

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

VITOR MATEUS TOMIO

ESTUDO ANALÍTICO-EXPERIMENTAL DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE UM
CASCO DIDÁTICO

Joinville
2019

VITOR MATEUS TOMIO

ESTUDO ANALÍTICO-EXPERIMENTAL DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE UM
CASCO DIDÁTICO

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: Dr. André Luís Condino Fugarra

Joinville
2019

VITOR MATEUS TOMIO

ESTUDO ANALÍTICO-EXPERIMENTAL DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE UM
CASCO DIDÁTICO

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

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Membro da Banca

Prof. Me. Luiz Eduardo Bueno Minioli
Membro da Banca

RESUMO

Estudar e compreender a estabilidade transversal de embarcações é essencial para a navegação. A análise e previsão do comportamento de navios em condições de navegação adversas é fundamental para a otimização de projetos navais, de modo a tornar a navegação mais segura. Devido à falta de recursos, muitas universidades brasileiras não possuem um tanque de provas. Portanto, é de interesse estudar a estabilidade transversal de navios em sala de aula por meio de um casco didático em escala reduzida. Este trabalho apresenta um estudo analítico-experimental da estabilidade transversal de embarcações, por intermédio de um experimento com um casco didático. É apresentada a teoria básica de estabilidade, assim como a abordagem teórica e os procedimentos envolvidos na execução de um teste de inclinação. Além disso, são apresentadas em detalhes cada parcela do experimento didático, assim como os métodos utilizados para a execução dos testes e obtenção de resultados. Por fim, discutem-se os dados obtidos, justificando a diferença entre os valores calculados de forma analítica e valores obtidos experimentalmente. Adicionalmente, são sugeridas melhorias para o arranjo didático.

Palavras-chave: Experimento. Didático. Estabilidade transversal. Modelo. Teste de Inclinação.

ABSTRACT

Studying and understanding the transverse stability of vessels is essential for navigation. The analysis and prediction of the behavior of ships in adverse navigation conditions is fundamental for the optimization of naval projects, in order to make navigation safer. Due to the lack of resources, many brazilian universities do not have a test tank. Therefore, it is of interest to study the transverse stability of ships in the classroom by means of a small-scale didactic hull. This work presents an analytical-experimental study of the transversal stability of vessels, by means of an experiment with a didactic hull. The basic theory of stability is presented, as well as the theoretical approach and procedures involved in performing an inclining experiment. In addition, each step of the didactic experiment is presented in detail, just like the methods used to perform the tests and obtain results. Finally, the obtained data are discussed, justifying the difference between the values calculated in analytical form and values obtained experimentally. In addition, improvements are suggested for the didactic arrangement.

Keywords: Experiment. Didactic. Transverse stability. Model. Inclining experiment.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Adilson e Maria Alvide, por sempre me apoiarem, nunca permitindo que eu desistisse embora as grandes dificuldades do período da graduação.

Agradeço também ao meu orientador por sugerir o tema deste trabalho e pelos conhecimentos repassados. Ao professor Thiago Antonio Fiorentin, por me permitir utilizar o Laboratório de Sistemas Veiculares para a execução dos testes deste trabalho. Meus profundos agradecimentos ao professor Carlos Sacchelli, Willian Harshe e a toda equipe do Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos (L.I.D) da UFSC Campus Joinville pela dedicação e suporte dados para a fabricação do modelo.

Ao Laboratório de Metrologia (METEq) da UFSC Campus Joinville por permitir o uso contínuo de paquímetros, balanças e do traçador de altura. Aos técnicos de laboratório, Elvis e Rodrigo, pela usinagem de um dos lastros.

Agradeço à equipe EfiCEM, em especial ao membro Guilherme Zanella Teodoro, por se dedicar a fazer toda a impermeabilização do casco com resina epóxi.

À minha psicóloga, Adriana Dietrich Guesser, por toda ajuda psicológica especializada, fundamental para poder concluir este trabalho.

Aos meus amigos de Blumenau, Ruan Luciano Mayer Marinho e Lucas Gabriel Fietz, pelos momentos de descontração e apoio quando eu não estava em Joinville.

Às amizades que fiz durante minha vida em Joinville: Luiz Schiavini, Martin Schultz, Matheus Alcanti, Pablo Lopes de Carvalho, Marcos Schneider Junior, Rodrigo Santiago, Danylle Donati, Eduardo Teixeira Heyder, Lucas Roberto Matheus, Gustavo Moreira Ramos, Cezar Junior Velho, Monique Krupinski, Ana Maria, Pedro Santos Moura, Daniel Champoski, Joao Bertoldo, Fernando Henrique Cossa, Murilo Pflieger entre tantos outros.

AO UNIVERSO....

*O sucesso é ir de fracasso em
fracasso sem perder
entusiasmo*

Winston Churchill

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Braço de Endireitamento \overline{GZ}	15
Figura 2 – Pontos de interesse para o estudo da estabilidade transversal. . . .	16
Figura 3 – Representação esquemática do teste de inclinação.	18
Figura 4 – Inclinômetro de precisão.	21
Figura 5 – Resultado do teste de inclinação.	22
Figura 6 – Triângulo retângulo.	22
Figura 7 – Arranjo didático montado.	23
Figura 8 – Tanque utilizado no experimento.	24
Figura 9 – Modelo logo após a impressão.	24
Figura 10 – Parte interna do modelo.	25
Figura 11 – Canal de alojamento das peças de fixação.	26
Figura 12 – Modelo com ponteiro.	26
Figura 13 – Lastros verticais - cilindro, barra roscada e inserto.	27
Figura 14 – Lastro fixo.	28
Figura 15 – Peso de movimentação lateral.	29
Figura 16 – Componentes do sistema de acoplamento do modelo ao tanque. . .	30
Figura 17 – Testes preliminares do sistema de fixação na ausência de água. . .	30
Figura 18 – Tabela de pesos e centros da planilha interativa	31
Figura 19 – Medição de ângulos por meio de um transferidor.	32
Figura 20 – Marcação utilizada para aferição visual de ângulos de trim e banda. .	33
Figura 21 – Lastro lateral centralizado.	33
Figura 22 – Medição da distância do lastro lateral ao costado do modelo.	34
Figura 23 – Medição de altura dos lastros verticais.	34
Figura 24 – Modelo flutuando livremente com estabilidade inicial.	36
Figura 25 – Modelo inclinado a boreste e indicação dos bordos.	37
Figura 26 – Resultados da primeira medição com o modelo fixo ao tanque. . . .	38
Figura 27 – Resultados da segunda medição com o modelo fixo ao tanque. . . .	38
Figura 28 – Resultados da terceira medição com o modelo fixo ao tanque. . . .	39
Figura 29 – Resultados da primeira medição de ângulos - região linear.	40
Figura 30 – Resultados da segunda medição de ângulos - região linear.	40
Figura 31 – Resultado da terceira medição de ângulos - região linear.	41
Figura 32 – Primeira medição de ângulos - modelo flutuando livremente.	42
Figura 33 – Segunda medição de ângulos - modelo flutuando livremente.	42

Figura 34 – Terceira medição de ângulos - modelo flutuando livremente.	43
Figura 35 – Resultado da análise estatística - modelo fixo ao tanque.	45
Figura 36 – Resultado da análise estatística - modelo em flutuação livre.	45
Figura 37 – Desalinhamento do modelo em relação ao ponto de fixação.	46
Figura 38 – Seção transversal do modelo com a região empenada em destaque.	48
Figura 39 – Impressão 3D do modelo.	49
Figura 40 – Seção transversal do modelo utilizado por Schwarz e Aranha (2002)	54
Figura 41 – Dimensões da seção transversal do modelo construído pelo autor	55
Figura 42 – Desenho CAD - Modelo extrudado.	56
Figura 43 – Desenho esquemático do tanque de correnteza.	57
Figura 44 – Vista superior do modelo com o offset indicado.	57
Figura 45 – Corte extrudado da parte interna do modelo.	58
Figura 46 – Modelo em corte - Rebaixos internos	59
Figura 47 – Dimensões dos rebaixos	59
Figura 48 – Dimensões dos rebaixos	60
Figura 49 – Alojamento da barra roscada <i>M5</i>	61
Figura 50 – Alojamento da barra roscada <i>M5</i> finalizado.	62
Figura 51 – Alojamento da barra roscada <i>M5</i> com filetes.	63
Figura 52 – Dimensões principais do canal das peças deslizantes	64
Figura 53 – Extrusão do canal das peças de fixação	64
Figura 54 – Vista frontal do corte extrudado do canal das peças deslizantes.	65
Figura 55 – Corte extrudado em perspectiva.	65
Figura 56 – Dimensões do rasgo para os parafusos <i>M4</i>	66
Figura 57 – Corte extrudado do rasgo para os parafusos <i>M4</i>	67
Figura 58 – Rasgo guia dos parafusos <i>M4</i> finalizado.	67
Figura 59 – Canal das peças deslizantes em perspectiva	68
Figura 60 – Modelo CAD finalizado em perspectiva	68
Figura 61 – Vista lateral do modelo CAD finalizado	69
Figura 62 – Impressora 3D Cloner DH	69
Figura 63 – Desenho CAD da peça deslizante em perspectiva.	70
Figura 64 – Dimensões principais das peças deslizantes	70
Figura 65 – Extrusão da peça deslizante.	71
Figura 66 – Furo para parafuso <i>M5</i>	71
Figura 67 – Corte extrudado para a porca <i>M5</i>	72
Figura 68 – Furos para os parafusos <i>M4</i>	72
Figura 69 – Filetes da peça deslizante	73
Figura 70 – Montagem dos parafusos e porcas à peça de fixação.	73
Figura 71 – Montagem em CAD da peça de fixação e parafusos no modelo - vista em perspectiva	74

Figura 72 – Montagem em CAD da peça de fixação e parafusos no modelo - vista frontal.	74
Figura 73 – Impressora Stratasys Dimension Elite	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Braços de momento e seus respectivos valores a serem medidos com o paquímetro.	35
Tabela 2 – Dados do conjunto.	36
Tabela 3 – Resultado dos testes de inclinação com o modelo fixo ao tanque. .	37
Tabela 4 – Resultados do teste de inclinação com o modelo flutuando de forma livre.	41
Tabela 5 – Análise estatística dos resultados dos testes de inclinação.	44
Tabela 6 – Valores de \overline{GM}_t obtidos experimentalmente.	47
Tabela 7 – Comparativo de valores de \overline{GM}_t experimentais com \overline{GM}_t teórico. .	47
Tabela 8 – Comparativo de valores de \overline{KG} experimentais com \overline{KG} teórico. . .	48
Tabela 9 – Tabela de custos do experimento.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Δ	Deslocamento da embarcação
∇	Volume deslocado pela embarcação
\overline{BM}_t	Raio metacêntrico transversal
\overline{GM}_t	Altura metacêntrica transversal
\overline{GZ}	Braço de endireitamento
\overline{KB}	Altura do centro de carena
\overline{KG}	Altura do centro de gravidade
ϕ	Ângulo de banda da embarcação
I_t	Momento de inércia do plano de flutuação em relação ao eixo longitudinal da embarcação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2	REVISÃO TEÓRICA	15
2.1	ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE EMBARCAÇÕES	15
2.1.1	Altura do Centro de Gravidade	17
2.1.2	Posição Vertical do Centro de Carena	17
2.1.3	Raio Metacêntrico Transversal	17
2.2	TESTE DE INCLINAÇÃO	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	MATERIAIS	23
3.1.1	Arranjo Didático	23
3.1.2	Planilha Interativa	30
3.2	MÉTODOS	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5	CONCLUSÕES	50
5.1	MELHORIAS NO EXPERIMENTO	51
5.2	TESTES FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A	54

1 INTRODUÇÃO

O estudo e a compreensão da estabilidade transversal de embarcações sempre teve importância para a navegação, sendo, portanto, possível prever e analisar o comportamento de navios em condições adversas a fim de otimizar projetos e criar embarcações mais seguras.

Por isso, torna-se necessário que os futuros engenheiros navais compreendam a estabilidade transversal de embarcações da maneira mais prática possível, assimilando a influência da geometria do casco, pesos e centros, entre outros parâmetros de projeto na estabilidade de navios e outros corpos flutuantes.

Neste contexto, é sabido que muitas universidades brasileiras não possuem infraestrutura e recursos financeiros suficientes para construir um tanque de provas. Este tipo de ferramenta permitiria realizar ensaios com modelos em escala reduzida, possibilitando conciliar o conhecimento teórico visto em sala de aula com a aplicação prática.

Tendo em vista a necessidade de viabilizar ferramentas didáticas para o estudo da estabilidade transversal de embarcações, é interessante que os estudantes de Engenharia Naval possam estudá-la em sala de aula por meio de um experimento didático de baixo custo em escala reduzida, efetuando cálculos analíticos e comparando valores teóricos e experimentais.

Trabalho desta natureza foi realizado na Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville, baseado em um experimento conduzido por Schwarz e Aranha (2002), sobre a dinâmica de sistemas com ênfase em osciladores com 1 grau de liberdade, onde foram analisados 3 casos de movimento de roll, onde: o primeiro caso diz respeito a um oscilador de baixo amortecimento excitado por ondas próximas à sua frequência natural, visando estudar o fenômeno da ressonância; o segundo caso refere-se a um estudo sobre a adição de bolinas, visando aumentar a dissipação de energia do sistema e, portanto, diminuindo a amplitude de oscilação; e o último caso apresenta formas de alterar a frequência natural do sistema e o momento de excitação através da adição de flutuadores laterais. Cada caso recebeu uma modelagem teórica específica, sendo esta posteriormente confrontada com resultados experimentais. Também foi estudado o problema de estabilidade estática envolvendo o fenômeno da bifurcação.

Assim, no presente trabalho de conclusão de curso foram feitos estudos sobre a estabilidade inicial de embarcações por intermédio de um experimento utilizando um

casco didático. Foi feita a descrição do experimento assim como cálculos teóricos a fim de compará-los com resultados experimentais por meio de um Teste de Inclinação. Neste trabalho não são feitos estudos sobre a estabilidade dinâmica do modelo, nem sobre o movimento de roll.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral estudar os fundamentos da estabilidade transversal de embarcações mediante um experimento didático utilizando uma metodologia teórico-experimental.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

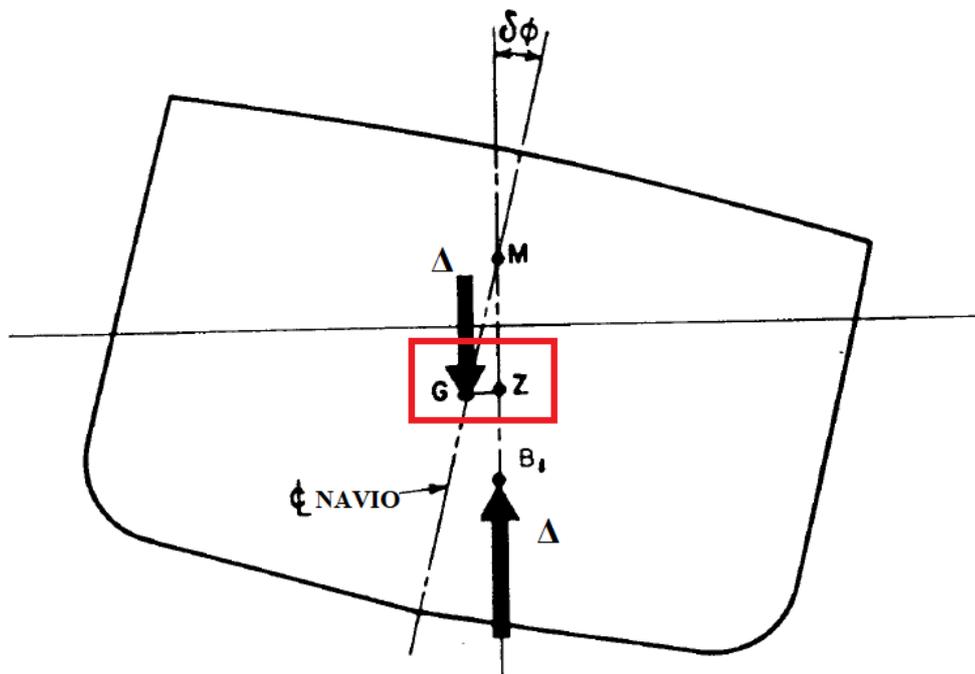
- a. Estudar teoricamente a influência de cada parâmetro da estabilidade estática transversal de navios;
- b. Estudar a condição de equilíbrio hidrostático do modelo;
- c. Caracterizar e calibrar o experimento;
- d. Executar o teste de inclinação;
- e. Comparar resultados teóricos com os experimentais.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE EMBARCAÇÕES

Embarcações flutuantes estão sujeitas a esforços que as retiram de sua condição de equilíbrio estático. Esses esforços, segundo Lewis (1988), podem ser causados por vento incidindo na região do costado, movimentação de cargas e passageiros a bordo, ondas, entre outros. Ao cessarem os esforços, a embarcação precisa ter estabilidade inicial para retornar à sua condição de equilíbrio estático. A estabilidade inicial de um corpo flutuante é garantida, segundo Martins (2010), quando o centro de gravidade está abaixo do centro de carena. Porém, caso o centro de gravidade estiver acima do centro de carena, a condição de estabilidade dependerá diretamente do braço de endireitamento \overline{GZ} , apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Braço de Endireitamento \overline{GZ} .



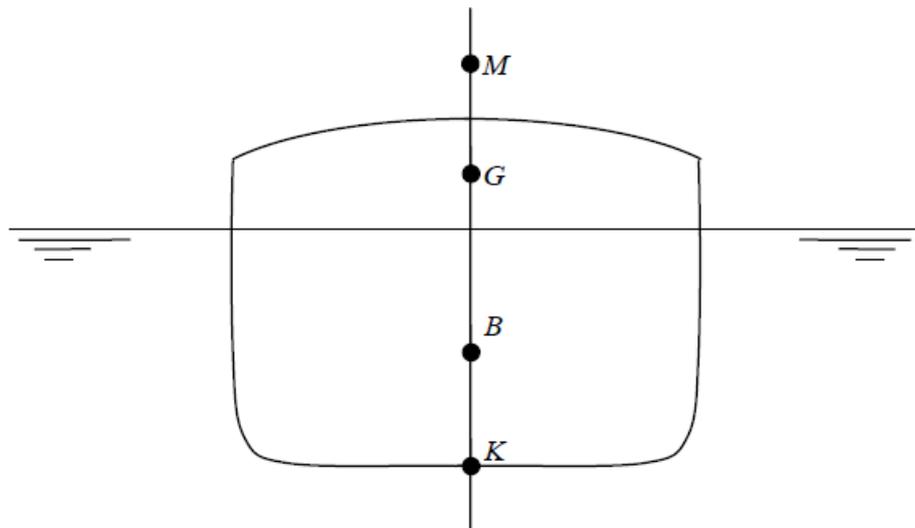
Fonte: Lewis (1988) - Adaptado.

A partir da Figura 1, conseguimos obter \overline{GZ} recorrendo-se à equação 1, sendo ϕ o ângulo de banda. Vale ressaltar que essa equação é válida, segundo Lewis (1988) para ângulos de banda de até 10° .

$$\overline{GZ} = \overline{GM}_t \cdot \sin(\phi) \quad (1)$$

O braço de endireitamento é função da altura metacêntrica transversal \overline{GM}_t , que depende do raio metacêntrico transversal \overline{BM}_t , da posição vertical do centro de carena \overline{KB} e da altura do centro de gravidade \overline{KG} , apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Pontos de interesse para o estudo da estabilidade transversal.



Fonte: Martins (2010).

A altura metacêntrica transversal pode ser calculada pela equação 3. A embarcação será considerada inicialmente estável se o valor de \overline{GM}_t for positivo. Caso contrário, a embarcação não terá estabilidade inicial e irá emborcar.

$$\overline{GM}_t = \overline{KM} - \overline{KG} \quad (2)$$

$$\overline{GM}_t = \overline{KB} + \overline{BM}_t - \overline{KG} \quad (3)$$

2.1.1 Altura do Centro de Gravidade

O centro de gravidade, indicado pela letra G na Figura 2 é definido, segundo Coelho (2007), como sendo o ponto onde a resultante das forças gravitacionais atua no navio, podendo ser calculado pela da equação 4.

$$\overline{KG} = \frac{\sum m_i \cdot z_i}{\sum m_i} \quad (4)$$

Onde:

- m_i é a massa da i -ésima parcela;
- z_i é a distância vertical da i -ésima parcela até a quilha (ponto K).

A altura do centro de gravidade da embarcação em relação à sua quilha é um dos fatores de maior impacto na estabilidade transversal. Grandes concentrações de pesos em posições distantes da quilha fazem com que o \overline{KG} da embarcação aumente, causando perda de estabilidade. Por isso, é necessário que o arranjo interno e o plano de carregamento de um navio seja concebido de forma a não concentrar pesos em posições elevadas.

2.1.2 Posição Vertical do Centro de Carena

Conforme literatura geral sobre o assunto, por exemplo encontrado em Martins (2010), define-se o centro de carena como a posição do centróide do volume submerso, indicado por B na Figura 2. Cascos com maiores valores de calado e boca tendem a possuir valores mais elevados de \overline{KB} , contribuindo para o aumento de \overline{GM}_t e para a melhora da estabilidade da embarcação.

2.1.3 Raio Metacêntrico Transversal

O raio metacêntrico transversal de uma embarcação, definido por \overline{BM}_t , pode ser calculado diretamente pela equação 5.

$$\overline{BM}_t = \frac{I_t}{\nabla} \quad (5)$$

Onde:

- I_t é o momento de inércia do plano de flutuação da embarcação em relação ao eixo longitudinal;
- ∇ é o volume deslocado pela embarcação.

