

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

GABRIEL MARTINS DO AIDO ALVES DA SILVA

**EFEITOS DA FORMA DO BOJO NA ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE UMA  
EMBARCAÇÃO DE SERVIÇO**

Joinville

2022

GABRIEL MARTINS DO AIDO ALVES DA SILVA

**EFEITOS DA FORMA DO BOJO NA ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE UMA  
EMBARCAÇÃO DE SERVIÇO**

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

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2022

*“O importante é: se você falhar uma vez, ou não tiver sorte dessa vez, o sonho continua. Um sonho só termina se você desistir ou se tornar realidade”.*

---

*Neil Peart*

## RESUMO

Diante da importância que os estudos sobre estabilidade têm para a segurança e a operação de embarcações mercantes e de serviço, este trabalho busca mitigar as lacunas existentes sobre o tema, apresentando uma avaliação da influência que a forma do bojo exerce na estabilidade transversal de uma embarcação de serviço. Ao longo do texto são apresentadas análises qualitativas e quantitativas acerca da influência da forma do bojo na estabilidade estática inicial, na estabilidade dinâmica, na estabilidade a grandes ângulos e na estabilidade avariada de uma embarcação de serviço. Usando o clássico programa MAXSURF, cinquenta e cinco geometrias de bojo foram modeladas e analisadas. Os resultados mostraram que o aumento da região de bojo provoca um aumento da altura do centro de flutuação, uma redução do coeficiente da seção mestra e, por fim, um aumento da altura do metacentro do casco. Além disso, observou-se que o bojo chanfrado provoca variações, nesses parâmetros, maiores do que aquelas observadas nas geometrias com bojo curvo. Em relação à estabilidade dinâmica, observou-se que a massa adicional associada ao bojo chanfrado é maior do que a massa adicional associada ao bojo curvo, o que tende a fazer com que geometrias com bojo chanfrado tenham maior estabilidade transversal dinâmica do que geometrias com bojo curvo. Já em relação à estabilidade a grandes ângulos e a estabilidade avariada, não foram observadas variações significativas em decorrência da forma do bojo do casco.

**Palavras-chave:** Estabilidade. Bojo. Casco. Estabilidade dinâmica. Estabilidade avariada.

## **ABSTRACT**

Given the importance that studies on stability have for the safety and operation of merchant and service vessels, this work seeks to mitigate the existing gaps on the subject by presenting an assessment of the influence that the shape of the bilge exerts on the transverse stability of a vessel of service. Throughout the text, qualitative and quantitative analysis are presented about the influence that the shape of the bilge exerts on the initial static stability, dynamic stability, stability at large angles and the damaged stability of a service vessel. Using the classic MAXSURF program, fifty-five bilge geometries were modeled and analyzed. The results showed that the increase in the bilge region causes an increase in the height of the center of buoyancy, a reduction in the coefficient of the midsection and, finally, an increase in the metacentric height of the hull. In addition, it was observed that the straight bilge causes greater variations, on those parameters, than those observed in the curved bilge geometries. Regarding dynamic stability, it was observed that the additional mass associated with the straight bilge is greater than the additional mass associated with the curved bilge, which tends to make geometries with straight bilges have greater dynamic transverse stability than geometries with curved bilge. Regarding stability at large angles and damaged stability, no significant variations were observed due to the shape of the hull's bilge.

**Keywords:** Stability. Bilge. Hull. Dynamical stability. Damaged stability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Diferentes tipos de bojos.....	11
<b>Figura 2</b> - Nomenclaturas.....	14
<b>Figura 3</b> - Seção transversal com bojo chanfrado.....	15
<b>Figura 4</b> - Seção transversal com bojo curvo.....	15
<b>Figura 5</b> - Seção transversal com bojo reto.....	16
<b>Figura 6</b> - Centros de gravidade e flutuação.....	17
<b>Figura 7</b> - Movimentos rotacionais e ângulos da embarcação.....	18
<b>Figura 8</b> - Exemplo de curva de estabilidade estática.....	21
<b>Figura 9</b> - Novas posições dos centroides dos volumes submersos.....	22
<b>Figura 10</b> - Método da transformação em cilindro equivalente.....	23
<b>Figura 11</b> - Representação gráfica do coeficiente $k_{33}$ .....	24
<b>Figura 12</b> - Validade do cálculo da massa adicional usando a teoria potencial.....	24
<b>Figura 13</b> - Fluxograma da metodologia empregada na pesquisa.....	27
<b>Figura 14</b> - Alternativas para tipo de bojo.....	29
<b>Figura 15</b> - Modelagem dos cascos usando blocos padronizados.....	30
<b>Figura 16</b> - Modelagem dos blocos de popa.....	30
<b>Figura 17</b> - Modelagem dos blocos de proa.....	31
<b>Figura 18</b> - Informações de referência para MAXSURF.....	32
<b>Figura 19</b> - Seção transversal da embarcação de referência.....	33
<b>Figura 20</b> - Modelo referência em MAXSURF.....	33
<b>Figura 21</b> - Algumas alternativas de bojos estudadas.....	34
<b>Figura 22</b> - Alternativas de ângulo de <i>deadrise</i> e de costado estudadas.....	34
<b>Figura 23</b> - Influência da forma do bojo no calado e no deslocamento.....	37
<b>Figura 24</b> - Influência da forma do bojo no $\overline{KB}$ .....	38
<b>Figura 25</b> - Influência da forma do bojo no $\overline{KM}$ .....	38
<b>Figura 26</b> - Influência da forma do bojo no $C_M$ .....	39
<b>Figura 27</b> - Coeficientes de massa adicional.....	40
<b>Figura 28</b> - Tanques internos.....	42
<b>Figura 29</b> - Pontos de alagamento.....	42
<b>Figura 30</b> - Modelagem dos tanques e pontos de alagamento.....	43
<b>Figura 31</b> - Equilíbrio na condição de peso leve.....	44
<b>Figura 32</b> - Condição de carregamento intacta.....	44

<b>Figura 33</b> - Equilíbrio da embarcação de bojo chanfrado na condição avariada.....	45
<b>Figura 34</b> - Equilíbrio da embarcação de bojo curvo na condição avariada.....	45
<b>Figura 35</b> - Equilíbrio da embarcação com bojo chanfrado sujeita a 45° de banda.....	48
<b>Figura 36</b> - Curva de estabilidade estática das geometrias estudadas.....	50
<b>Figura A1</b> - Coordenadas dos tanques em MAXSURF Stability.....	56
<b>Figura A2</b> - Coordenadas dos pontos de alagamento em MAXSURF Stability.....	57
<b>Figura A3</b> - Condição de carregamento para análise de estabilidade intacta.....	58
<b>Figura A4</b> - Condição de carregamento para análise de estabilidade avariada.....	59

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Dimensões principais da embarcação de referência.....	27
<b>Tabela 2</b> - Variações geométricas estudadas.....	28
<b>Tabela 3</b> - Dados hidrostáticos: calado constante.....	35
<b>Tabela 4</b> - Dados hidrostáticos: deslocamento constante.....	36
<b>Tabela 5</b> - Modelos selecionados para análise de estabilidade avariada.....	41
<b>Tabela 6</b> - Influência da forma do bojo na estabilidade avariada.....	46
<b>Tabela 7</b> - Avaliação dos critérios IMO para grandes ângulos (bojo chanfrado).....	48
<b>Tabela 8</b> - Avaliação dos critérios IMO para grandes ângulos (bojo curvo).....	48
<b>Tabela 9</b> - Comparação de margens.....	49

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Aspectos referentes à estabilidade de uma embarcação .....	19
<b>Quadro 2</b> - Critérios de estabilidade transversal da IMO. ....	47

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>14</b>
2.1 DIFERENTES TIPOS DE BOJO	14
2.2 EQUILÍBRIO E ESTABILIDADE	17
2.3 ESTABILIDADE DINÂMICA DE UMA EMBARCAÇÃO	20
2.4 CONCEITO DE MASSA ADICIONAL DE ROTAÇÃO	22
2.5 ESTABILIDADE AVARIADA DE UMA EMBARCAÇÃO	25
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>26</b>
3.1 ESTUDO DE CASO	27
3.2 MODELAGEM	29
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>32</b>
4.1 CONFIGURAÇÃO DOS MODELOS	32
4.2 COMPARAÇÃO DOS DADOS HIDROSTÁTICOS	35
4.3 DISCUSSÕES SOBRE A ESTABILIDADE ESTÁTICA	39
4.4 DISCUSSÕES SOBRE A ESTABILIDADE DINÂMICA	40
4.5 ESTUDO SOBRE A ESTABILIDADE AVARIADA	41
4.6 DEFINIÇÃO DE TANQUES E PONTOS DE ALAGAMENTO	41
4.7 DEFINIÇÃO DO PESO LEVE E DO CARREGAMENTO	43
4.8 CONSIDERAÇÕES NA ESTABILIDADE AVARIADA	45
4.9 DISCUSSÕES SOBRE A ESTABILIDADE AVARIADA	46
4.10 ESTUDO SOBRE A ESTABILIDADE A GRANDES ÂNGULOS	47
4.11 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>53</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE B</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE C</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O litoral brasileiro, que se estende por mais de 8.500 km de costa, representa elevada importância social e econômica para um enorme contingente de trabalhadores. Segundo informações do Ministério do Meio Ambiente (2016), o Brasil possui dezessete estados costeiros, contendo trezentos e noventa e sete municípios. Desses, duzentos e oitenta são posicionados defronte ao mar, o que evidencia a enorme importância que os oceanos possuem na economia nacional.

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval e Offshore (SINAVAL) a construção naval é amplamente reconhecida por governos e pela sociedade como sendo uma grande geradora de empregos diretos e indiretos, além de ser uma indústria fomentadora de desenvolvimento econômico e social, pois estimula o crescimento de uma ampla gama de prestadores de serviços e fornecedores de produtos.

Segundo a Marinha do Brasil, de acordo com a NORMAM-01/DPC (2005), uma embarcação é qualquer construção<sup>1</sup> sujeita à inscrição na Autoridade Marítima e suscetível a se locomover na água, por meios próprios ou não, transportando pessoas ou cargas. Além disso, é possível distinguir as embarcações em função de suas aplicações, métodos propulsivos, arranjos estruturais e técnicas construtivas.

Para o projeto de uma embarcação, o armador, sendo o cliente e dono da embarcação, estipula os requisitos iniciais para o projeto. Esses requisitos são relacionados à carga mínima a ser transportada, condições de operação, calado máximo para a operação e, até mesmo, fatores construtivos limitantes.

Assim, as necessidades do armador, aliadas à capacidade construtiva do estaleiro, conduzem as decisões sobre a forma do casco, o que inclui o tipo de bojo a ser utilizado.

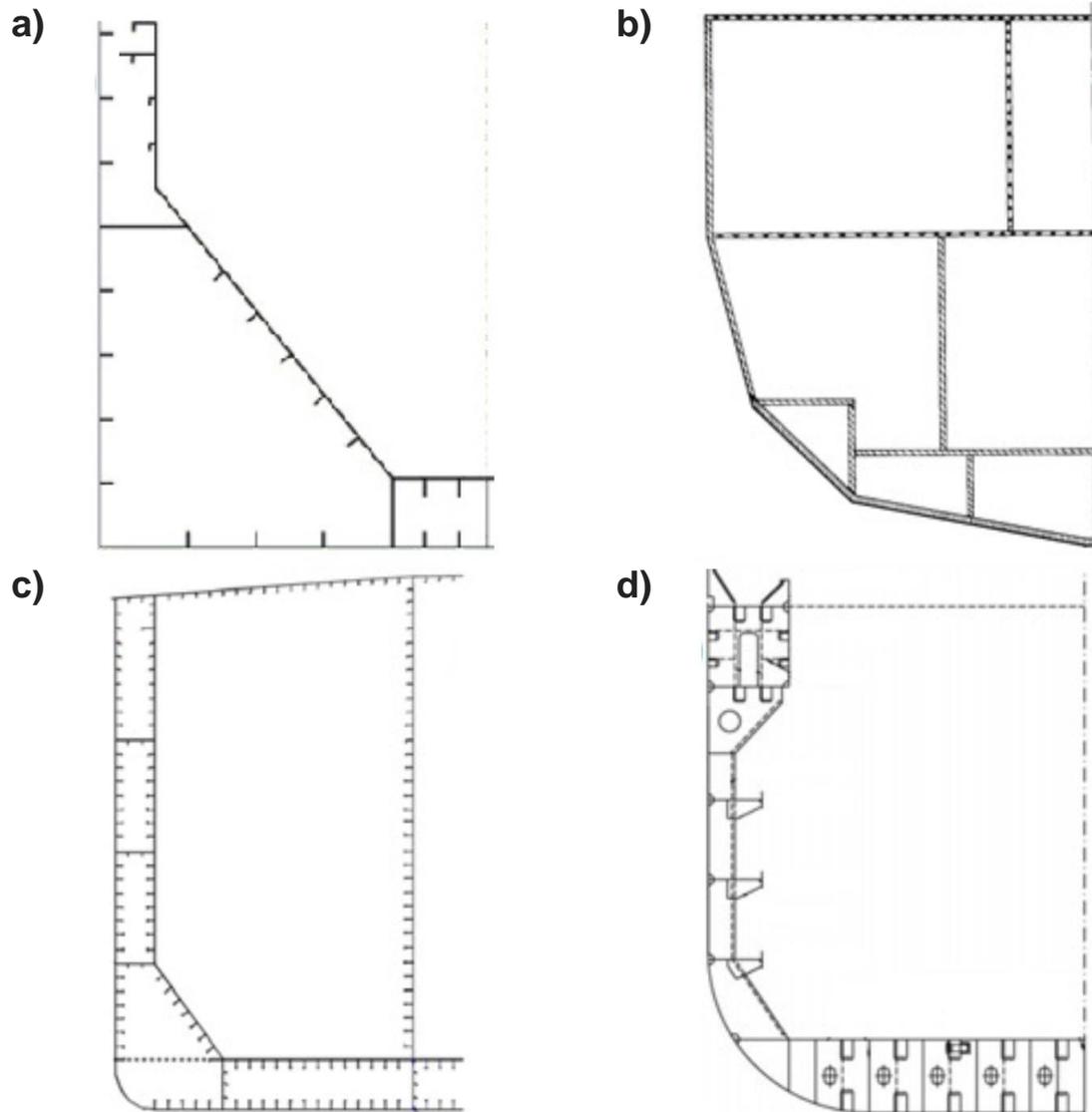
De acordo com a NBR 8035 TB-228 (1989), bojo é a parte do casco que corresponde à região de transição entre o fundo e o costado, podendo ser reto, chanfrado ou curvo (Figura 1).

Se por um lado a definição do tipo de bojo (reto, chanfrado ou curvo) está ligada a facilidade de construção do casco, por outro, afeta o volume deslocado, podendo modificar diversos aspectos do comportamento hidrodinâmico da embarcação.

---

<sup>1</sup> Mesmo as plataformas fixas podem ser consideradas embarcações quando são rebocadas.

**Figura 1** - Diferentes tipos de bojos.



a) Bojo reto (BORGES, 2010). b) Bojo chanfrado (DIXYACHT DESIGN, 2019). c) Bojo com pequeno raio de curvatura (EYRES, 2001). d) Bojo com grande raio de curvatura (AKBAR et al., 2021).

Entre os diferentes aspectos associados ao comportamento hidrodinâmico, este trabalho se dedica a estudar a influência que o tipo de bojo tem na estabilidade transversal de uma embarcação.

A importância da análise de estabilidade de embarcações ficou evidente quando em março de 2016, a embarcação RO-RO (transportadora de veículos), "Hoegh Osaka", encalhou devido a um adernamento não previsto à boreste. Uma análise posterior confirmou que o navio apresentava uma condição de carga que comprometia a estabilidade da embarcação, e que não havia sido verificada antes da partida (MAIB, 2016).

Outro exemplo de acidente causado por problemas de estabilidade ocorreu na Geórgia, nos Estados Unidos, em 2019, quando mais uma embarcação RO-RO, a "Golden Ray", foi à pique. O Conselho Nacional de Segurança nos Transportes (NTSB) determinou que a causa mais provável do acidente foi um erro do capitão ao indicar a quantidade de lastro no sistema de controle do navio (NTSB, 2019).

Dado que a estabilidade transversal diz respeito à capacidade que uma embarcação tem de estabilizar um eventual balanço do casco, o formato do bojo possui grande importância nessa análise. Paradoxalmente são poucos os estudos que se dedicam a avaliar a influência do tipo de bojo na estabilidade transversal de uma embarcação.

Embora relativamente simples, quando comparadas a outras análises, o estudo de estabilidade de uma embarcação requer a integração de volumes em geometrias não regulares em diferentes condições de calado, trim e banda. Usualmente essa tarefa é realizada com o auxílio de ferramentas computacionais que facilitam os cálculos.

Dentro desse contexto, este trabalho visa comparar qualitativamente e quantitativa os efeitos que o tipo de bojo (reto, chanfrado ou curvo) exerce na estabilidade transversal (estática, dinâmica, em avaria e a grandes ângulos) de uma embarcação de serviço.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Usando as clássicas ferramentas computacionais disponíveis no mercado para análises navais e, diante do contexto apresentado, este trabalho objetiva analisar, descrever e comparar os efeitos na estabilidade transversal de uma embarcação de serviço em razão do tipo de bojo do casco.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo estabelecido, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- I. Escolher e descrever as características de uma embarcação de serviço típica a ser utilizada como estudo de caso;

- II. Modelar, na ferramenta computacional *Bentley MAXSURF Modeler*, o casco da embarcação escolhida considerando diversas geometrias de bojo;
- III. Analisar e comparar os resultados referentes ao equilíbrio hidrostático da embarcação na condição de serviço, avaliando os efeitos do formato do bojo nos dados de deslocamento, calado, altura do centro de flutuação, altura do metacentro e coeficiente da seção mestra;
- IV. Analisar e comparar os efeitos do formato do bojo na estabilidade transversal inicial de uma embarcação de serviço;
- V. Descrever o conceito de estabilidade dinâmica e, usando o conceito de massa adicional, avaliar qualitativamente os efeitos do tipo de bojo na dissipação de energia ao longo de ciclos sucessivos de movimentos transversais;
- VI. Analisar e comparar os efeitos do formato do bojo na curva de estabilidade a grandes ângulos de uma embarcação de serviço, além de avaliar os efeitos do tipo de bojo na aplicabilidade dos critérios da Organização Marítima Internacional (IMO);
- VII. Modelar os diversos compartimentos internos da embarcação, comparando o efeito do bojo na estabilidade avariada de uma embarcação de serviço;
- VIII. Sistematizar os resultados, indicando a relação entre a forma do bojo e a estabilidade transversal de uma embarcação de serviço.

