) [m]	[%]
0,0000	0,0000	0,0000	0,0080	0,0000
0,0000	0,0081	0,0525	0,0060	-25,9625
0,0525	0,0061	0,1051	0,0049	-19,8167
0,1051	0,0050	0,1576	0,0057	12,9832
0,1576	0,0058	0,2101	0,0089	53,5807
0,2101	0,0089	0,2626	0,0122	37,0941
0,2626	0,0122	0,3152	0,0142	16,1744
0,3152	0,0142	0,3677	0,0132	-6,8520
0,3677	0,0132	0,4202	0,0105	-20,2128
0,4202	0,0104	0,4727	0,0074	-29,1730
0,4727	0,0073	0,5253	0,0041	-43,8587
0,5253	0,0040	0,5778	0,0014	-64,9035
0,5778	0,0013	0,6303	0,0004	-69,3016
0,6303	0,0004	0,6828	0,0000	-100,0000
0,6828	0,0000	0,6947	0,0000	-100,0000
0,7111	0,0000	0,7354	0,0000	0,0000
0,7879	0,0000	0,7879	0,0000	0,0000
0,8404	0,0000	0,8404	0,0000	0,0000
0,8929	0,0000	0,8929	0,0000	0,0000
0,9455	0,0000	0,9455	0,0000	0,0000
0,9980	0,0000	0,9980	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor

Tabela 16 - SAC(x) do Rebocador na Segunda Análise

SAC(x)				
Maxsurf		Barbosa's		Erro
X [m]	SAC(x) [m]	X [m]	SAC(x) [m]	[%]
0,0000	0,0123	0,0000	0,0121	-1,7698
0,0525	0,0136	0,0525	0,0134	-1,8171
0,1051	0,0158	0,1051	0,0157	-0,8651
0,1576	0,0198	0,1576	0,0196	-0,8599
0,2101	0,0261	0,2101	0,0260	-0,4937
0,2626	0,0328	0,2626	0,0327	-0,2501
0,3152	0,0381	0,3152	0,0381	-0,0839
0,3677	0,0406	0,3677	0,0405	-0,2119
0,4202	0,0414	0,4202	0,0414	0,0556
0,4727	0,0417	0,4727	0,0417	0,0552
0,5253	0,0413	0,5253	0,0414	0,1330
0,5778	0,0405	0,5778	0,0406	0,2741
0,6303	0,0394	0,6303	0,0395	0,2131
0,6828	0,0381	0,6828	0,0382	0,3494
0,7354	0,0361	0,7354	0,0362	0,3298
0,7879	0,0328	0,7879	0,0330	0,4658
0,8404	0,0278	0,8404	0,0279	0,4067
0,8929	0,0203	0,8929	0,0205	0,8759
0,9455	0,0057	0,9455	0,0058	1,9153
0,9807	0,0000	0,9812	0,0000	0,0000
0,9980	0,0000	0,9980	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor

Tabela 17 - SAC(x) do Rebocador na Terceira Análise

SAC(x)				
Maxsurf		Barbosa's		Erro
X [m]	SAC(x) [m]	X [m]	SAC(x) [m]	[%]
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0525	0,0000	0,0525	0,0000	0,0000
0,1051	0,0000	0,1051	0,0000	0,0000
0,1576	0,0000	0,1576	0,0000	0,0000
0,2101	0,0000	0,2101	0,0000	0,0000
0,2257	0,0000	0,2339	0,0000	0,0000
0,2626	0,0024	0,2626	0,0023	-4,2066
0,3152	0,0096	0,3152	0,0094	-1,9096
0,3677	0,0143	0,3677	0,0142	-0,7409
0,4202	0,0175	0,4202	0,0174	-0,6282
0,4727	0,0204	0,4727	0,0203	-0,2702
0,5253	0,0228	0,5253	0,0228	-0,1402
0,5778	0,0249	0,5778	0,0249	-0,1123
0,6303	0,0268	0,6303	0,0268	-0,0485
0,6828	0,0284	0,6828	0,0285	0,2921
0,7354	0,0294	0,7354	0,0295	0,4016
0,7879	0,0290	0,7879	0,0291	0,2930
0,8404	0,0265	0,8404	0,0266	0,3509
0,8929	0,0208	0,8929	0,0209	0,2783
0,9455	0,0068	0,9455	0,0068	0,0000
0,9930	0,0000	0,9899	0,0000	0,0000
0,9970	0,0000	0,9980	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor

Tabela 18 - Braço \overline{GZ} do Pesqueiro na Primeira Análise

	MaxSurf	Barbosa's	Erro	Erro Perc.
Angle	GZ [m]	GZ [m]	GZ [m]	GZ [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,1979	0,1980	0,0001	0,0505
10	0,3970	0,3970	0,0000	0,0000
15	0,5989	0,5990	0,0001	0,0167
20	0,7993	0,7990	-0,0003	-0,0375
25	0,9802	0,9800	-0,0002	-0,0204
30	1,1428	1,1430	0,0002	0,0175
35	1,2893	1,2890	-0,0003	-0,0233
40	1,4210	1,4210	0,0000	0,0000
45	1,5386	1,5380	-0,0006	-0,0390
50	1,6435	1,6430	-0,0005	-0,0304
55	1,7360	1,7360	0,0000	0,0000
60	1,8154	1,8150	-0,0004	-0,0220
65	1,8809	1,8810	0,0001	0,0053
70	1,9322	1,9320	-0,0002	-0,0104
75	1,9687	1,9680	-0,0007	-0,0356
80	1,9901	1,9900	-0,0001	-0,0050
85	1,9966	1,9960	-0,0006	-0,0301
90	1,9887	1,9890	0,0003	0,0151
95	1,9672	1,9670	-0,0002	-0,0102
100	1,9323	1,9320	-0,0003	-0,0155
105	1,8844	1,8840	-0,0004	-0,0212
110	1,8254	1,8250	-0,0004	-0,0219
115	1,7567	1,7570	0,0003	0,0171
120	1,6789	1,6790	0,0001	0,0060
125	1,5927	1,5930	0,0003	0,0188
130	1,4989	1,4990	0,0001	0,0067
135	1,3976	1,3980	0,0004	0,0286
140	1,2875	1,2870	-0,0005	-0,0388
145	1,1673	1,1670	-0,0003	-0,0257
150	1,0308	1,0310	0,0002	0,0194
155	0,8799	0,8800	0,0001	0,0114
160	0,7173	0,7170	-0,0003	-0,0418
165	0,5460	0,5460	0,0000	0,0000
170	0,3677	0,3680	0,0003	0,0816
175	0,1848	0,1850	0,0002	0,1082
180	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor

Tabela 19 - Braço \overline{GZ} do Pesqueiro na Segunda Análise

	MaxSurf	Barbosa's	Erro	Erro Perc.
Angle	GZ [m]	GZ [m]	GZ [m]	GZ [%]
0	0	0	0	0
5	0,004	0,0039	-0,0001	-2,5
10	0,011	0,0103	-0,0007	-6,363636364
15	0,022	0,0214	-0,0006	-2,727272727
20	0,037	0,0366	-0,0004	-1,081081081
25	0,056	0,0557	-0,0003	-0,5357142857
30	0,077	0,0767	-0,0003	-0,3896103896
35	0,096	0,0961	0,0001	0,1041666667
40	0,11	0,1096	-0,0004	-0,3636363636
45	0,114	0,1136	-0,0004	-0,350877193
50	0,106	0,1066	0,0006	0,5660377358
55	0,089	0,0889	-0,0001	-0,1123595506
60	0,062	0,062	0	0
65	0,027	0,0275	0,0005	1,851851852
70	-0,013	-0,0131	-0,0001	0,7692307692
75	-0,059	-0,059	0	0
80	-0,107	-0,1067	0,0003	-0,2803738318
85	-0,157	-0,1566	0,0004	-0,2547770701
90	-0,207	-0,2066	0,0004	-0,193236715
95	-0,256	-0,2555	0,0005	-0,1953125
100	-0,301	-0,3015	-0,0005	0,1661129568
105	-0,344	-0,3437	0,0003	-0,08720930233
110	-0,381	-0,3808	0,0002	-0,05249343832
115	-0,411	-0,4117	-0,0007	0,1703163017
120	-0,434	-0,4347	-0,0007	0,1612903226
125	-0,448	-0,4482	-0,0002	0,04464285714
130	-0,451	-0,4516	-0,0006	0,133037694
135	-0,444	-0,4448	-0,0008	0,1801801802
140	-0,428	-0,4283	-0,0003	0,07009345794
145	-0,402	-0,4022	-0,0002	0,04975124378
150	-0,367	-0,3671	-0,0001	0,0272479564
155	-0,323	-0,3234	-0,0004	0,1238390093
160	-0,271	-0,271	0	0
165	-0,21	-0,2095	0,0005	-0,2380952381
170	-0,141	-0,1407	0,0003	-0,2127659574
175	-0,07	-0,07	0	0
180	0	0	0	0

Fonte: O Autor

Tabela 20 - Braço \overline{GZ} do Pesqueiro na Terceira Análise

Angle	MaxSurf GZ [m]	Barbosa's GZ [m]	Erro GZ [m]	Erro Perc. GZ [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0660	0,0663	0,0003	0,4545
10	0,1280	0,1282	0,0002	0,1563
15	0,1840	0,1839	-0,0001	-0,0543
20	0,2330	0,2333	0,0003	0,1288
25	0,2760	0,2763	0,0003	0,1087
30	0,3130	0,3130	0,0000	0,0000
35	0,3440	0,3437	-0,0003	-0,0872
40	0,3690	0,3688	-0,0002	-0,0542
45	0,3890	0,3884	-0,0006	-0,1542
50	0,4030	0,4028	-0,0002	-0,0496
55	0,4120	0,4121	0,0001	0,0243
60	0,4170	0,4166	-0,0004	-0,0959
65	0,4170	0,4165	-0,0005	-0,1199
70	0,4120	0,4123	0,0003	0,0728
75	0,4040	0,4044	0,0004	0,0990
80	0,3930	0,3931	0,0001	0,0254
85	0,3790	0,3791	0,0001	0,0264
90	0,3630	0,3624	-0,0006	-0,1653
95	0,3440	0,3438	-0,0002	-0,0581
100	0,3240	0,3236	-0,0004	-0,1235
105	0,3020	0,3018	-0,0002	-0,0662
110	0,2790	0,2790	0,0000	0,0000
115	0,2560	0,2556	-0,0004	-0,1563
120	0,2310	0,2315	0,0005	0,2165
125	0,2070	0,2072	0,0002	0,0966
130	0,1830	0,1833	0,0003	0,1639
135	0,1600	0,1597	-0,0003	-0,1875
140	0,1370	0,1371	0,0001	0,0730
145	0,1160	0,1158	-0,0002	-0,1724
150	0,0960	0,0959	-0,0001	-0,1042
155	0,0770	0,0774	0,0004	0,5195
160	0,0600	0,0601	0,0001	0,1667
165	0,0440	0,0439	-0,0001	-0,2273
170	0,0290	0,0287	-0,0003	-1,0345
175	0,0140	0,0144	0,0004	2,8571
180	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor