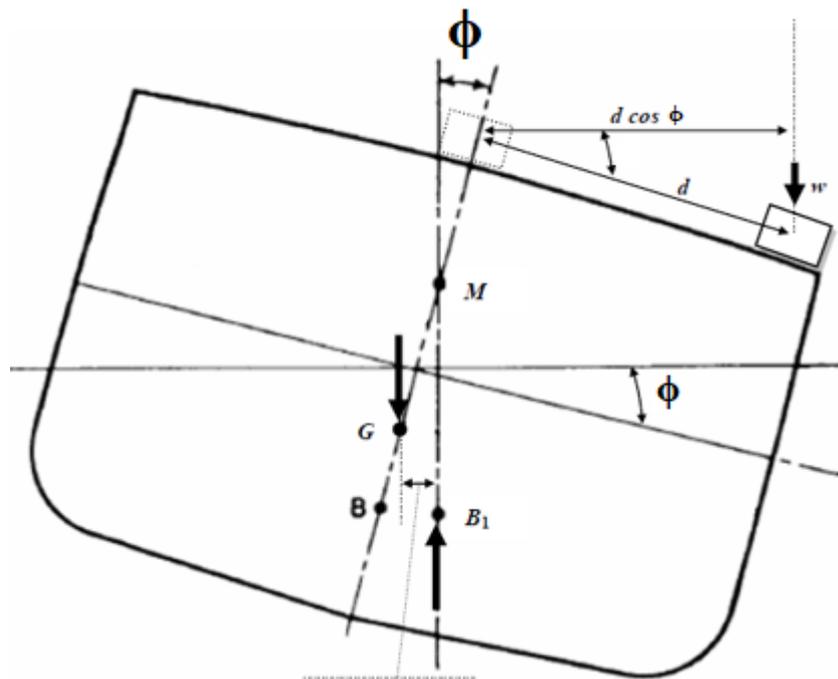
O momento de inércia do plano de flutuação e o volume deslocado dependem principalmente do valor da boca da embarcação no plano de flutuação. Portanto, navios

com maiores valores de boca e calado, aliados a baixos valores de \overline{KG} possuem maior estabilidade inicial.

2.2 TESTE DE INCLINAÇÃO

O teste de inclinação, segundo Lewis (1988), consiste em inclinar transversalmente um navio em pequenos ângulos, movendo um peso conhecido a bordo, perpendicularmente ao plano diametral da embarcação, por uma distância conhecida para ambos os bordos, como exemplificado na Figura 3.

Figura 3 – Representação esquemática do teste de inclinação.



Fonte: Martins (2010)-Adaptado

A embarcação irá adquirir ângulo banda até que os momentos de endireitamento e emborcador se igualem. Os ângulos de banda e calados são registrados para calcular a altura metacêntrica transversal e averiguar as coordenadas vertical e horizontal do centro de gravidade do navio. A altura metacêntrica transversal é obtida da seguinte maneira:

Sabe-se que o braço de endireitamento \overline{GZ} para ângulos de até 10° é uma função linear dada pela equação 1. A partir dela, tem-se que o momento de endireitamento é dado por:

$$\Delta \cdot \overline{GZ} = \Delta \cdot \overline{GM}_t \cdot \sin(\phi) \quad (6)$$

Sendo Δ o deslocamento da embarcação. O momento de emborcamento M , produzido pela movimentação do peso w perpendicular ao plano diametral do navio por uma distância d é:

$$M = w \cdot d \cdot \cos(\phi) \quad (7)$$

Como os momentos de emborcamento e endireitamento devem ser iguais:

$$\Delta \cdot \overline{GM}_t \cdot \sin(\phi) = w \cdot d \cdot \cos(\phi) \quad (8)$$

O que leva a:

$$\overline{GM}_t = \frac{w \cdot d \cdot \cos(\phi)}{\Delta \cdot \sin(\phi)} \quad (9)$$

$$\overline{GM}_t = \frac{w \cdot d}{\Delta \cdot \tan(\phi)} \quad (10)$$

A altura do centro de gravidade pode ser obtida por meio da equação 3. Caso o navio possua um trim considerável, deve-se recorrer às curvas de bonjean para calcular \overline{KB} e \overline{BM}_t .

O teste de inclinação deve ser realizado com o navio o mais próximo possível de sua fase final de construção. Nestes casos, usualmente, há tanques que já contém água ou combustível, sendo necessário retirar ou adicionar fluidos destes tanques para evitar o efeito de superfície livre. Feito o ajuste, realiza-se o teste normalmente. Os valores encontrados para \overline{GM}_t e \overline{KG} não são os valores reais, mas sim, valores virtuais. Para achar o \overline{KG} real com base no \overline{GM}_t virtual, deve-se corrigir o efeito de superfície livre através da equação 11. O efeito de superfície livre pode ser desprezado para tanques completamente cheios ou vazios.

$$\overline{KG} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{GM}_t - \frac{1}{\Delta} \Sigma \frac{i}{\delta} \quad (11)$$

Onde:

- i é a inércia de superfície livre;
- δ é o volume específico de cada tanque.

Devem ser estimados todos os pesos e momentos longitudinais e verticais que fazem parte da embarcação e ainda não foram colocados a bordo até o momento do teste, assim como todos os itens já presentes e itens que serão removidos da embarcação ao final de sua construção a fim de efetuar uma estimativa final que simule a condição de embarcação leve. Essa etapa é chamada de Inventário.

Alguns cuidados para a realização do teste de inclinação em embarcações reais:

- Evitar calados que mudem abruptamente o plano de linha da água conforme o navio incline;
- Leituras de calado devem ser feitas simultaneamente a bombordo e a boreste em posições à vante, à meia nau e à ré;
- Reduzir ao máximo o número de tripulantes a bordo;
- Fechar válvulas para que não haja movimentação de líquidos nas tubulações;
- Fixar pesos que possam balançar durante a execução do teste, como por exemplo botes salva-vidas;
- Cuidar com o efeito de vento, corrente e linhas de ancoragem na hora de efetuar o teste que, se possível, deve ser feito em uma doca seca;
- Os pesos do teste devem ser suficientes para produzir ângulos de inclinação que garantam resultados precisos, mas que não saiam da região de linearidade ($\phi \leq 10^\circ$).

O peso escolhido deve permitir inclinações de aproximadamente 1° para cada bordo em navios de grande porte; $1,5^\circ$ para navios de até 30m e 2 a 3° para embarcações de pequeno porte. Desta forma, se garante que a variação de \overline{KM} seja pequena durante a execução do teste. Lewis (1988) sugere que o valor do peso utilizado para executar o teste seja calculado recorrendo-se à equação 12, sendo \overline{GM}_t obtido por meio de uma estimativa preliminar.

$$w = \frac{\overline{GM}_t \cdot \Delta \cdot \tan(\phi)}{d} \quad (12)$$

O ângulo de banda do navio, segundo Lewis (1988) deve ser medido com pêndulos em 3 balizas diferentes para evitar a aquisição de valores inconsistentes. O pêndulo deve consistir de uma corda de pequena espessura amarrada a um peso (p.ex um recipiente cheio de óleo) em sua extremidade mais baixa, de forma similar a um prumo, estando em um local abrigado de vento. No entanto, esta é uma metodologia

arcaica para obtenção de dados, sendo possível atualmente obter resultados muito mais precisos por intermédio, por exemplo, de inclinômetros de precisão, como apresentado na Figura 4.

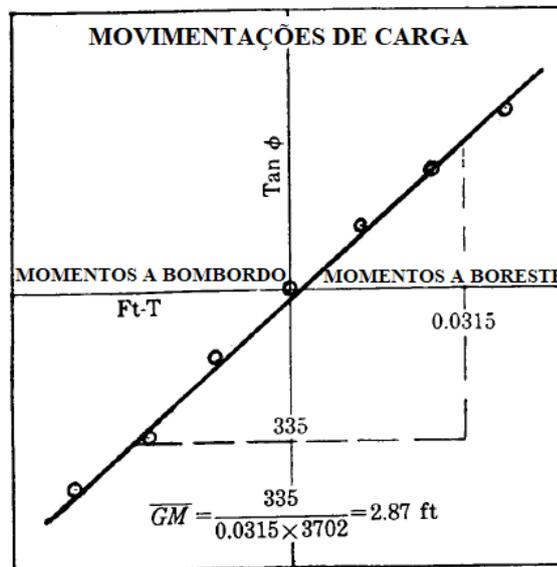
Figura 4 – Inclinômetro de precisão.



Fonte: INCLINÔMETRO... (2019).

Por fim, devem-se plotar as tangentes dos ângulos em função do momento de emborcamento. Recomenda-se pelo menos dois deslocamentos para cada bordo do navio para a construção dos gráficos. O gráfico resultante dos pontos deve tender a uma linha reta conforme a Figura 5. Caso isto não aconteça, devem ser avaliadas possíveis fontes de erro e repetir o teste até que os valores obtidos estejam condizentes. Lewis (1988) considera ângulos e deslocamentos positivos a boreste (estibordo) e negativos a bombordo. A melhor linha de tendência não necessariamente passará pela origem do gráfico, pois o fato de não passar apenas indica a possibilidade de alguma força estar agindo na embarcação no momento em que a leitura inicial foi efetuada.

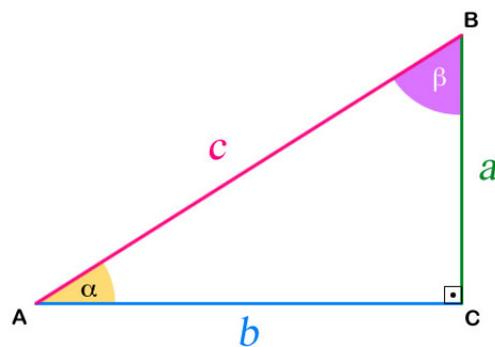
Figura 5 – Resultado do teste de inclinação.



Fonte: Lewis (1988) - Adaptado.

A Figura 5 forma um triângulo retângulo similar ao da Figura 6. Nota-se que a parcela $\frac{w \cdot d}{\tan \phi}$ na Equação 10 equivale à tangente do ângulo β da Figura 6. Portanto, o valor de \overline{GM}_t depende do conjunto de dados obtidos no teste de inclinação, não devendo ser calculado com base em apenas um único ponto da curva.

Figura 6 – Triângulo retângulo.



Fonte: Meier (2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Arranjo Didático

Os experimentos deste trabalho foram realizados em um arranjo didático. O conjunto consiste em um modelo de seção transversal prismática fixo às paredes de um tanque de vidro por meio de suas extremidades longitudinais, de modo que haja apenas o grau de liberdade de roll. O modelo pode ter seu centro de gravidade modificado mediante um sistema de lastros que se movimentam verticalmente. Um lastro que se desloca paralelo à boca do modelo permite que este ganhe ângulos de banda para ambos os bordos, possibilitando o teste de inclinação. O conjunto montado é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Arranjo didático montado.



(a) Vista em perspectiva.

(b) Vista superior.

Fonte: O autor (2019).

O tanque do arranjo, apresentado na Figura 8 tem as dimensões internas a seguir:

- Comprimento: 300,0 milímetros;
- Largura: 250,0 milímetros;
- Altura: 260 milímetros;
- Espessura das paredes: 6 milímetros.

Um transferidor escolar de graduação 1° foi colado na parede do tanque para medir os ângulos de banda no teste de inclinação. A presença de uma espuma no

fundo do tanque impede que objetos danifiquem o vidro ao cair. A base do tanque foi revestida com uma folha de E.V.A para proteger o vidro contra arranhões, impactos e para que a superfície de contato com o meio externo seja antiderrapante.

Figura 8 – Tanque utilizado no experimento.



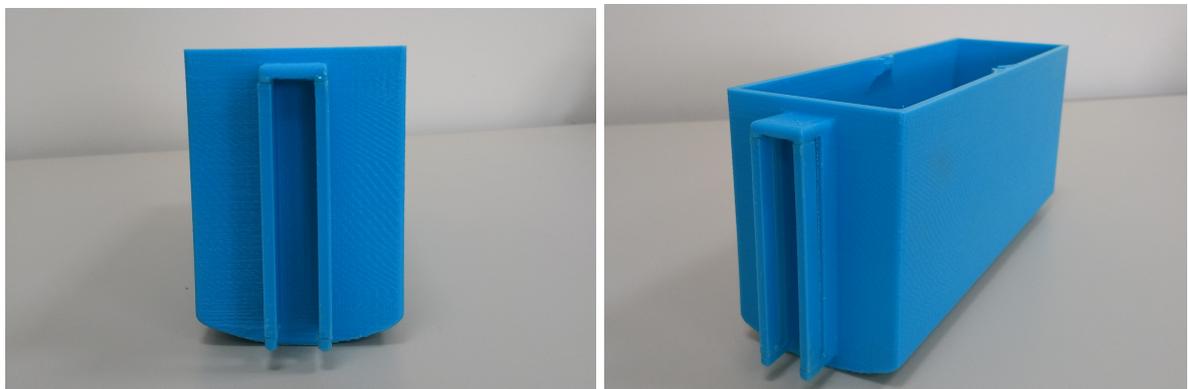
(a) Tanque em perspectiva.

(b) Vista superior do tanque.

Fonte: O autor (2019).

O modelo utilizado no conjunto é composto por um casco de geometria didática concebida com objetivo de facilitar cálculos analíticos. O fundo do modelo é formado por uma meia-elipse e os costados são retos e paralelos, assemelhando-se à seção mestra de um navio mercante como mostra a Figura 9. Foi fabricado por impressão 3D em Poliacido Láctico (P.L.A) e posteriormente impermeabilizado externa e internamente com resina epóxi para evitar absorção de água. O casco possui marcações externas feitas com um traçador de altura para indicar o calado de projeto e facilitar a calibração do experimento.

Figura 9 – Modelo logo após a impressão.



(a) Vista frontal.

(b) Modelo em perspectiva.

Fonte: O autor (2019).

Internamente, o fundo do modelo possui dois rebaixos para inserir insertos

de alumínio que irão alojar as barras roscadas que proporcionam a movimentação dos lastros verticais. Os insertos metálicos possuem 15 milímetros de largura, 30 milímetros de comprimento e 8 milímetros de altura. Há também dois rebaixos na porção interna do topo das paredes laterais do casco para inserir a barra roscada *M5*, que movimenta o lastro transversal como mostra a Figura 10.

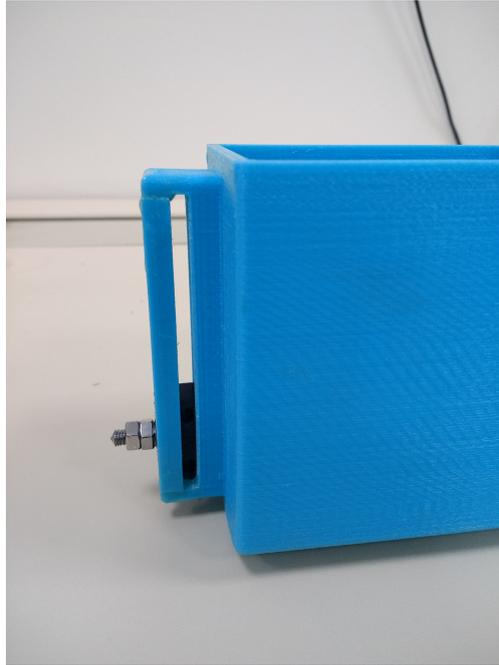
Figura 10 – Parte interna do modelo.



Fonte: O autor (2019).

Há um canal em cada extremidade externa no modelo, apresentado na Figura 11. Estes canais têm como objetivo alojar os componentes responsáveis pela fixação do casco às paredes do tanque.

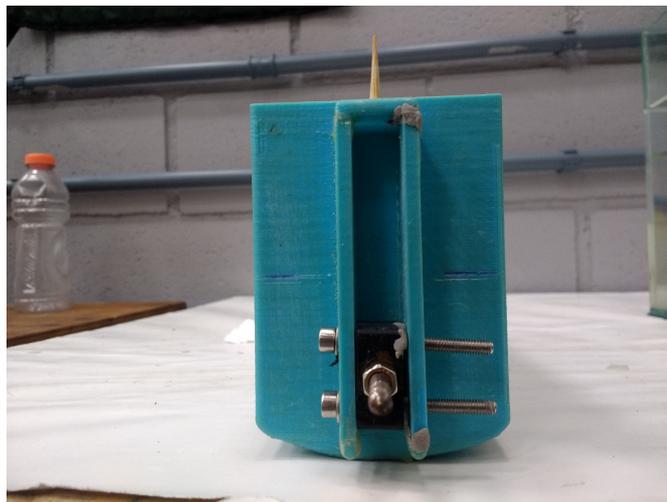
Figura 11 – Canal de alojamento das peças de fixação.



Fonte: O autor (2019).

Uma ponta de madeira colada em uma das extremidades do casco tem a função de ponteiro para as medições de ângulo no transferidor, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Modelo com ponteiro.



Fonte: O autor (2019).

As dimensões principais do modelo são apresentadas a seguir. Foi escolhida uma razão de $\frac{L}{B}$ de 3,0 para facilitar a fabricação e haver espaço suficiente para o manuseio da parte interna do casco, considerando o tamanho reduzido do modelo.

- Comprimento: 210,0 milímetros;
- Boca: 70,0 milímetros;

- Pontal: 100,0 milímetros
- Espessura das paredes: 4,5 milímetros.

Os lastros necessários para que o modelo tenha estabilidade estática foram divididos em: Pesos de movimentação vertical, lastro fixo e peso de movimentação lateral.

Os pesos de movimentação vertical são constituídos de dois cilindros maciços de alumínio usinados de diâmetro 32,1 milímetros e altura 29,7 milímetros, pesando 61,1 gramas cada. Esses cilindros possuem um furo com rosca do tipo *M8*, como mostra a Figura 13. Os furos roscados viabilizam a movimentação vertical dos cilindros em uma barra roscada através do acoplamento porca-parafuso, variando a altura do centro de gravidade do modelo e podendo induzi-lo a condições de instabilidade. Os dois lastros estão posicionados simetricamente a vante e a ré para evitar ângulos de trim no modelo. Cada barra roscada *M8* possui 90 milímetros de comprimento.

Figura 13 – Lastros verticais - cilindro, barra roscada e inserto.



Fonte: O autor (2019).

O lastro fixo constitui-se de uma caixa de acrílico com as seguintes dimensões externas:

- Comprimento: 99,2 milímetros
- Largura: 55,5 milímetros;
- Altura: 36,2 milímetros;
- Espessura das paredes laterais: 1,5 milímetros;
- Espessura do fundo e da tampa: 1,6 milímetros.

Dentro da caixa, há quatro pilhas de moedas de 25 centavos e quatro pilhas de moedas de 50 centavos, escolhidas por serem objetos de geometria simples e massa facilmente mensurável. As moedas foram coladas entre si e ao fundo do recipiente, como mostra a Figura 14 para impedir sua movimentação durante o teste de inclinação, evitando interferência nos resultados. Essa parcela de lastro pesa 192,1 gramas, levando-se em consideração a soma do peso da caixa de acrílico com as moedas posicionadas.

Figura 14 – Lastro fixo.



(a) Vista superior.

(b) Vista lateral.

Fonte: O autor (2019).

O peso de movimentação lateral constitui-se de um disco de aço com diâmetro 21,6 milímetros, espessura de 3,9 milímetros e massa 10,4 gramas, com um furo roscado *M5* em seu centro. Analogamente aos pesos de movimentação vertical, é possível ter uma variação bem controlada do deslocamento do disco, auxiliando na realização do teste de inclinação como mostra a Figura 15. A barra roscada *M5* possui comprimento de 63 milímetros.

Figura 15 – Peso de movimentação lateral.



(a) Vista frontal.

(b) Vista em perspectiva.



(c) Montagem com indicação do lastro lateral.

Fonte: O autor (2019).

A fixação do casco à parede do tanque foi feita através de duas peças impressas em ABS, como apresentado na Figura 16. Essas peças deslizam dentro de canais mostrados na Figura 16 para que se possa fixar o modelo em diferentes condições de calado. Cada uma das peças é atravessada transversalmente por dois parafusos de aço inoxidável com rosca $M4$, servindo de guia para seu movimento. Uma porca e um parafuso $M5$ de classe 12.9¹ em cada peça proporcionam o ajuste da ponta de fixação à parede do tanque, tendo complacência para fixar o modelo em tanques maiores ou menores do que o utilizado nesse trabalho. Uma porca de aço inoxidável de rosca $M5$ é responsável por travar os parafusos de fixação.

¹ Parafusos classe 12.9 foram escolhidos devido à sua dureza, pois como irão estar em contato direto com as moedas, seu material precisa ter uma dureza elevada para que a abrasão não desgaste suas pontas e, por consequência, aumente o atrito no acoplamento.

Figura 16 – Componentes do sistema de acoplamento do modelo ao tanque.



(a) Peça de acoplamento e parafuso. (b) Peça de acoplamento montada no modelo.

Fonte: O autor (2019).

Duas moedas de 50 centavos foram marcadas em seus respectivos centros com um punção e coladas na parede do tanque. A marcação resultante permite que as pontas de fixação dos parafusos gerem pouco atrito devido ao movimento de roll e possam ser acopladas sem danificar o vidro, como mostra a Figura 17. Nos testes preliminares da fixação sem água, o modelo oscilou por mais de 25 segundos até parar completamente.

Figura 17 – Testes preliminares do sistema de fixação na ausência de água.



Fonte: O autor (2019).