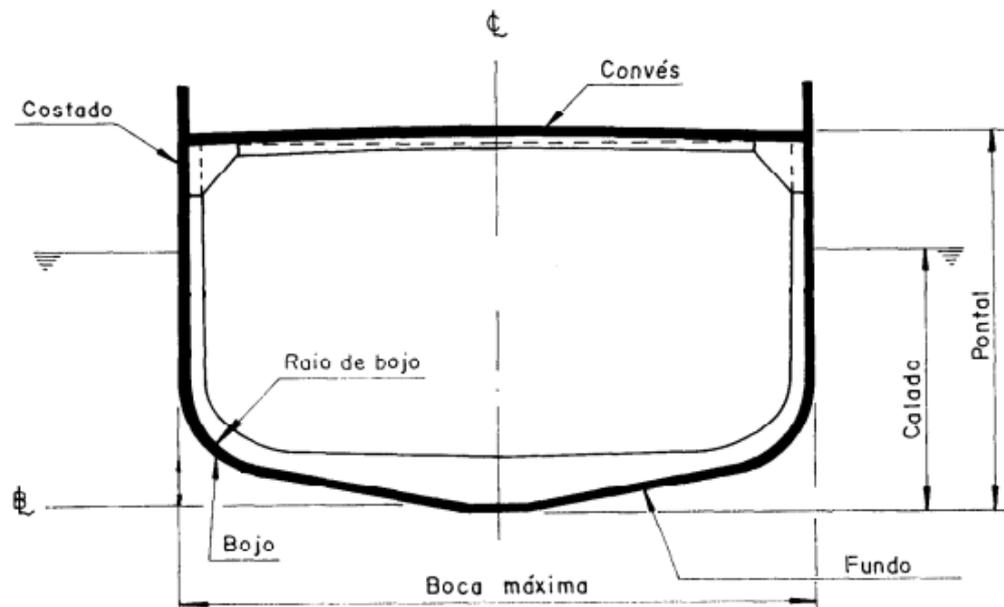
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são descritos os fundamentos teóricos que substanciam o desenvolvimento realizado. Inicialmente discute-se o conceito de bojo, bem como os tipos de geometrias existentes em cascos deslocantes. A seguir são apresentados os principais conceitos associados à análise de estabilidade de uma embarcação.

### 2.1 DIFERENTES TIPOS DE BOJOS

Na Figura 2 é retratada a seção transversal típica de uma embarcação, onde é possível observar a nomenclatura utilizada ao longo deste trabalho.

Figura 2 - Nomenclaturas.



Fonte: Adaptado de NBR 8035 TB-228 (1989).

Segundo NBR 8035 TB-228 (1989), o bojo<sup>2</sup> corresponde a região de transição entre o fundo e o costado do casco (Figura 2). Sendo que, devido a questões construtivas e de arranjo interno, o bojo pode apresentar diferentes formatos (Figura 1).

Nas Figuras 3, 4 e 5 são mostradas embarcações reais, nas quais a região do bojo é destacada por linhas vermelhas. Como pode ser observado, na Figura 3 a transição do fundo para o costado ocorre de maneira reta, enquanto na Figura 4 essa

<sup>2</sup> Na indústria naval, o bojo é muitas vezes chamado de quina.

transição é curva. Já na Figura 5, não existe região de bojo, pois o fundo se conecta diretamente ao costado do casco.

**Figura 3** - Seção transversal com bojo chanfrado.



Fonte: Ferraris e Volpone (2005).

**Figura 4** - Seção transversal com bojo curvo.



Fonte: Australian Maritime Safety Authority (2002).

**Figura 5** - Seção transversal com bojo reto.



Fonte: *Bludworth Marine* (2021).

Em virtude da tridimensionalidade do casco, a geometria do bojo pode se modificar ao longo do comprimento da embarcação. Assim, usualmente, a forma do bojo é definida na seção mestra<sup>3</sup>.

Considerando a fabricação e a montagem, chapeamentos planos são notavelmente mais fáceis de serem produzidos, uma vez que não necessitam de curvaturas. No entanto, nem sempre a facilidade construtiva é o fator decisivo no projeto de uma embarcação, pois aspectos hidrodinâmicos podem se sobrepôr às facilidades construtivas.

A alteração do desempenho hidrodinâmico decorre da variação do volume deslocado pelo casco, além da variação da posição vertical do centro de flutuação, cujos valores podem sofrer alterações em virtude da forma do bojo.

---

<sup>3</sup> A rigor, segundo Tancredi (2020), do ponto de vista estrutural, a seção mestra é aquela que apresenta o máximo momento fletor. No entanto, este texto utiliza a definição mais usual de seção mestra (FONSECA, 2002), a qual corresponde à seção da embarcação com maior boca.

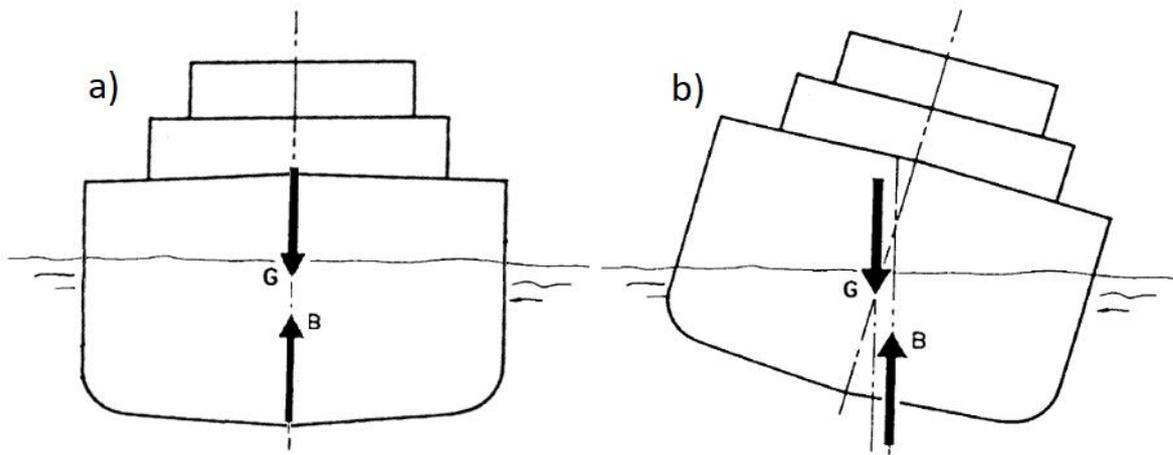
## 2.2 EQUILÍBRIO E ESTABILIDADE

Considera-se que um corpo está em equilíbrio quando, tanto a resultante das forças, quanto a resultante dos momentos, são nulas.

No caso de corpos flutuantes, a condição de equilíbrio se refere à situação na qual a resultante das forças gravitacionais (peso) e das forças de flutuação (empuxo) têm magnitudes equivalentes e são aplicadas em uma mesma linha vertical (LEWIS, 1989), tal como visto na Figura 6a.

Já o conceito de estabilidade refere-se à capacidade de uma embarcação retornar à posição de equilíbrio inicial cessada uma perturbação externa (Figura 6b).

**Figura 6** - Centros de gravidade e flutuação.



a) Condição de equilíbrio inicial. b) Condição após perturbação externa.

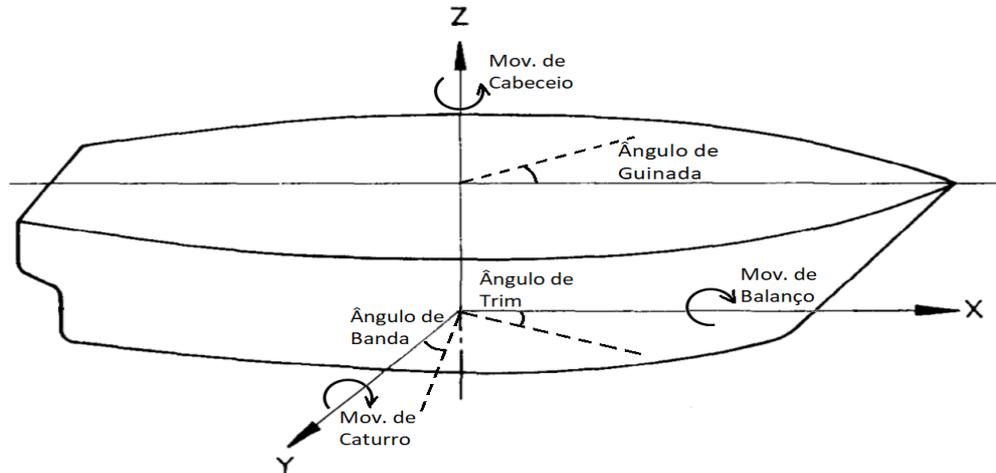
Fonte: Adaptado de Lewis (1989).

O centro de gravidade “G” descreve o centroide das massas da embarcação, sendo o ponto no espaço no qual assume-se que toda a massa possa ser concentrada (BARRASS, 2006). Já o centro de flutuação “B” corresponde ao centroide do volume submerso da embarcação (LEWIS, 1989). Tanto o centro de gravidade (ponto de aplicação da força peso), quanto o centro de flutuação (ponto de aplicação do empuxo), são mostrados na Figura 6.

É importante destacar que a ausência de equilíbrio pode induzir movimentos em um ou mais graus de liberdade de um navio (Figura 7). É possível observar que uma inclinação transversal, ou movimento de balanço, resulta em um ângulo de banda; já uma inclinação longitudinal, ou movimento de caturro, gera um ângulo de trim. Assim, a análise da estabilidade de uma embarcação deve considerar tanto as

inclinações na direção transversal, quanto as inclinações na direção longitudinal. Já o movimento de cabeceio não provoca oscilação e, por isso, não faz parte da análise de estabilidade de uma embarcação.

**Figura 7** - Movimentos rotacionais e ângulos da embarcação.



Fonte: O Autor (2022).

Em relação à estabilidade transversal, foco deste trabalho, existem dois fatores que definem a capacidade de uma embarcação de retornar à posição de equilíbrio inicial após ser perturbada: o momento restaurador e o momento emborcador.

O momento restaurador corresponde à soma dos efeitos que, cessada a perturbação, tendem a mover a embarcação para a posição de equilíbrio inicial. Já o momento emborcador corresponde à soma dos efeitos que tendem a aumentar o movimento, levando ao emborcamento da embarcação.

Como ensinam Barrass (2006) e Lewis (1988), o binário formado pelas forças peso e empuxo corresponde a um dos principais efeitos que, a depender da situação, pode resultar em um momento emborcador ou em um momento restaurador.

No entanto, além da força peso e do empuxo, a estabilidade transversal de uma embarcação pode ser afetada pela área de linha d'água, rajadas de ventos, deslocamentos de carga a bordo, superfície livre de tanques, guinadas na trajetória, elevação de cargas, entre outros (LEWIS, 1988).

Além disso, o estudo da estabilidade transversal de uma embarcação deve considerar diferentes aspectos, destacando-se as análises referentes à estabilidade estática inicial, à estabilidade dinâmica, à estabilidade avariada e à estabilidade à grandes ângulos (Quadro 1).

**Quadro 1** – Aspectos referentes à estabilidade de uma embarcação.

<b>Tipo de Análise</b>	<b>Descrição</b>
<b>Estabilidade Estática</b>	Análise da embarcação sem movimento, resultando nos dados hidrostáticos que descrevem a condição analisada.
<b>Estabilidade Dinâmica</b>	Análise da embarcação ao longo de ciclos de movimentos, os quais ocorrem quando a embarcação está sujeita a perturbações sucessivas.
<b>Estabilidade Avariada</b>	Análise da estabilidade da embarcação quando da ocorrência de avarias na estrutura submersa do casco.
<b>Estabilidade a Grandes Ângulos</b>	Análise do comportamento da embarcação quando da ocorrência de ângulos de inclinação superiores a 15°.

Fonte: adaptado de Barrass (2006) e Dokkum (2008).

A análise da estabilidade estática inicial tem por objetivo avaliar indicadores como o deslocamento, a altura do centro de flutuação, o calado, o coeficiente de seção mestra e a altura do metacentro.

De acordo com a NBR 8035 TB-228 (1989), o coeficiente de seção mestra é um importante parâmetro para a caracterização do comportamento hidrodinâmico da embarcação, pois relaciona a área submersa da seção mestra com um retângulo de lados iguais à boca e ao calado moldado do casco.

Como conclusão, é possível deduzir que os maiores valores de  $C_M$  estão presentes, principalmente, em embarcações de casco deslocante destinadas ao transporte de cargas, visando maximizar a arqueação bruta<sup>4</sup> do navio.

Já a altura do metacentro  $\bar{KM}$  corresponde ao braço associado ao momento restaurador e representa a composição dos efeitos referentes ao empuxo e à restauração causada pela inércia da área de linha d'água. Ou seja, quanto maior a altura do metacentro de um casco, maior a capacidade de restauração transversal da embarcação.

<sup>4</sup> Segundo Fonseca (2008), a arqueação bruta é um valor adimensional, proporcional ao volume dos espaços fechados da embarcação.

Por sua vez, o estudo da estabilidade dinâmica tem o objetivo de avaliar qualitativamente a influência que o tipo de bojo exerce no comportamento da embarcação ao longo de ciclos sucessivos de adernamento e será realizado utilizando-se analogias com casos conhecidos da engenharia naval.

Já no estudo de estabilidade avariada, os compartimentos da embarcação são modelados, o que permite avaliar os efeitos do tipo de bojo no comportamento transversal da embarcação quando da ocorrência de avarias no casco. Além disso, é nessa etapa do trabalho que são avaliados os efeitos da forma do bojo na curva de comprimento alagável da embarcação.

Por fim, o estudo de estabilidade a grandes ângulos avaliará a influência do tipo de bojo na curva de estabilidade estática, bem como na aplicabilidade dos critérios de estabilidade definidos pela Organização Marítima Internacional (IMO, 2008).

A análise de estabilidade estática a grandes ângulos determina a variação do braço de endireitamento  $\bar{GZ}$ , em função do ângulo de inclinação transversal da embarcação e busca identificar os ângulos a partir dos quais ocorrem o alagamento e/ou emborcamento do casco. Nessa análise são avaliados o equilíbrio da embarcação em cada ângulo de banda analisado, determinando os valores de trim e calado que resultam no equilíbrio das forças verticais e dos momentos longitudinais.

### 2.3 ESTABILIDADE DINÂMICA DE UMA EMBARCAÇÃO

De acordo com Dokkum et al (2008), o termo “dinâmica” se refere a uma força exercida em um corpo, cujos efeitos são dissipados gradualmente. Ainda de forma sucinta, Barrass e Derrett (2006) definem a estabilidade dinâmica como a capacidade de uma embarcação dissipar a energia de uma perturbação antes que ciclos sucessivos de movimentos possam causar o emborcamento do casco.

Nesse contexto, o estudo da estabilidade dinâmica envolve a análise do balanço energético associado ao movimento transversal do casco, avaliando se ao longo de oscilações sucessivas, a embarcação acumula ou dissipa a energia transferida pelas perturbações externas.

Rawson e Tupper (2001) definem a energia potencial de restauração de uma embarcação submetida a um ângulo de banda  $\Theta$ , como sendo proporcional à área

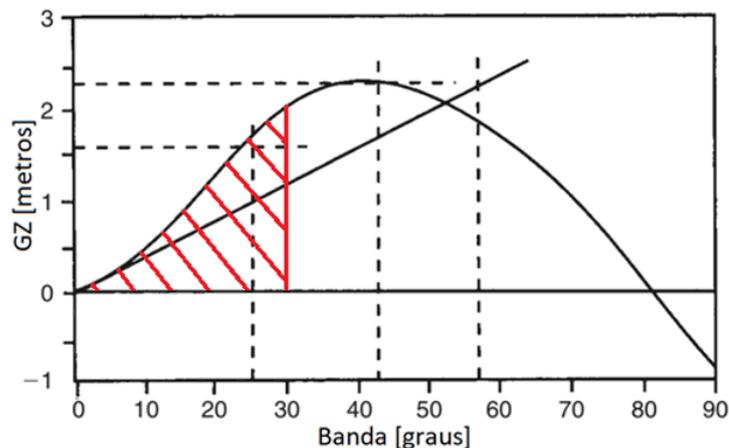
abaixo da curva de estabilidade estática calculada do ângulo de equilíbrio<sup>5</sup> até o ângulo  $\Theta$ . Sendo que a curva de estabilidade estática representa o braço de endireitamento  $\overline{GZ}$  em função do ângulo de banda aplicado à embarcação.

Por exemplo, a energia potencial de restauração de uma embarcação sujeita a um ângulo de banda de  $30^\circ$  e cuja curva de estabilidade estática é mostrada na Figura 8, pode ser calculada usando-se a Equação 1.

$$E_{\text{pot transversal}} = \Delta g \int_0^{30^\circ} GZ(\theta) d\theta \quad (1)$$

Onde  $\Delta$  corresponde ao deslocamento da embarcação,  $g$  à aceleração da gravidade e  $\int_0^{30^\circ} GZ(\theta) d\theta$  à área abaixo da curva de restauração considerando o trecho entre  $0^\circ$  e  $30^\circ$  (área hachurada na Figura 8).

**Figura 8** – Exemplo de curva de estabilidade estática.



Fonte: Adaptado de Barrass e Derrett (2006).

