

PNV 3315 - Hidrostática e Estabilidade

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica



Determinação das Propriedades Hidrostáticas de uma Embarcação

Professor Dr. Marcelo Ramos Martins

Grupo 3

Caio Augusto Santos da Silva	11302400
Gustavo Keizo Yamasaki Odagima	10345143
Mateus Castagnet	10685403
Thiago Dias Roviello	11259479

São Paulo, 2021

Sumário

Sumário	1
1.0 Resumo	2
2.0 Introdução	3
3.0 Metodologia	4
3.1 Interpolação e Função Spline	5
3.2 Geração de painéis	10
3.3 Cálculo das propriedades hidrostáticas da embarcação	14
4.0 Linguagens utilizadas	19
5.0 Código e sua execução	20
5.1 Interpolação e obtenção de splines intermediárias	21
5.2 Construção dos Painéis	24
5.3 Obtenção das propriedades hidrostáticas	25
5.4 Código	26
6.0 Resultados	27
6.1 Volume submerso (∇)	28
6.2 Deslocamento (Δ)	29
6.3 Posição Longitudinal do CB (LCB)	30
6.4 Área molhada (S_w)	31
6.5 Área do plano de flutuação (A_{WL})	32
6.6 Posição Longitudinal do Centro de Flutuação LCF	33
6.7 Momento de Inércia Longitudinal	34
6.8 Momento para gerar um trim de 1 cm	35
6.9 Posição longitudinal BM_L	36
6.10 Posição transversal BM_T	37
6.11 Resultado Final	38
7.0 Conclusão	39
8.0 Bibliografia	40

1.0 Resumo

Nesse documento realiza-se um método de determinação das propriedades flutuantes de uma dada embarcação. Começando pela tabela de cotas e chegando até as curvas hidrostáticas .

Durante a leitura os conceitos de curvas e propriedades hidrostáticas são expostos, explicando cada passo para se obtê-la pelo método computacional utilizando a linguagem *Python*.

Todo desenvolvimento foi feito com base nos conhecimentos da disciplina programa de Hidrostática e Estabilidade.

2.0 Introdução

A engenharia Naval moderna, assim como qualquer outra área, em sua grandeza aderiu aos modelos computacionais. Dessa forma os projetistas estão imersos em conceitos que antes eram raramente utilizados, e nos dias atuais se tornaram fundamentais, tais quais interpolação, Spline entre outros. Todos eles explicados mais profundamente na metodologia.

Com isso todo processo de desenvolvimento tem sua parcela pragmática, um simples plano de cotas pode nos revelar informações fundamentais se bem modelado. E esse é um dos objetivos mais importantes deste relatório.

Com a tabela de cotas em mãos, viabiliza-se o processo de interpolação, gerando uma malha de painéis, que aplicada às propriedades do cálculo vetorial fornece as propriedades hidrostáticas. Estas propriedades podem ser obtidas para diversos calados, inclusive o da embarcação escolhida. Assim sendo, através dos métodos de interpolação agregados ao cálculo vetorial com painéis, é possível de se obter: volume, LCF(Posição longitudinal do centro de flutuação), TCF(Posição transversal do centro de flutuação), LCB(Posição longitudinal do centro de carena), TCB (Posição transversal do centro de carena), KB (Altura do centro de carena), momentos de inércia longitudinal e transversal do plano de flutuação, área do plano de flutuação, área molhada e altura do BM (raio metacêntrico) longitudinal e transversal.

Sendo assim é inegável a importância do domínio, tanto prático, quanto teórico, desse processo para um engenheiro Naval. A seguir dita-se o detalhamento da execução do projeto, além disso, veremos os fatores que motivaram as decisões, e, por fim, mas não menos importante todo embasamento teórico.

3.0 Metodologia

Por ser uma atividade de construção Naval é de suma importância a clareza nos conhecimentos básicos de estabilidade. Porém a parte mais densa do conteúdo, sem dúvidas, se foca na descrição da matemática, sobretudo na interpolação polinomial. Além disso, um detalhamento na questão da descrição do casco em painéis e, por fim, um pouco sobre cálculos vetoriais.