3.1.2 Planilha Interativa

Uma planilha interativa foi desenvolvida no software Microsoft Excel para auxiliar na execução dos testes. Essa planilha foi preenchida inicialmente com as

dimensões principais do modelo, propriedades da seção transversal e das partes que compõem o canal de alojamento para as peças de fixação. Foram informados também os valores de pesos e centros, correspondendo à etapa de Inventário do teste de inclinação, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Tabela de pesos e centros da planilha interativa

Cálculo de KG			
Parcela	Massa (g)	Altura Medida Paquímetro (mm)	Altura KG [mm]
Casco	322,42	-	37,89
Barra Roscada M8 (1)	27,59	-	52,00
Barra Roscada M8 (2)	27,59	-	52,00
Pilha de Moedas - 25 centavos	22,00	-	19,995
Pilha de Moedas - 25 centavos	22,97	-	19,995
Pilha de Moedas - 25 centavos	22,97	-	19,995
Pilha de Moedas - 25 centavos	22,97	-	19,995
Pilha de Moedas - 50 centavos	15,79	-	19,41
Pilha de Moedas - 50 centavos	15,79	-	19,41
Pilha de Moedas - 50 centavos	15,79	-	19,41
Pilha de Moedas - 50 centavos	15,79	-	19,41
Caixa de Acrílico	37,3	-	33,105
Peso M8 (1)	61,09	29,70	29,88
Peso M8 (2)	61,09	29,70	29,86
Inserto de Metal M8 (1)	8,79	-	11,00
Inserto de Metal M8 (2)	8,79	-	11,00
Barra Roscada M5	7,44	-	100,00
Peso M5	10,39	-	100,00
VALOR KG (mm)			34,40

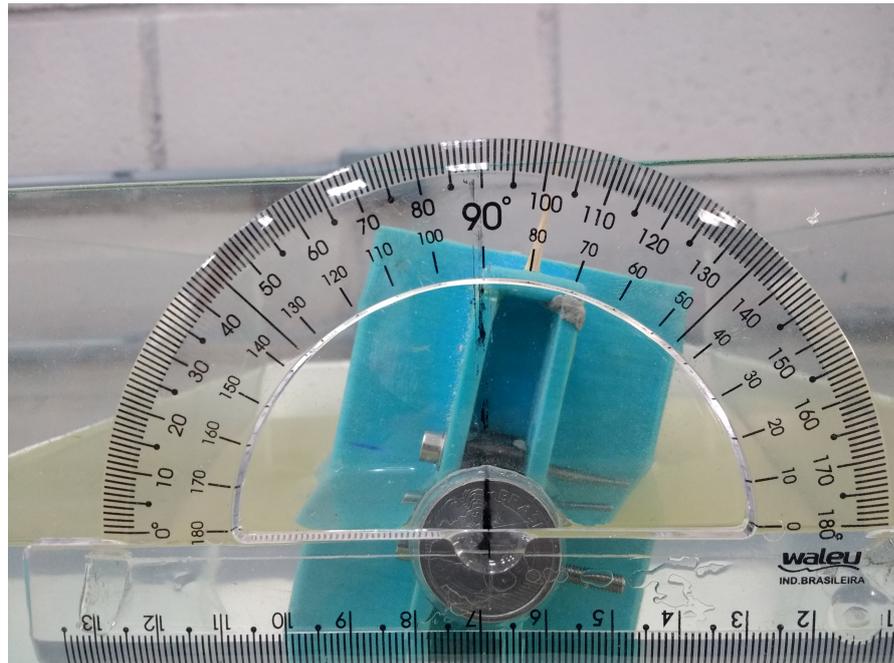
Fonte: O autor (2019).

Baseando-se nessas informações, a planilha calculou o calado de equilíbrio hidrostático através de uma macro, também retornando os valores de \overline{KB} , \overline{BM}_t , \overline{KG} e \overline{GM}_t . Os cálculos foram efetuados com base massa específica da água doce ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Ao receber os dados dos ângulos de banda e do deslocamento transversal do lastro lateral para cada bordo, a planilha plotou os ângulos de banda e suas tangentes em função do momento emborcador, similarmente à Figura 5.

3.2 MÉTODOS

O estudo da estabilidade transversal deste trabalho fundamentou-se em comparar e discutir dados obtidos de \overline{GM}_t e \overline{KG} no teste de inclinação com os respectivos valores calculados através da planilha interativa. A medição dos ângulos de banda do teste foi feita por intermédio de um transferidor e um ponteiro posicionado em um local específico do casco como mostra a Figura 19, não utilizando pêndulos em diferentes balizas para a aquisição de dados.

Figura 19 – Medição de ângulos por meio de um transferidor.

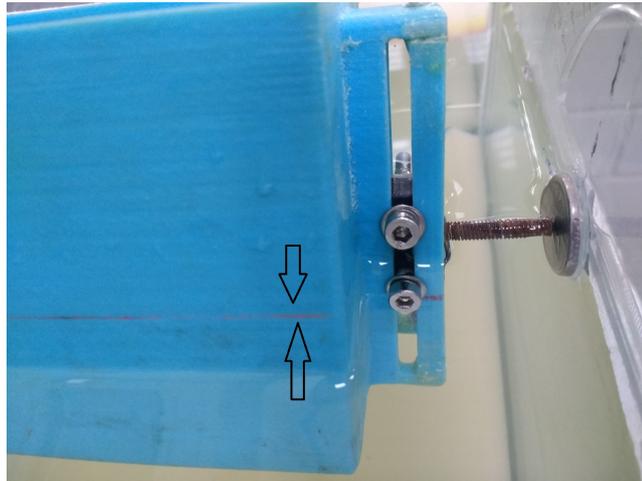


Fonte: O autor (2019).

O modelo não esteve sujeito ao efeito de superfície livre durante os testes. Portanto, estas considerações não foram feitas na planilha de cálculos. A densidade da água foi medida durante o experimento e todos os pesos estavam fixos durante o teste, não sendo necessário fazer hipóteses sobre cargas que poderiam ter movimento de balanço. Vale ressaltar que o calado do modelo não foi medido simultaneamente em ambos os bordos do casco.

O experimento precisou ser calibrado para a execução dos testes. Com o modelo dentro do tanque cheio de água, ajustou-se a posição do lastro fixo para corrigir ângulos de trim e banda. A conferência foi feita de maneira visual por meio de de marcações ao longo do casco feitas com um traçador de altura, conforme a Figura 20. O calado do casco foi obtido com base na planilha interativa, que utilizou as informações geométricas e dos pesos para calcular o calado do modelo. Essas marcações também serviram de base para averiguar se o modelo atingiu ou ultrapassou o calado de projeto, assim como para conferir ângulos de trim e banda.

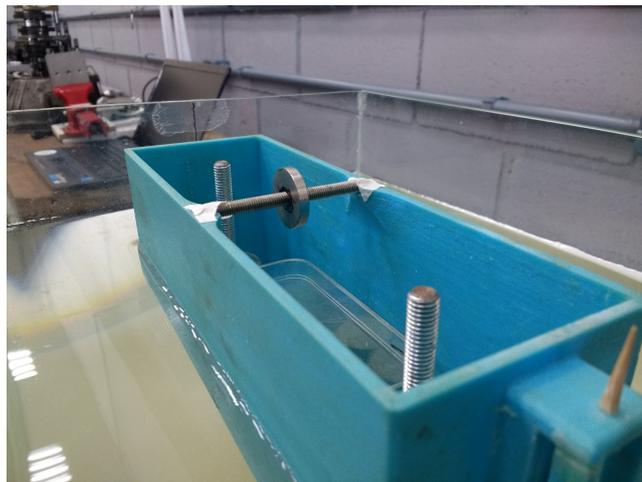
Figura 20 – Marcação utilizada para aferição visual de ângulos de trim e banda.



Fonte: O autor (2019).

O peso de movimentação lateral deve estar no centro do casco, conforme a Figura 21 para que a calibração seja feita corretamente.

Figura 21 – Lastro lateral centralizado.



Fonte: O autor (2019).

A centralização desse lastro foi feita utilizando um paquímetro de resolução 0,02 mm, medindo-se a distância da faces do disco até o costado externo do modelo como mostra a Figura 22. O disco está centralizado quando o valor medido com o paquímetro for igual a 36,94 milímetros.

Figura 22 – Medição da distância do lastro lateral ao costado do modelo.



Fonte: O autor (2019).

Os pesos de movimentação vertical devem estar em sua posição mais baixa possível para a execução da calibração e dos testes. Deve-se medir a distância de cada cilindro até o fundo do modelo com o paquímetro, como mostra a Figura 23. O valor obtido foi informado à planilha para composição dos pesos e centros.

Figura 23 – Medição de altura dos lastros verticais.



Fonte: O autor (2019).

Após os ajustes, o modelo foi fixado cuidadosamente nas paredes do tanque de modo que a altura das peças de fixação não implique ângulos de trim. O aperto dos parafusos foi o mínimo possível, suficiente apenas para que não saiam de suas posições nas moedas. Maiores quantidades de aperto aumentam o atrito entre os

parafusos e as moedas, reduzindo o movimento de roll e interferindo nos resultados. Finalizada a montagem e calibração do experimento, iniciou-se o teste de inclinação.

Foram definidas 7 posições de braços de momento de emborcamento a partir do centro do modelo para a execução do teste de inclinação, como mostrado na Tabela 1, sendo as quatro primeiras com espaçamento de 1,5 milímetros entre si para garantir a aquisição de dados na região de linearidade de \overline{GZ} . A primeira coluna da Tabela 1 refere-se à ordem das posições até onde foi movido o lastro lateral, gerando os momentos emborcadores. A segunda coluna diz respeito à distância que o centro do lastro lateral está de sua posição inicial no modelo, equivalendo ao valor dos braços de momento emborcador. A terceira coluna informa o resultado da medição no paquímetro, executada conforme a Figura 22, para que o centro do lastro lateral esteja na posição de teste especificada na primeira coluna.

Tabela 1 – Braços de momento e seus respectivos valores a serem medidos com o paquímetro.

Posição	Braço de momento (mm)	Resultado Medição no Paquímetro (mm)
1	1,50	35,44
2	3,00	33,94
3	4,50	32,44
4	6,00	30,94
5	12,00	24,94
6	18,00	18,94
7	24,00	12,94

Fonte: O autor (2019).

Estas posições foram testadas para ambos os bordos do modelo, sendo utilizada a convenção de sinais sugerida por Lewis (1988) para deslocamentos e inclinações a boreste e a bombordo. Para cada braço de momento, foram realizadas três medições de ângulos. Portanto, houve três deslocamentos transversais de massa do centro do modelo até cada distância de braço de momento, sendo anotados os valores dos ângulos de banda para calcular as tangentes e compor os gráficos necessários. Posteriormente, baseando-se no referencial teórico exposto, foram comparados \overline{GM}_t e \overline{KG} teóricos e experimentais.

Adicionalmente, foi realizado o teste de inclinação com o modelo flutuando de forma livre. O procedimento para a execução desta etapa é análogo ao implementado para os experimentos com o modelo fixo às paredes do tanque. No entanto, foram apresentados e avaliados apenas os valores correspondentes a região onde $\phi \leq 15^\circ$ para cada bordo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 reúne os dados obtidos de forma analítica para o experimento por meio da planilha interativa, tendo-se inseridos os parâmetros de geometria do modelo e pesos.

Tabela 2 – Dados do conjunto.

Δ (g)	727,56
Calado do modelo (mm)	50,98
Altura do centro de carena \overline{KB} (mm)	26,61
Raio Metacêntrico \overline{BM}_t (mm)	8,30
\overline{KG} teórico (mm)	34,4
\overline{GM}_t teórico (mm)	0,52

Fonte: O autor (2019).

É possível afirmar, baseando-se no resultado de \overline{GM} exposto, que o modelo tem estabilidade inicial positiva. Essa afirmação foi comprovada durante a pré-montagem do conjunto, onde o modelo flutuou estável com todos os pesos a bordo, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Modelo flutuando livremente com estabilidade inicial.

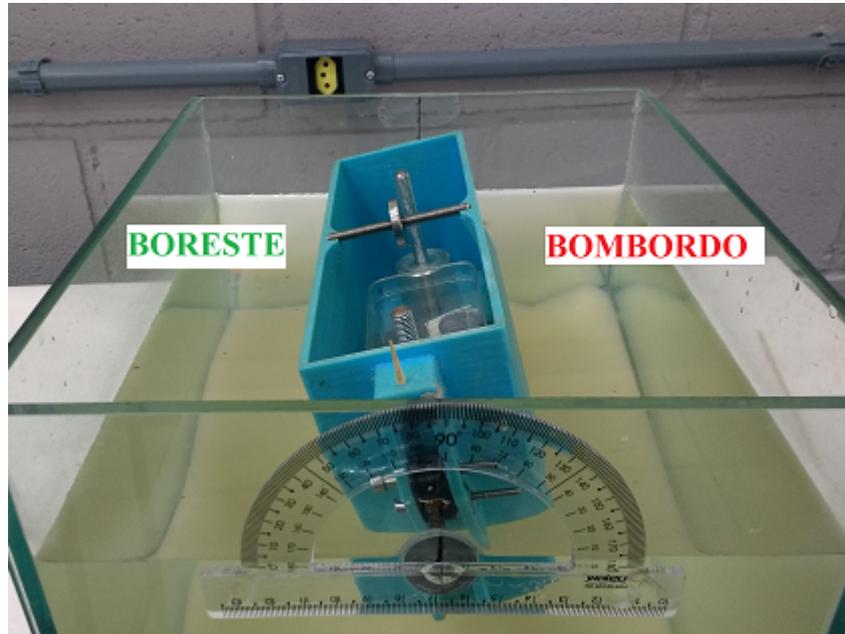


Fonte: O autor (2019).

Os resultados do teste de inclinação são elencados na Tabela 3, sendo possível visualizar os ângulos de banda e suas respectivas tangentes para cada

momento emborcador, tanto a boreste quanto a bombordo. A Figura 25 mostra o modelo inclinado a boreste, assim como a indicação dos bordos.

Figura 25 – Modelo inclinado a boreste e indicação dos bordos.



Fonte: O autor (2019).

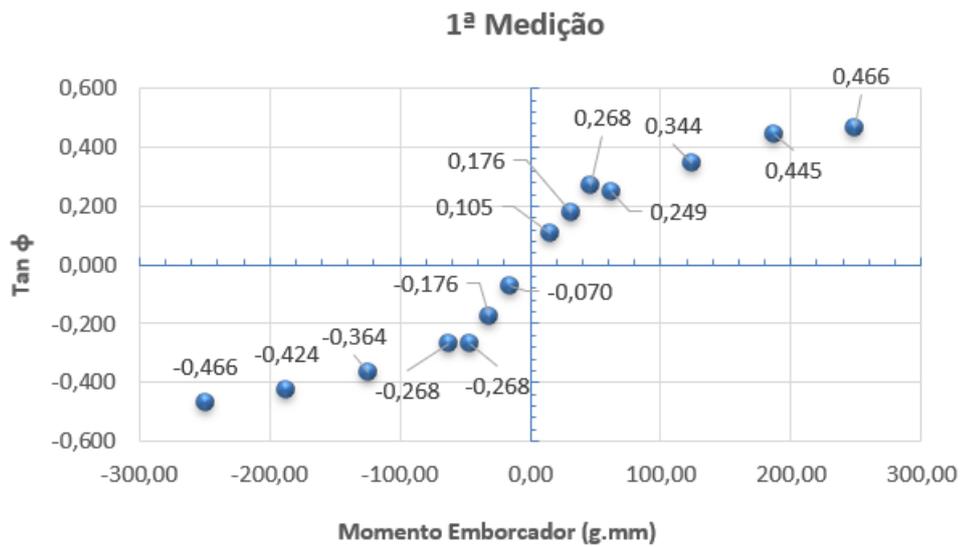
Tabela 3 – Resultado dos testes de inclinação com o modelo fixo ao tanque.

INCLINAÇÕES A BORESTE							
Posição	Momento Emborcador ($g \cdot mm$)	1ª Medição		2ª Medição		3ª Medição	
		ϕ (°)	$\tan(\phi)$	ϕ (°)	$\tan(\phi)$	ϕ (°)	$\tan(\phi)$
1	15,59	6,00	0,105	8,00	0,141	6,00	0,105
2	31,17	10,00	0,176	11,00	0,194	11,00	0,194
3	46,76	15,00	0,268	13,00	0,231	13,00	0,231
4	62,34	14,00	0,249	15,00	0,268	15,00	0,268
5	124,68	19,00	0,344	20,00	0,364	20,00	0,364
6	187,02	24,00	0,445	24,00	0,445	23,00	0,424
7	249,36	25,00	0,466	24,00	0,445	24,00	0,445
INCLINAÇÕES A BOMBORDO							
Posição	Momento Emborcador ($g \cdot mm$)	1ª Medição		2ª Medição		3ª Medição	
		ϕ (°)	$\tan(\phi)$	ϕ (°)	$\tan(\phi)$	ϕ (°)	$\tan(\phi)$
1	-15,59	-4,00	-0,070	-4,00	-0,070	-4,00	-0,070
2	-31,17	-10,00	-0,176	-9,00	-0,158	-10,00	-0,176
3	-46,76	-15,00	-0,268	-15,00	-0,268	-16,00	-0,287
4	-62,34	-15,00	-0,268	-15,00	-0,268	-15,00	-0,268
5	-124,68	-20,00	-0,364	-20,00	-0,364	-19,00	-0,344
6	-187,02	-23,00	-0,424	-23,00	-0,424	-24,00	-0,445
7	-249,36	-25,00	-0,466	-25,00	-0,466	-26,00	-0,488

Fonte: O autor (2019).

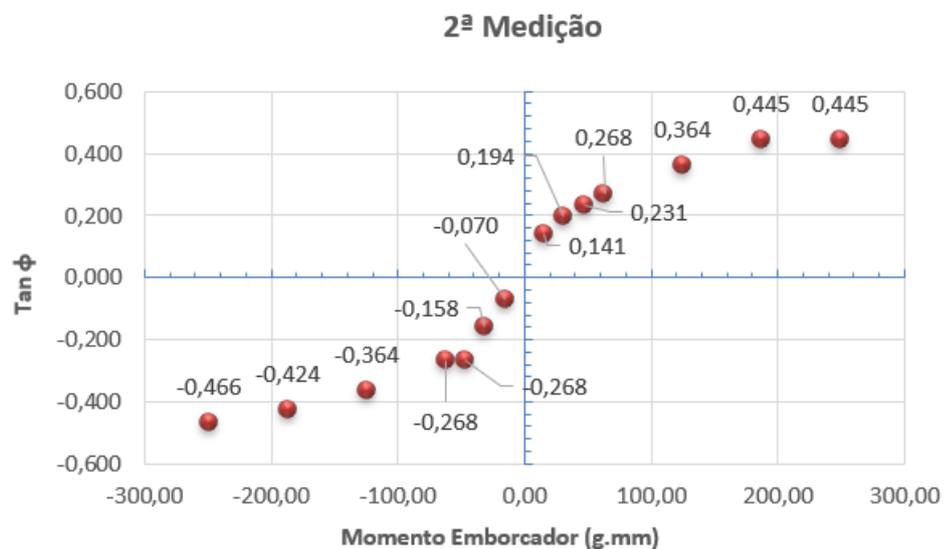
A partir dos dados da Tabela 3 são construídos os gráficos das Figuras 26, 27 e 28, onde são exibidas as tangentes dos ângulos de banda em função dos momentos emborcadores.

Figura 26 – Resultados da primeira medição com o modelo fixo ao tanque.



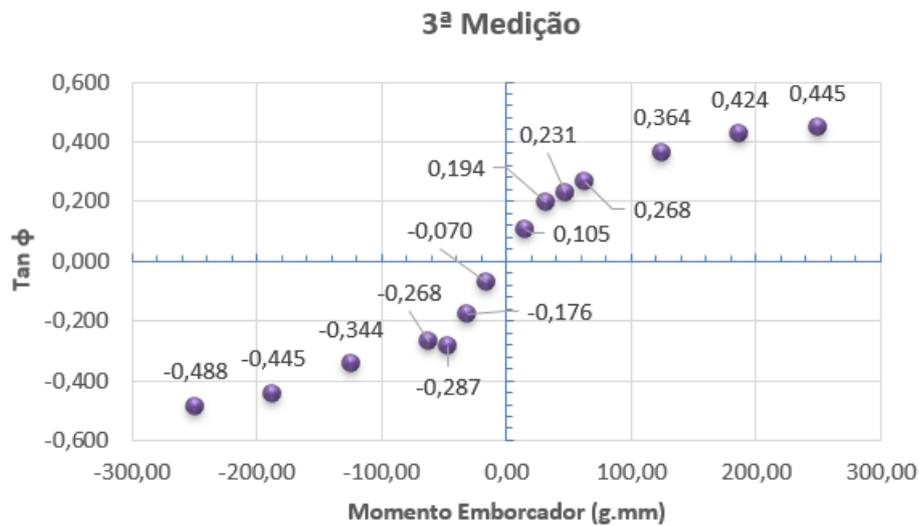
Fonte: O autor (2019).

Figura 27 – Resultados da segunda medição com o modelo fixo ao tanque.



Fonte: O autor (2019).

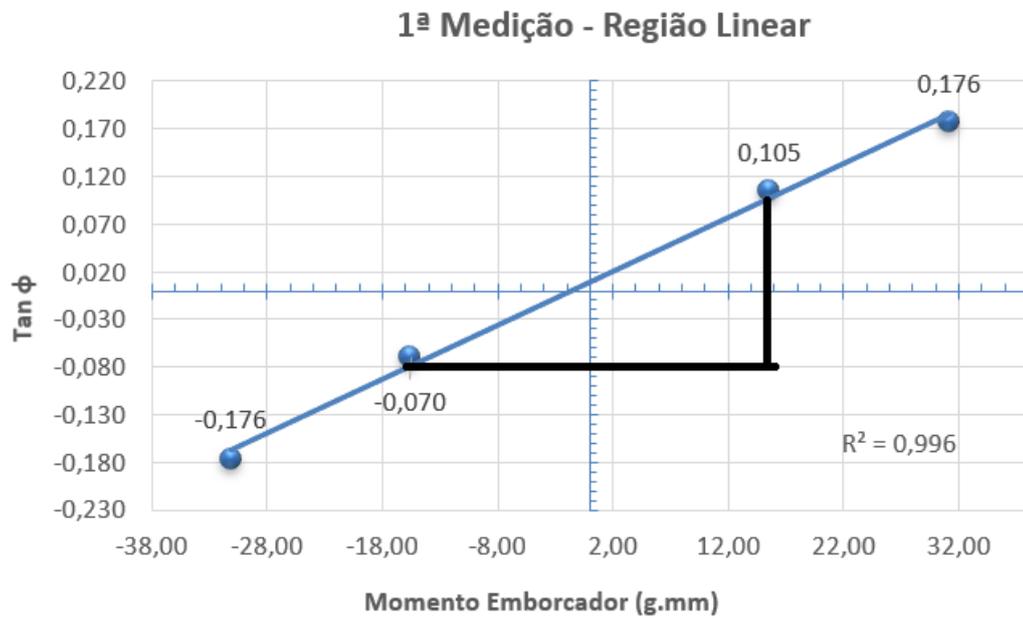
Figura 28 – Resultados da terceira medição com o modelo fixo ao tanque.



Fonte: O autor (2019).