Segundo Rawson e Tupper (2001), é possível estimar a área abaixo de uma curva de restauração usando a Fórmula de Moseley (Equação 2)<sup>6</sup>, a qual relaciona o ângulo de banda, o deslocamento da embarcação, o volume da cunha emergida após o movimento de balanço e as novas posições dos centroides dos volumes submersos (Figura 9).

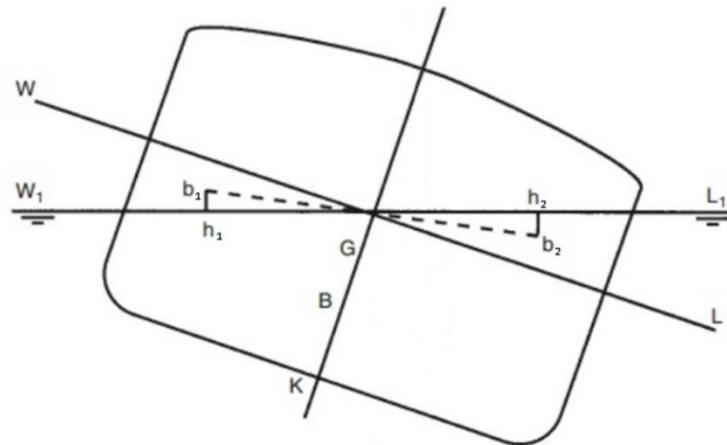
<sup>5</sup> Usualmente, as embarcações navegam aprumadas, ou seja, com ângulo de banda de  $0^\circ$  na condição de equilíbrio. No entanto, no caso da existência de um ângulo de banda inicial, a energia potencial de restauração transversal deve considerar a existência de tal ângulo.

<sup>6</sup> A rigor, na Fórmula de Moseley, a Equação 2 é multiplicada pelo deslocamento  $\Delta$ , fornecendo uma grandeza a qual o autor chama de “Estabilidade Dinâmica” associada ao ângulo de banda  $\Theta$  da embarcação.

$$\int_0^\theta GZ(\theta) d\theta = \left[ \frac{\nu(b_1 h_1 + b_2 h_2)}{\nabla} - BG(1 - \cos\theta) \right] \quad (2)$$

Onde  $\nabla$  é o volume deslocado da embarcação,  $\nu$  o volume da cunha que emerge,  $b_1 h_1$  representa o deslocamento vertical do centroide da cunha emergida,  $b_2 h_2$  representa o deslocamento vertical do centroide da cunha imergida e  $BG$  é a distância vertical entre o centro de carena e o centro de gravidade da embarcação (Figura 9).

**Figura 9** – Novas posições dos centroides dos volumes submersos.



Fonte: Adaptado de Barrass (2006).

## 2.4 CONCEITO DE MASSA ADICIONAL DE ROTAÇÃO

De acordo com Konstantinidis (2013), sempre que uma aceleração é imposta à um corpo submerso, forças inerciais adicionais agem nesse corpo devido ao deslocamento do fluido que o circunda.

Korotkin (2007) esclarece que as forças e momentos de natureza inerciais podem ser descritos na forma de massas adicionais ao corpo, estando presentes não somente em movimentos acelerados, mas também em movimentos de velocidade constante.

Resultados experimentais (DNV-RP-H103, 2010) mostram que a massa adicional referente a oscilação vertical de um cilindro flutuando na horizontal pode ser calculada usando a Equação 3.

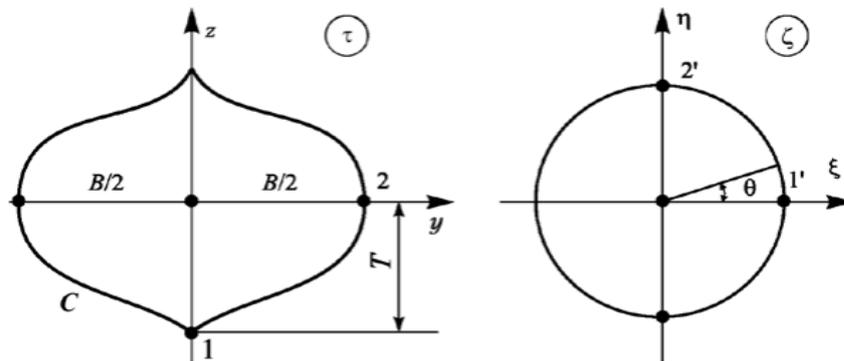
$$Massa\ Adicional = L \rho \pi r^2 \quad (3)$$

Onde  $L$  representa o comprimento do cilindro,  $\rho$  representa a massa específica do fluido e  $r$  representa o raio do cilindro.

No caso de corpos com comprimento predominante em relação ao calado e à boca, a massa adicional pode ser estimada como a soma da massa adicional gerada por cada uma das seções isoladamente (DNV-RP-H103, 2010).

É evidente que os cascos de embarcações não possuem seções cilíndricas. Por essa razão, Korotkin (2007) descreve um método matemático o qual permite que as seções de uma embarcação possam ser transformadas em um cilindro equivalente (Figura 10).

**Figura 10** - Método da transformação em cilindro equivalente.



Fonte: Korotkin (2007).

A partir do conceito de transformação geométrica, o modelo matemático utilizado para o cálculo da massa adicional devido ao movimento vertical de uma seção pode ser representado pela Equação 4.

$$\text{Massa adicional de uma seção} = \frac{\rho \pi B^2}{8} k_{33} \quad (4)$$

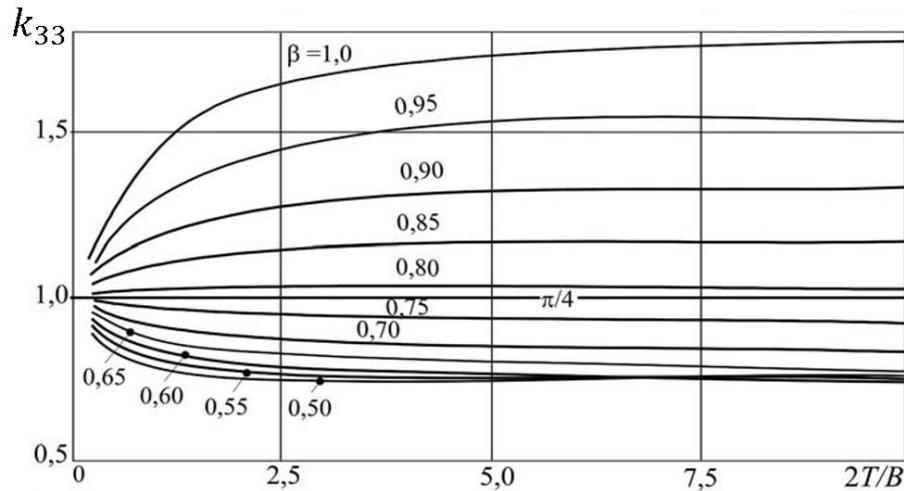
Onde  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $B$  é a boca da seção e  $k_{33}$  indica o coeficiente de transformação geométrica considerando a oscilação vertical do corpo.

Já para a obtenção do coeficiente  $k_{33}$ , inicialmente é necessário determinar o coeficiente de área submersa  $\beta$ , o qual é definido pela Equação 5, onde  $S$  representa a área submersa da seção,  $B$  a boca da seção e  $T$  o calado da seção.

$$\beta = \frac{S}{BT} \quad (5)$$

Por fim, é possível determinar o valor de  $k_{33}$  utilizando-se a Figura 11, onde o coeficiente de massa adicional é definido com base no valor de  $\beta$  e na relação  $2T/B$ .

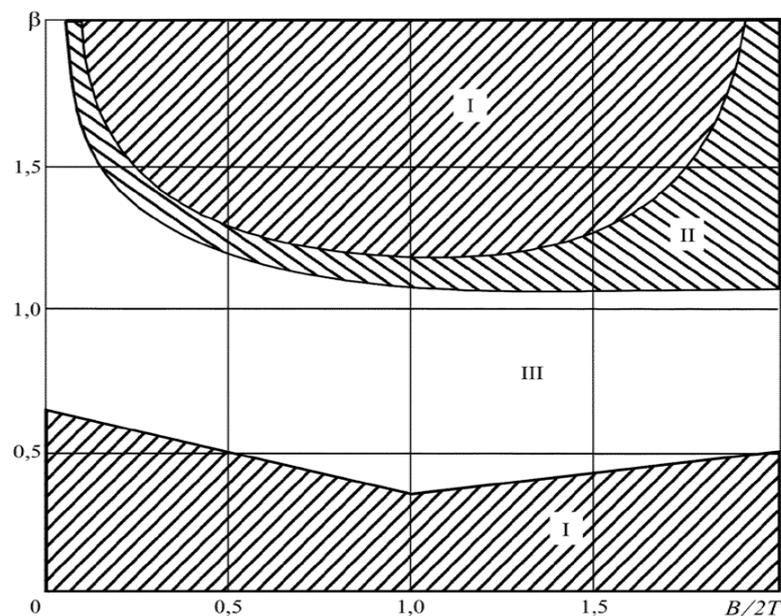
**Figura 11** – Representação gráfica do coeficiente  $k_{33}$ .



Fonte: Adaptado de Korotkin (2007).

Embora, segundo Korotkin (2007), a massa adicional de um casco possa ser estimada com base na teoria potencial, é importante observar que Lorotkin (2007) estabelece que essa abordagem é válida somente quando os valores de  $\beta$  e  $2T/B$  representam uma coordenada na região III da Figura 12.

**Figura 12** - Validade do cálculo da massa adicional usando a teoria potencial.



Fonte: Korotkin (2007).

## 2.5 ESTABILIDADE AVARIADA DE UMA EMBARCAÇÃO

Toda embarcação, durante a navegação, está sujeita à ocorrência de avarias. Para efeitos deste trabalho, considera-se uma avaria como sendo qualquer dano que atinja a estrutura externa do casco, de modo a influenciar a flutuabilidade, equilíbrio e/ou estabilidade da embarcação.

De acordo com Dokkum et al (2008), a análise referente ao desempenho da embarcação quando avariada deve ser realizada ainda na fase de projeto, devendo ser aprovada pela Sociedade Classificadora antes da construção. Isso demonstra a importância dessa análise para o resguardo da vida humana e a segurança da embarcação.

A Convenção Internacional para Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS, 1974) indica os tipos de embarcação, os quais devem, necessariamente, apresentar a documentação referente à análise da estabilidade avariada. Entre os tipos de embarcações que exigem tal análise, destacam-se as embarcações: de passageiros, gaseiros, transportadores de produtos químicos, de apoio *offshore* (PSV) e cargueiros acima de 80 metros de comprimento de subdivisão.

Dada a importância da análise de estabilidade avariada para o projeto conceitual de uma embarcação, por vezes, ainda que a SOLAS (1974) não exija tal análise, essa solicitação pode ser feita pela Sociedade Classificadora devido a questões estruturais ou de operação que estejam fora das normas básicas ou sejam assuntos pontuais que interfiram na segurança a bordo.

### 3 METODOLOGIA

Segundo Prodanov (2013), a definição da metodologia consiste no estudo, compreensão e avaliação dos possíveis métodos para a realização de uma pesquisa acadêmica. Assim, a metodologia trata, portanto, de procedimentos e técnicas destinados à construção do conhecimento, com o propósito de comprovar sua validade e utilidade nos diversos âmbitos da sociedade.

Já como visto em Tancredi (2020), as ferramentas são elementos utilizados para viabilizar, facilitar e/ou acelerar a aplicação das técnicas empregadas na análise, sendo que a metodologia pode ser definida como o conjunto das técnicas, processos e ferramentas utilizadas em um estudo. Dentro desse contexto, na Figura 13 é apresentado um fluxograma que resume a metodologia empregada neste trabalho e cujas principais características são descritas ao longo deste capítulo.

Em relação as ferramentas computacionais, optou-se pela utilização dos programas *Bentley MAXSURF Modeler* e *Bentley MAXSURF Stability*<sup>7</sup>. A escolha dessas ferramentas considerou dois fatores: a disponibilidade de licenças na Universidade, além da confiabilidade e uso que elas têm na indústria naval. Além disso, será utilizada a ferramenta *Microsoft Excel*, a qual permite construir tabelas e gráficos que facilitam a sistematização e a análise dos resultados.

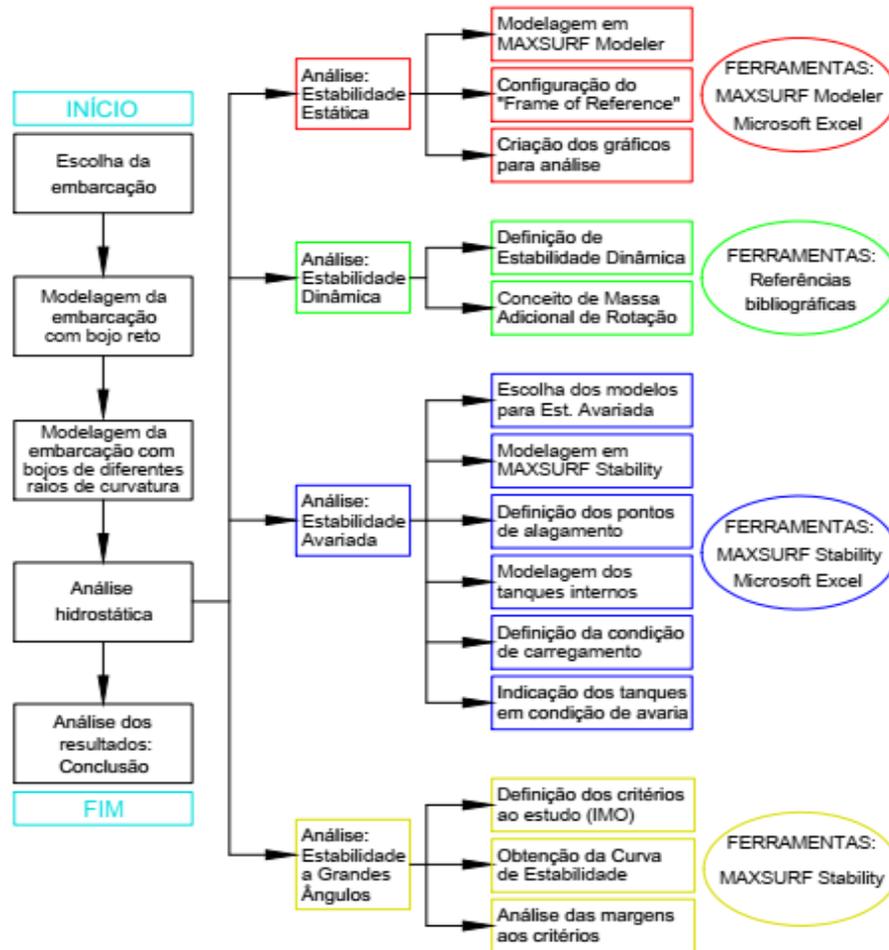
É importante observar que a utilização dessas ferramentas facilita a modelagem e a análise de diferentes geometrias de uma mesma embarcação, permitindo que a forma do bojo seja variada sistematicamente.

Para o estudo de estabilidade estática, os modelos foram divididos em dois grupos: os de calado constante e os de deslocamento constante. Sendo que em todos os casos, os cascos das embarcações foram modelados usando três grandes blocos: um paralelogramo que corresponde ao corpo médio paralelo, uma cunha cortada, a qual determina a região de popa e, por fim, uma cunha completa, a qual corresponde ao corpo de proa.

---

<sup>7</sup> Programas *Bentley MAXSURF Modeler* e *Bentley MAXSURF Stability* em versão estudantil 23.03.00.101 fornecida pela Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em <<https://education.bentley.com/>>

Figura 13 - Fluxograma da metodologia empregada na pesquisa.



Fonte: O Autor (2022).

### 3.1 ESTUDO DE CASO

Para realizar os objetivos propostos, decidiu-se utilizar como estudo de caso uma embarcação de 7590 toneladas e coeficiente de bloco acima de 0,8, cuja geometria simplificada facilitou o processo de modelagem. As dimensões principais da embarcação escolhida são sintetizadas na Tabela 1 e representam uma geometria tipicamente associada à uma embarcação de serviço de porte médio.

Tabela 1 - Dimensões principais da embarcação de referência.

Dimensões Principais		
Deslocamento ( $\Delta$ )	7590	t
Comprimento Total ( $L_{OA}$ )	85	m
Boca Máxima ( $B_{Máx}$ )	18	m
Pontal ( $D$ )	9.2	m
Calado ( $T$ )	6.4	m
Coeficiente de Bloco ( $C_B$ )	0.813	

Fonte: O Autor (2022).

Para que o estudo tenha um caráter mais abrangente, decidiu-se analisar bojos chanfrados e curvos de diferentes amplitudes, bem como avaliar dois ângulos para o fundo (*deadrise*) e para o costado da embarcação. O conjunto das geometrias estudadas pode ser visto na Tabela 2.