A seguir são descritos esses conceitos fundamentais para o entendimento do projeto em sua totalidade.

3.1 Interpolação e Função Spline

A interpolação nada mais é que a determinação de uma função (iremos considerar polinômios), assumindo valores conhecidos em certos pontos (chamados de nós). Teoricamente o tipo de função escolhida para interpolar é arbitrária, e deve ser adequada às características que pretendemos que ela possua. Nesse caso a polinomial foi escolhida, a fim de se obter curvas contínuas sem picos.

Para se aproximar de um comportamento fiel do casco, utilizou-se uma spline cúbica, pois ela evita picos, por conter derivada simples e continua até segunda ordem. E pela união dos intervalos designados uma curva similar a embarcação surgiu. Dado um plano de corte. No gráfico abaixo, veremos uma interpolação polinomial:

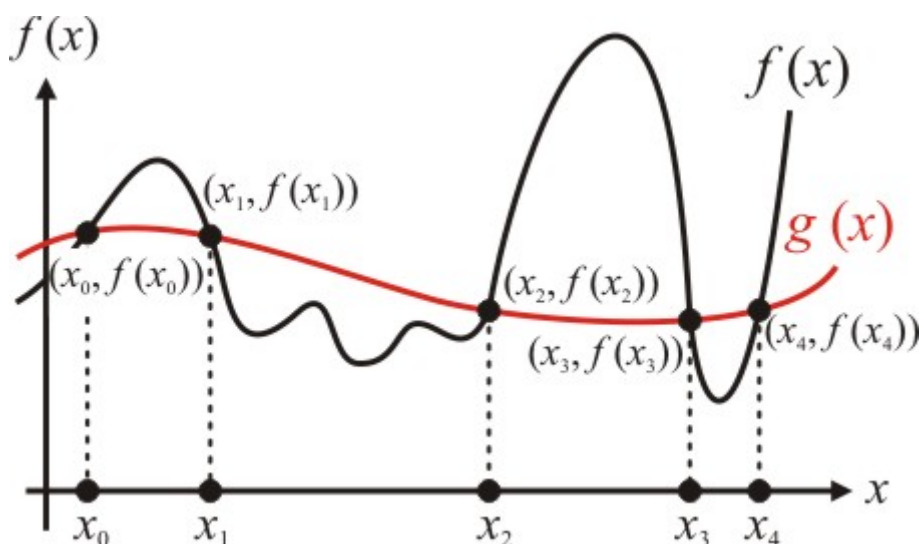


Figura 1: Função interpolada

Se dividirmos os intervalos em x a soma deles deram origem à função $g(x)$, que aproxima muito bem a $f(x)$ original.

A interpolação polinomial acima consiste, como dito anteriormente, na obtenção de um polinômio interpolador que passe pelos pontos fornecidos e que tenha grau menor ou igual ao número destes pontos menos um. A obtenção deste polinômio é obtida pela solução de um sistema linear, ou pelos métodos de Lagrange ou de Newton.

$$f_n(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x) f(x_i)$$
$$L_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)}; J \text{ dif } i$$

Todavia, o polinômio encontrado pelo método lagrangiano apresenta alguns pontos, devido às oscilações, não servindo como bom interpolador para uma grande quantidade de valores. Além disso, a utilização de polinômios não assegura um bom gerenciamento das linhas, portanto para uma interpolação mais eficiente as funções spline são utilizadas, cujas vantagens serão apresentadas a seguir.

Introduzindo um pouco sobre a função Spline, sua principal vantagem se transmite na inviabilidade de aparecer picos e mudanças abruptas em sua curvatura. Informação de suma importância para o modelismo naval.