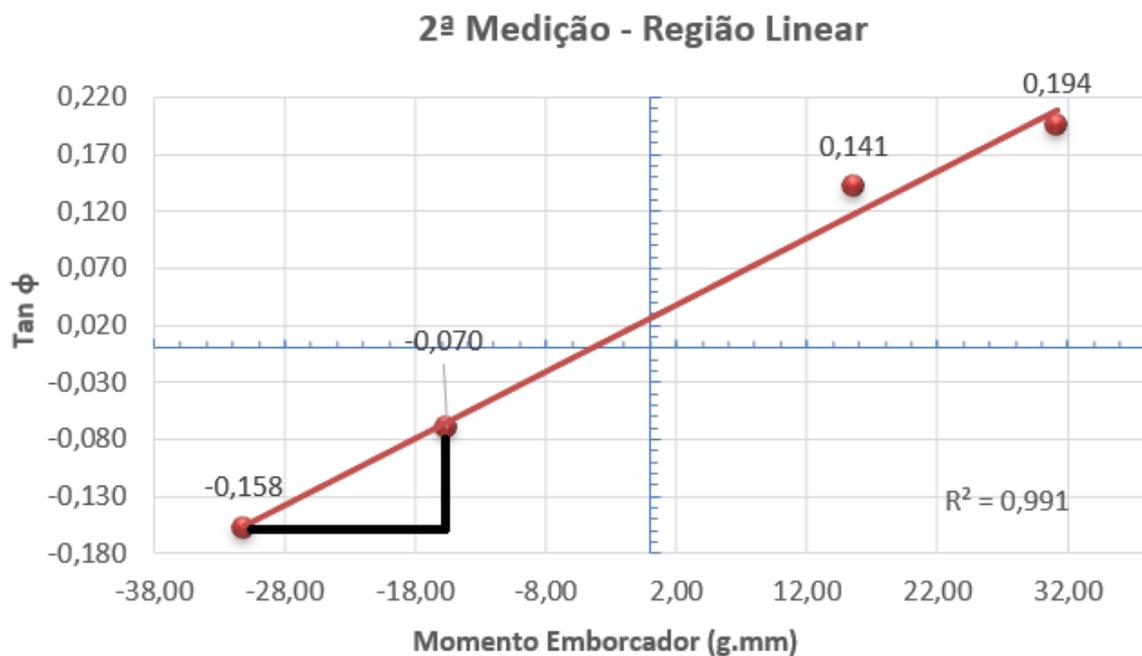
A altura metacêntrica transversal foi calculada com base no gráfico resultante dos pontos da região de linearidade do braço de endireitamento \overline{GZ} , ocorrendo, segundo Lewis (1988), quando $0 \leq \phi \leq 10^\circ$. Esse comportamento linear é evidenciado nas Figuras 29, 30 e 31, correspondentes aos gráficos dos resultados das posições de teste 1 e 2 de cada bordo. Nestas figuras estão marcados os triângulos retângulos utilizados para calcular a inclinação da curva e, posteriormente, obter o valor experimental de \overline{GM}_t . Os pontos selecionados para formar a hipotenusa dos triângulos foram escolhidos de maneira que o segmento de reta resultante tenha a inclinação mais próxima possível da linha de tendência linear de cada nuvem de pontos.

Figura 29 – Resultados da primeira medição de ângulos - região linear.



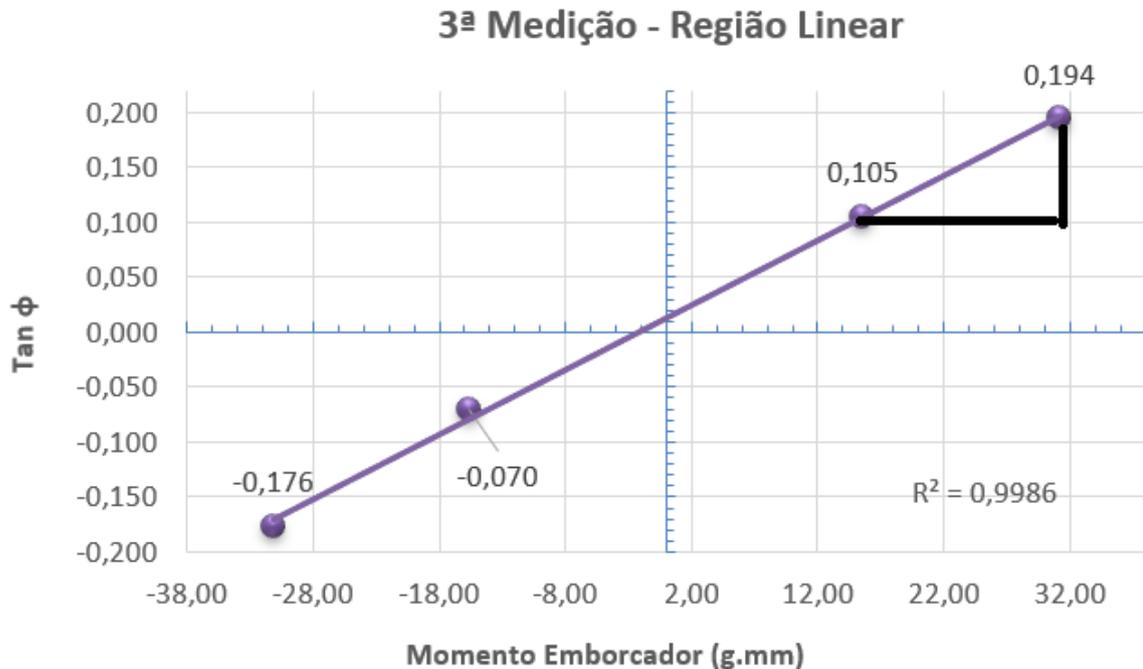
Fonte: O autor (2019).

Figura 30 – Resultados da segunda medição de ângulos - região linear.



Fonte: O autor (2019).

Figura 31 – Resultado da terceira medição de ângulos - região linear.



Fonte: O autor (2019).

O teste de inclinação foi repetido com o modelo flutuando livremente no tanque, tendo como objetivo observar seu comportamento e obter valores de altura metacêntrica transversal mais próximos à realidade, comparando-os com o modelo fixo. A Tabela 4 mostra os resultados do teste de inclinação para a região linear de \overline{GZ} .

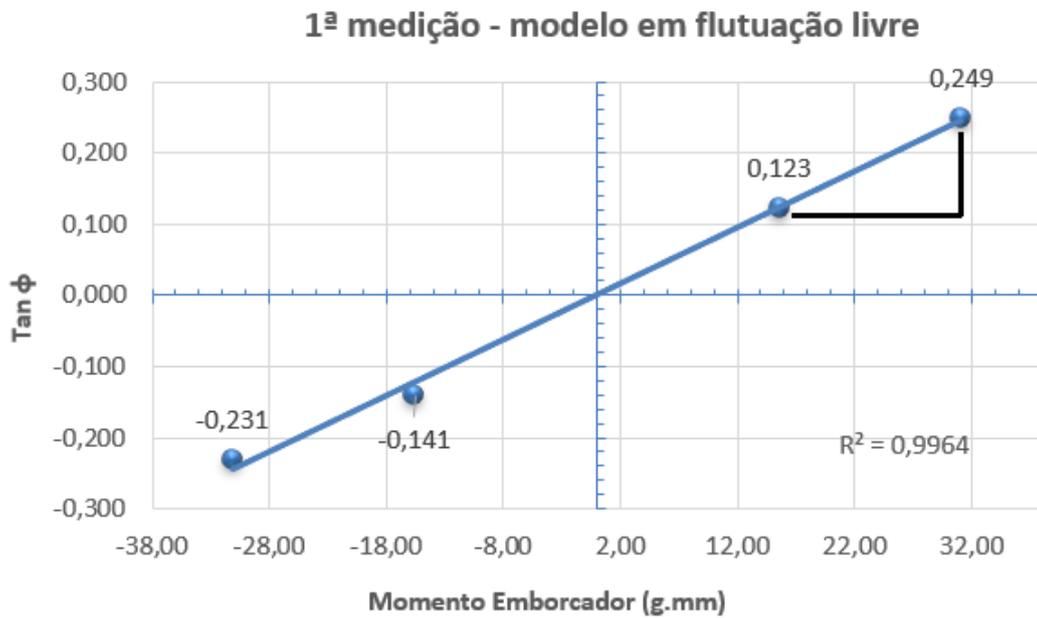
Tabela 4 – Resultados do teste de inclinação com o modelo flutuando de forma livre.

INCLINAÇÕES A BORESTE							
Posição	Momento Emborcador ($g \cdot mm$)	1ª Medição		2ª Medição		3ª Medição	
		ϕ (°)	$\tan(\phi)$	ϕ (°)	$\tan(\phi)$	ϕ (°)	$\tan(\phi)$
1	15,59	7,00	0,123	8,00	0,141	10,00	0,176
2	31,17	14,00	0,249	13,00	0,231	13,000	0,227
INCLINAÇÕES A BOMBORDO							
Posição	Momento Emborcador ($g \cdot mm$)	1ª Medição		2ª Medição		3ª Medição	
		ϕ (°)	$\tan(\phi)$	ϕ (°)	$\tan(\phi)$	ϕ (°)	$\tan(\phi)$
1	-15,59	-8,00	-0,141	-9,00	-0,158	-9,00	-0,158
2	-31,17	-13,00	-0,231	-14,00	-0,244	-13,00	-0,231

Fonte: O autor (2019).

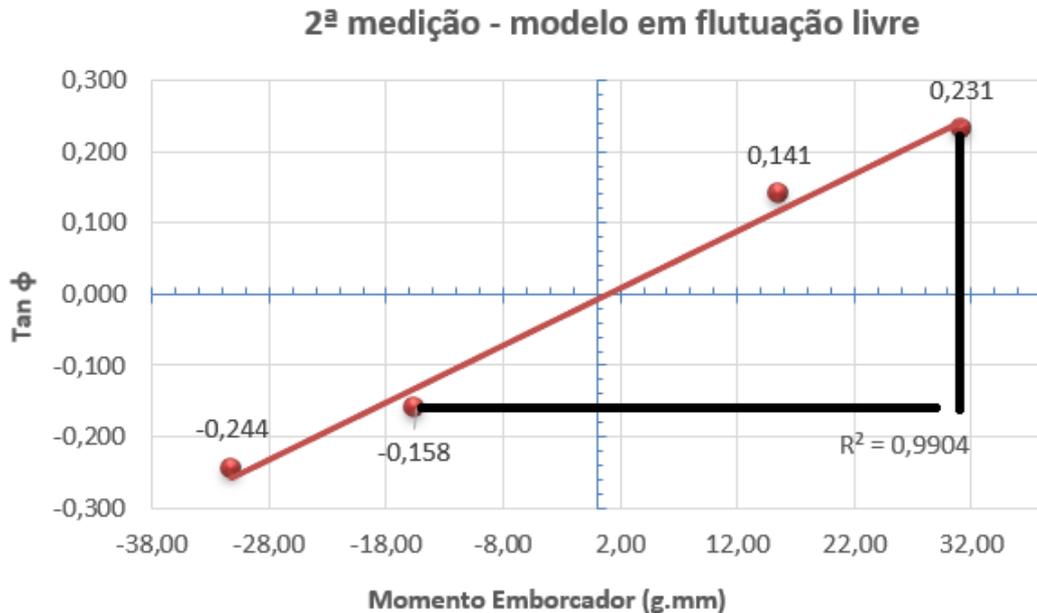
A partir dos dados da Tabela 4, foram construídos os gráficos das Figuras 32, 33 e 34, sendo analogamente marcados os triângulos retângulos para os cálculos de \overline{GM}_t . Constata-se que a teoria linear de \overline{GZ} proposta por Lewis (1988) é válida, pois o comportamento da dispersão de pontos obtidos para o modelo fixo ao tanque é similar ao observado para o casco em flutuação livre.

Figura 32 – Primeira medição de ângulos - modelo flutuando livremente.



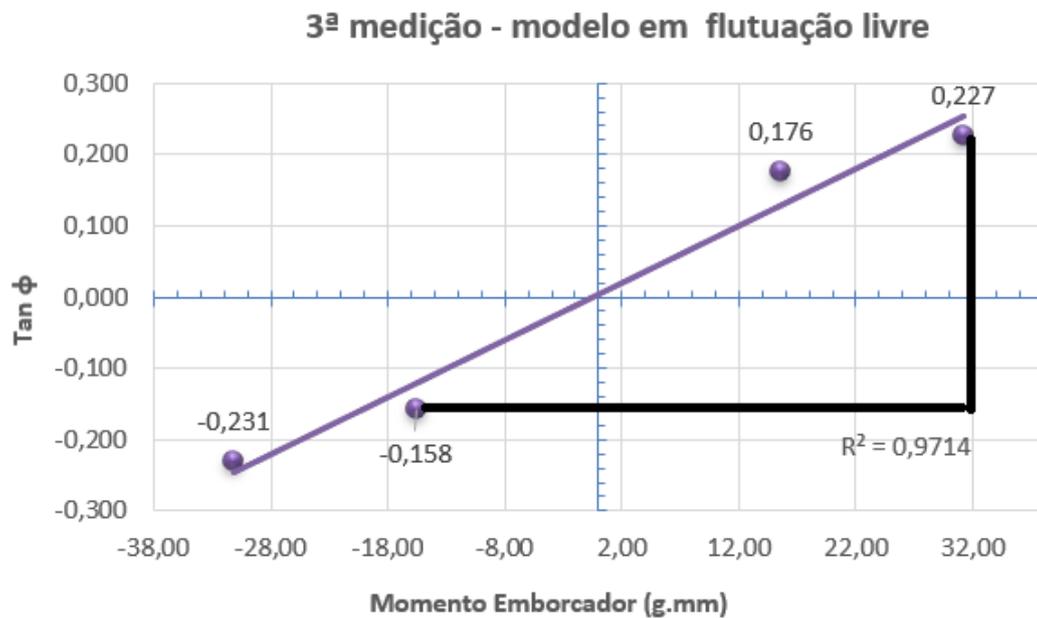
Fonte: O autor (2019).

Figura 33 – Segunda medição de ângulos - modelo flutuando livremente.



Fonte: O autor (2019).

Figura 34 – Terceira medição de ângulos - modelo flutuando livremente.



Fonte: O autor (2019).

As informações expostas acima serviram de base para compor uma análise estatística dos resultados. A Tabela 5 exhibe os valores médios dos ângulos de banda para cada braço de momento, juntamente com os valores de desvio e erro padrão. A incerteza do instrumento de medição é de $0,5^\circ$, ou seja, metade da resolução do transferidor.

Tabela 5 – Análise estatística dos resultados dos testes de inclinação.

MODELO FIXO AO TANQUE					
INCLINAÇÕES A BORESTE					
Posição	Ângulo Médio (°)	Incerteza (°)	Desvio Padrão (°)	Erro Padrão (°)	Valor Real (°)
1	6,67	0,50	1,15	1,26	6,67 ± 1,26
2	10,67	0,50	0,577	0,76	10,67 ± 0,76
INCLINAÇÕES A BOMBORDO					
Posição	Ângulo Médio (°)	Incerteza (°)	Desvio Padrão (°)	Erro Padrão (°)	Valor Real (°)
1	-4,00	0,50	0,000	0,50	-4,00 ± 0,50
2	-9,67	0,50	0,577	0,76	-9,67 ± 0,76
MODELO EM FLUTUAÇÃO LIVRE					
INCLINAÇÕES A BORESTE					
Posição	Ângulo Médio (°)	Incerteza (°)	Desvio Padrão (°)	Erro Padrão (°)	Valor Real (°)
1	8,33	0,50	1,528	1,61	8,33 ± 1,61
2	13,33	0,50	0,577	0,76	13,33 ± 0,76
INCLINAÇÕES A BOMBORDO					
Posição	Ângulo Médio (°)	Incerteza (°)	Desvio Padrão (°)	Erro Padrão (°)	Valor Real (°)
1	-8,67	0,50	0,577	0,76	-8,67 ± 0,76
2	-13,33	0,50	0,577	0,76	-13,33 ± 0,76

Fonte: O autor (2019).

Os valores dos ângulos de banda registrados são diferentes para cada condição de fixação, havendo maior erro padrão para os testes executados com o modelo em flutuação livre. Os gráficos da Figura 35 e Figura 36 apresentam os resultados dos valores médios de ϕ em função do momento emborcador, juntamente com a barra de erro padrão dos ângulos obtida por meio da Tabela 5.

Figura 35 – Resultado da análise estatística - modelo fixo ao tanque.

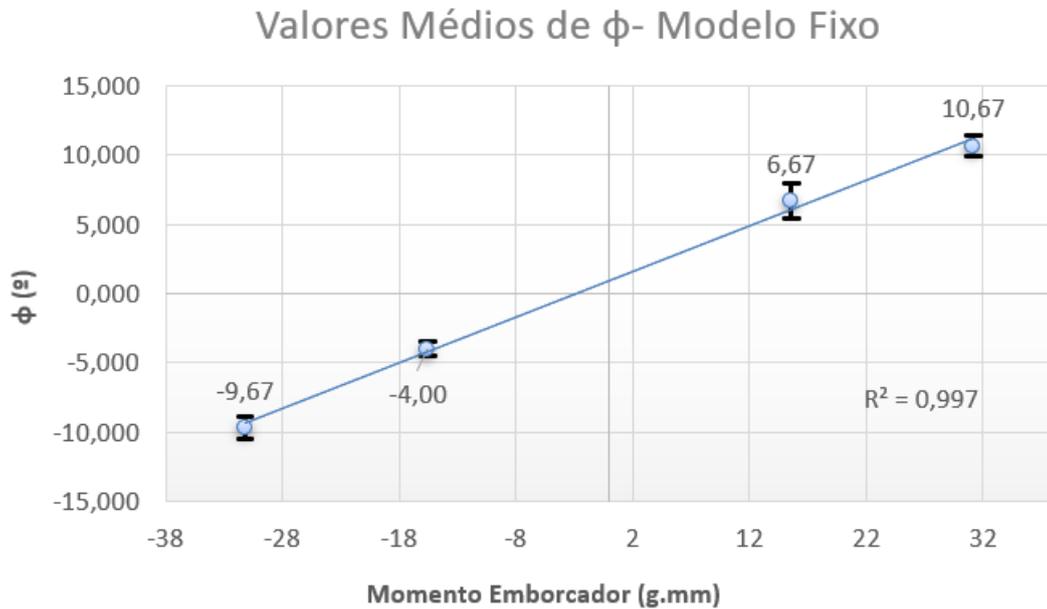
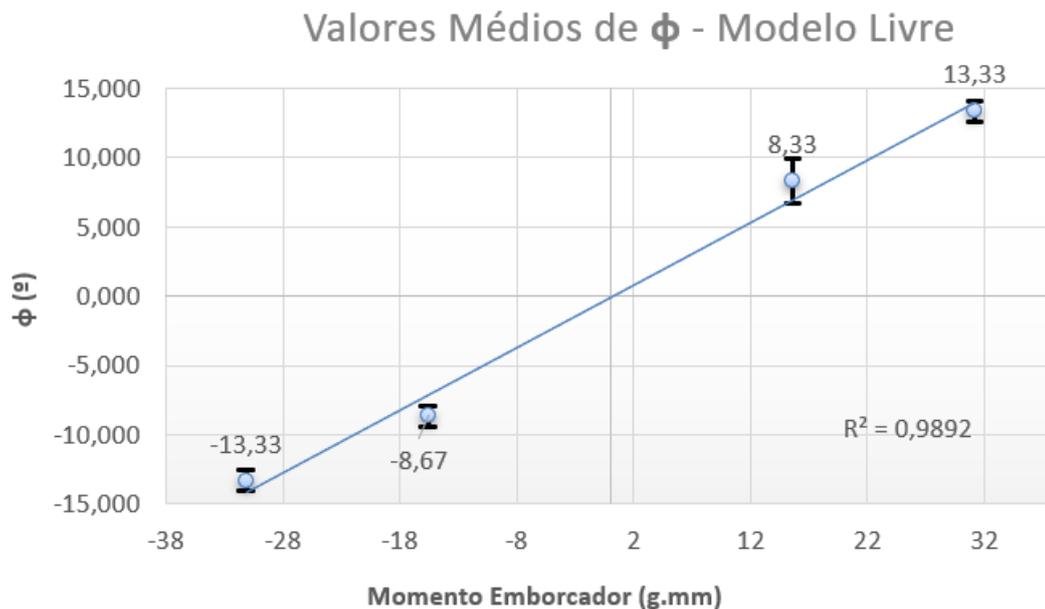


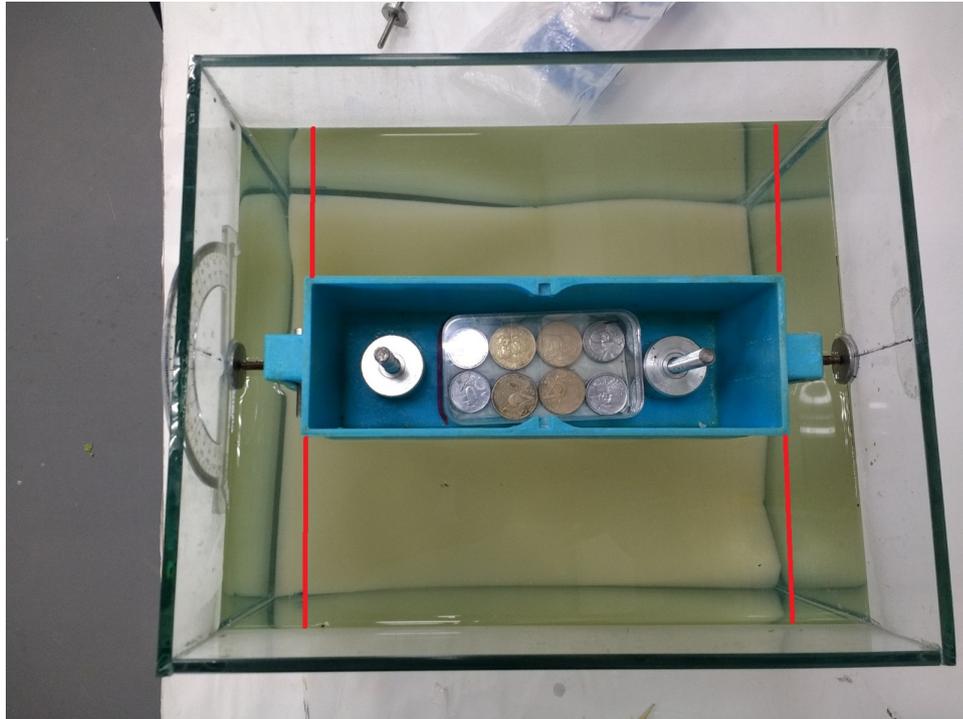
Figura 36 – Resultado da análise estatística - modelo em flutuação livre.



Quando o modelo está fixo ao tanque, os ângulos de banda são maiores a boreste e menores a bombordo. Há folgas entre as peças de fixação, os parafusos de rosca $M4$ e o canal de alojamento do modelo. Estas folgas, somadas ao desalinhamento vertical e horizontal das marcações de fixação nas moedas, implica o desalinhamento do modelo com relação à sua fixação, como mostra a Figura 37. Portanto, é condizente afirmar que o casco adquira ângulos de banda com mais

facilidade para um dos bordos em questão devido ao desalinhamento. As folgas dificultam a movimentação das peças deslizantes em algumas ocasiões após a fixação do modelo ao tanque, implicando ângulos de trim e não permitindo que o modelo atinja seu calado de equilíbrio, prejudicando a calibração do experimento.