**Tabela 2** - Variações geométricas estudadas.

Tipo de Bojo	Nº do Modelo	Bojo [m]	Ângulo de <i>Deadrise</i> [°]	Ângulo do Costado [°]	Igualdade à Referência
Sem bojo	1	-	1.5	0	Calado
	2	-	1.5	0	Deslocamento
	3	-	1.5	2	Calado
	4	-	1.5	2	Deslocamento
	5	-	2	0	Calado
	6	-	2	0	Deslocamento
	7	-	2	2	Calado
	8	-	2	2	Deslocamento
Chanfrado	9	Chanfro 0.3	1.5	0	Calado
	10	Chanfro 0.3	1.5	0	Deslocamento
	11	Chanfro 0.3	1.5	2	Calado
	12	Chanfro 0.3	1.5	2	Deslocamento
	13	Chanfro 0.3	2	0	Calado
	14	Chanfro 0.3	2	0	Deslocamento
	15	Chanfro 0.3	2	2	Calado
	16	Chanfro 0.3	2	2	Deslocamento
	17	Chanfro 0.6	1.5	0	Referência
	18	Chanfro 0.6	1.5	2	Calado
	19	Chanfro 0.6	1.5	2	Deslocamento
	20	Chanfro 0.6	2	0	Calado
	21	Chanfro 0.6	2	0	Deslocamento
	22	Chanfro 0.6	2	2	Calado
	23	Chanfro 0.6	2	2	Deslocamento
	24	Chanfro 0.8	1.5	0	Calado
	25	Chanfro 0.8	1.5	0	Deslocamento
	26	Chanfro 0.8	1.5	2	Calado
	27	Chanfro 0.8	1.5	2	Deslocamento
	28	Chanfro 0.8	2	0	Calado
	29	Chanfro 0.8	2	0	Deslocamento
	30	Chanfro 0.8	2	2	Calado
	31	Chanfro 0.8	2	2	Deslocamento
	Curvo	32	Curvo 0.3	1.5	0
33		Curvo 0.3	1.5	0	Deslocamento
34		Curvo 0.3	1.5	2	Calado
35		Curvo 0.3	1.5	2	Deslocamento
36		Curvo 0.3	2	0	Calado
37		Curvo 0.3	2	0	Deslocamento
38		Curvo 0.3	2	2	Calado
39		Curvo 0.3	2	2	Deslocamento
40		Curvo 0.6	1.5	0	Calado
41		Curvo 0.6	1.5	0	Deslocamento
42		Curvo 0.6	1.5	2	Calado
43		Curvo 0.6	1.5	2	Deslocamento
44		Curvo 0.6	2	0	Calado
45		Curvo 0.6	2	0	Deslocamento
46		Curvo 0.6	2	2	Calado
47		Curvo 0.6	2	2	Deslocamento
48		Curvo 0.8	1.5	0	Calado
49		Curvo 0.8	1.5	0	Deslocamento
50		Curvo 0.8	1.5	2	Calado
51		Curvo 0.8	1.5	2	Deslocamento
52		Curvo 0.8	2	0	Calado
53		Curvo 0.8	2	0	Deslocamento
54		Curvo 0.8	2	2	Calado
55		Curvo 0.8	2	2	Deslocamento

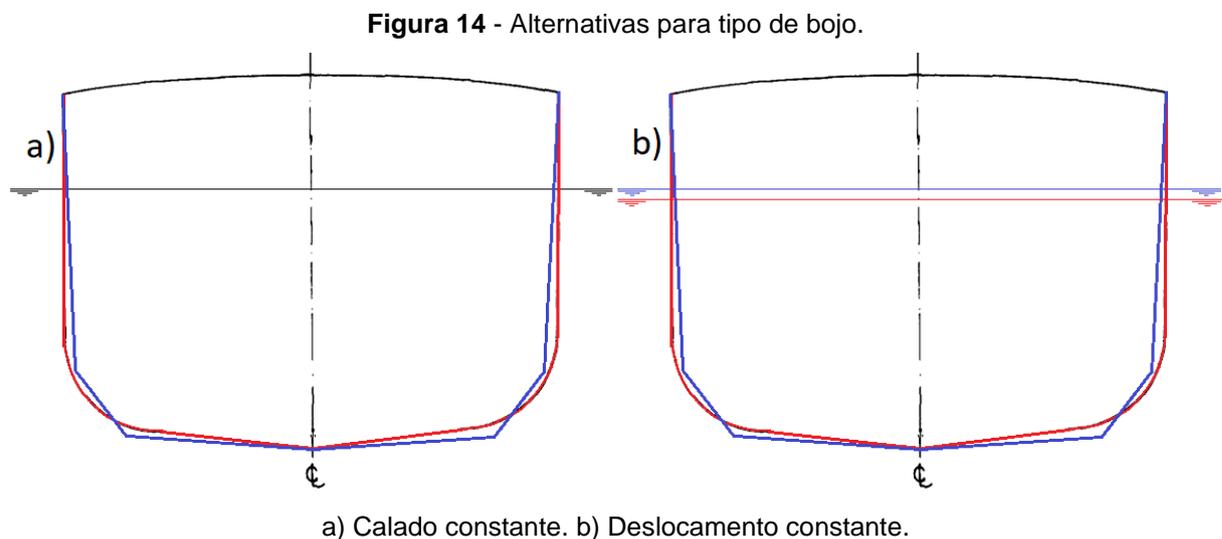
Fonte: O Autor (2022).

### 3.2 MODELAGEM

Conforme já mencionado, objetivando uma comparação assertiva, as geometrias estudadas foram divididas em dois grupos: as de calado constante e as de deslocamento constante.

Assim, uma geometria de bojo curvo poderá ser comparada com uma geometria de bojo chanfrado considerando que ambas têm o mesmo calado ou considerando que ambas têm o mesmo deslocamento.

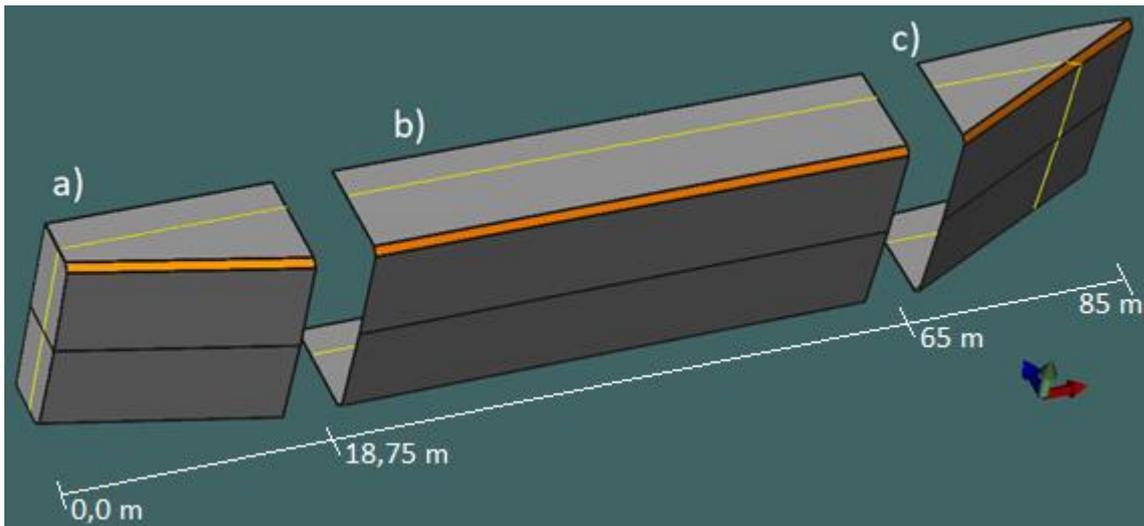
Para compreender os efeitos do tipo de bojo na geometria do casco, na Figura 14a são comparados os casos de bojo curvo (em vermelho) e bojo chanfrado (em azul) considerando que ambas as geometrias possuem o mesmo calado. Já na Figura 14b são comparados os casos de bojo curvo (em vermelho) e bojo chanfrado (em azul) considerando que ambas as geometrias possuem o mesmo deslocamento.



Fonte: O Autor (2022).

Cada uma das geometrias de bojo estudada foi modelada a partir de três blocos: popa, corpo central e proa. O bloco de popa foi modelado em forma de uma cunha cortada verticalmente para representar o espelho de popa (Figura 15a). Já o corpo central foi definido por um paralelogramo gerado a partir da extrusão da seção mestra (Figura 15b). Por fim, o bloco de proa foi modelado como uma cunha completa (Figura 15c).

**Figura 15** - Modelagem dos cascos usando blocos padronizados.



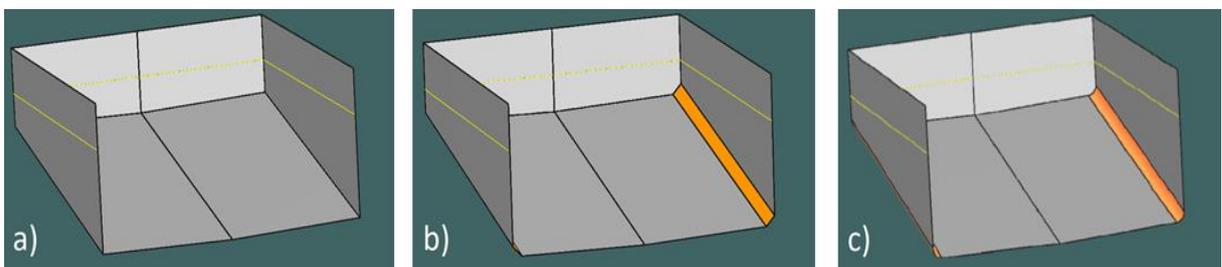
Fonte: O Autor (2022).

O bloco de popa inicia, longitudinalmente, em 0,0 metro e se estende por 18,75 metros. O bloco central, por sua vez, segue até a marca de 65 metros do eixo longitudinal. Já o bloco de proa finaliza o modelo, se estendendo até a marca de 85 metros do eixo longitudinal.

A boca da embarcação é constante ao longo de todo o casco, enquanto o pontal reduz linearmente nos corpos de proa e popa. Em todas as seções, a forma do bojo é mantida constante, sendo que apenas a altura do costado diminui ao longo das cunhas de proa e popa. Já a transição entre os blocos ocorre de maneira suave e natural, visto que os blocos de proa e de popa compartilham a mesma seção usada na modelagem do corpo médio paralelo.

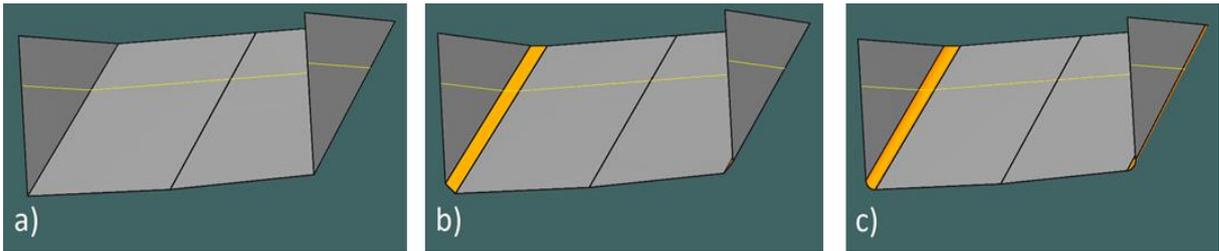
Para facilitar a visualização, nas Figuras 16 e 17 são mostrados os blocos de popa e proa considerando a opção sem bojo (Figuras 16a e 17a), com bojo chanfrado (Figuras 16b e 17b) e, por fim, a opção com bojo curvo (Figuras 16c e 17c).

**Figura 16** - Modelagem dos blocos de popa.



Fonte: O Autor (2022).

**Figura 17** - Modelagem dos blocos de proa.



Fonte: O Autor (2022).

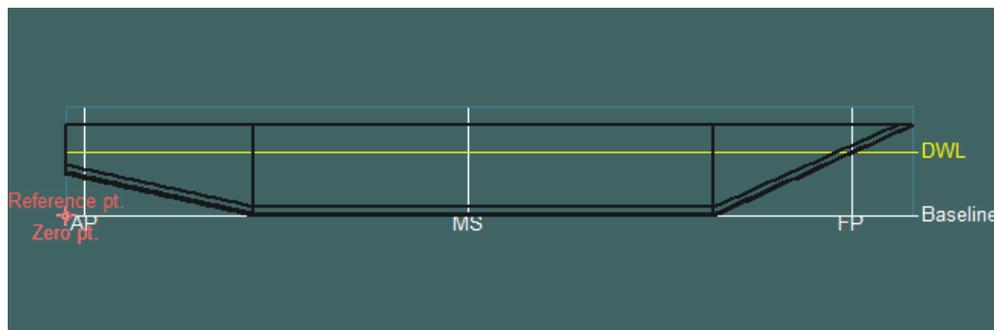
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguindo os objetivos estabelecidos na introdução e a metodologia descrita no capítulo anterior, este capítulo apresenta os resultados obtidos, bem como as discussões e análises realizadas.

### 4.1 CONFIGURAÇÃO DOS MODELOS

Conforme descrito na metodologia, as análises numéricas foram realizadas com auxílio do programa *MAXSURF Stability*. A configuração do sistema de referências usado nas análises foi realizada com o comando “*Data > Frame of Reference*”, sendo que a origem do sistema foi determinada como estando localizada no espelho de popa, no plano diametral e junto à linha de base (Figura 18).

**Figura 18** - Informações de referência para MAXSURF.



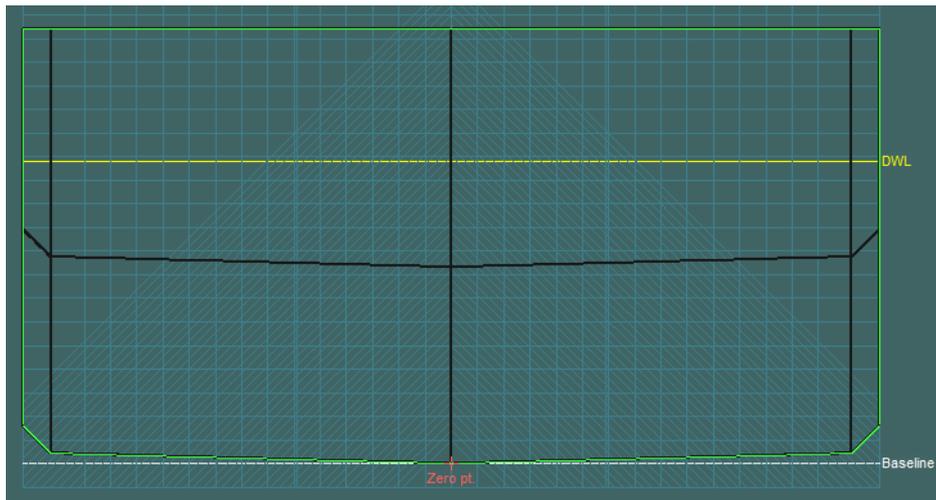
Fonte: O Autor (2022).

A definição da perpendicular de ré considera a linha ortogonal ao plano de base que passa pela linha de centro da madre do leme. Já a definição da perpendicular de vante, considera a linha ortogonal que passa pela intersecção entre a linha d'água de projeto e a linha de perfil de proa (NBR 8035 TB-228, 1989).

A estimativa do calado de projeto foi realizada com base em embarcações de serviço de dimensões semelhantes, resultando no valor de 6,4 metros, o que estabeleceu um deslocamento de projeto de 7590 toneladas.

A embarcação de referência, a partir da qual foram construídas as variações estudadas, possui um ângulo de *deadrise* de  $1,5^\circ$ , um bojo chanfrado com largura de chanfro de 0,6 metro e um costado vertical (Figura 19).

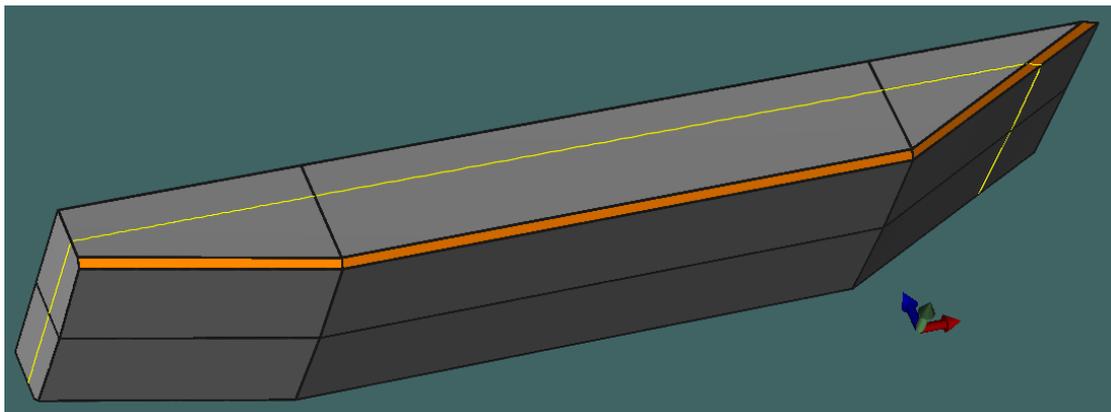
**Figura 19** - Seção transversal da embarcação de referência.



Fonte: O Autor (2022).

Na Figura 20 é mostrado o resultado da modelagem da embarcação de referência, onde a região destacada em laranja corresponde ao bojo chanfrado, enquanto a linha amarela delimita a superfície da linha d'água no calado de projeto.

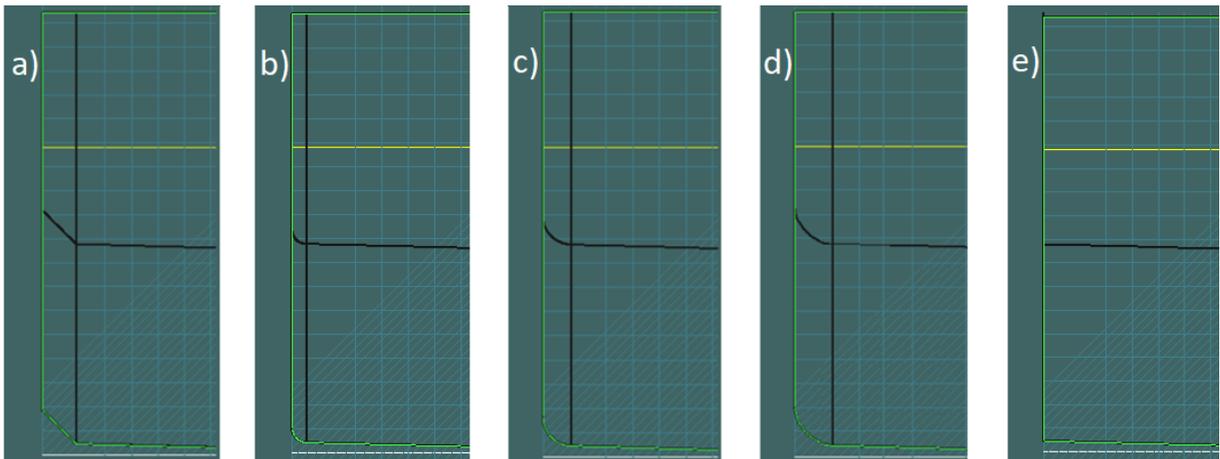
**Figura 20** - Modelo referência em MAXSURF.