Para definir uma função spline de grau p com os nós nos pontos x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) pode ser impostas algumas condições:

i) Em cada subintervalo de pontos $[x_i, x_{i+1}]$, ($i = 0, 1, \dots, (n-1)$), $S_p(x)$ é um polinômio de grau p : $s_p(x)$;

ii) A função spline $S_p(x)$ é contínua e tem derivada contínua até ordem $(p-1)$ no intervalo em que é considerada;

iii) A função spline $S_p(x)$ passa pelos pontos do intervalo.

A função spline utilizada neste programa apresenta um grau igual a 3 (função cúbica), para que a gente obtenha curvas contínuas e sem picos entre os nós. Em outros casos, é possível utilizar uma função spline de grau igual a 1 (função linear) e de grau igual a 2 (função quadrática).

Ao utilizar uma função spline linear para interpolar pontos distintos, percebemos que sua derivada apresenta descontinuidade nos nós por ser uma função com grau igual a 1. O mesmo acontece com a função quadrática, tendo em vista que apresenta derivada contínua até a ordem 1 não garantindo que a curvatura mantenha-se a mesma nos pontos fornecidos. Devido a isso, a função spline utilizada no programa é a spline cúbica interpoladora.

Dado um intervalo, a função gera um polinômio do terceiro grau, que melhor se aproxima do casco de uma embarcação. Sendo assim, quando temos a união dos intervalos chegamos a uma curva que representa o formato do casco, tendo em

vista um plano de corte pré-determinado. Cada intervalo tem o polinômio determinado por:

$$(1) s_k(x) = a_k(x - x_k)^3 + b_k(x - x_k)^2 + c_k(x - x_k) + d_k$$

Assim, o cálculo de $S_3(x)$ exige a determinação de 4 coeficientes para cada k , num total de 4 coeficientes: $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, \dots, a_n, b_n, c_n, d_n$.

Impondo as condições para que $S_3(x)$ seja spline interpolante de uma função f em x_0, \dots, x_n teremos:

$(n + 1)$ condições para que $S_3(x)$ interpola $f(x)$ nos nós;

$(n - 1)$ condições para que $S_3(x)$ esteja bem definida nos nós (continuidade de $S_3(x)$ em $[x_0, x_n]$);

$(n - 1)$ condições para que $S'_3(x)$ seja contínua em $[x_0, x_n]$;

$(n - 1)$ condições para que $S''_3(x)$ seja contínua em $[x_0, x_n]$, num total de $(n + 1 + 3(n - 1)) = 4n - 2$ condições.

Portanto temos duas condições em aberto. Essas condições podem ir de acordo com informações físicas que tenham sobre o problema etc; citaremos mais adiante algumas opções, dentre as mais usadas.

De acordo com a definição que demos para cada $s_k(x)$, a condição (iii) é satisfeita definindo as derivadas de cada $s_k(x)$:

$$(2) s'_k(x) = 3a_k(x - x_k)^2 + 2b_k(x - x_k) + c_k$$

$$(3) s''_k(x) = 6a_k(x - x_k) + 2b_k$$

Observa-se que $s''_k(x_k) = 2b_k$. Assim cada coeficiente b_k pode ser escrito em função de $s''_k(x_k)$:

$$(4) b_k = \frac{s''_k(x_k)}{2}$$

Analogamente, como $s''_k(x_{k-1}) = -6a_k b_k + 2b_k$, podemos também escrever a_k em função das derivadas segundas nos nós, pois

$$(5) a_k = \frac{b_k - s_k''(x_{k-1})}{6h_k} = \frac{s_k''(x_k) - s_k''(x_{k-1})}{6h_k}$$

Uma vez que $d_k = f(x_k)$ e já expressamos a_k e b_k , podemos utilizar da relação:

$$(6) s_1(x_0) = f(x_0) \Rightarrow -a_1 h_1^3 + b_1 h_1^2 - c_1 h_1 + d_1 = f(x_0)$$