Figura 37 – Desalinhamento do modelo em relação ao ponto de fixação.



Fonte: O autor (2019).

A linha de base do transferidor, utilizada como referência, está colada na mesma posição onde é fixo um dos parafusos à parede do tanque, como é possível observar na Figura 19. Quando o modelo está fixo ao tanque, este se movimenta apenas em torno do ponto de fixação, portanto, com o ponteiro percorrendo exatamente o mesmo arco formado pelo transferidor. Isto torna a medição mais eficaz, diminuindo a ocorrência de erros devido a grandes desalinhamentos do modelo em relação ao instrumento de medição, também mitigando erros de paralaxe.

No entanto, quando o casco flutua de forma livre, torna-se difícil visualizar o real valor do ângulo que está sendo marcado no transferidor. É preciso segurar o modelo manualmente, de modo que este fique o mais paralelo possível às paredes do tanque, aproximando-o ao máximo da linha de referência do transferidor. Deve-se também ter cautela para não induzir ângulos de banda no casco durante seu manuseio. Estes fatores contribuem para o aumento da ocorrência de erros de medição, o que é comprovado ao observar a Tabela 5. Vale ressaltar que a própria espessura do ponteiro pode induzir a erros.

Os valores de \overline{GM}_t obtidos nos testes de inclinação são exibidos na Tabela 6,

onde é feito também um comparativo percentual entre os resultados.

Tabela 6 – Valores de \overline{GM}_t obtidos experimentalmente.

Medição	\overline{GM}_t modelo flutuando livre (mm)	\overline{GM}_t modelo fixo ao tanque (mm)	Diferença %
1 ^a	0,169	0,245	30,84
2 ^a	0,165	0,261	36,74
3 ^a	0,167	0,231	27,84

Fonte: O autor (2019).

A diferença entre os valores de \overline{GM}_t encontrados para as diferentes condições de teste pode ser justificada pela própria concepção do experimento. Quando o casco está fixo às paredes, a fixação restringe o grau de liberdade de heave. Portanto, ao adquirir ângulos de banda e modificar a geometria submersa, não ocorre alteração de calado do modelo para que o volume deslocado permaneça constante. A fixação também implica o modelo não ter movimento de roll em torno de seu ponto de rotação na linha d'água, mas sim em relação a pontos localizados em diferentes regiões do casco. Logo, a inércia total será composta pela inércia do movimento de roll em relação ao plano de flutuação, somada a uma parcela de transferência com relação aos pontos de fixação do modelo ao tanque. Este aumento na inércia eleva o valor de \overline{BM} e, por consequência, \overline{GM} , justificando o fato de o modelo apresentar maior estabilidade estando fixo ao tanque.

A Tabela 7 exhibe a comparação dos valores experimentais de \overline{GM}_t com o valor obtido de forma analítica. Analogamente, os valores de \overline{KG} experimentais e analíticos são comparados na Tabela 8.

Tabela 7 – Comparativo de valores de \overline{GM}_t experimentais com \overline{GM}_t teórico.

Medição	\overline{GM}_t flutuação livre (mm)	\overline{GM}_t modelo fixo (mm)	\overline{GM}_t Teórico (mm)	Diferença % \overline{GM}_t Teórico e \overline{GM}_t de flutuação livre	Diferença % \overline{GM}_t Teórico e \overline{GM}_t modelo fixo
1 ^a	0,169	0,245	0,521	67,50	53,01
2 ^a	0,165	0,261	0,521	68,30	49,90
3 ^a	0,167	0,231	0,521	67,98	55,62

Fonte: O autor (2019).

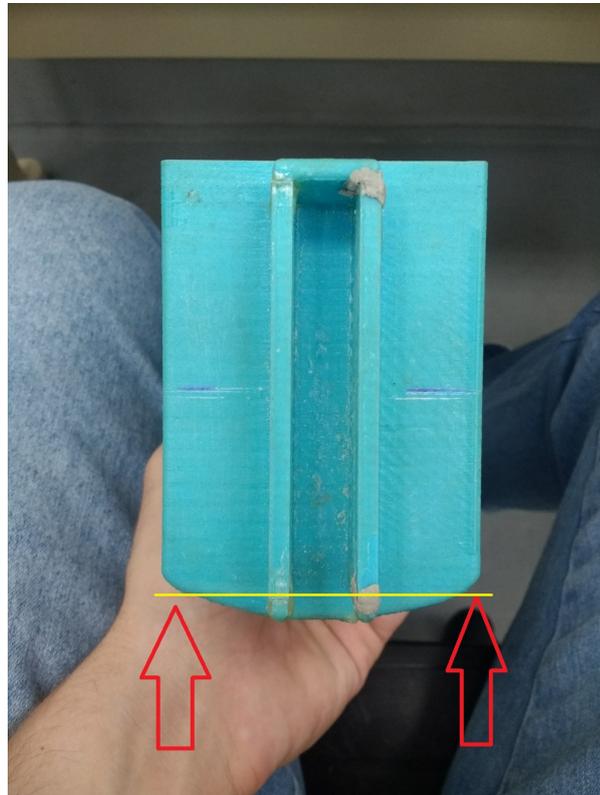
Tabela 8 – Comparativo de valores de \overline{KG} experimentais com \overline{KG} teórico.

Medição	\overline{KG} flutuação livre (mm)	\overline{KG} modelo fixo (mm)	\overline{KG} Teórico (mm)	Diferença % \overline{KG} Teórico e \overline{KG} de flutuação livre	Diferença % \overline{KG} Teórico e \overline{KG} modelo fixo
1 ^a	34,74	34,67	34,40	1,01	0,80
2 ^a	34,75	34,66	34,40	1,02	0,75
3 ^a	34,75	34,69	34,40	1,02	0,84

Fonte: O autor (2019).

Percebe-se que há uma grande diferença entre os valores de \overline{GM}_t experimentais e teóricos. No entanto, esta diferença entre valores teóricos e experimentais é significativamente menor quando se comparam os valores de \overline{KG} . A altura metacêntrica é função de \overline{KB} , \overline{BM}_t e \overline{KG} . Como o valor de \overline{KG} está muito próximo ao resultado teórico, a divergência está sendo causada por \overline{KB} e/ou \overline{BM}_t , fatores que são diretamente relacionados à geometria submersa do casco. A Figura 38 exibe a seção transversal do modelo.

Figura 38 – Seção transversal do modelo com a região empenada em destaque.

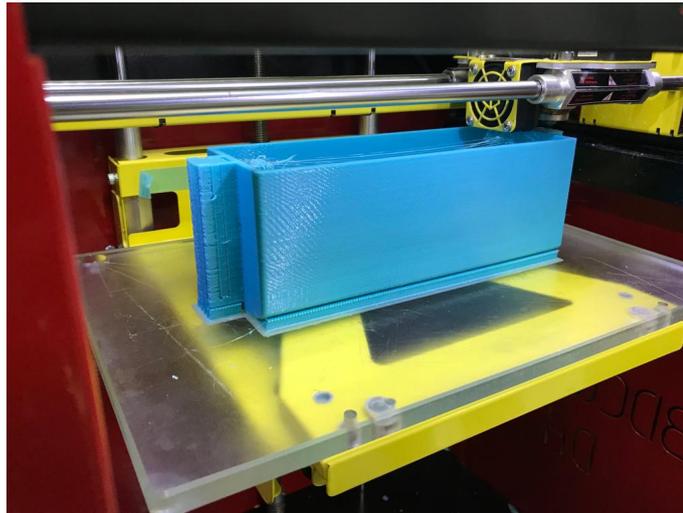


Fonte: O autor (2019).

Ao observar a Figura 38, percebe-se que há uma assimetria em relação ao plano diametral da embarcação, sendo evidenciada pelas setas vermelhas e pelo traço

de cor amarela. Esta assimetria entre os bordos é resultado da própria fabricação, onde a impressora utilizada não possuía controle da temperatura de sua mesa e nem do ambiente onde ocorre a impressão, como mostra a Figura 39. Como resultado, houve um empenamento do casco, gerando a assimetria vista na Figura 38. A assimetria entre os bordos também contribui para o fato de o modelo não reproduzir os mesmos ângulos de inclinação a boreste e a bombordo, principalmente quando fixo às paredes do tanque.

Figura 39 – Impressão 3D do modelo.



Fonte: O autor (2019).

O modelo utilizado para os cálculos analíticos não contém nenhuma imperfeição na superfície do casco, sendo perfeitamente simétrico em relação aos bordos e às porções de vante e ré. A diferença geométrica entre o modelo real e teórico não possibilita comparar diretamente os valores de \overline{GM}_t , visto que \overline{KB} e \overline{BM}_t obtidos de forma analítica não são compatíveis com o protótipo construído.

No entanto, este ocorrido não invalida os testes e muito menos a teoria proposta por Lewis (1988), pois todas as nuvens de pontos resultantes do teste de inclinação tendem a um comportamento linear quando $\phi \leq 10^\circ$. Isso apenas reforça o fato de que a fabricação de modelos de teste em escala reduzida deve ser feita com o maior cuidado possível, evitando não-equivalências geométricas que possam induzir a erros quando confrontados valores teóricos e experimentais.

5 CONCLUSÕES

O teste de inclinação foi executado com sucesso. Foi possível comprovar que a teoria proposta por Lewis (1988) é válida, mesmo com o conjunto didático apresentando limitações e problemas, devido à própria concepção do experimento e defeitos de fabricação do modelo. Também foi possível perceber o quão difícil é atenuar o movimento de roll em embarcações, pois a movimentação de uma pequena massa localizada no convés do modelo já implicava grandes ângulos de banda. Não foi possível realizar testes de inclinação para condições diferentes de \overline{KG} , pois ao movimentar os lastros verticais, o modelo rapidamente emborcava se o lastro lateral estivesse montado no conjunto, demonstrando o quão elevado está o centro de gravidade. Vale ressaltar que caso o lastro lateral não esteja presente, é possível movimentar consideravelmente os pesos verticais, induzindo o modelo a condições de instabilidade.

A influência de cada parâmetro da estabilidade transversal foi discutida neste trabalho. Percebeu-se o quanto a altura do centro de carena e o raio metacêntrico estão atrelados à geometria submersa do casco, pois o empeno do modelo, juntamente com outras limitações do experimento fez com que os valores teóricos e práticos de \overline{GM} divergissem em mais de cinquenta por cento. Os cálculos analíticos de estabilidade do modelo foram feitos na planilha interativa.

O conjunto didático foi caracterizado apresentando-se cada parcela que compunha o arranjo, expondo o modelo impresso em 3D e exibindo o funcionamento dos lastros verticais e lateral. Há também a explicação de como devem ser feitas as medições de deslocamento dos lastros por meio de um paquímetro para informar à planilha interativa. Nesta caracterização, também foi explicado como seria feita a fixação do modelo ao tanque por meio de peças deslizantes, combinadas com parafusos e porcas de rosca $M4$ e $M5$. O método de medição de ângulos também pode ser conferido.

Calibrar o experimento exigiu diversos cuidados e mostrou ser uma tarefa complicada. Devido ao fato de a calibração dos ângulos de banda e trim ser feita por meio do lastro fixo, tornou-se muito difícil acertar o ponto onde o modelo estaria nivelado. A movimentação desta parcela precisou ser feita de forma delicada, pois como equivale a 26,47% do peso total do conjunto, qualquer movimentação equivocada retirava o modelo de sua posição inicial, acarretando principalmente ângulos de banda.

O sistema de fixação do casco ao tanque atrapalhou a calibração do experimento quando o modelo já estava fixo às paredes. O desalinhamento entre

o casco e seus pontos de fixação implicava ângulos de banda para um dos bordos, sendo necessário ajustar a posição do lastro fixo antes de iniciar cada movimentação de lastro lateral a partir do centro do modelo. A pequena largura do tanque apresentou-se como um problema. Qualquer perturbação externa implicava a irradiação de ondas e tornava a calibração mais demorada, pois era preciso aguardar a atenuação das ondas para conferir se o modelo já estava nivelado.

5.1 MELHORIAS NO EXPERIMENTO

A comparação entre resultados teóricos e experimentais mostrou o quanto este arranjo didático pode ser melhorado. Todo o experimento foi construído e testado em apenas 1 semestre fazendo com que muitos atributos não alcançaram seu patamar ótimo, implicando os erros vistos no trabalho.

O modelo pode ser fabricado utilizando métodos e materiais mais robustos que garantam os aspectos geométricos e dimensionais, como por exemplo usinagem em alumínio. Não se deve projetar o modelo visando a máxima redução de peso, pois esta implica uma quantidade maior de lastros a bordo, dificultando a calibração.

A fixação do modelo ao tanque pode ser novamente projetada, baseando-se no princípio de o modelo conseguir emergir e submergir sem dificuldades, além de garantir seu alinhamento, não provocando ângulos de trim e ter o menor atrito possível no acoplamento. O tanque pode ser reconstruído com maiores dimensões de largura, diminuindo a irradiação de ondas e possibilitando inclusive ensaios dinâmicos.

O sistema de ajuste da posição de lastros fixos deve permitir que estes sejam posicionados de forma precisa e possam ser travados em qualquer local. Pode-se usar acelerômetros conectados a um computador para medir ângulos de banda e trim, facilitando a calibração do experimento, a execução do teste inclinação com o modelo livre e a aquisição de dados para, por exemplo, testes de decaimento, também eliminando erros de paralaxe. O lastros verticais podem ser feitos de aço, por necessitar de menores dimensões para atingir determinada massa em comparação a lastros de alumínio.

5.2 TESTES FUTUROS

Futuramente, podem ser feitos ensaios de decaimento e obter as funções de transferência (RAO's) experimentais. O ensaio de decaimento, segundo Schwarz e Aranha (2002) consiste em impor um ângulo de banda inicial no modelo e em seguida soltá-lo. O modelo irá oscilar livremente até parar na posição de equilíbrio, onde $\phi = 0$. Deve-se registrar a variação do ângulo ϕ com o tempo e plotar um gráfico de ϕ em função de t . Por meio desse gráfico pode-se determinar a frequência natural do modelo

(número de ciclos por segundo) e, comparando-o com uma simulação numérica, os coeficientes de amortecimento.

Os testes de decaimento e obtenção da função de transferência experimentais também podem ser feitos com o modelo utilizando bolinas ou flutuadores laterais, podendo comparar os resultados obtidos com os valores aqusitados com o casco nú. Estes apêndices têm a função de atenuar o movimento de roll do modelo. As bolinas diminuem o movimento de roll da embarcação por meio do atrito viscoso, agindo como barreiras que dificultam o escoamento da água ao redor do casco. As bolinas também aumentam o amortecimento devido à geração de ondas. Já os flutuadores laterais atenuam o movimento de roll atuando no aumento do coeficiente de restauração.

REFERÊNCIAS

3DCLONER DH. 2019. Acessado em 8 de julho de 2019. Disponível em: <<http://www.etchbrasil.com.br/produto/10/3dcloner-dh>>.

COELHO, A. S. **Módulo de Estabilidade**: Unidade de Estudo Autônomo. 1. ed. [S.l.]: Diretoria de Portos e Costas, 2007.

DIMENSION ELITE. 2019. Acessado em 8 de julho de 2019. Disponível em: <<https://tca.pt/impressoras-3d-stratasys/>>.

INCLINÔMETRO DIGITAL MEDIÇÃO NÍVEL BASE MAGNÉTICA PRECISÃO. 2019. Acessado em 10 de junho de 2019. Disponível em: <<https://www.lojadocuteleiro.com.br/ferramentas-cutelaria/inclinometro/inclinometro-digital-medicao-nivel-base-magnetica-precisao/>>.

LEWIS, E. V. (Ed.). **Principles of Naval Architecture**: Stability and Strength. [S.l.]: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988. v. 1.

MARTINS, M. R. **Hidrostatica e Estabilidade**. 2010. Acessado em 27 de maio de 2019. Disponível em: <http://www.ndf.poli.usp.br/~gassi/disciplinas/pnv2341/Martins_2010_Hidrostatica_e_Estabilidade_PNV2341.pdf>.

MEIER, C. **Tangente no Triângulo Retângulo**. 2019. Acessado em 08 de junho de 2019. Disponível em: <<http://www.profcardy.com/cardicas/tangente-no-triangulo-retangulo.php>>.

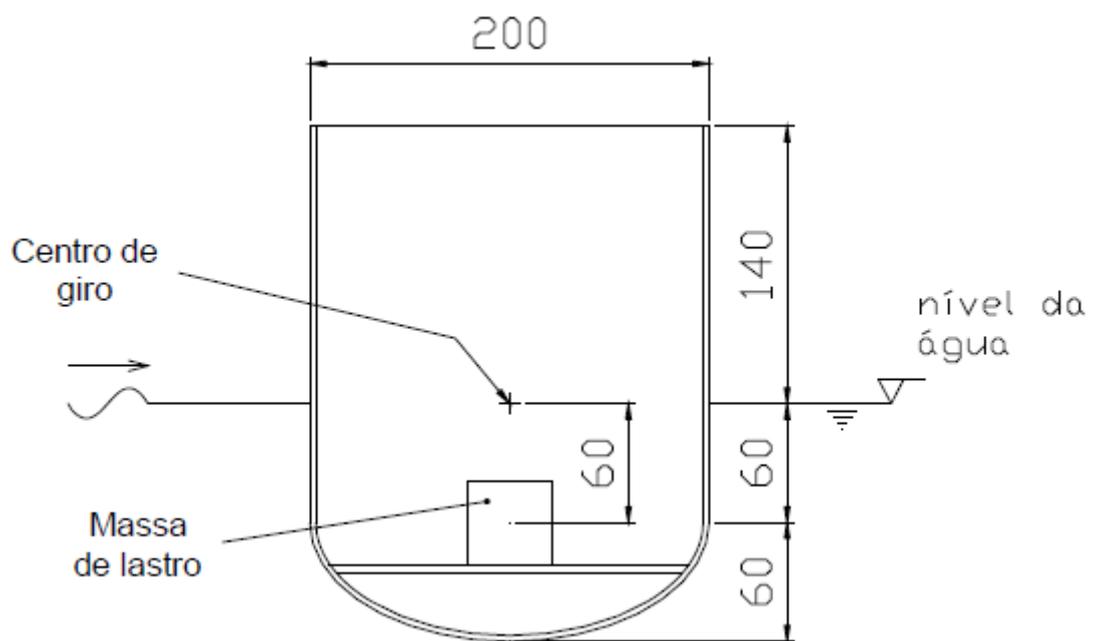
RUTLEDGE, J.; FRENCH, J. J. Design and analysis of a water channel for characterization of low Reynolds number flows. **Advances in Technology Innovation**, Taiwan Association of Engineering and Technology Innovation, v. 3, n. 3, p. 101, 2018.

SCHWARZ, M.; ARANHA, J. A. P. **Análise teórica e experimental do movimento de Roll de um modelo de seção constante e com 1 grau de liberdade**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2002.

APÊNDICE A - PROJETO E CONSTRUÇÃO DO MODELO E DA FIXAÇÃO

O modelo foi desenhado no software SolidWorks com uma seção transversal prismática, similar à seção proposta por Schwarz e Aranha (2002), vista na Figura 40 para possibilitar cálculos analíticos.

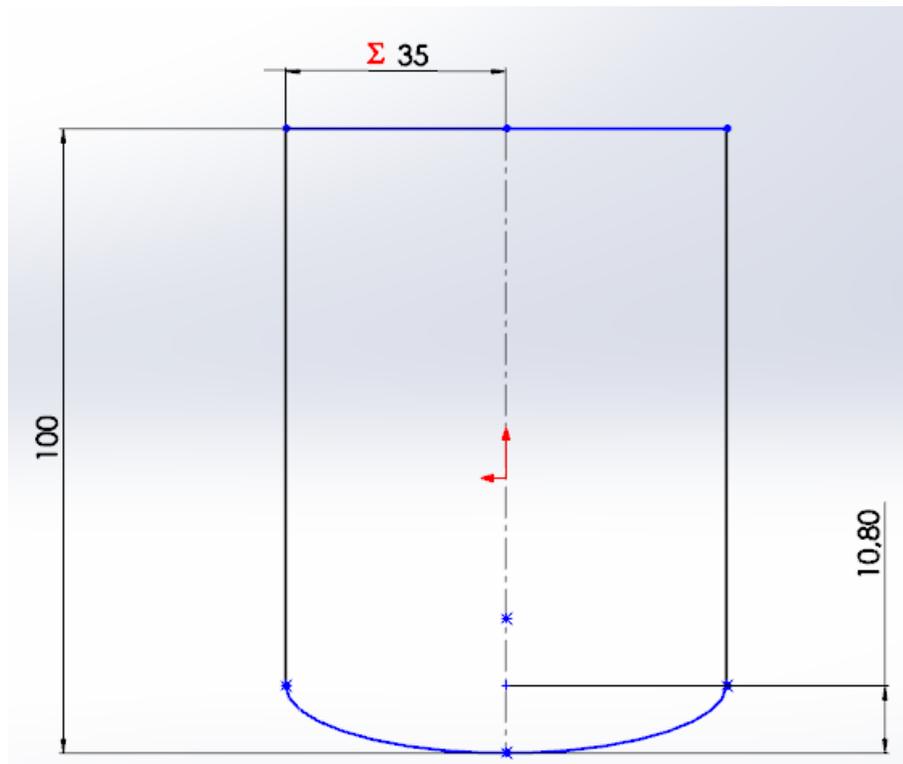
Figura 40 – Seção transversal do modelo utilizado por Schwarz e Aranha (2002)



Fonte: Schwarz e Aranha (2002) - Adaptado.

A Figura 41 apresenta o desenho em CAD da seção transversal do modelo e suas respectivas dimensões em milímetros.