Fonte: O Autor (2022).

Para que as embarcações possam ser visualmente comparadas quanto à forma do bojo, na Figura 21 são mostradas as seções mestras de cinco das 55 geometrias estudadas: a primeira possui bojo com chanfro de 0,6 metro (a), a segunda possui bojo curvo com raio de curvatura de 0,3 metro (b), a terceira possui bojo curvo com raio de curvatura de 0,6 metro (c), a quarta possui bojo curvo com raio de curvatura de 0,8 metro (d) e, por último, a geometria sem bojo (e). Destaca-se que essas geometrias foram modeladas com ângulo de *deadrise* de  $1,5^\circ$  e costado vertical.

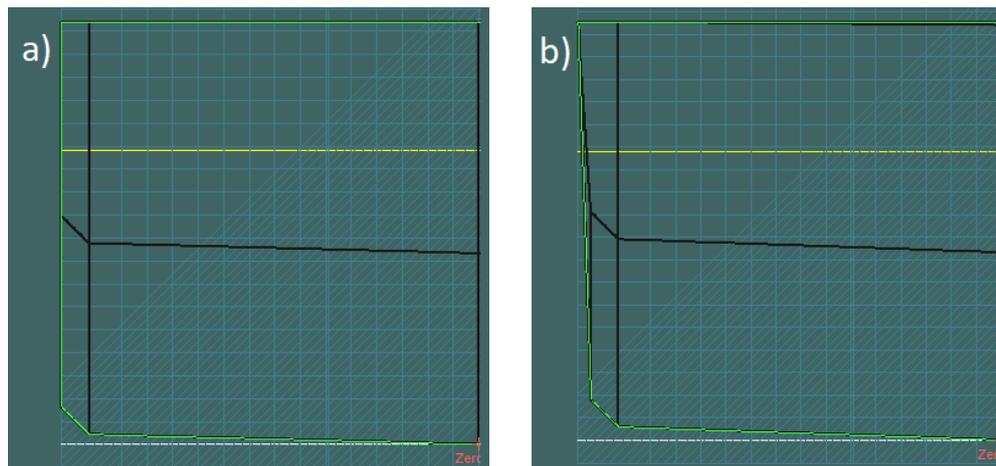
**Figura 21** – Algumas alternativas de bojos estudadas.



Fonte: O Autor (2022).

Conforme discutido na metodologia, procurou-se também avaliar o efeito que o aumento do ângulo de *deadrise* ( $2^\circ$ ), combinado com o uso de uma inclinação de  $2^\circ$  no costado, exerce na estabilidade transversal da embarcação estudada. Para facilitar a visualização, na Figura 22 é mostrada uma comparação entre ambos os conceitos estudados, considerando a geometria com bojo chanfrado.

**Figura 22** – Alternativas de ângulo de *deadrise* e de costado estudadas.



a) Embarcação de referência, modelada com ângulo de *deadrise* de  $1,5^\circ$  e costado vertical.

b) Seção mestra com ângulo de *deadrise* de  $2^\circ$  e costado com  $2^\circ$  de inclinação.

Fonte: O Autor (2022).

## 4.2 COMPARAÇÃO DOS DADOS HIDROSTÁTICOS

Uma vez modeladas as geometrias enumeradas na Tabela 2, e realizadas as análises hidrostáticas, os resultados obtidos são sistematizados na Tabela 3 (embarcações de calado constante) e Tabela 4 (embarcações de deslocamento constante).

**Tabela 3 - Dados hidrostáticos: calado constante.**

Nº do modelo	Bojo [m]	Ângulo de Deadrise [°]	Ângulo de Costado [°]	Deslocamento [t]	Calado [m]	$C_M$	KB [m]	KM [m]
1	Sem bojo	1.5	0	7623	6.400	0.982	3.532	8.677
3	Sem bojo	1.5	2	7535	6.400	0.971	3.542	8.714
5	Sem bojo	2	0	7571	6.400	0.978	3.548	8.728
7	Sem bojo	2	2	7481	6.400	0.966	3.558	8.764
9	Chanfro 0.3	1.5	0	7617	6.400	0.982	3.534	8.682
11	Chanfro 0.3	1.5	2	7520	6.400	0.970	3.545	8.735
13	Chanfro 0.3	2	0	7562	6.400	0.976	3.551	8.733
15	Chanfro 0.3	2	2	7475	6.400	0.965	3.561	8.787
17	Chanfro 0.6	1.5	0	7590	6.400	0.979	3.542	8.701
18	Chanfro 0.6	1.5	2	7497	6.400	0.967	3.553	8.753
20	Chanfro 0.6	2	0	7533	6.400	0.973	3.559	8.753
22	Chanfro 0.6	2	2	7443	6.400	0.961	3.570	8.805
24	Chanfro 0.8	1.5	0	7565	6.400	0.976	3.549	8.721
26	Chanfro 0.8	1.5	2	7471	6.400	0.964	3.560	8.774
28	Chanfro 0.8	2	0	7508	6.400	0.970	3.566	8.775
30	Chanfro 0.8	2	2	7416	6.400	0.958	3.577	8.827
32	Curvo 0.3	1.5	0	7619	6.400	0.982	3.534	8.681
34	Curvo 0.3	1.5	2	7529	6.400	0.970	3.544	8.732
36	Curvo 0.3	2	0	7564	6.400	0.976	3.550	8.731
38	Curvo 0.3	2	2	7477	6.400	0.965	3.561	8.785
40	Curvo 0.6	1.5	0	7604	6.400	0.980	3.538	8.692
42	Curvo 0.6	1.5	2	7512	6.400	0.968	3.549	8.746
44	Curvo 0.6	2	0	7553	6.400	0.975	3.553	8.739
46	Curvo 0.6	2	2	7459	6.400	0.963	3.565	8.795
48	Curvo 0.8	1.5	0	7595	6.400	0.979	3.540	8.699
50	Curvo 0.8	1.5	2	7498	6.400	0.968	3.551	8.748
52	Curvo 0.8	2	0	7539	6.400	0.973	3.558	8.750
54	Curvo 0.8	2	2	7448	6.400	0.962	3.568	8.803
			<b>Maior</b>	7623	6.400	0.982	3.577	8.827
			<b>Menor</b>	7416	6.400	0.958	3.532	8.677
			<b>Média</b>	7529	6.400	0.971	3.552	8.744
			<b>Desvio Padrão</b>	57.80	0.000	0.007	0.012	0.040

Fonte: O Autor (2022).

Tabela 4 - Dados hidrostáticos: deslocamento constante.

Nº do modelo	Bojo [m]	Ângulo de Deadrise [°]	Ângulo de Costado [°]	Deslocamento [t]	Calado [m]	$C_M$	KB [m]	KM [m]	
2	Sem bojo	1.5	0	7590	6.377	0.982	3.520	8.685	
4	Sem bojo	1.5	2	7590	6.438	0.972	3.563	8.708	
6	Sem bojo	2	0	7590	6.414	0.977	3.556	8.723	
8	Sem bojo	2	2	7590	6.473	0.967	3.599	8.740	
10	Chanfro 0.3	1.5	0	7590	6.382	0.982	3.524	8.688	
12	Chanfro 0.3	1.5	2	7590	6.448	0.970	3.571	8.717	
14	Chanfro 0.3	2	0	7590	6.419	0.976	3.561	8.725	
16	Chanfro 0.3	2	2	7590	6.480	0.964	3.606	8.769	
17	Chanfro 0.6	1.5	0	7590	6.400	0.979	3.542	8.701	
19	Chanfro 0.6	1.5	2	7590	6.464	0.967	3.588	8.741	
21	Chanfro 0.6	2	0	7590	6.439	0.973	3.580	8.738	
23	Chanfro 0.6	2	2	7590	6.501	0.961	3.625	8.780	
25	Chanfro 0.8	1.5	0	7590	6.418	0.976	3.558	8.717	
27	Chanfro 0.8	1.5	2	7590	6.482	0.964	3.605	8.758	
29	Chanfro 0.8	2	0	7590	6.457	0.970	3.597	8.754	
31	Chanfro 0.8	2	2	7590	6.520	0.958	3.643	8.796	
33	Curvo 0.3	1.5	0	7590	6.380	0.982	3.523	8.688	
35	Curvo 0.3	1.5	2	7590	6.446	0.971	3.569	8.710	
37	Curvo 0.3	2	0	7590	6.416	0.976	3.559	8.724	
39	Curvo 0.3	2	2	7590	6.482	0.965	3.606	8.765	
41	Curvo 0.6	1.5	0	7590	6.390	0.980	3.532	8.695	
43	Curvo 0.6	1.5	2	7590	6.453	0.969	3.578	8.731	
45	Curvo 0.6	2	0	7590	6.427	0.975	3.569	8.732	
47	Curvo 0.6	2	2	7590	6.489	0.963	3.618	8.771	
49	Curvo 0.8	1.5	0	7590	6.397	0.979	3.538	8.700	
51	Curvo 0.8	1.5	2	7590	6.463	0.968	3.585	8.738	
53	Curvo 0.8	2	0	7590	6.435	0.973	3.577	8.737	
55	Curvo 0.8	2	2	7590	6.497	0.962	3.622	8.779	
				<b>Maior</b>	7590	6.520	0.982	3.643	8.796
				<b>Menor</b>	7590	6.377	0.958	3.520	8.685
				<b>Média</b>	7590	6.442	0.971	3.576	8.733
				<b>Desvio Padrão</b>	0.00	0.040	0.007	0.033	0.031

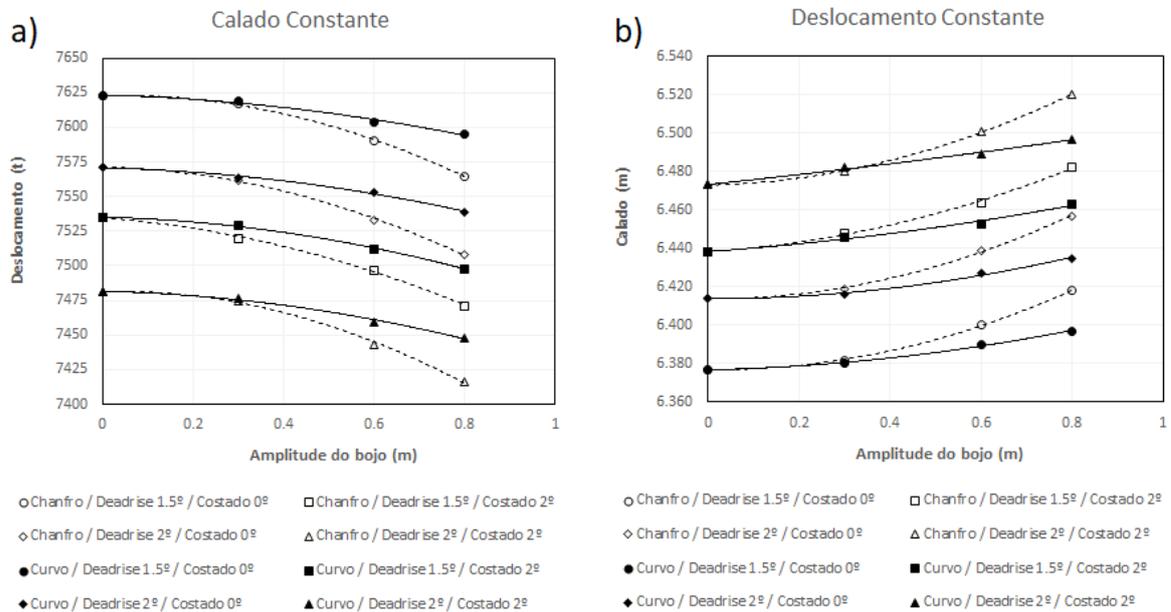
Fonte: O Autor (2022).

Analisando os resultados, observa-se que as variações numéricas são pequenas, mas se intensificam com o aumento da região do bojo.

Com relação ao deslocamento, a variação entre o maior e o menor valor foi de 207 toneladas, o que representa aproximadamente 2,7% do deslocamento da embarcação de referência. Para o calado, a variação foi de 0,143 metro, ou 2,2% do calado de referência. Já para o coeficiente de seção mestra, a amplitude da variação foi de 0,024, ou 2,5% do  $C_M$  de referência. Enquanto o  $\bar{KM}$  apresentou uma variação de 0,15 metro ou 1,7% do valor de referência. Por fim, a altura do centro de flutuação sofreu alteração de 0,123 metro, equivalente a 3,4% do  $\bar{KB}$  de referência.

Visando aprofundar a análise sobre os efeitos da alteração do formato de bojo de uma embarcação de serviço, a seguir são apresentados gráficos referentes ao deslocamento (Figura 23a), ao calado (Figura 23b), à altura do centro de flutuação (Figura 24), ao coeficiente de seção mestra (Figura 25) e à altura do metacentro (Figura 26) de cada uma das geometrias estudadas.

**Figura 23** – Influência da forma do bojo no calado e no deslocamento.



Fonte: O Autor (2022).

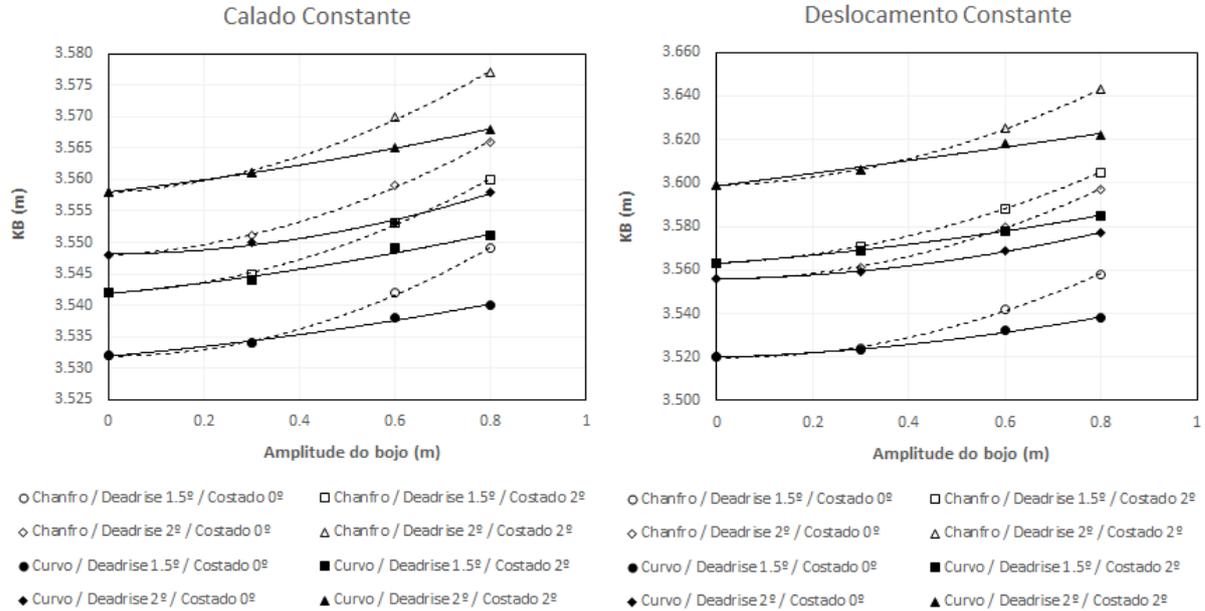
Observando a Figura 23a, constata-se que, considerando um mesmo calado de projeto, as embarcações com maiores deslocamentos são aquelas com ângulo de *deadrise* de 1,5° e costado vertical. Além disso, resta evidente que o aumento da região de bojo provoca uma redução no deslocamento de projeto, sendo que essa redução é maior nas geometrias com bojo chanfrado do que naquelas com bojo curvo.

Já quando são consideradas as embarcações operando com o mesmo deslocamento de projeto, observa-se um comportamento inverso, sendo que a embarcação de maior calado é aquela com *deadrise* de 2° e costado com 2° de inclinação. Embora as maiores variações também tenham sido observadas nas geometrias com bojo chanfrado, nesse caso, o aumento da região de bojo resulta em um aumento do calado de projeto.

Observando tanto a variação da altura do centro de flutuação  $\bar{K}\bar{B}$  em função da variação do bojo (Figura 24), quanto a variação da altura do metacentro  $\bar{K}\bar{M}$  em função da variação do bojo (Figura 25), observa-se que tanto as geometrias de calado

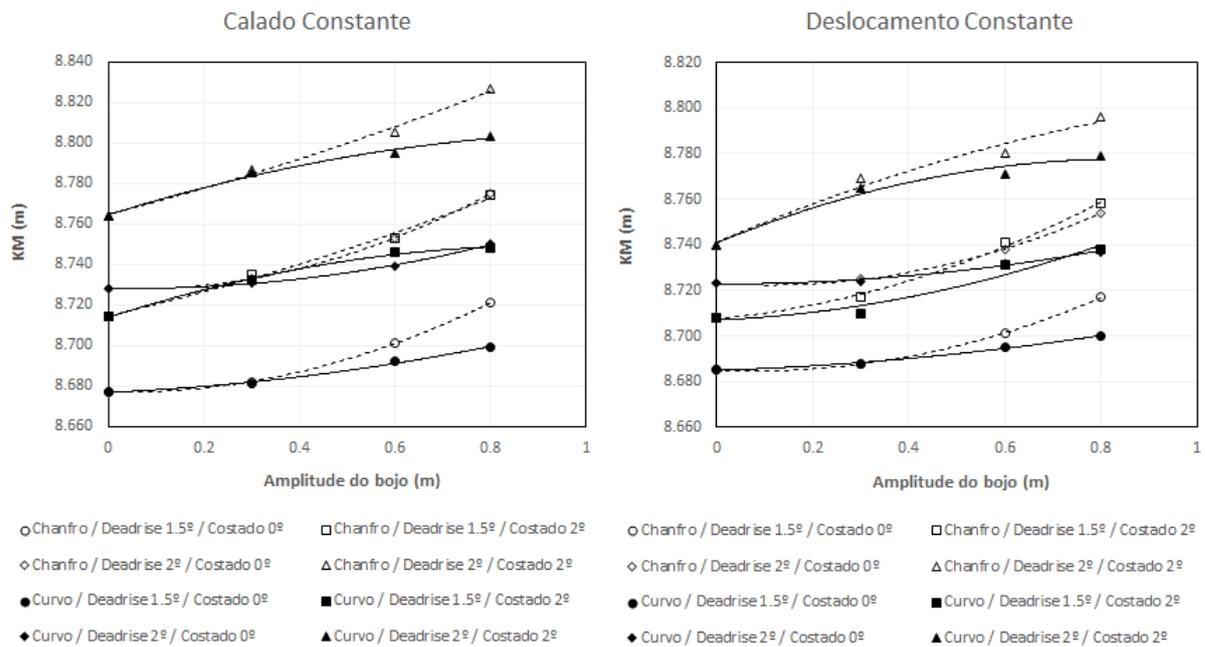
constante, quanto aquelas de deslocamento constante, apresentam aumento de  $\overline{KB}$  e  $\overline{KM}$  com o aumento da região de bojo do navio. Além disso, observa-se que esse aumento é maior nas geometrias com bojo chanfrado do que naquelas com bojo curvo.