Onde usamos a notação:

$$(7) h_k = x_k - x_{k-1}, \text{ com } k = 1,$$

$$(8) -a_{k+1} h_{k+1}^3 + b_{k+1} h_{k+1}^2 - c_{k+1} h_{k+1} + d_{k+1} = f(x_k)$$

Para termos c_k também em função das derivadas segundas nos nós, observamos que tirar c_1 da equação (6) e, para $k = 1, \dots, (n-1)$ usar (8) é o mesmo que, para $k = 1, 2, \dots, n$, tem-se:

$$(9) c_k = \frac{-f(x_{k-1}) - a_k h_k^3 + b_k h_k^2 + d_k}{h_k}$$

Após algumas substituições em:

$$(10) c_k = \frac{f(x_k) - f(x_{k-1})}{h_k} - \frac{2s_k''(x_k)h_k - s_{k-1}''(x_{k-1})h_k}{6}$$

Se utilizarmos mais algumas notações:

$$s_k''(x_k) = g_k \text{ e}$$

$$f(x_k) = y_k \text{ tem-se:}$$

$$(11) a_k = \frac{g_k - g_{k-1}}{6h_k}$$

$$(12) b_k = \frac{g_k}{2}$$

$$(13) \quad c_k = \frac{y_k - y_{k-1}}{h_k} + \frac{2h_k g_k - g_{k-1} h_k}{6}$$

$$(14) \quad d_k = y_k$$

Assim para $k = 1, 2, \dots, n$, calcula-se todos os coeficientes de $s_k(x)$ em função de

$$g_j = s_j''(x_j), \quad j = 0, 1, \dots, n.$$

Impondo a condição $s_k'(x_k) = s_{k+1}'(x_k)$, $k = 1, 2, \dots, (n-1)$:

$$s_k'(x_k) = a_k = 3a_{k+1}h_{k+1}^2 - 2b_{k+1}h_{k+1} + c_{k+1}$$

$$\text{onde } c_{k+1} = c_k - 3a_{k+1}h_{k+1}^2 + 2b_{k+1}h_{k+1}$$

Em posse de (11), (12), (13) e agrupando alguns termos:

$$h_k g_{k-1} + 2(h_k + h_{k+1})g_k + h_{k+1}g_{k+1} = 6\left[\frac{y_{k+1} - y_k}{h_{k+1}} - \frac{y_k - y_{k-1}}{h_k}\right]$$

que é um sistema de equações lineares com $(n-1)$ equações ($k = 1, \dots, (n-1)$) e $(n+1)$ incógnitas: $g_0, g_1, \dots, g_{n-1}, g_n$ e portanto, indeterminado, $Ax = b$ onde $x = (g_0, g_1, \dots, g_n)^T$.

$$A = \begin{pmatrix} h_1 & 2(h_1 + h_2) & h_2 & & \\ & h_2 & 2(h_2 + h_3) & h_3 & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & h_{n-1} & 2(h_{n-1} + h_n) & h_n \end{pmatrix}_{(n-1) \times (n+1)}$$

$$b = \begin{pmatrix} \frac{y_2 - y_1}{h_2} - \frac{y_1 - y_0}{h_1} \\ \frac{y_3 - y_2}{h_3} - \frac{y_2 - y_1}{h_2} \\ \vdots \\ \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} - \frac{y_{n-1} - y_{n-2}}{h_{n-1}} \end{pmatrix}_{(n-1) \times 1}$$

De posse da solução, aí então poderemos determinar a_k , b_k , c_k e d_k para cada $s_k(x)$.

3.2 Geração de painéis

Com toda bagagem obtida sobre interpolação e função Spline, temos mais familiaridade para expor sobre os painéis, que são gerados pelo programa. O programa depois que passa pela Spline gera balizas e meia bocas intermediárias e, a partir delas, gera-se as novas linhas d'água.