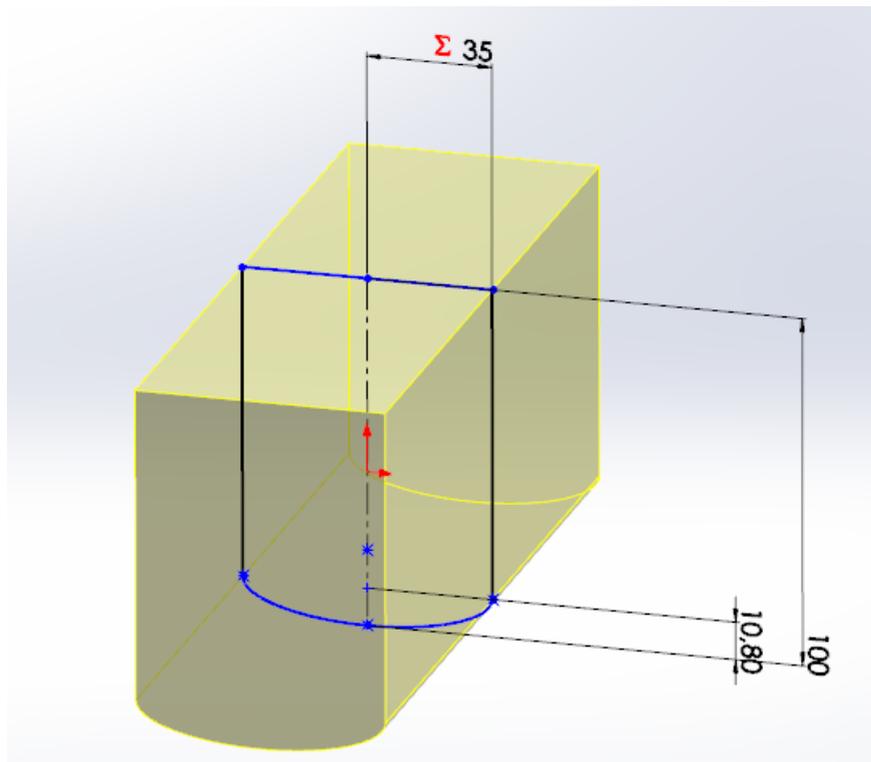
Figura 41 – Dimensões da seção transversal do modelo construído pelo autor



Fonte: O autor (2019).

Por possuir simetria em relação aos bordos, foi desenhada apenas metade da seção transversal do casco, sendo posteriormente espelhada em relação ao plano diametral do modelo. Posteriormente, a seção transversal finalizada foi extrudada, dando origem ao corpo do modelo, como observado na Figura 42.

Figura 42 – Desenho CAD - Modelo extrudado.



Fonte: O autor (2019).

O casco nu possui as seguintes dimensões:

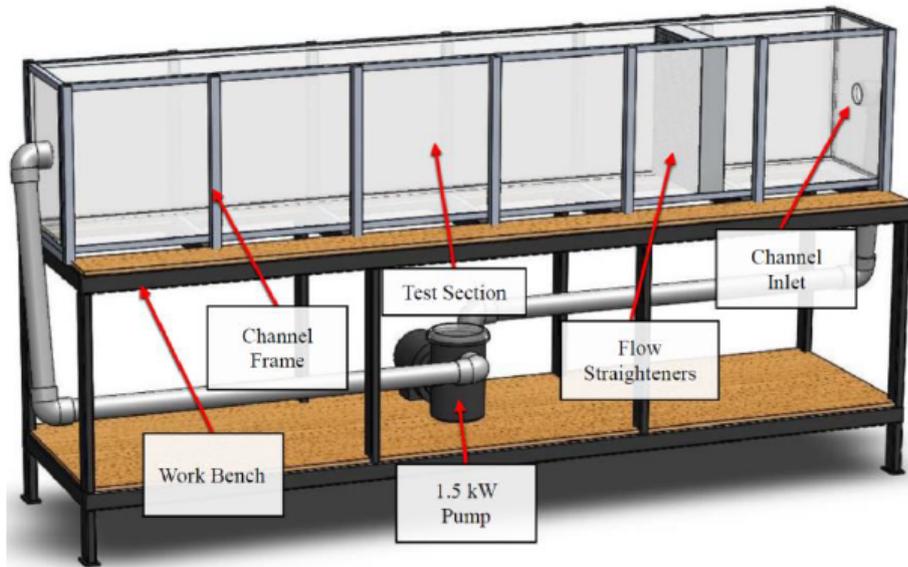
- Comprimento: 210,0 milímetros;
- Boca: 70,0 milímetros;
- Pontal: 100,0 milímetros.

O comprimento do modelo foi escolhido para que ele possa ser utilizado em um tanque de correnteza de baixo custo, Esse tanque, proposto por Rutledge e French (2018), será construído na UFSC - Campus Joinville e possui uma seção de testes com as seguintes dimensões:

- Comprimento: 1000,0 milímetros;
- Largura: 300,0 milímetros;
- Altura: 400,0 milímetros.

A Figura 43 apresenta o desenho esquemático do tanque a ser construído.

Figura 43 – Desenho esquemático do tanque de correnteza.

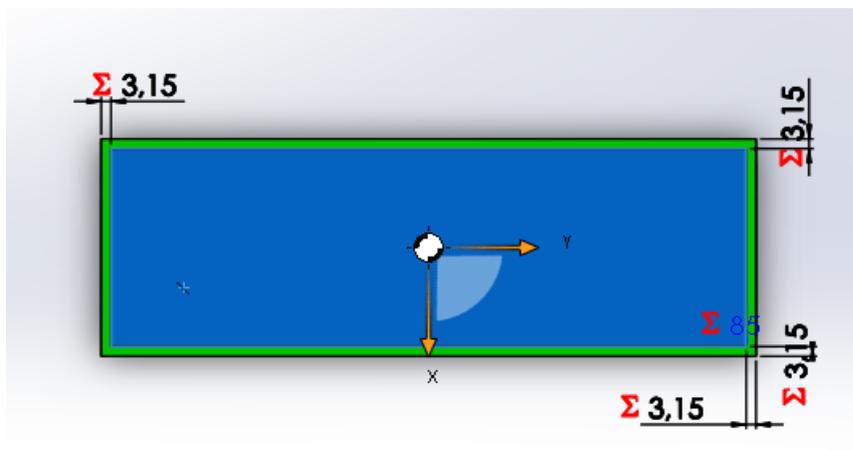


Fonte: Rutledge e French (2018)

É interessante ressaltar que o modelo será acoplado transversalmente ao fluxo de água do tanque de correnteza. Logo, o modelo tem menos de 300,0 milímetros de comprimento para que haja espaço suficiente para o manuseio e montagem do modelo ao tanque.

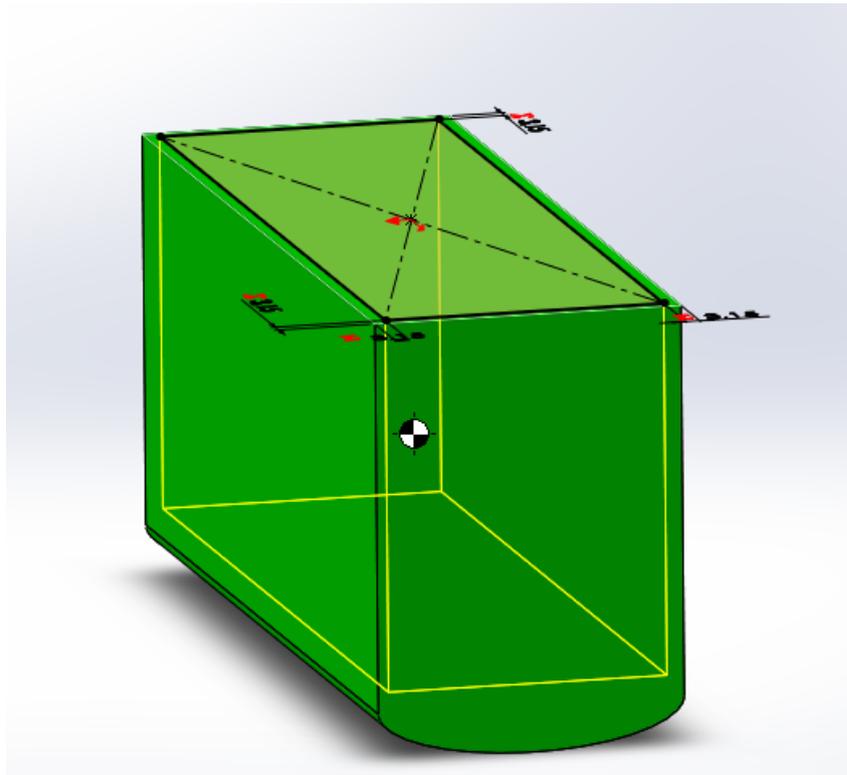
Posteriormente, foi efetuado um offset de 3,15 milímetros na face superior do modelo, como mostra a Figura 44. O retângulo resultante foi utilizado para fazer um corte extrudado com profundidade de 85,0 % do pontal do modelo a partir da face superior para dar origem à parte interna, como mostra a Figura 45.

Figura 44 – Vista superior do modelo com o offset indicado.

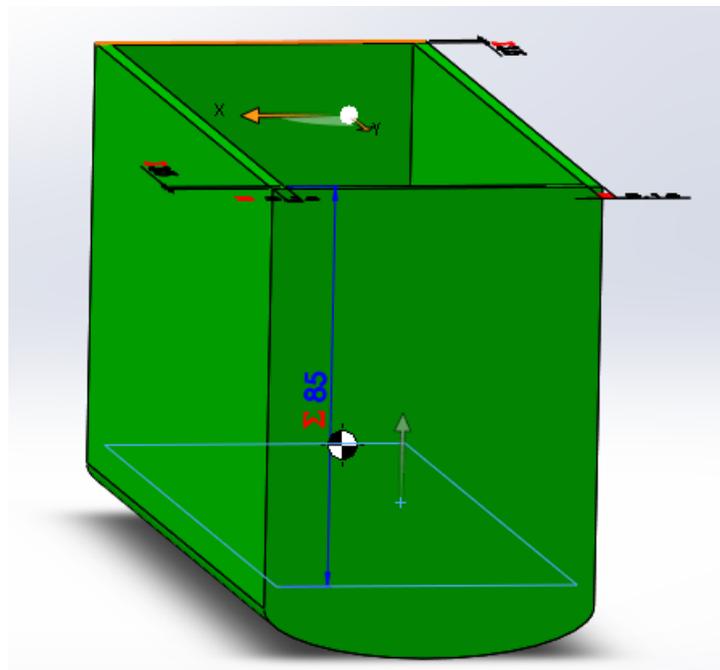


Fonte: O autor (2019)

Figura 45 – Corte extrudado da parte interna do modelo.



(a) Corte extrudado

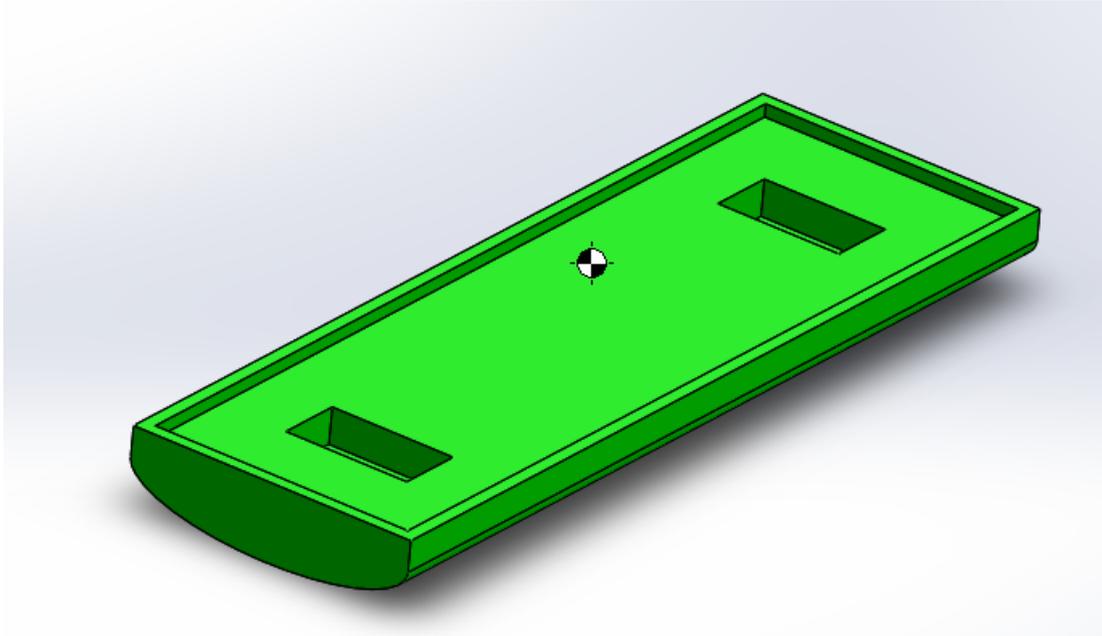


(b) Resultado do corte extrudado

Fonte: O autor (2019)

Há dois rebaixos no fundo do modelo, como mostra a Figura 46 do modelo em corte.

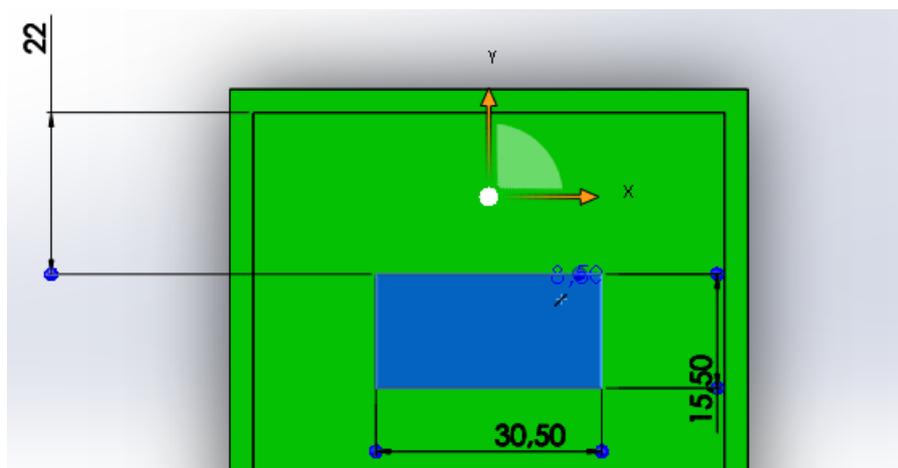
Figura 46 – Modelo em corte - Rebaixos internos



Fonte: O autor (2019)

Esses rebaixos, desenhados simetricamente em relação ao plano diametral e às porções de vante e ré, foram feitos com o intuito de alojar insertos metálicos, para que as barras roscadas $M8$ que constituem os lastros verticais não fossem roscadas diretamente no casco, impedindo que o modelo seja danificado após a montagem dos lastros. Os rebaixos possuem 8,5 milímetros de profundidade e estão distanciados 22,0 milímetros das extremidades de vante e ré. Suas dimensões, apresentadas na Figura 47, foram concebidas prevendo a contração do material após a impressão 3D.

Figura 47 – Dimensões dos rebaixos

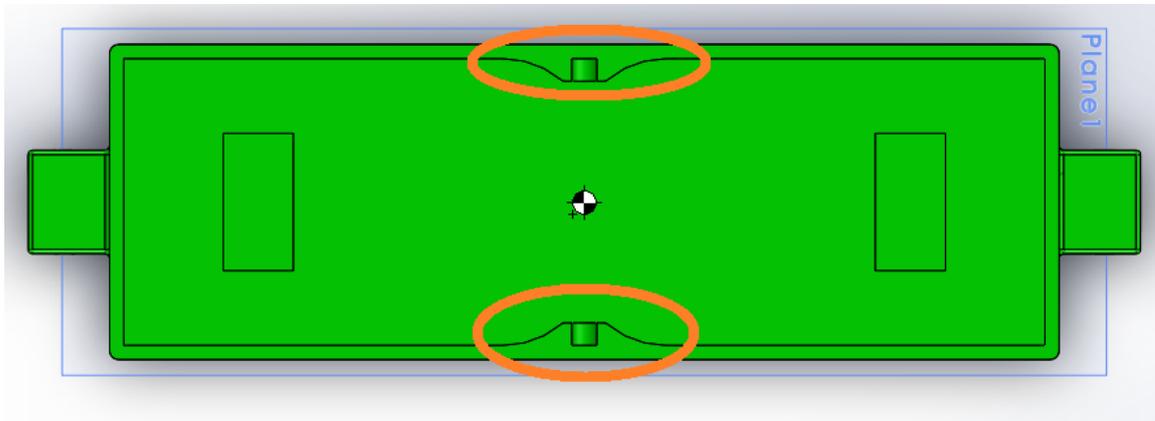


Fonte: O autor (2019)

Na altura do convés do modelo foram desenhadas protuberâncias responsáveis por alocar a barra roscada $M5$ que compõe o lastro lateral. Na Figura 48 é possível ver

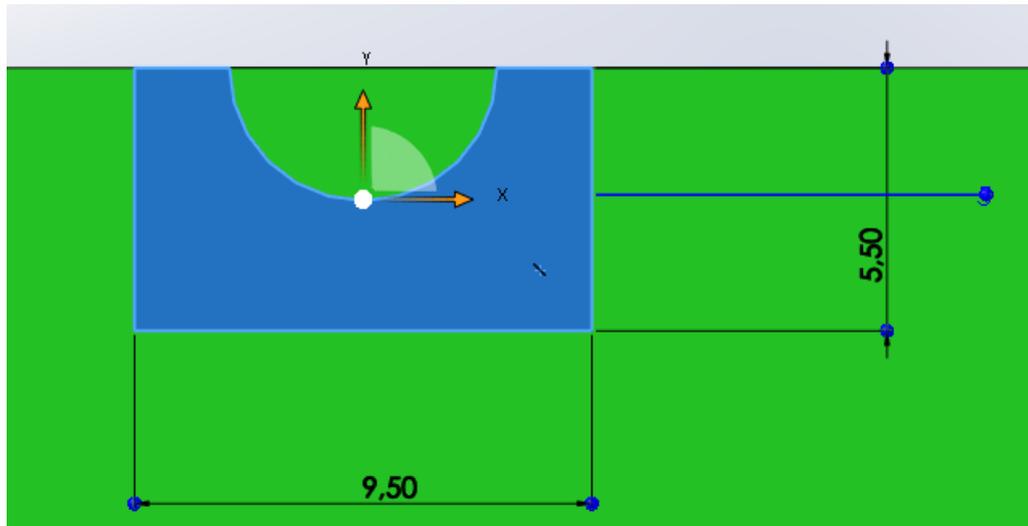
as protuberâncias em destaque.

Figura 48 – Dimensões dos rebaixos

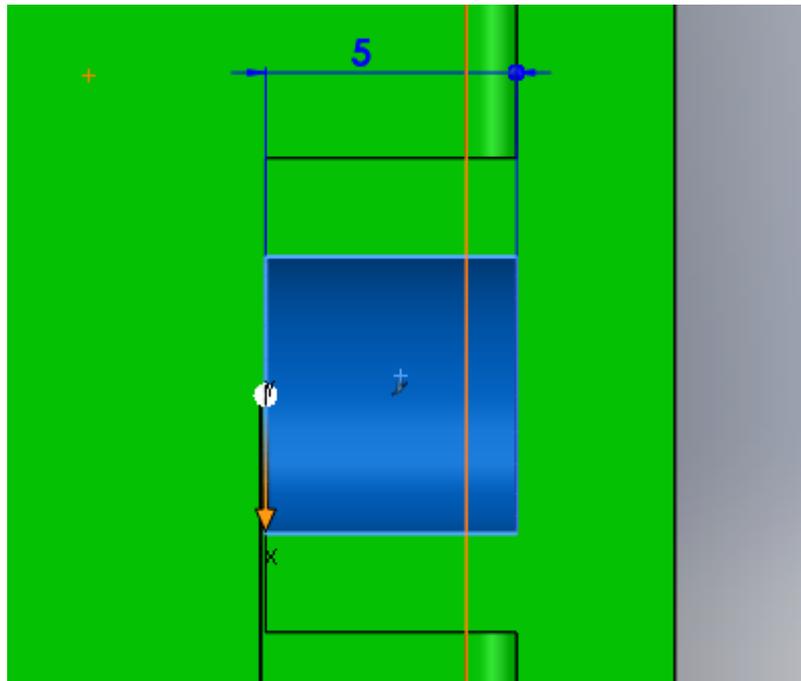


Fonte: O autor (2019)

Para dar origem às protuberâncias, foi desenhado inicialmente um retângulo com as dimensões apontadas na Figura 49. Este retângulo foi extrudado 5,0 milímetros em relação à parte interna do costado do modelo, como também mostra a Figura 49. A meia circunferência responsável por alojar a barra roscada $M5$ possui raio 2,75 milímetros, dimensão de projeto que também prevê a contração do material após a fabricação. O resultado final pode ser visto na Figura 50.

Figura 49 – Alojamento da barra roscada *M5*

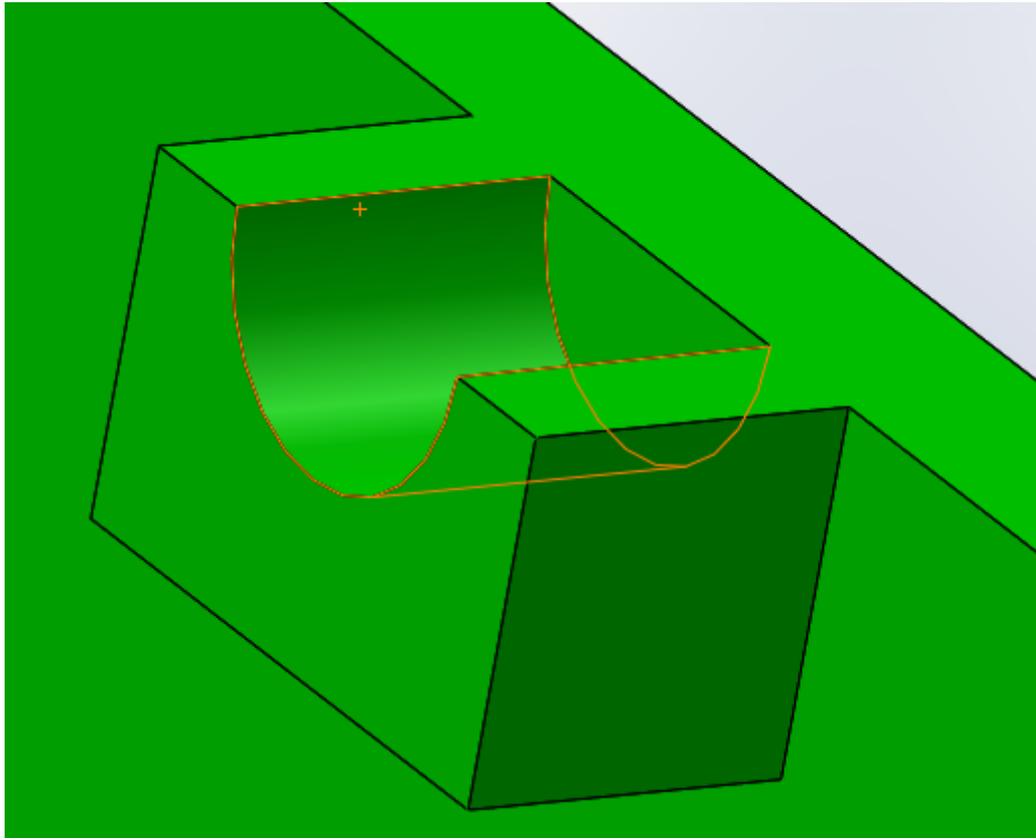
(a) Dimensões de base para o alojamento.