**Figura 24 - Influência da forma do bojo no  $\overline{KB}$ .**



Fonte: O Autor (2022).

**Figura 25 - Influência da forma do bojo no  $\overline{KM}$ .**

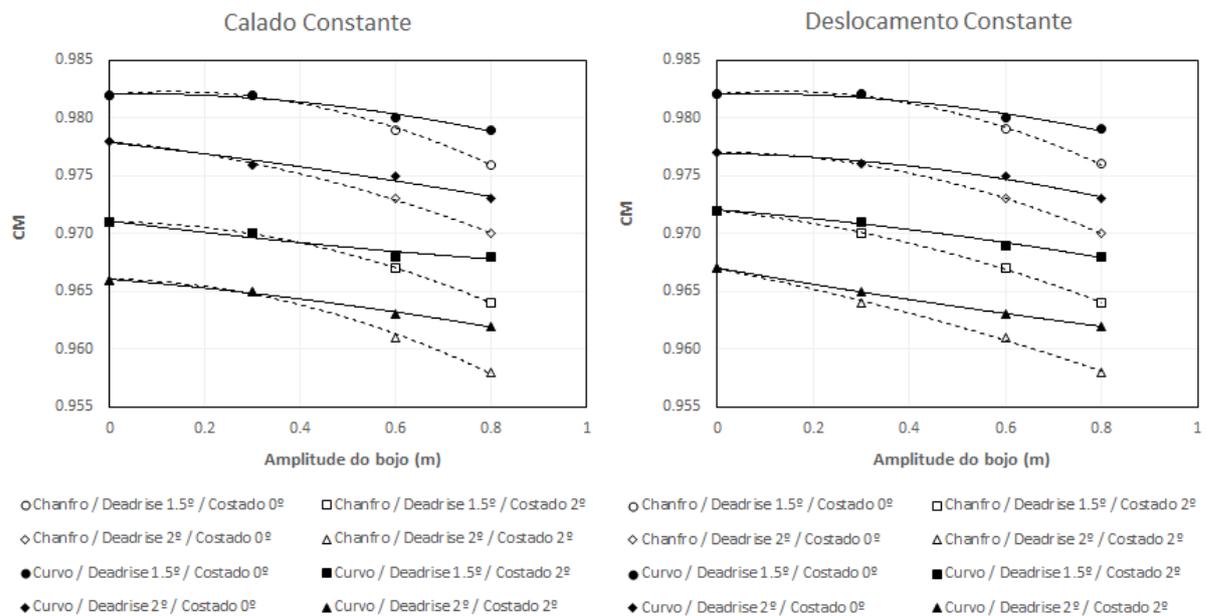


Fonte: O Autor (2022).

Por fim, observando a variação do coeficiente de seção mestra em função do aumento da região de bojo (Figura 26), constata-se que o valor de  $C_M$  é reduzido com o aumento da região de bojo do navio, tanto nas geometrias com calado constante quanto naquelas com deslocamento constante.

Além disso, observa-se que a presença de um ângulo no costado reduz consideravelmente o valor de  $C_M$ , o que corrobora com a definição apresentada anteriormente, tendo em vista que a área submersa da seção mestra tende a ocupar uma menor fração do retângulo que a contorna.

**Figura 26** - Influência da forma do bojo no  $C_M$ .



Fonte: O Autor (2022).

#### 4.3 DISCUSSÕES SOBRE A ESTABILIDADE ESTÁTICA

Observando os resultados, é possível perceber que a forma da seção tem influência direta na estabilidade da embarcação, sendo que a variação da forma do bojo afeta diversos aspectos do projeto.

Os resultados mostraram que a distância vertical do centro de flutuação  $\overline{KB}$ , é inversamente proporcional ao coeficiente de seção mestra  $C_M$ . Esse mesmo resultado já havia sido relatado por outros pesquisadores, como por exemplo Chaves et al. (2013). Por fim, observou-se que o valor da altura do metacentro  $\overline{KM}$  aumenta com o aumento da amplitude do bojo, sendo que as geometrias com bojo chanfrado apresentaram variações mais intensas do que as geometrias de bojo curvo.

De maneira geral, é possível afirmar que, mantida a posição do centro de gravidade do navio, o aumento da amplitude do bojo resulta em uma maior estabilidade transversal da embarcação. Sendo que esse efeito é maior se forem consideradas geometrias com bojo chanfrado.

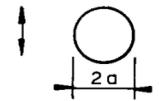
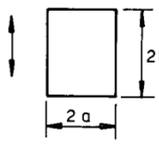
#### 4.4 DISCUSSÕES SOBRE A ESTABILIDADE DINÂMICA

Tendo em vista o equacionamento abordado por Korotkin (2007), percebe-se que o conceito de massa adicional de rotação é influenciado diretamente por parâmetros geométricos da embarcação, tais como: calado, boca e área submersa.

Ainda que os resultados para estabilidade estática sejam próximos, percebe-se que as influências da forma da seção transversal são amplificadas no quesito de estabilidade dinâmica. Isto ocorre devido a influência da massa adicional na frequência e no amortecimento do movimento de rotação, o que tende a mitigar os problemas de instabilidade dinâmica.

Na Figura 27 são mostrados os coeficientes relativos à massa adicional para seções circulares e retangulares.

**Figura 27 - Coeficientes da massa adicional.**

Seção do corpo	Direção do movimento	$C_A$	$A_R$	Mom. Inércia da Massa Ad. [(kg/m)*m <sup>2</sup> ]			
		1.0	$\pi a^2$	0			
 a / b = ∞ a / b = 10 a / b = 5 a / b = 2 a / b = 1 a / b = 0.5 a / b = 0.2 a / b = 0.1	Vertical	1.0	$\pi a^2$	$\beta_1 \rho \pi a^4$ or $\beta_2 \rho \pi b^4$			
					a/b	$\beta_1$	$\beta_2$
					0.1	-	0.147
					0.2	-	0.15
					0.5	-	0.15
					1.0	0.234	0.234
					2.0	0.15	-
					5.0	0.15	-
					∞	0.125	-
					2.23		

Fonte: Adaptado de DNV-RP-H103 (2010).

Observando os valores associados a massa adicional de rotação, constata-se que uma embarcação sem bojo, ou com bojo chanfrado, acaba por gerar uma maior massa adicional e, por esse motivo, tende a sofrer um maior amortecimento durante o movimento, resultando em uma maior dissipação de energia.

Já uma maior dissipação de energia, por sua vez, tende a aumentar a capacidade da embarcação sobreviver a oscilações transversais causadas por perturbações sucessivas.

#### 4.5 ESTUDO SOBRE A ESTABILIDADE AVARIADA

Para realizar o estudo de estabilidade avariada, foram selecionadas duas geometrias dentre aquelas descritas na Tabela 2. Visando uma comparação assertiva entre uma embarcação de bojo chanfrado e uma de bojo curvo, foram selecionadas geometrias cuja largura do chanfro e o raio de curvatura possuem o mesmo valor da embarcação de referência utilizada neste estudo.

Além disso, visando a operação em águas rasas, considerou-se a condição na qual ambas as geometrias operam com o mesmo calado. Assim, as embarcações selecionadas para o estudo de estabilidade avariada têm as características sintetizadas na Tabela 5.

**Tabela 5** - Modelos selecionados para análise de estabilidade avariada.

Nº do modelo	Bojo [m]	Ângulo de <i>Deadrise</i> [°]	Ângulo de <i>Costado</i> [°]	Deslocamento [t]	Calado [m]	$C_M$	KB [m]	KM [m]
17	Chanfro 0.6	1.5	0	7590	6.400	0.979	3.542	8.701
40	Curvo 0.6	1.5	0	7604	6.400	0.980	3.538	8.692

Fonte: O Autor (2022).

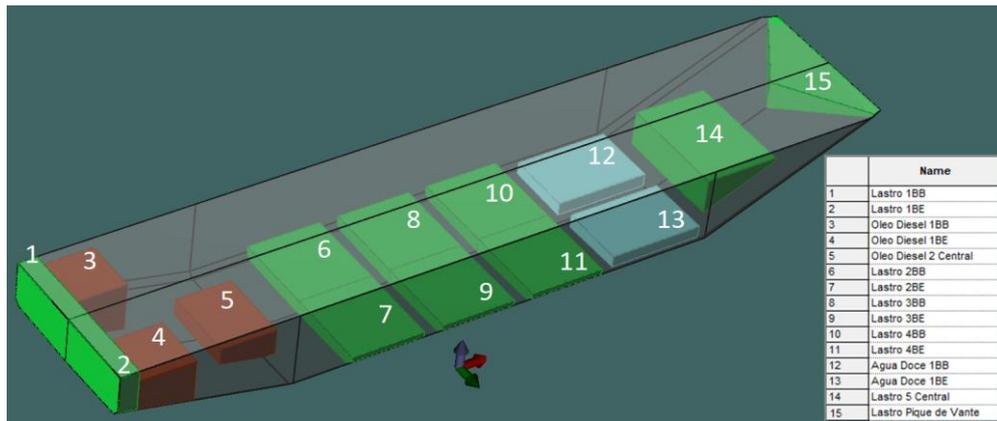
#### 4.6 DEFINIÇÃO DE TANQUES E PONTOS DE ALAGAMENTO

Para viabilizar o estudo de estabilidade avariada, a embarcação deve ser modelada considerando a existência dos compartimentos internos, de maneira que seja possível determinar os pesos e volumes a serem computados quando da ocorrência de avarias no casco.

Observando embarcações semelhantes, foram considerados tanques para lastro, para óleo diesel e para água doce. Os tanques foram modelados buscando abranger todo o comprimento da embarcação, ocupando as regiões de popa, proa e duplo fundo, tal como visto em embarcações de serviço desse porte.

Para a modelagem, foi utilizado o comando “*Room Definition Window*”, onde as coordenadas que descrevem os tanques são indicadas, bem como o tipo de fluido a ser carregado, a permeabilidade e a nomenclatura referente a cada tanque. No total foram modelados quinze tanques (Figura 28).

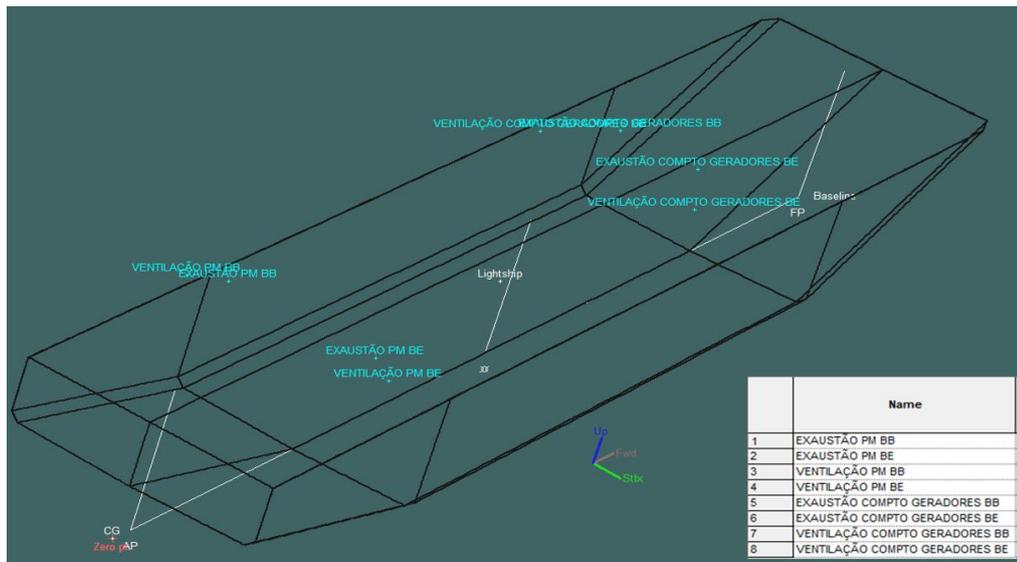
**Figura 28** - Tanques internos.



Fonte: O Autor (2022).

Tendo em vista os critérios de estabilidade definidos na resolução MSC.267(85) do Código Internacional de Estabilidade Intacta (IMO, 2008), foram estipulados sete possíveis pontos de alagamento, os quais foram posicionados em regiões da superestrutura, tanto à bombordo quanto à boreste da embarcação. Os pontos de alagamento indicados correspondem à ventilação e exaustão da praça de máquinas, além daqueles associados ao compartimento dos geradores (Figura 29).

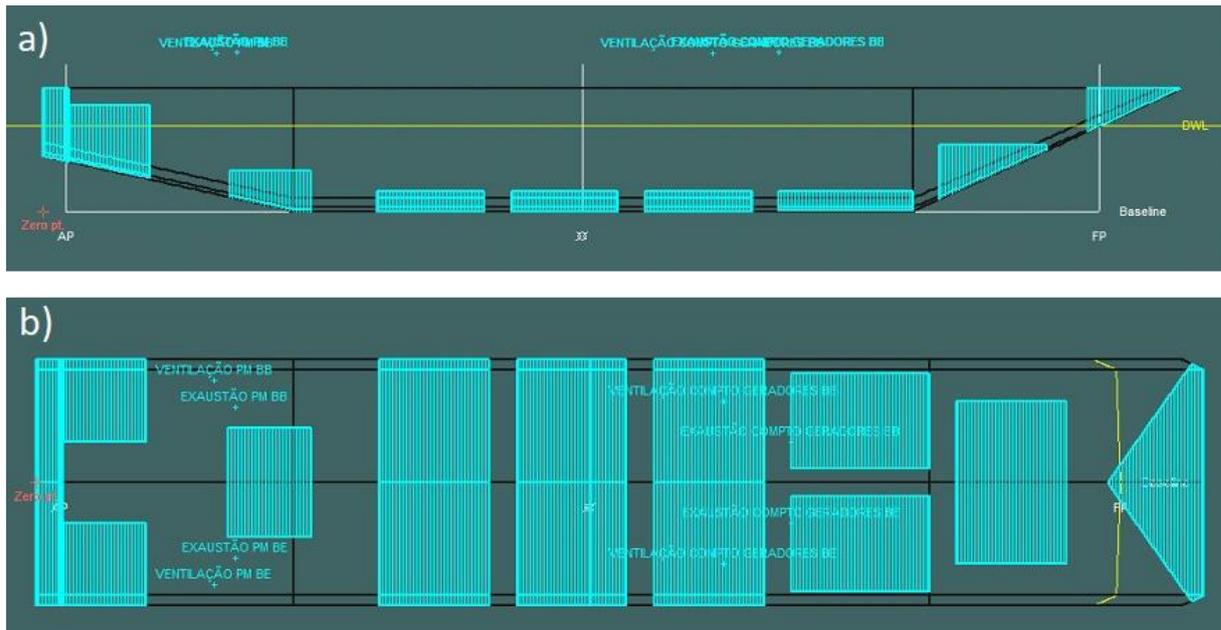
**Figura 29** - Pontos de alagamento.



Fonte: O Autor (2022).

Na Figura 30 é mostrado o resultado da modelagem dos tanques internos, bem como a indicação dos pontos de alagamento a serem considerados na análise.

**Figura 30** - Modelagem dos tanques e pontos de alagamento.



a) Vista lateral. b) Vista superior. Fonte: O Autor (2022).

Por fim, no Apêndice A é apresentada a descrição das coordenadas utilizadas para a modelagem dos tanques, bem como dos pontos de alagamento considerados.

#### 4.7 DEFINIÇÃO DO PESO LEVE E DO CARREGAMENTO

Dando continuidade à análise, é necessário definir a condição de carregamento, a qual deve ser descrita com base na capacidade dos tanques modelados e no peso leve da embarcação.

Como o objetivo deste estudo é comparar as duas geometrias selecionadas, em uma abordagem simplificada, considerou-se que o peso morto DWT corresponde à capacidade máxima dos tanques modelados e, por consequência, a diferença entre o DWT e o deslocamento do casco corresponderá ao peso leve da embarcação.

Tomando como base a embarcação de bojo chanfrado, o deslocamento de projeto é de 7590 toneladas (Tabela 1). Dado que a capacidade total dos tanques modelados é de 1635 toneladas, o peso leve da embarcação foi estimado em 5955 toneladas.