Tabela 21 - Braço \overline{GZ} do Rebocador na Primeira Análise

Angle	MaxSurf GZ [m]	Barbosa's GZ [m]	Erro GZ [m]	Erro Perc. GZ [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0170	0,0173	0,0003	1,7647
10	0,0330	0,0333	0,0003	0,9091
15	0,0460	0,0464	0,0004	0,8696
20	0,0560	0,0559	-0,0001	-0,1786
25	0,0620	0,0623	0,0003	0,4839
30	0,0670	0,0669	-0,0001	-0,1493
35	0,0700	0,0699	-0,0001	-0,1429
40	0,0720	0,0718	-0,0002	-0,2778
45	0,0730	0,0727	-0,0003	-0,4110
50	0,0720	0,0724	0,0004	0,5556
55	0,0710	0,0708	-0,0002	-0,2817
60	0,0680	0,0680	0,0000	0,0000
65	0,0640	0,0644	0,0004	0,6250
70	0,0600	0,0599	-0,0001	-0,1667
75	0,0550	0,0548	-0,0002	-0,3636
80	0,0490	0,0492	0,0002	0,4082
85	0,0430	0,0430	0,0000	0,0000
90	0,0370	0,0366	-0,0004	-1,0811
95	0,0300	0,0298	-0,0002	-0,6667
100	0,0230	0,0228	-0,0002	-0,8696
105	0,0160	0,0156	-0,0004	-2,5000
110	0,0080	0,0082	0,0002	2,5000
115	0,0010	0,0006	-0,0004	-40,0000
120	-0,0070	-0,0071	-0,0001	1,4286
125	-0,0150	-0,0149	0,0001	-0,6667
130	-0,0230	-0,0227	0,0003	-1,3043
135	-0,0300	-0,0302	-0,0002	0,6667
140	-0,0370	-0,0372	-0,0002	0,5405
145	-0,0440	-0,0437	0,0003	-0,6818
150	-0,0490	-0,0492	-0,0002	0,4082
155	-0,0530	-0,0533	-0,0003	0,5660
160	-0,0550	-0,0552	-0,0002	0,3636
165	-0,0530	-0,0533	-0,0003	0,5660
170	-0,0440	-0,0446	-0,0006	1,3636
175	-0,0260	-0,0266	-0,0006	2,3077
180	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor

Tabela 22 - Braço \overline{GZ} do Rebocador na Segunda Análise

Angle	MaxSurf GZ [m]	Barbosa's GZ [m]	Erro GZ [m]	Erro Perc. GZ [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0080	0,0076	-0,0004	-5,0000
10	0,0150	0,0152	0,0002	1,3333
15	0,0230	0,0229	-0,0001	-0,4348
20	0,0290	0,0292	0,0002	0,6897
25	0,0340	0,0339	-0,0001	-0,2941
30	0,0380	0,0375	-0,0005	-1,3158
35	0,0400	0,0405	0,0005	1,2500
40	0,0430	0,0428	-0,0002	-0,4651
45	0,0450	0,0446	-0,0004	-0,8889
50	0,0460	0,0460	0,0000	0,0000
55	0,0470	0,0468	-0,0002	-0,4255
60	0,0470	0,0471	0,0001	0,2128
65	0,0470	0,0469	-0,0001	-0,2128
70	0,0460	0,0462	0,0002	0,4348
75	0,0450	0,0451	0,0001	0,2222
80	0,0440	0,0435	-0,0005	-1,1364
85	0,0420	0,0417	-0,0003	-0,7143
90	0,0390	0,0395	0,0005	1,2821
95	0,0370	0,0370	0,0000	0,0000
100	0,0340	0,0343	0,0003	0,8824
105	0,0320	0,0315	-0,0005	-1,5625
110	0,0290	0,0285	-0,0005	-1,7241
115	0,0260	0,0255	-0,0005	-1,9231
120	0,0230	0,0226	-0,0004	-1,7391
125	0,0200	0,0198	-0,0002	-1,0000
130	0,0170	0,0170	0,0000	0,0000
135	0,0140	0,0143	0,0003	2,1429
140	0,0120	0,0116	-0,0004	-3,3333
145	0,0090	0,0092	0,0002	2,2222
150	0,0070	0,0069	-0,0001	-1,4286
155	0,0050	0,0050	0,0000	0,0000
160	0,0040	0,0035	-0,0005	-12,5000
165	0,0020	0,0023	0,0003	15,0000
170	0,0010	0,0014	0,0004	40,0000
175	0,0010	0,0006	-0,0004	-40,0000
180	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor

Tabela 23 - Braço \overline{GZ} do Rebocador na Terceira Análise

Angle	MaxSurf GZ [m]	Barbosa's GZ [m]	Erro GZ [m]	Erro Perc. GZ [%]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0090	0,0092	0,0002	2,2222
10	0,0180	0,0185	0,0005	2,7778
15	0,0280	0,0277	-0,0003	-1,0714
20	0,0370	0,0369	-0,0001	-0,2703
25	0,0460	0,0459	-0,0001	-0,2174
30	0,0540	0,0539	-0,0001	-0,1852
35	0,0610	0,0605	-0,0005	-0,8197
40	0,0660	0,0658	-0,0002	-0,3030
45	0,0700	0,0697	-0,0003	-0,4286
50	0,0730	0,0726	-0,0004	-0,5479
55	0,0750	0,0745	-0,0005	-0,6667
60	0,0760	0,0754	-0,0006	-0,7895
65	0,0760	0,0755	-0,0005	-0,6579
70	0,0750	0,0748	-0,0002	-0,2667
75	0,0730	0,0734	0,0004	0,5479
80	0,0710	0,0714	0,0004	0,5634
85	0,0690	0,0689	-0,0001	-0,1449
90	0,0660	0,0659	-0,0001	-0,1515
95	0,0620	0,0624	0,0004	0,6452
100	0,0590	0,0586	-0,0004	-0,6780
105	0,0540	0,0544	0,0004	0,7407
110	0,0500	0,0501	0,0001	0,2000
115	0,0450	0,0455	0,0005	1,1111
120	0,0410	0,0407	-0,0003	-0,7317
125	0,0360	0,0358	-0,0002	-0,5556
130	0,0310	0,0310	0,0000	0,0000
135	0,0260	0,0261	0,0001	0,3846
140	0,0210	0,0215	0,0005	2,3810
145	0,0170	0,0172	0,0002	1,1765
150	0,0130	0,0133	0,0003	2,3077
155	0,0100	0,0098	-0,0002	-2,0000
160	0,0070	0,0069	-0,0001	-1,4286
165	0,0040	0,0045	0,0005	12,5000
170	0,0030	0,0027	-0,0003	-10,0000
175	0,0010	0,0013	0,0003	30,0000
180	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor

Tabela 24 - Critérios da IMO do Pesqueiro na Segunda Análise

CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE - EMBARCAÇÕES MERCANTES - IMO						
Critérios			Resultados		Erro	
Condição		Requisito	Maxsurf	Barbosa's	Erro	Erro [%]
1) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 30^\circ$	$A \geq 0,055$ [m.rad]	0,0145	0,0145	0,0000	0,0000
2) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,090$ [m.rad]	0,0311	0,0310	-0,0001	-0,3215
3) $\theta \geq 30^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,030$ [m.rad]	0,0166	0,0165	-0,0001	-0,6024
4) $\theta = 30^\circ$		$GZ \geq 0,20$ [m]	0,0780	0,0767	-0,0013	-1,6667
5) Max(GZ)		$\theta \geq 30^\circ$	44,5000	45,0000	0,5000	1,1236
6) GM inicial		$GMt \geq 0,15$ [m]	0,0420	0,0408	-0,0012	-2,8571