(b) Extrudando a geometria.

Fonte: O autor (2019)

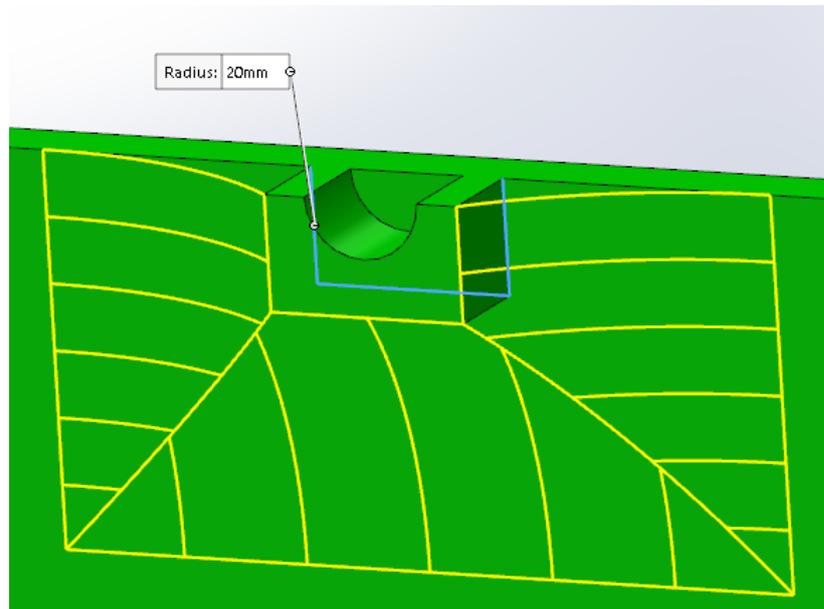
Figura 50 – Alojamento da barra roscada $M5$ finalizado.



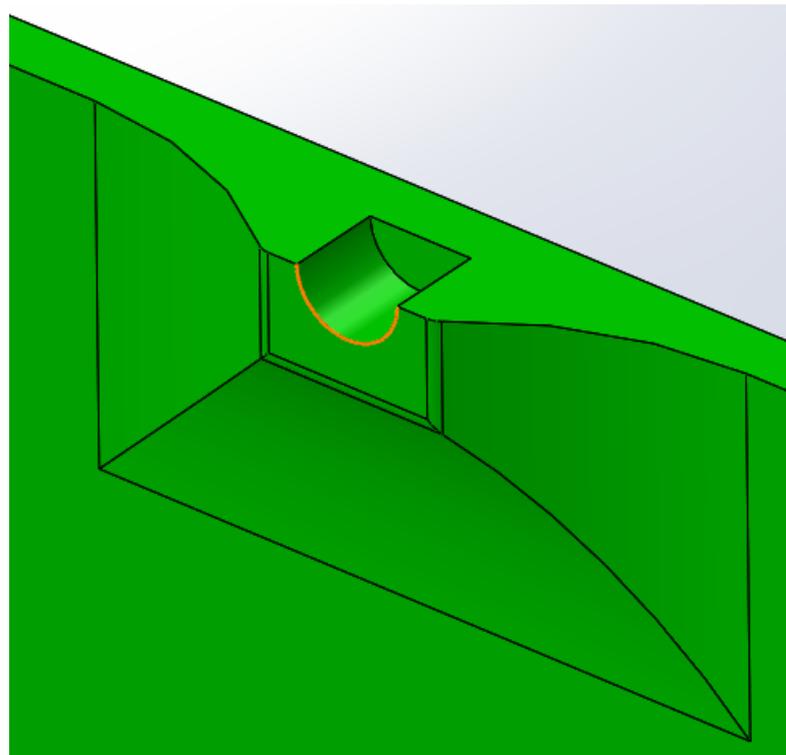
Fonte: O autor (2019)

Posteriormente, foram feitos filetes de raio 20,0 milímetros nas bordas, para reduzir possíveis concentrações de tensão devido aos ângulos de 90° e facilitar a impressão 3D do modelo, como mostra a Figura 51. Devido à simetria do modelo em relação aos bordos, a primeira protuberância foi espelhada em relação ao plano diametral, dando origem à geometria vista na Figura 48.

Figura 51 – Alojamento da barra roscada $M5$ com filetes.



(a) Filetes de raio 20 milímetros indicados.

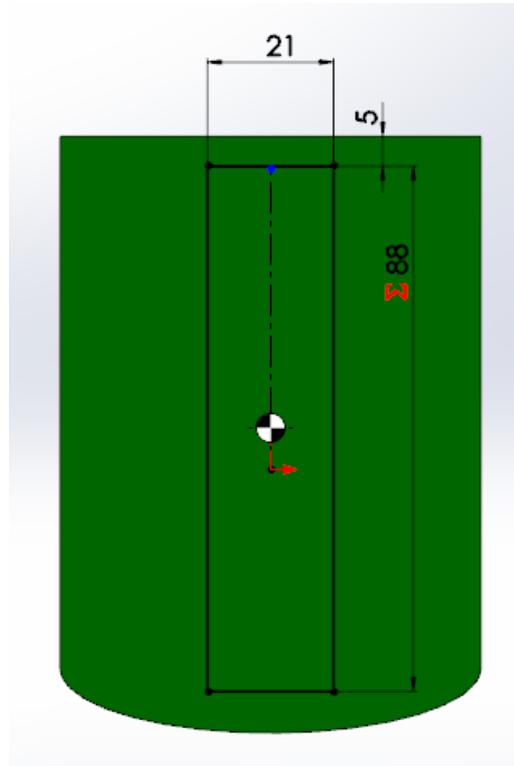


(b) Alojamento do lastro lateral finalizado.

Fonte: O autor (2019)

O canal responsável pelo alojamento das peças deslizantes foi projetado tendo em vista a possibilidade de as peças de fixação deslizarem independentemente, permitindo a fixação do modelo em diferentes condições de calado. As dimensões principais utilizadas para compor o canal estão apresentadas na Figura 52. O comprimento total do canal equivale a 88,0% do pontal.

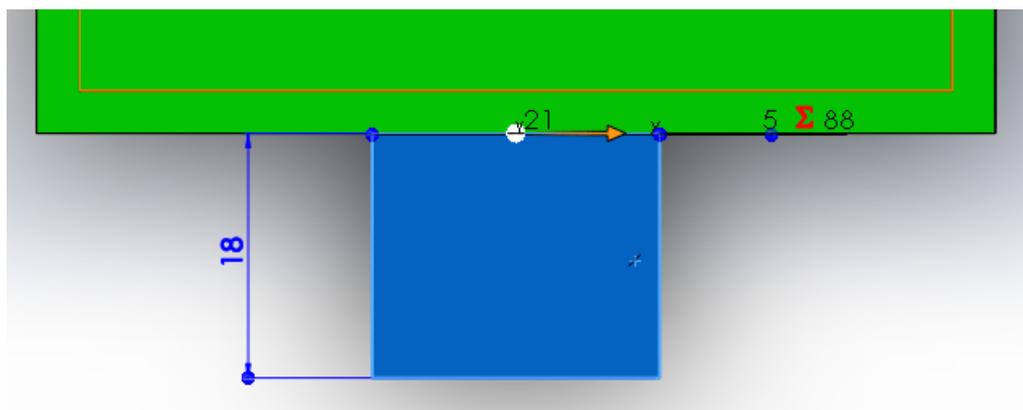
Figura 52 – Dimensões principais do canal das peças deslizantes



Fonte: O autor (2019)

Com base nesta geometria, foi extrudado o canal a partir da parede externa do modelo, com 18,0 milímetros de comprimento, como mostra a Figura 53.

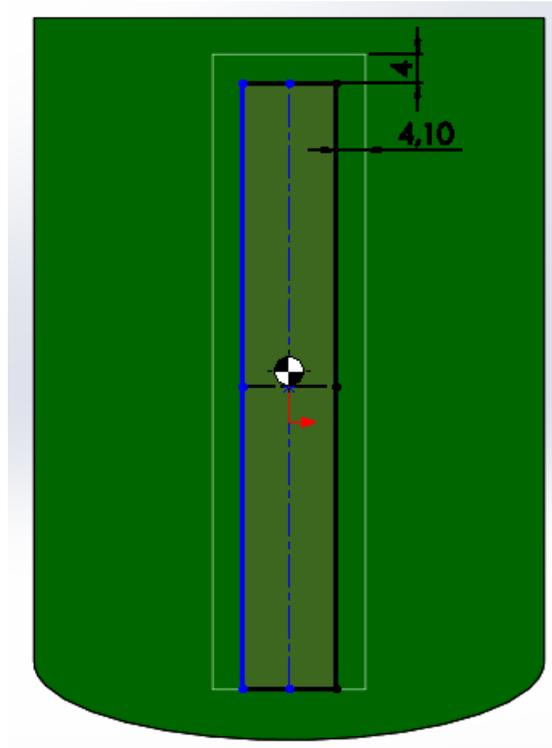
Figura 53 – Extrusão do canal das peças de fixação



Fonte: O autor (2019)

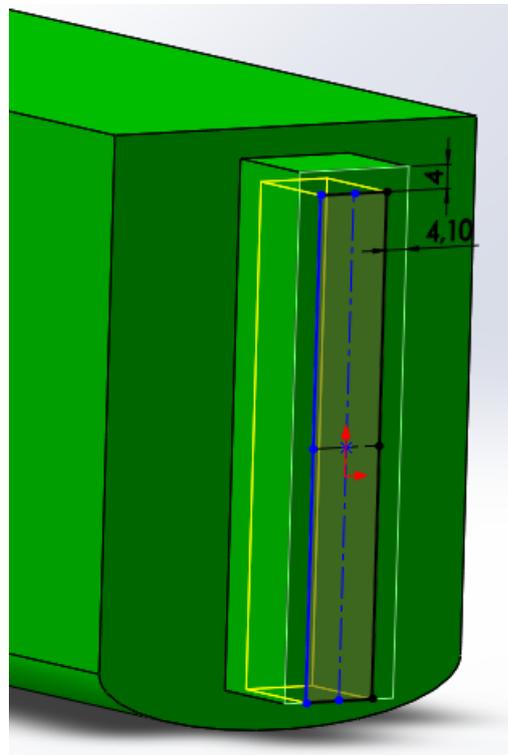
Para alojar a peça deslizante, foi feito um corte extrudado com geometria retangular, como pode ser visto nas Figuras 54 e 55. A profundidade do corte foi de 18,0 milímetros.

Figura 54 – Vista frontal do corte extrudado do canal das peças deslizantes.



Fonte: O autor (2019)

Figura 55 – Corte extrudado em perspectiva.

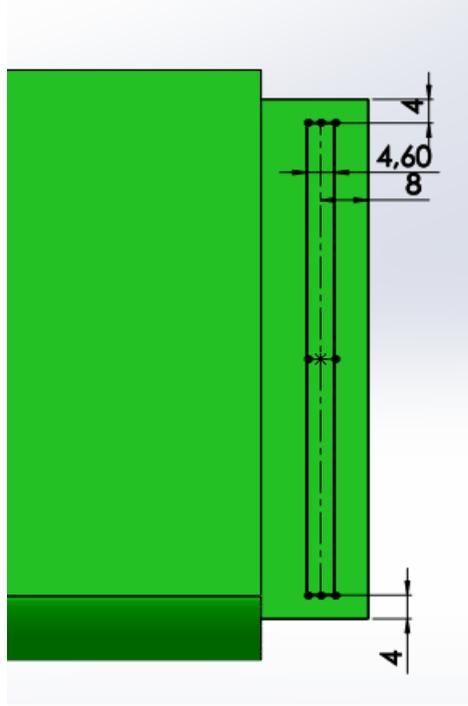


Fonte: O autor (2019)

Em seguida, foi desenhado o rasgo responsável por transpassar os parafusos *M4* que servem de guia para a movimentação das peças deslizantes. As dimensões

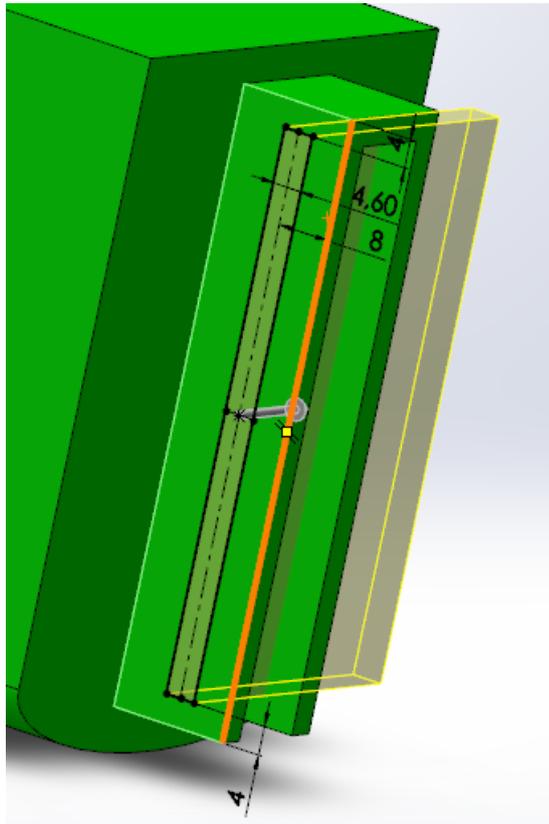
do rasgo estão apresentadas na Figura 56. A partir da geometria desenhada foi feito um corte extrudado, visto na Figura 57, dando origem à Figura 58 .

Figura 56 – Dimensões do rasgo para os parafusos *M4*



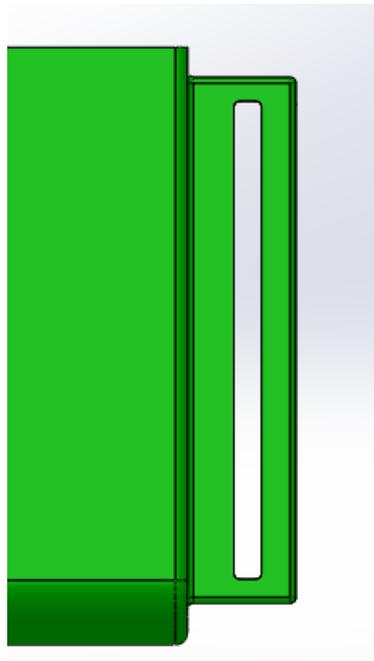
Fonte: O autor (2019)

Figura 57 – Corte extrudado do rasgo para os parafusos *M4*



Fonte: O autor (2019)

Figura 58 – Rasgo guia dos parafusos *M4* finalizado.

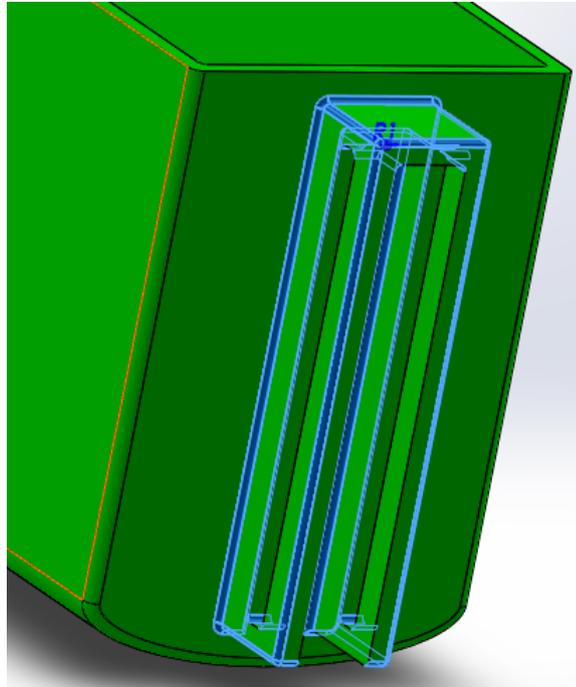


Fonte: O autor (2019)

Como resultado, o canal das peças deslizantes finalizado é apresentado na Figura 59, que destaca também os locais onde foram aplicados filetes de raio 1,0

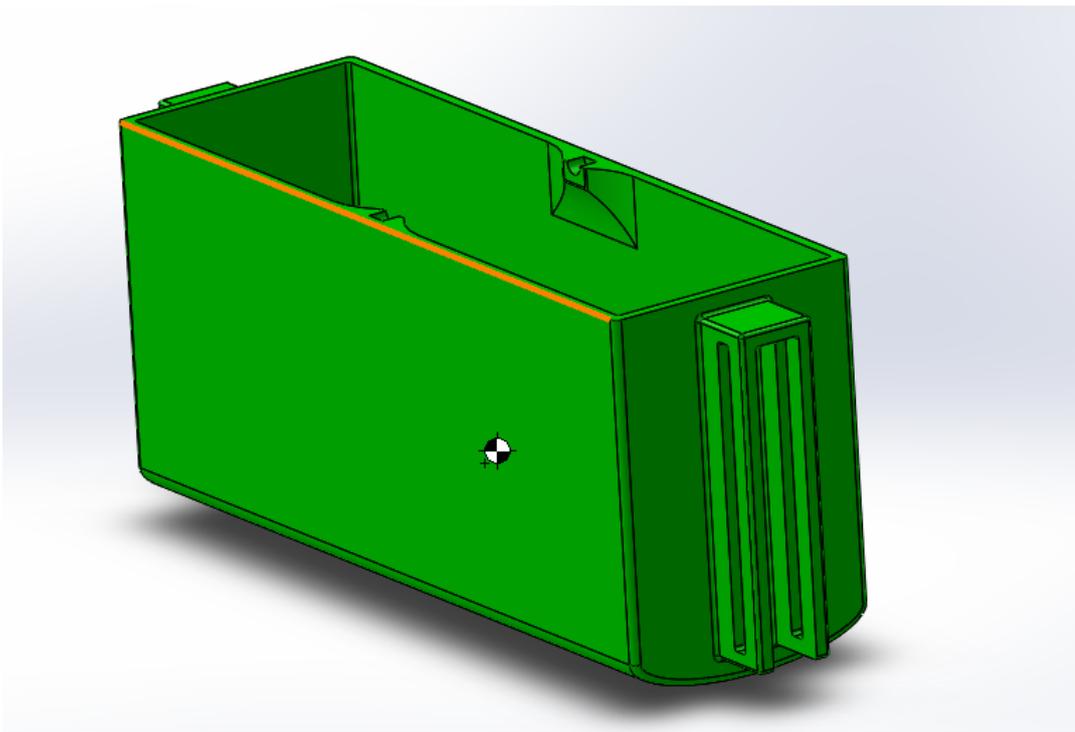
milímetro. Posteriormente, toda a geometria do canal foi espelhada em relação à meia nau utilizando o comando Mirror, para replicar o canal na outra extremidade do modelo. As Figuras 61 e 60 mostram o modelo CAD finalizado.

Figura 59 – Canal das peças deslizantes em perspectiva



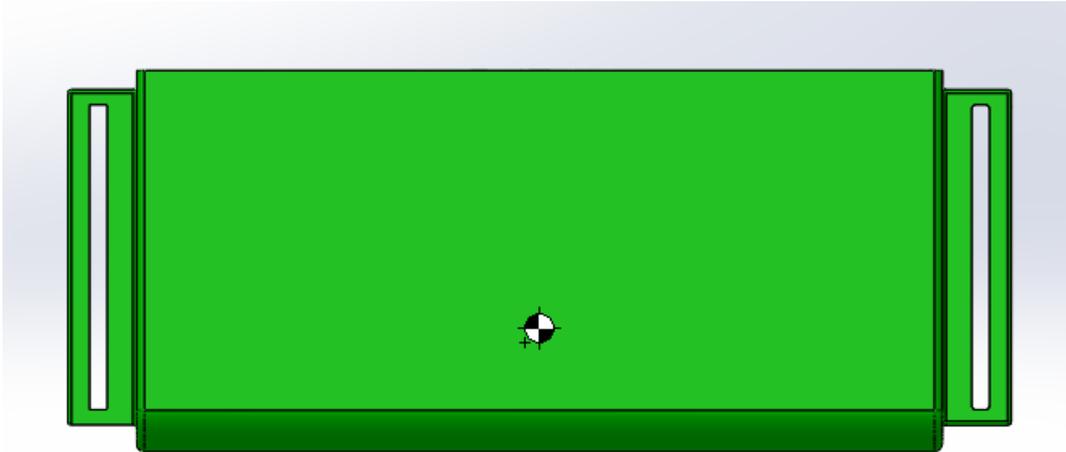
Fonte: O autor (2019)

Figura 60 – Modelo CAD finalizado em perspectiva



Fonte: O autor (2019)

Figura 61 – Vista lateral do modelo CAD finalizado



Fonte: O autor (2019)

Após o arquivo CAD ser concluído, este foi salvo em formato .STL e enviado para impressão 3D no Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos da UFSC Joinville. O material utilizado foi o P.L.A e a impressora utilizada foi do modelo 3D Cloner DH, apresentada na Figura 62. A impressão do fundo do modelo (Figura 46) foi feita utilizando como parâmetro de impressão 40,0% de preenchimento de material, tendo em vista a redução do peso final do modelo.