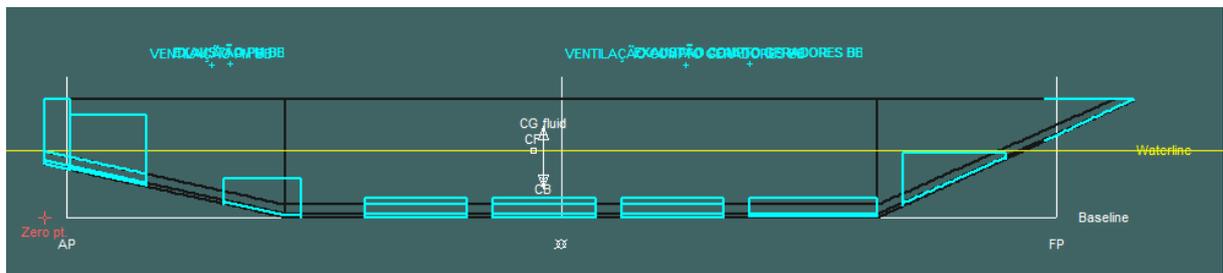
Além da estimativa de peso leve, é necessário definir a posição do centro de gravidade da embarcação. A fim de que os tanques tenham efeito predominante no

equilíbrio da embarcação, foi arbitrado que, na ausência de carga, a embarcação esteja em condição de banda e trim zero.

Dessa forma, a posição do centro de gravidade na condição leve corresponderá a posição do centro de flutuação do casco (Apêndice B). Por fim, a posição vertical do centro de gravidade foi estabelecida com base no arranjo da embarcação de referência, sendo definida em 6,5 metros.

A partir da definição do peso leve da embarcação, criou-se uma condição de carregamento inicial, na qual todos os tanques estão completamente vazios e o deslocamento corresponde ao peso leve da embarcação (Figura 31).

**Figura 31** - Equilíbrio na condição de peso leve.

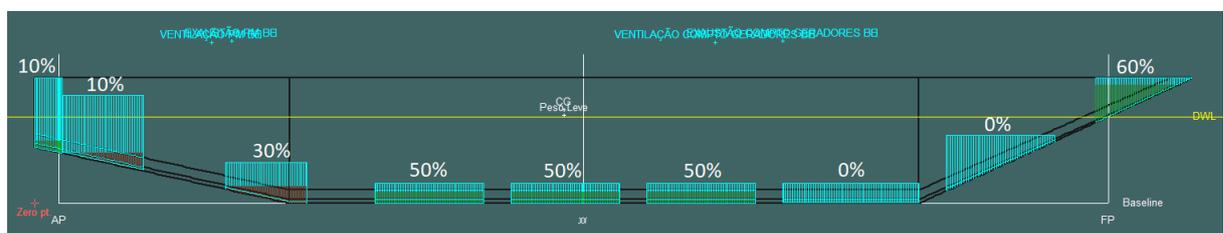


Fonte: O Autor (2022).

Para uma análise de estabilidade mais realista, faz-se necessário determinar uma condição de carregamento que envolva a utilização dos tanques internos, bem como a indicação de quais tanques estarão sujeitos à avaria.

Dessa forma, a carga dos tanques foi distribuída visando, na condição intacta, um equilíbrio com banda e trim zero. No Apêndice B são descritas a condição de carga analisada, indicando a quantidade de carga em cada tanque, bem como seus respectivos centros de gravidade. Por fim, na Figura 32 a condição de carregamento utilizada na análise de estabilidade avariada é representada graficamente.

**Figura 32** - Condição de carregamento intacta.



Fonte: O Autor (2022).

#### 4.8 CONSIDERAÇÕES NA ESTABILIDADE AVARIADA

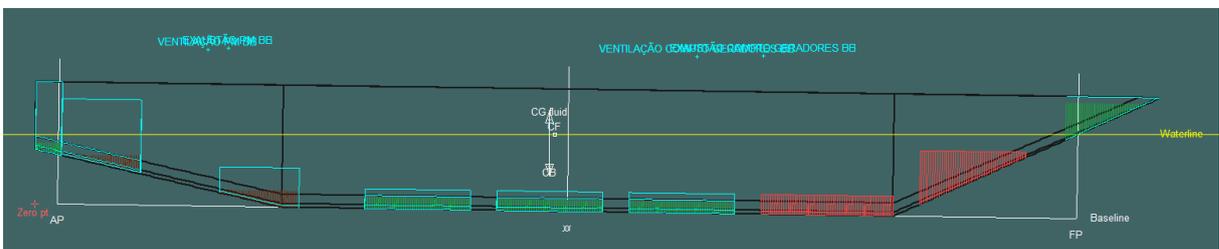
Tendo em vista a condição de carregamento estabelecida na seção anterior, faz-se necessário determinar quais tanques sofrerão avarias durante a análise de estabilidade avariada da embarcação.

Visando amplificar os efeitos da avaria no comportamento da embarcação, optou-se por considerar que os tanques 12 (água doce bombordo), 13 (água doce boreste) e 5 (lastro central) fossem avariados, além de considerar que, inicialmente, esses tanques encontravam-se vazios (Figura 32).

Usando a janela “*Damage Case Window*”, o programa permite selecionar os tanques, ou compartimentos, a serem avariados. Uma vez definida a condição de análise, o programa calcula a nova posição de equilíbrio considerando o alagamento dos tanques e a reserva de flutuabilidade da embarcação.

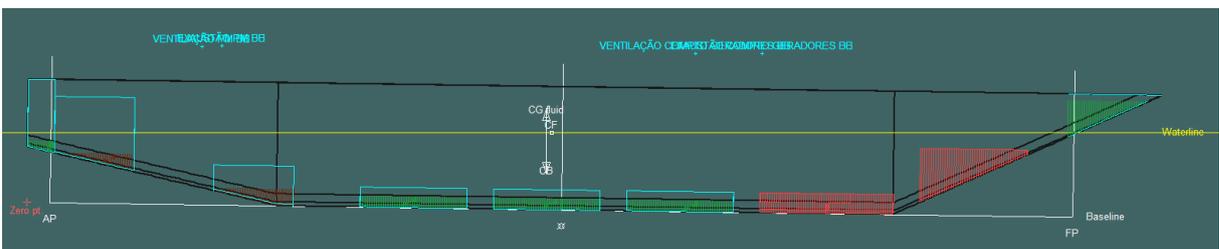
A condição de carregamento utilizada na análise de estabilidade avariada é mostrada no Apêndice C, sendo que o resultado para a embarcação de bojo chanfrado é mostrado na Figura 33, enquanto o resultado para a embarcação de bojo curvo é mostrado na Figura 34. Em ambas as figuras, os tanques marcados em vermelho correspondem aos tanques avariados.

**Figura 33** - Equilíbrio da embarcação de bojo chanfrado na condição avariada.



Fonte: O Autor (2022).

**Figura 34** - Equilíbrio da embarcação de bojo curvo na condição avariada.



Fonte: O Autor (2022).

É importante observar que, durante o cálculo de estabilidade, os tanques avariados não terão influência no empuxo sofrido pelo casco, pois esses encontram-se abertos e sofrendo constantes alagamentos até que a embarcação atinja a nova posição de equilíbrio. Além disso, destaca-se que, durante a análise, a embarcação se encontra livre para o movimento vertical, de balanço e de caturro.

Conforme esperado, observou-se que ambas as embarcações (bojo curvo e bojo reto) apresentaram um ângulo de trim negativo, pois o alagamento dos tanques avariados resulta no afundamento da proa.

Embora visualmente seja possível afirmar que as embarcações apresentaram resultados consideravelmente próximos, na Tabela 6 é apresentada uma comparação numérica sobre a influência da forma do bojo na análise de estabilidade avariada das geometrias estudadas.

**Tabela 6** – Influência da forma do bojo na estabilidade avariada.

		Bojo Chanfrado Intacto	Bojo Chanfrado Avariado	Bojo Chanfrado Variação	Bojo Curvo Intacto	Bojo Curvo Avariado	Bojo Curvo Variação
1	Calado à meia-nau m	5,553	5,847	0,294	5,544	5,835	0,291
2	Deslocamento t	6373	6373	0,0	6375	6375	0,0
3	Volume deslocado m <sup>3</sup>	6217,369	6217,706	0,337	6219,766	6219,823	0,057
4	Banda graus	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	Trim (+ pela popa) m	0,006	-1,126	-1,132	0,005	-1,119	-1,124
6	Comprimento linha d'água m	77,065	78,944	1,879	77,047	78,924	1,877
7	Área molhada m <sup>2</sup>	2024,874	2096,499	71,625	2037,716	2109,407	71,691
8	LCB da origem m	38,866	38,920	0,054	38,865	38,919	0,054
9	KB m	3,076	3,299	0,223	3,068	3,290	0,222
10	Ângulo de trim graus	0,0044	-0,8359	-0,8403	0,0040	-0,8357	-0,8397
10	KMt m	9,075	9,442	0,367	9,070	9,437	0,367

Fonte: O Autor (2022).

A análise dos resultados mostrados na Tabela 6 confirma a impressão visual de que a forma do bojo tem pouca influência na estabilidade avariada da embarcação estudada.

#### 4.9 DISCUSSÕES SOBRE A ESTABILIDADE AVARIADA

Notou-se que apenas a alteração da forma de bojo de chanfrado para curvo não representa uma alteração significativa no quesito de estabilidade avariada. Ainda que os valores absolutos dos parâmetros hidrostáticos referentes aos estados de equilíbrio pós-avaria sejam diferentes, as variações são ínfimas.

#### 4.10 ESTUDO SOBRE A ESTABILIDADE A GRANDES ÂNGULOS

Para a análise a grandes ângulos, o programa *MAXSURF Stability* permite a seleção de quais critérios devem ser avaliados, os quais se baseiam na análise da curva de estabilidade estática da embarcação.

Conforme já mencionado, neste trabalho foram considerados os critérios da Organização Marítima Internacional, ou IMO, publicados na resolução MSC.267(85). A IMO (2008) define seis critérios (Quadro 2) a serem considerados no estudo de estabilidade transversal intacta de embarcações sujeitas a ângulos de banda superiores a 15°.

**Quadro 2** - Critérios de estabilidade transversal da IMO.

Critérios IMO - MSC.267(85)	
Critério	Descrição
Área abaixo da curva entre 0° e 30°	Não deve ser menor que 0,055 metros radianos
Área abaixo da curva entre 0° e 40°	Não deve ser menor que 0,090 metros radianos
Área abaixo da curva entre 30° e 40°	Não deve ser menor que 0,030 metros radianos
GZ para 30°	Não deve ser menor que 0,20 metro
Máximo GZ	Ocorrer acima de 30°
Valor inicial de GMT	Nunca inferior a 0,15 metro

Fonte: Adaptado de IMO (2008).

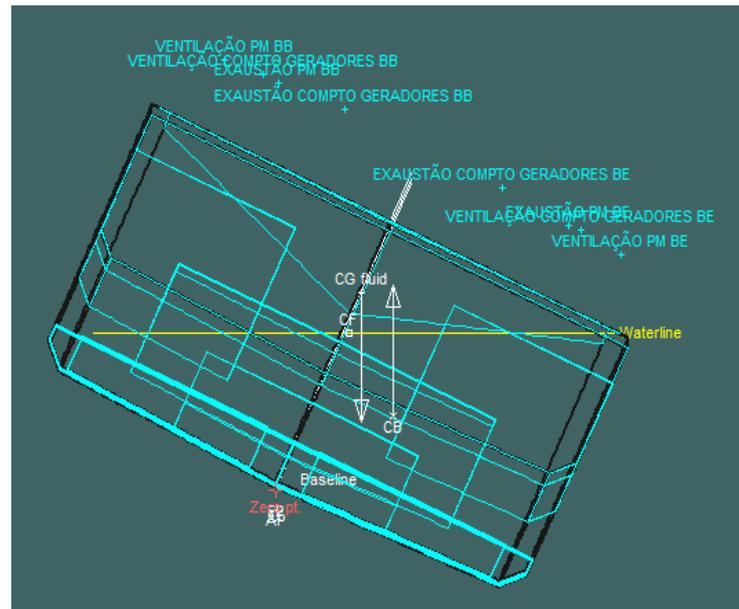
Visando manter uma comparação assertiva, as mesmas embarcações (Tabela 5) e condições de carregamento (Figura 32) estipuladas na análise de estabilidade avariada foram usadas na análise de estabilidade à grandes ângulos. Além disso foram considerados os mesmos pontos de alagamentos descritos na Figura 29.

Ao executar a análise, o programa simula um movimento de balanço da embarcação indo de -30° à 80°, iniciando à bombordo e finalizando à boreste. Em cada ângulo de banda analisado, o programa determina o ângulo de trim e o calado referentes ao equilíbrio das forças verticais e momentos longitudinais. Uma vez determinada a posição de equilíbrio, o braço de endireitamento  $\bar{G}\bar{Z}$  é calculado.

O conjunto dos resultados referentes a todos os ângulos de banda analisados dá origem a curva de estabilidade estática, a partir da qual são verificados os critérios exigidos pela IMO (2008).

Como exemplo de aplicação, na Figura 35 é mostrada a vista transversal da embarcação quando é realizada a análise para o ângulo de banda de 45°.

**Figura 35** – Equilíbrio da embarcação com bojo chanfrado sujeita a 45° de banda.



Fonte: O Autor (2022).

Os resultados referentes à aplicação dos critérios da IMO (2008) na embarcação com bojo chanfrado podem ser vistos na Tabela 7. Já os resultados para a embarcação com bojo curvo podem ser vistos na Tabela 8.

**Tabela 7** – Avaliação dos critérios IMO para grandes ângulos (bojo chanfrado).

	Código	Critério	Valor	Unid.	Atual	Status	Margem %
1	A.749(18) Ch	3.1.2.1: Área 0 a 30	0.0550	m.rad	0.3273	Pass	+495.10
2	A.749(18) Ch	3.1.2.1: Área 0 a 40	0.0900	m.rad	0.5161	Pass	+473.44
3	A.749(18) Ch	3.1.2.1: Área 30 a 40	0.0300	m.rad	0.1888	Pass	+529.30
4	A.749(18) Ch	3.1.2.2: Máx. GZ a 30 ou maior	0.200	m	1.225	Pass	+512.50
5	A.749(18) Ch	3.1.2.3: Ângulo de máx. GZ	30.0	deg	32.3	Pass	+7.57
6	A.749(18) Ch	3.1.2.4: GMt inicial	0.150	m	2.177	Pass	+1351.33

Fonte: O Autor (2022).

**Tabela 8** - Avaliação dos critérios IMO para grandes ângulos (bojo curvo).

	Código	Critério	Valor	Unid.	Atual	Status	Margem %
1	A.749(18) Ch	3.1.2.1: Área 0 a 30	0.0550	m.rad	0.3271	Pass	+494.66
2	A.749(18) Ch	3.1.2.1: Área 0 a 40	0.0900	m.rad	0.5172	Pass	+474.63
3	A.749(18) Ch	3.1.2.1: Área 30 a 40	0.0300	m.rad	0.1901	Pass	+533.68
4	A.749(18) Ch	3.1.2.2: Máx. GZ a 30 ou maior	0.200	m	1.230	Pass	+515.00
5	A.749(18) Ch	3.1.2.3: Ângulo de máx. GZ	30.0	deg	32.3	Pass	+7.57
6	A.749(18) Ch	3.1.2.4: GMt inicial	0.150	m	2.168	Pass	+1345.33

Fonte: O Autor (2022).

#### 4.11 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

A comparação dos resultados foi realizada analisando-se as margens obtidas em cada um dos critérios definidos pela IMO (2008). Conforme pode ser visto na Tabela 9, ambas as geometrias passaram nos seis critérios analisados, sendo que a seta verde indica a geometria que alcançou a maior margem em cada um dos critérios analisados.

**Tabela 9** - Comparação de margens.

Critério	Bojo Chanfrado	Bojo Curvo
	Margem %	Margem %
3.1.2.1: Área 0 a 30	↑ +495.10	+494.66
3.1.2.1: Área 0 a 40	+473.44	↑ +474.63
3.1.2.1: Área 30 a 40	+529.30	↑ +533.68
3.1.2.2: Máx. GZ a 30 ou maior	+512.50	↑ +515.00
3.1.2.3: Ângulo de máx. GZ	+7.57	+7.57
3.1.2.4: GMT inicial	↑ +1351.33	+1345.33

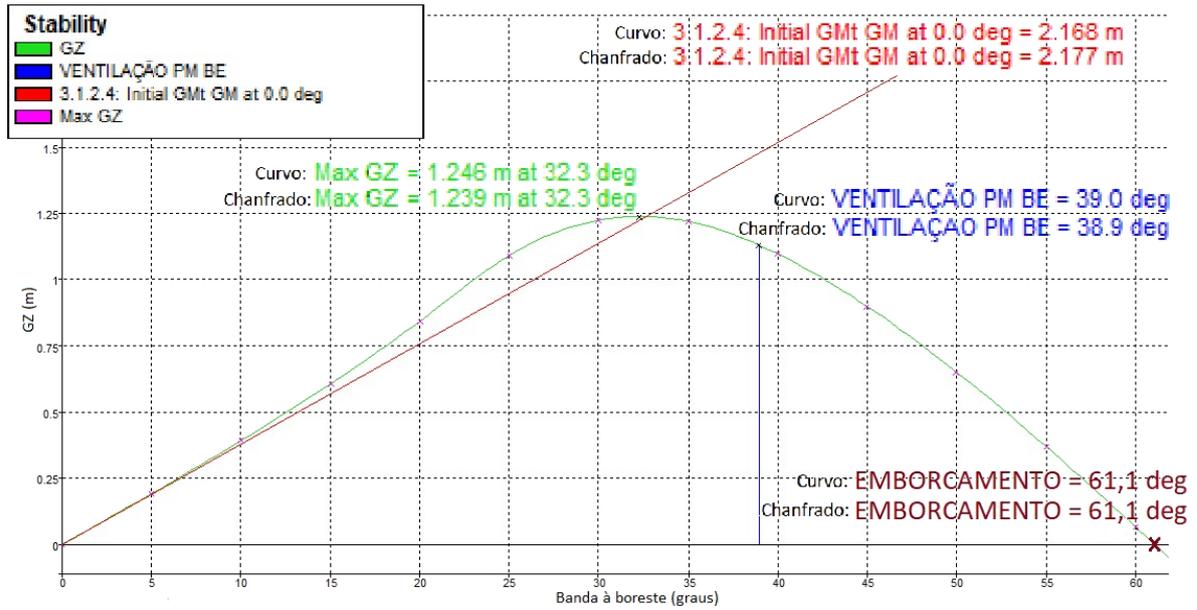
Fonte: O Autor (2022).