Fonte: O Autor

Tabela 25 - Critérios da IMO do Pesqueiro na Terceira Análise

CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE - EMBARCAÇÕES MERCANTES - IMO						
Critérios			Resultados		Erro	
Condição		Requisito	Maxsurf	Barbosa's	Erro	Erro [%]
1) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 30^\circ$	$A \geq 0,055$ [m.rad]	0,0914	0,0911	-0,0003	-0,3282
2) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,090$ [m.rad]	0,1513	0,1509	-0,0004	-0,2644
3) $\theta \geq 30^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,030$ [m.rad]	0,0598	0,0597	-0,0001	-0,1672
4) $\theta = 30^\circ$		$GZ \geq 0,20$ [m]	0,3140	0,3130	-0,0010	-0,3185
5) Max(GZ)		$\theta \geq 30^\circ$	62,3000	60,0000	-2,3000	-3,6918
6) GM inicial		$GMt \geq 0,15$ [m]	0,7830	0,7829	-0,0001	-0,0128

Fonte: O Autor

Tabela 26 - Critérios da IMO do Rebocador na Primeira Análise

CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE - EMBARCAÇÕES MERCANTES - IMO						
Critérios			Resultados		Erro	
Condição		Requisito	Maxsurf	Barbosa's	Erro	Erro [%]
1) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 30^\circ$	$A \geq 0,055$ [m.rad]	0,0218	0,0217	-0,0001	-0,4587
2) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,090$ [m.rad]	0,0340	0,0339	-0,0001	-0,2941
3) $\theta \geq 30^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,030$ [m.rad]	0,0122	0,0122	0,0000	0,0000
4) $\theta = 30^\circ$		$GZ \geq 0,20$ [m]	0,0670	0,0669	-0,0001	-0,1493
5) Max(GZ)		$\theta \geq 30^\circ$	46,4000	45,0000	-1,4000	-3,0172
6) GM inicial		$GMt \geq 0,15$ [m]	0,2030	0,2035	0,0005	0,2463

Fonte: O Autor

Tabela 27 - Critérios da IMO do Rebocador na Segunda Análise

CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE - EMBARCAÇÕES MERCANTES - IMO						
Critérios			Resultados		Erro	
Condição		Requisito	Maxsurf	Barbosa's	Erro	Erro [%]
1) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 30^\circ$	$A \geq 0,055$ [m.rad]	0,0112	0,0111	-0,0001	-0,8929
2) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,090$ [m.rad]	0,0182	0,0182	0,0000	0,0000
3) $\theta \geq 30^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,030$ [m.rad]	0,0070	0,0070	0,0000	0,0000
4) $\theta = 30^\circ$		$GZ \geq 0,20$ [m]	0,0380	0,0375	-0,0005	-1,3158
5) Max(GZ)		$\theta \geq 30^\circ$	60,0000	60,0000	0,0000	0,0000
6) GM inicial		$GMt \geq 0,15$ [m]	0,0860	0,0864	0,0004	0,4651

Fonte: O Autor

Tabela 28 - Critérios da IMO do Rebocador na Terceira Análise

CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE - EMBARCAÇÕES MERCANTES - IMO						
Critérios			Resultados		Erro	
Condição		Requisito	Maxsurf	Barbosa's	Erro	Erro [%]
1) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 30^\circ$	$A \geq 0,055$ [m.rad]	0,0144	0,0144	0,0000	0,0000
2) $\theta \geq 0^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,090$ [m.rad]	0,0250	0,0249	-0,0001	-0,4000
3) $\theta \geq 30^\circ$	$\theta \leq 40^\circ$	$A \geq 0,030$ [m.rad]	0,0105	0,0105	0,0000	0,0000
4) $\theta = 30^\circ$		$GZ \geq 0,20$ [m]	0,0530	0,0539	0,0009	1,6981
5) Max(GZ)		$\theta \geq 30^\circ$	62,7000	65,0000	2,3000	3,6683
6) GM inicial		$GMt \geq 0,15$ [m]	0,1080	0,1063	-0,0017	-1,5741

Fonte: O Autor