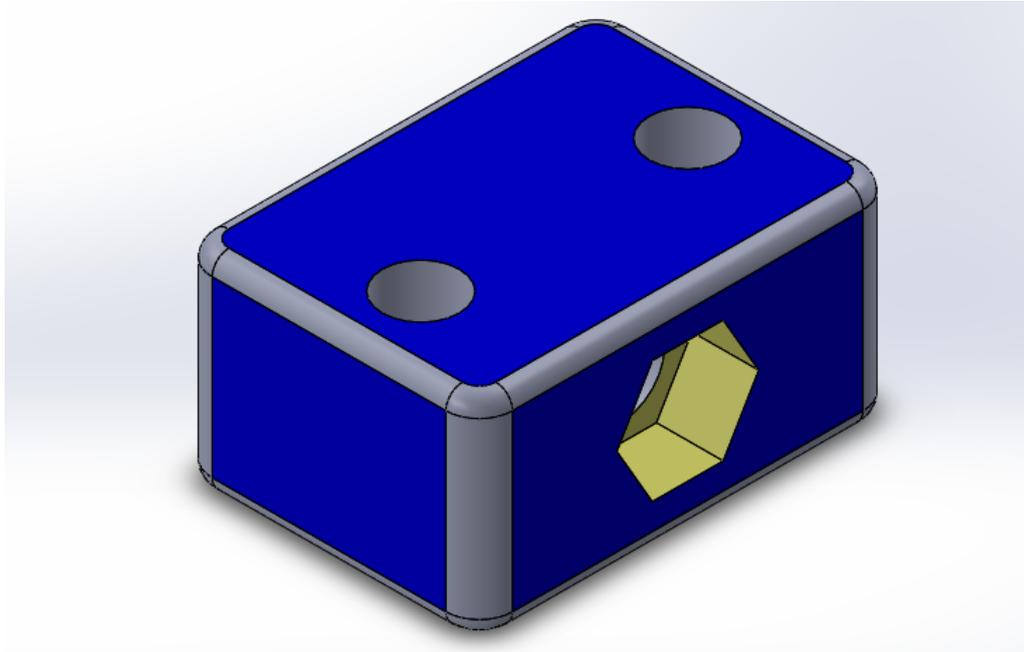
Figura 62 – Impressora 3D Cloner DH



Fonte: 3DCloner... (2019)

O desenho CAD da peça de fixação que desliza no canal presente no modelo está apresentado na seguir na Figura 63.

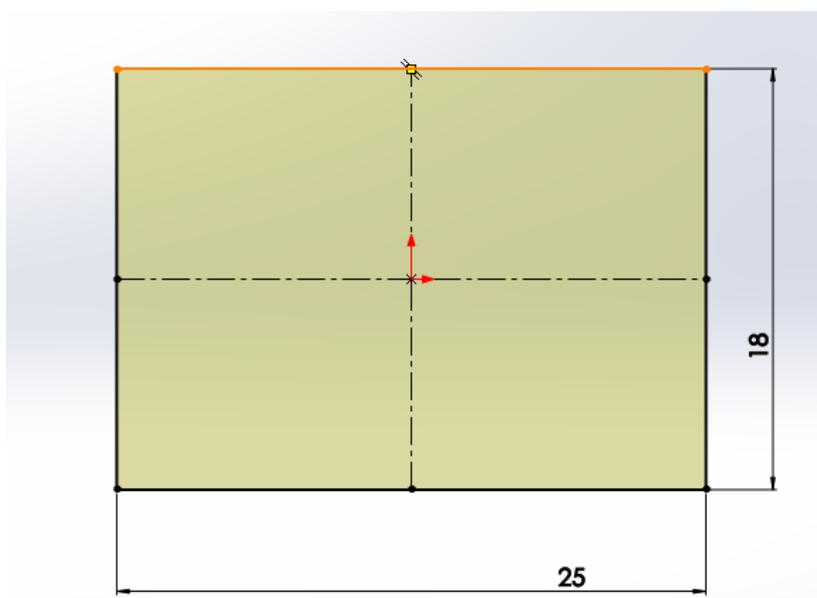
Figura 63 – Desenho CAD da peça deslizante em perspectiva.



Fonte: O autor (2019)

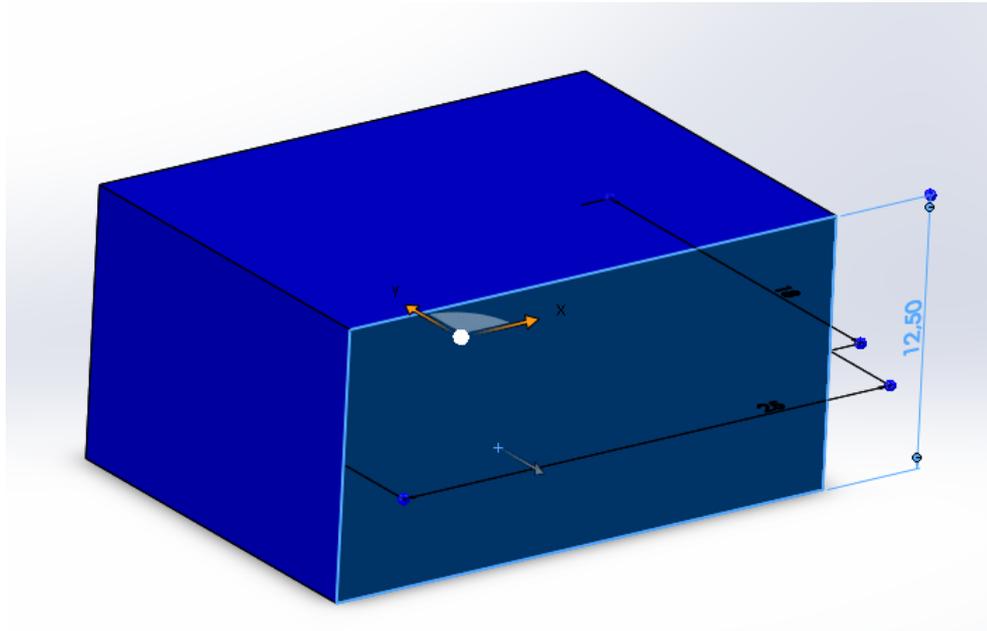
Para desenhá-la, inicialmente foi feito um retângulo com as dimensões apresentadas na Figura 64, posteriormente extrudando-o com 12,5 milímetros de espessura, como mostra a Figura 65.

Figura 64 – Dimensões principais das peças deslizantes



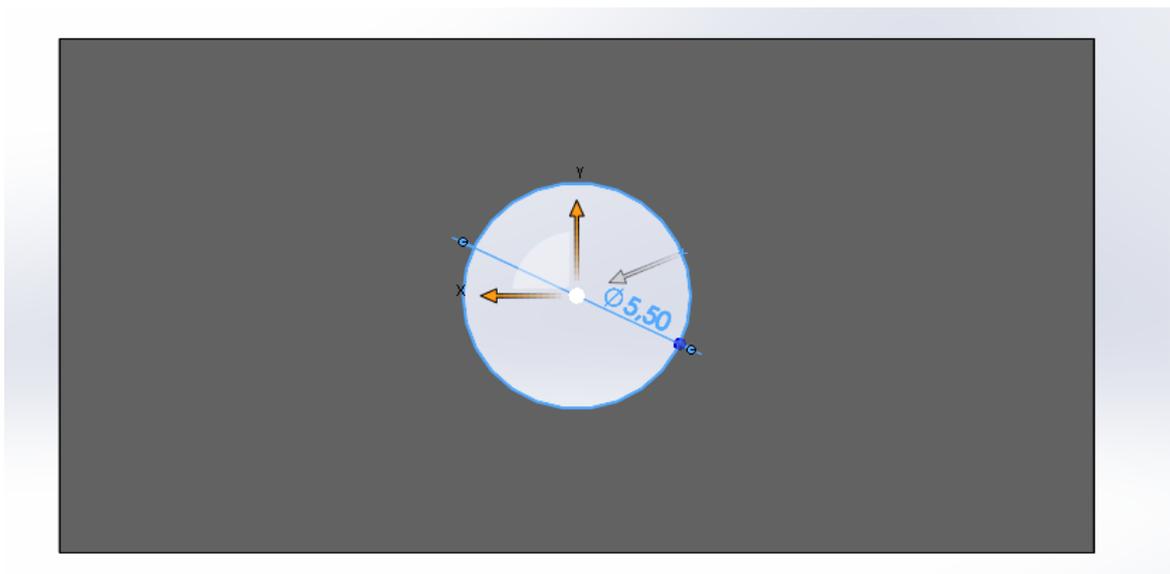
Fonte: O autor (2019)

Figura 65 – Extrusão da peça deslizante.

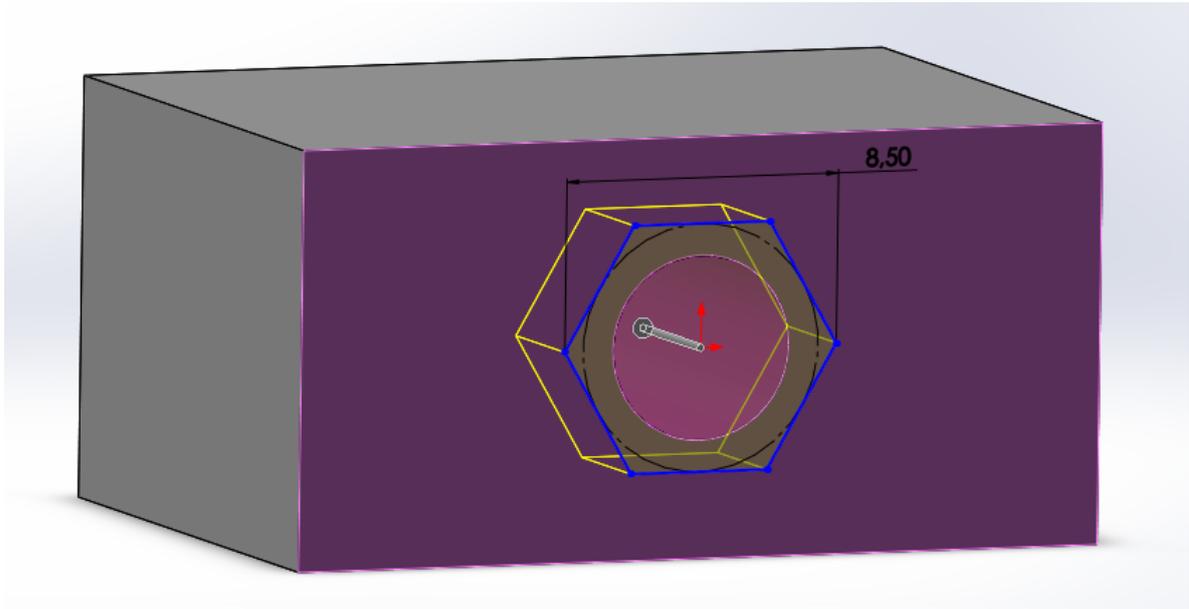


Fonte: O autor (2019)

Posteriormente, foi feito um furo de diâmetro 5,5 milímetros, como mostra a Figura 66, para alojar o parafuso *M5* que irá fixar o modelo ao tanque. Foi feito um corte extrudado de geometria hexagonal com 4,0 milímetros de profundidade, como mostrado na Figura 67, para alojar a porca *M5* que permitirá a movimentação controlada do parafuso *M5*.

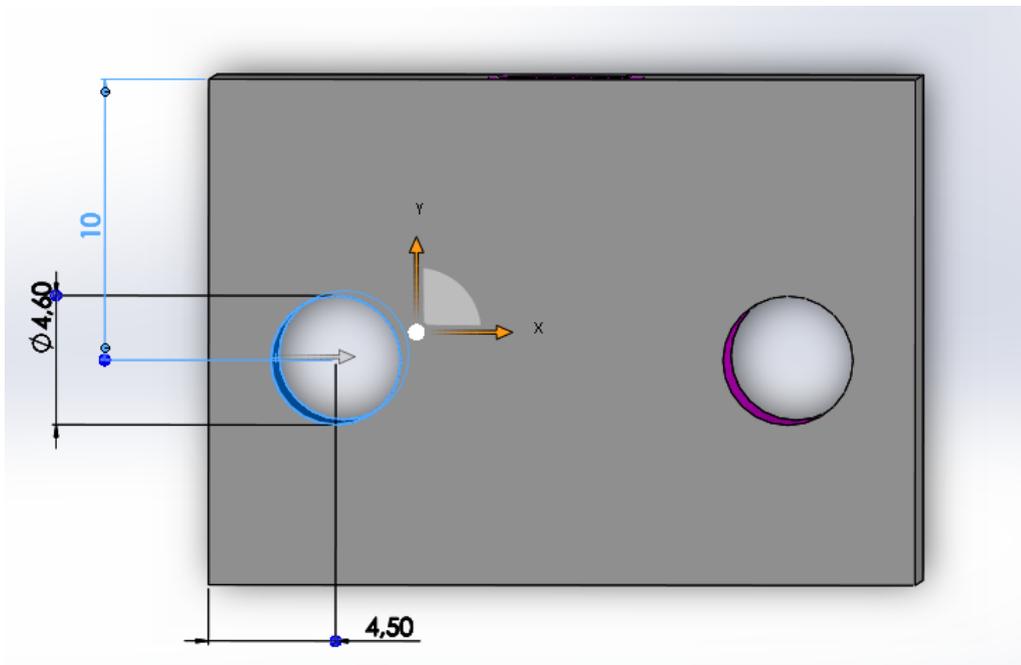
Figura 66 – Furo para parafuso *M5*.

Fonte: O autor (2019)

Figura 67 – Corte extrudado para a porca *M5*.

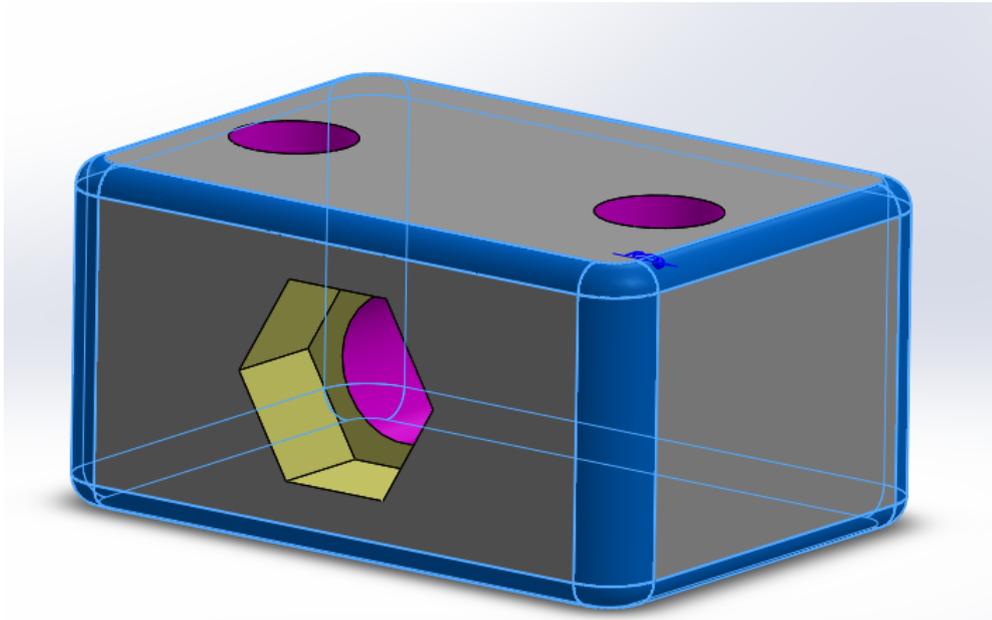
Fonte: O autor (2019)

Em seguida, foram desenhados os furos, como mostra a Figura 68 que irão alojar os parafusos *M4* responsáveis por guiar o movimento das peças deslizantes dentro dos canais. Os filetes, destacados na Figura 69 possuem raio 2,0 milímetros.

Figura 68 – Furos para os parafusos *M4*

Fonte: O autor (2019)

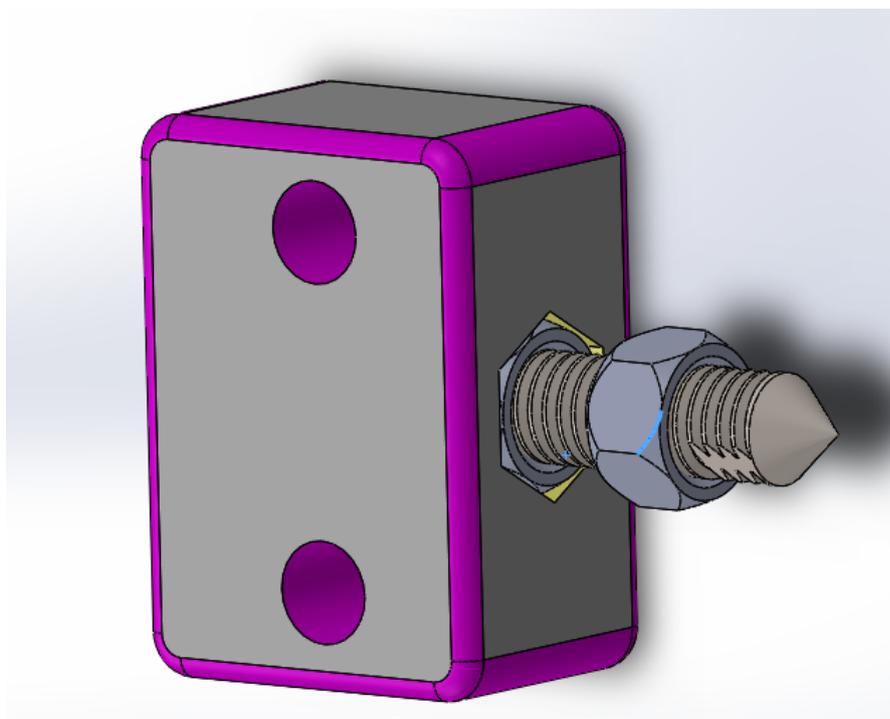
Figura 69 – Filetes da peça deslizante



Fonte: O autor (2019)

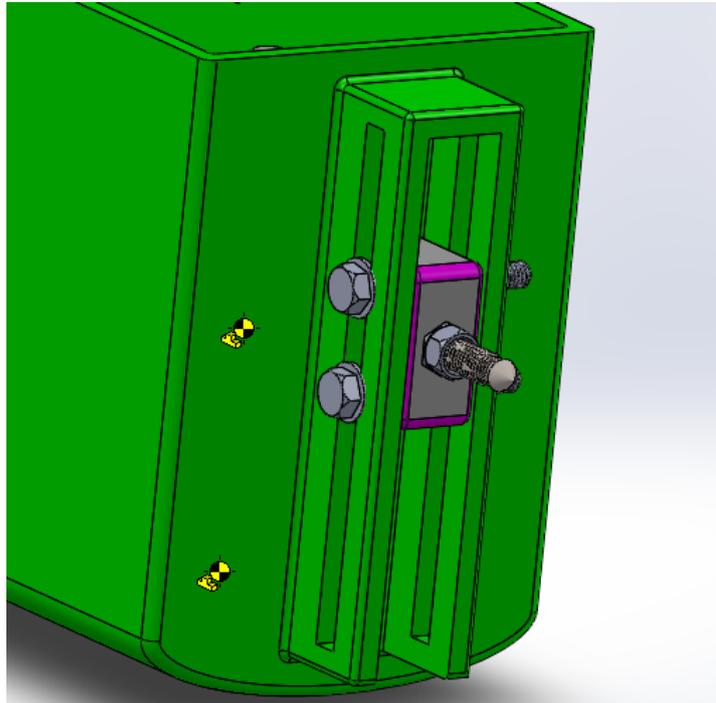
A Figura 70 mostra como será montado o esquema de fixação na peça. O parafuso $M5$ tem 30,0 milímetros de comprimento de rosca. Já os parafusos $M4$ possuem 35,0 milímetros de rosca. O esquema da montagem das pelotas de fixação, parafusos e porcas ao modelo são apresentados nas Figuras 71 e 72.

Figura 70 – Montagem dos parafusos e porcas à peça de fixação.



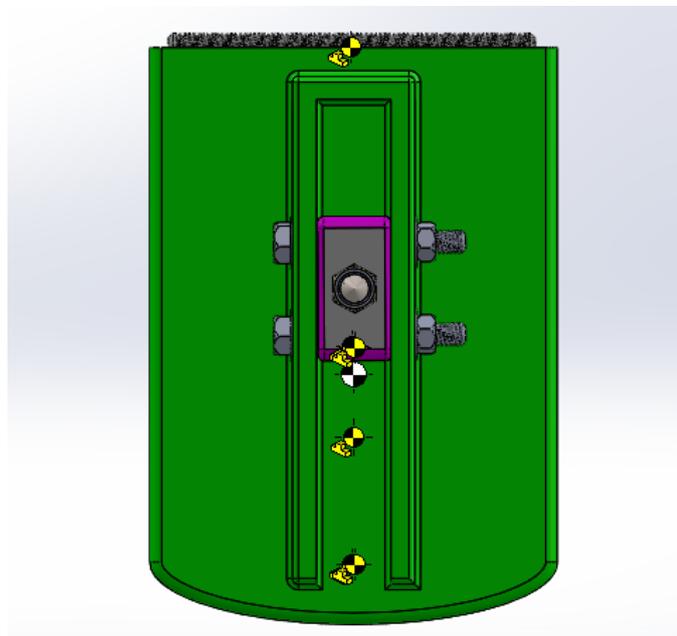
Fonte: O autor (2019)

Figura 71 – Montagem em CAD da peça de fixação e parafusos no modelo - vista em perspectiva



Fonte: O autor (2019)

Figura 72 – Montagem em CAD da peça de fixação e parafusos no modelo - vista frontal.



Fonte: O autor (2019)

Analogamente à impressão do modelo, o arquivo CAD da peça deslizante foi exportado em formato .STL para fabricação na UFSC Joinville. O material utilizado foi o ABS e a impressora utilizada foi do modelo Stratasys Dimension Elite, apresentada na Figura 73, utilizando 100,0 % de preenchimento.

Figura 73 – Impressora Stratasys Dimension Elite



Fonte: DIMENSION... (2019)

A Tabela 9 apresenta os custos envolvidos na construção do experimento. Valer ressaltar que as impressões 3D utilizaram materiais da própria universidade, não sendo computadas no custo final do experimento.

Tabela 9 – Tabela de custos do experimento.

CUSTO DE FABRICAÇÃO DO EXPERIMENTO	
Usinagem	R\$180,00
Aquário	R\$70,00
Insumos (lixas, colas, transferidor, etc)	R\$96,71
TOTAL	R\$346,71

Fonte: O autor (2019).

Observação: A execução do experimento, assim como as metodologias para medições estão descritas no corpo do texto. Detalhes sobre os cálculos efetuados podem ser encontrados na planilha interativa, que será disponibilizada.