Observando os resultados obtidos, é possível verificar que a embarcação de bojo curvo apresentou um desempenho levemente melhor em relação aos critérios analisados.

Visando aprofundar a análise dos resultados, na Figura 36 são apresentadas as curvas de estabilidade estática de ambas as geometrias estudadas, nas quais são indicados os principais valores referentes a cada uma das formas de bojo analisadas.

Observando a Figura 36, percebe-se que o ângulo de alagamento da ventilação à boreste da praça de máquinas ocorre à 38,9° para a geometria de bojo chanfrado e 39,0° para a geometria com bojo curvo. O máximo braço de endireitamento ocorre, em ambos os casos, em 32,3°, porém esse resulta em 1,239 metro para a embarcação de bojo chanfrado e 1,246 metro para a de bojo curvo. Com relação ao  $\overline{GMt}$  inicial, o modelo de bojo chanfrado iniciou a inclinação com um valor levemente maior. Por fim, ambas as geometrias apresentaram o mesmo ângulo de emborcamento.

**Figura 36** - Curva de estabilidade estática das geometrias estudadas.



Fonte: O Autor (2022).

Tendo em vista as análises realizadas, é possível afirmar que a embarcação de bojo curvo apresentou resultados melhores para a avaliação de estabilidade a grandes ângulos. Entretanto, a variação na aplicação dos critérios foi ínfima, indicando que a forma do bojo tem pouca influência no comportamento da embarcação quando sujeita a grandes ângulos de inclinação transversal.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a influência da forma do bojo na estabilidade transversal de uma embarcação de serviço. Ao longo do texto foram apresentadas análises qualitativas e quantitativas acerca da influência do bojo na estabilidade estática inicial, na estabilidade dinâmica, na estabilidade a grandes ângulos e na estabilidade avariada de uma embarcação de serviço.

Inicialmente foram descritos os fundamentos teóricos associados ao conceito de estabilidade de embarcações, bem como as variações geométricas existentes no projeto do bojo de uma embarcação de serviço.

Utilizando a ferramenta *Bentley MAXSURF*, 55 configurações geométricas foram modeladas e analisadas, tendo como base uma embarcação de referência, a qual possui a geometria típica de uma embarcação de serviço de porte médio.

Os resultados referentes à análise de estabilidade estática inicial mostraram que o aumento da região de bojo provoca um aumento da altura do centro de flutuação, uma redução do coeficiente da seção mestra e, por fim, um aumento da altura do metacentro do casco. Além disso, observou-se que o bojo chanfrado provoca variações maiores do que aquelas observadas nas geometrias com bojo curvo.

Em relação à estabilidade dinâmica, observou-se que a massa adicional associada ao bojo chanfrado é maior do que a massa adicional associada ao bojo curvo, o que tende a fazer com que geometrias com bojo chanfrado tenham maior estabilidade transversal dinâmica do que geometrias com bojo curvo.

Para o estudo de estabilidade avariada, foram selecionadas duas embarcações com base nos resultados obtidos do estudo de estabilidade estática, sendo uma com bojo chanfrado e outra em formato curvo. Essa análise concluiu que os resultados para estabilidade avariada foram consideravelmente próximos, não apresentando uma variação expressiva no comportamento da embarcação devido à forma do bojo.

Por fim, sucedeu-se a análise da estabilidade a grandes ângulos. Foram analisadas as curvas de estabilidade estática geradas, bem como os critérios definidos pela IMO. Novamente as diferenças observadas foram pequenas. No entanto, é possível afirmar que a geometria com bojo curvo apresentou melhores resultados, mas ainda assim com variações ínfimas se comparadas à geometria com bojo chanfrado.

Tendo em vista os resultados obtidos, sugere-se para trabalhos futuros o estudo em três outras vertentes associadas aos efeitos do tipo de bojo no desempenho de uma embarcação de serviço: o viés estrutural, a análise de resistência ao avanço e o estudo de comportamento no mar. O viés estrutural indicaria a diferença nos níveis de tensões atuantes na estrutura, bem como as diferenças associadas ao dimensionamento de chapas e reforçadores. Já a análise de resistência ao avanço visa avaliar os efeitos associados ao projeto da instalação propulsora e ao desempenho propulsivo da embarcação. Por fim, o estudo de comportamento no mar indicaria as diferenças resultantes da alteração da forma do bojo no desempenho operacional da embarcação.

## REFERÊNCIAS

AKBAR, M. S; PRABOWO, A. R; TJAHHANA, D. D. P; TUSWAN, T. **Analysis of Plated-Hull Structure Strength Against Hydrostatic and Hydrodynamic Loads: A Case Study of 600 TEU Container Ships**. Journal of the Mechanical Behavior of Materials. De Gruyter. Indonesia, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8035 TB-228: Arquitetura Naval**. Rio de Janeiro, 1989. 15 p.

AUSTRALIAN MARITIME SAFETY AUTHORITY (AMSA). **Comparison of Single and Double Hull Tankers**. Austrália, 2002. 9 p.

BARRASS, B.; DERRETT, D. R. **Ship Stability for Masters and Mates**. 6 ed. Elsevier Ltd. Oxford, Reino Unido, 2006.

BORGES, A. Á. **Modelagem Numérica de Diferentes Situações de Acoplamento para um Sistema Empurrador-Barcaça**. 2010. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CHAVES, V. T.; TANCREDI, T. P.; ANDRADE, B. L. R.. **Optimal structural design of small ships with response surface**. In: 15th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, 2013, A Coruña. Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources. London: CRC Press/Balkema, 2013. v. 1. p. 297-307.

DECOLA, E. **A Review of Double Hull Tanker Oil Spill Prevention Considerations**. Nuka Research & Planning Group, LLC. Seldovia, Alasca, EUA, 2009.

DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS. **Normas da Autoridade Marítima para Embarcações Empregadas na Navegação em Mar Aberto: NORMAM-01/DPC**. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 2005. 581 p.

DIX, Dudley. **Dudley Dix Yacht Design**. 2019. Disponível em: <https://www.dixdesign.com/>. Acesso em: 01 mar. 2022.

DOKKUM, K.; KATEN H.; KOOMEN, K.; PINKSTER, J. **Ship Stability**. Dokmar Maritime Publishers. Enkhuizen, Holanda, 2008.

EYRES, D. J. **Ship Construction**. 5 ed. Butterworth-Heinemann. Oxford, Reino Unido, 2001. 354 p.

FERRARIS, S; VOLPONE, L. **Aluminum Alloys in Third Millennium Shipbuilding: Materials, Technologies, Perspectives**. The Fifth International Forum on Aluminum Ships. Istituto Italiano della Saldatura, Gênova, Itália, 2005.

FONSECA, M. M. **Arte Naval - Volume I**. 6 ed. Serviço de Documentação da Marinha, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **International Convention for the Safety of Life at Sea: SOLAS**. 6 ed. Londres, Inglaterra: IMO Publishing, 2014. p.446.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Adoption of the International Code on Intact Stability (2008 IS CODE): Resolution MSC.267(85)**. Londres, Inglaterra: IMO Publishing, 2008. 93 p.

KONSTANTINIDIS, E. **Added Mass of a Circular Cylinder Oscillating in a Free Stream**. Proceedings of the Royal Society. Department of Mechanical Engineering, University of Western Macedonia, Cozani, Grécia, 2013.

KOROTKIN, A. I. **Added Mass of Ship Structures**. Springer Science. São Petersburgo, Rússia, 2007.

LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture: Second Revision**. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Jersey City, New Jersey, EUA, 1988.

PRODANOV, C. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2 ed. Editora Feevale, Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul, Brasil, 2013.

RAWSON, K. J; TUPPER, E. C. **Basic Ship Theory**. 5 ed. Elsevier Ltd. Oxford, Reino Unido, 2001.

TANCREDI, T. P. **Metodologia de Projeto**. Youtube, 29 fev. 2020. Publicado pelo canal Uma Pitada de Engenharia. Disponível em: <<https://youtu.be/4VJYg0AbsEg>>.

TANCREDI, T. P. **Tensões Globais - Vídeo 01 - Propriedades da Seção Mestra**. Youtube, 16 dez. 2020. Publicado pelo canal Uma Pitada de Engenharia. Disponível em: <<https://youtu.be/G6zDFWP6BYg>>.

## APÊNDICE A

Figura A1 - Coordenadas dos tanques em MAXSURF Stability.

<b>Tabela de Coordenadas para Criação dos Tanques</b>																	
	Name	Type	Intact Perm. %	Damaged Perm. %	Specific gravity	Fluid type	Boundary Surfaces	Aft m	Fore m	F.Port m	F.Stbd. m	F.Top m	F.Bott. m	A.Port m	A.Stbd. m	A.Top m	A.Bott. m
1	Lastro 1BB	Tank	98	95	1.025	Water Ballast	none	0.001	2.000	-10.000	0.000	10.000	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
2	Lastro 1BE	Tank	98	95	1.025	Water Ballast	none	0.001	2.000	0.000	10.000	10.000	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
3	Oleo Diesel 1BB	Tank	98	95	0.86	Diesel	none	2.000	8.000	-10.000	-3.000	8.000	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
4	Oleo Diesel 1BE	Tank	98	95	0.86	Diesel	none	2.000	8.000	3.000	10.000	8.000	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
5	Oleo Diesel 2 Central	Tank	98	95	0.86	Diesel	none	14.000	20.000	-4.000	4.000	3.000	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
6	Lastro 2BB	Tank	98	95	1.025	Water Ballast	none	25.000	33.000	-10.000	0.000	1.500	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
7	Lastro 2BE	Tank	98	95	1.025	Water Ballast	none	25.000	33.000	0.000	10.000	1.500	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
8	Lastro 3BB	Tank	98	95	1.025	Water Ballast	none	35.000	43.000	-10.000	0.000	1.500	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
9	Lastro 3BE	Tank	98	95	1.025	Water Ballast	none	35.000	43.000	0.000	10.000	1.500	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
10	Lastro 4BB	Tank	98	95	1.025	Water Ballast	none	45.000	53.000	-10.000	0.000	1.500	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
11	Lastro 4BE	Tank	98	95	1.025	Water Ballast	none	45.000	53.000	0.000	10.000	1.500	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
12	Agua Doce 1BB	Tank	98	95	1	Fresh Water	none	55.000	65.000	-8.000	-1.000	1.500	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
13	Agua Doce 1BE	Tank	98	95	1	Fresh Water	none	55.000	65.000	1.000	8.000	1.500	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
14	Lastro 5 Central	Tank	98	95	1.025	Water Ballast	none	67.000	75.000	-6.000	6.000	5.000	0.000	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic
15	Lastro Pique de Vante	Tank	98	95	1.025	Water Ballast	none	78.000	84.999	-10.000	10.000	10.000	0.000	0.000	0.000	Prismatic	Prismatic

Fonte: O Autor (2022).

Figura A2 - Coordenadas dos pontos de alagamento em MAXSURF Stability.

**Tabela de Coordenadas para Criação dos Pontos de Alagamento**

	Name	Long. Pos. m	Offset m	Height m	Type	Linked to	Flood from	Intact (use for intact case)	Damage (use for final damage cases)	Int'nd. (use for intermediate damage cases)	Flow into Tank when immersed
1	EXAUSTÃO PM BB	14.500	-5.500	12.000	Downflooding point	None	Sea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	EXAUSTÃO PM BE	14.500	5.500	12.000	Downflooding point	None	Sea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	VENTILAÇÃO PM BB	13.000	-7.500	11.900	Downflooding point	None	Sea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	VENTILAÇÃO PM BE	13.000	7.500	11.900	Downflooding point	None	Sea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	EXAUSTÃO COMPTO GERADORES BB	55.000	-3.000	12.000	Downflooding point	None	Sea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	EXAUSTÃO COMPTO GERADORES BE	55.000	3.000	12.000	Downflooding point	None	Sea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	VENTILAÇÃO COMPTO GERADORES BB	50.000	-6.000	11.900	Downflooding point	None	Sea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	VENTILAÇÃO COMPTO GERADORES BE	50.000	6.000	11.900	Downflooding point	None	Sea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: O Autor (2022).

## APÊNDICE B

**Figura A3 - Condição de carregamento para análise de estabilidade intacta.**

**Loadcase - Intacta**

**Damage Case - Intact**

Free to Trim

Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m<sup>3</sup>)

Fluid analysis method: Use corrected VCG

Item Name	Quantity	Total Mass tonne	Total Volume m <sup>3</sup>	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
<b>.PESOS FIXOS</b>						
Peso Leve	1	5954,980		38,921	0,000	6,500
<b>Subtotal</b>		<b>5954,980</b>		<b>38,921</b>	<b>0,000</b>	<b>6,500</b>
<b>.TANQUES DE LASTRO</b>						
Lastro 1BB	10%	9,265	9,039	1,142	-4,014	4,298
Lastro 1BE	10%	9,265	9,039	1,142	4,014	4,298
Lastro 2BB	50%	49,334	48,130	29,000	-4,121	0,465
Lastro 2BE	50%	49,334	48,130	29,000	4,121	0,465
Lastro 3BB	50%	49,332	48,129	39,000	-4,121	0,465
Lastro 3BE	50%	49,332	48,129	39,000	4,121	0,465
Lastro 4BB	50%	49,331	48,128	49,000	-4,121	0,465
Lastro 4BE	50%	49,331	48,128	49,000	4,121	0,465
Lastro 5 Central	0%	0,000	0,000	67,038	0,000	0,920
Lastro Pique de Vante	60%	44,804	43,711	80,944	0,000	8,016
<b>Subtotal</b>	<b>33,81%</b>	<b>359,329</b>	<b>350,565</b>	<b>42,277</b>	<b>0,000</b>	<b>1,604</b>
<b>.TANQUES DE ÓLEO DIESEL</b>						
Oleo Diesel 1BB	10%	14,122	16,811	6,282	-5,745	3,307
Oleo Diesel 1BE	10%	14,122	16,811	6,282	5,745	3,307
Oleo Diesel 2 Central	30%	30,006	35,722	17,778	0,000	0,769
<b>Subtotal</b>	<b>15,23%</b>	<b>58,249</b>	<b>69,344</b>	<b>12,204</b>	<b>0,000</b>	<b>2,000</b>
<b>.TANQUES DE AGUA DOCE</b>						
Agua Doce 1BB	0%	0,000	0,000	59,880	-1,001	0,026
Agua Doce 1BE	0%	0,000	0,000	59,880	1,001	0,026
<b>Subtotal</b>	<b>0%</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>Total Loadcase</b>		<b>6372,558</b>	<b>419,909</b>	<b>38,866</b>	<b>0,000</b>	<b>6,183</b>
<b>FS correction</b>						<b>0,734</b>
<b>VCG fluid</b>						<b>6,917</b>

Fonte: O Autor (2022).

## APÊNDICE C

**Figura A4 - Condição de carregamento para análise de estabilidade avariada.**

**Loadcase - Avaria**

**Damage Case - Avaria**

Free to Trim

Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m<sup>3</sup>)

Compartments Damaged -

Compartiment or Tank	Status	Perm.%	PartFlood.%	PartFlood.WL
Agua Doce 1BB	Fully flooded	95		
Agua Doce 1BE	Fully flooded	95		
Lastro 5 Central	Fully flooded	95		

Agua Doce 1BB Fully flooded 95

Agua Doce 1BE Fully flooded 95

Lastro 5 Central Fully flooded 95

Fluid analysis method: Use corrected VCG

Item Name	Quantity	Total Mass tonne	Total Volume m <sup>3</sup>	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
<b>.PESOS FIXOS</b>						
Peso Leve	1	5954,980		38,921	0,000	6,500
<b>Subtotal</b>		<b>5954,980</b>		<b>38,921</b>	<b>0,000</b>	<b>6,500</b>
<b>.TANQUES DE LASTRO</b>						
Lastro 1BB	10%	9,265	9,039	1,142	-4,014	4,298
Lastro 1BE	10%	9,265	9,039	1,142	4,014	4,298
Lastro 2BB	50%	49,334	48,130	29,000	-4,121	0,465
Lastro 2BE	50%	49,334	48,130	29,000	4,121	0,465
Lastro 3BB	50%	49,332	48,129	39,000	-4,121	0,465
Lastro 3BE	50%	49,332	48,129	39,000	4,121	0,465
Lastro 4BB	50%	49,331	48,128	49,000	-4,121	0,465
Lastro 4BE	50%	49,331	48,128	49,000	4,121	0,465
<b>Lastro 5 Central (Damaged)</b>	<b>Damaged</b>					
Lastro Pique de Vante	60%	44,804	43,711	80,944	0,000	8,016
<b>Subtotal</b>	<b>42,18%</b>	<b>359,329</b>	<b>350,565</b>	<b>42,277</b>	<b>0,000</b>	<b>1,604</b>
<b>.TANQUES DE ÓLEO DIESEL</b>						
Oleo Diesel 1BB	10%	14,122	16,811	6,282	-5,745	3,307
Oleo Diesel 1BE	10%	14,122	16,811	6,282	5,745	3,307
Oleo Diesel 2 Central	30%	30,006	35,722	17,778	0,000	0,769
<b>Subtotal</b>	<b>15,23%</b>	<b>58,249</b>	<b>69,344</b>	<b>12,204</b>	<b>0,000</b>	<b>2,000</b>
<b>.TANQUES DE ÁGUA DOCE</b>						
<b>Agua Doce 1BB (Damaged)</b>	<b>Damaged</b>					
<b>Agua Doce 1BE (Damaged)</b>	<b>Damaged</b>					
<b>Subtotal</b>	<b>0%</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>Total Loadcase</b>		<b>6372,558</b>	<b>419,909</b>	<b>38,866</b>	<b>0,000</b>	<b>6,183</b>
<b>FS correction</b>						<b>0,734</b>
<b>VCG fluid</b>						<b>6,917</b>

Fonte: O Autor (2022).