Dessa maneira para descrever com precisão as propriedades hidrostáticas finalizam-se os painéis, situados entre a baliza e linha d'água, eles sempre possuem 4 pontos e levam consigo um vetor normal saindo da embarcação. A importância desse processo pode ficar mais clara na imagem a seguir

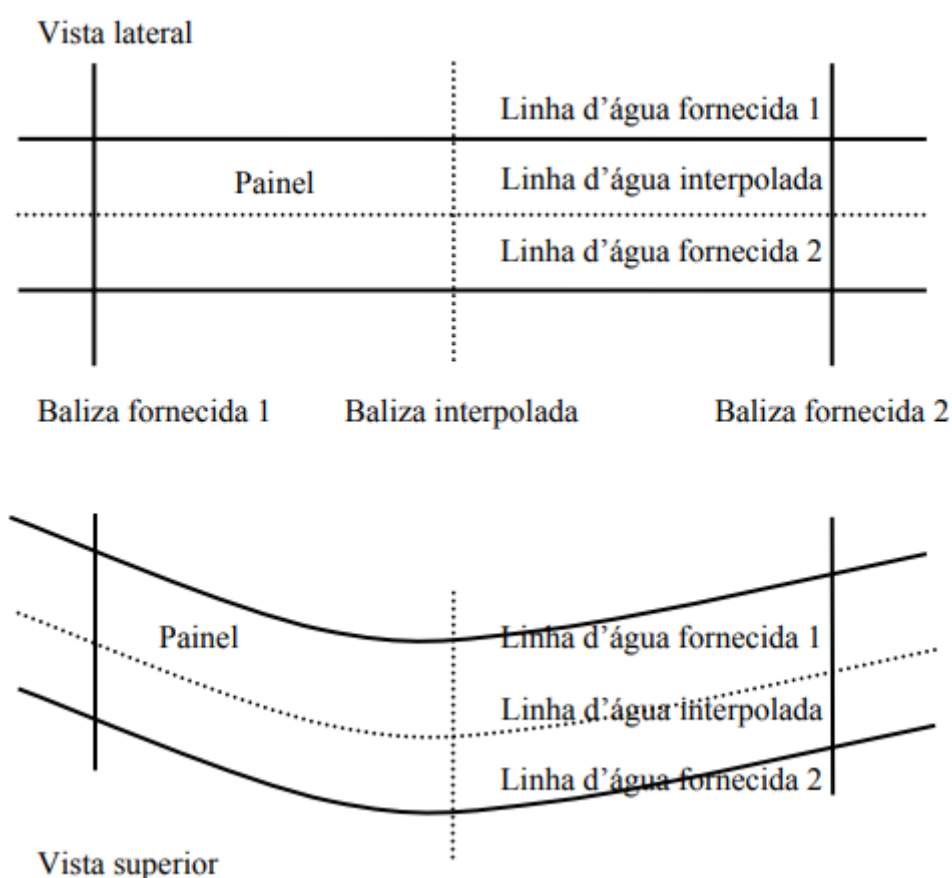


Figura 2: Configuração dos painéis criados pelos programas com a linha d' água e a baliza interpoladas

Repare como o nível de detalhamento da embarcação se eleva pelas balizas interpoladas, isso permite ao programa uma precisão maior, devido ao pouco espaçamento entre os painéis.

No exemplo da Figura 2 é notório que o painel gerado possui quatro pontos e que também estes pertencem a outros painéis ao mesmo tempo. O formato que ele

pode assumir depende da disposição dos pontos que o formam. Em geral, eles não definem um plano, devido às irregularidades dos cascos, mas como os cálculos são feitos através de vetores, o formato do painel não afeta o resultado.

Mas naturalmente surge a dúvida: Como o programa determina esses painéis graficamente?

O programa deve criar a partir da linha d'água zero para a parte superior da mesma e da popa para proa. O programa basicamente cria os quatro pontos contidos no painel na linha da água zero. Pelo caráter simétrico das embarcações sempre surgem painéis simétricos em relação a x , e assim são criados vários painéis correspondentes contidos nesse plano Oxz , a figura representa isso com mais clareza.

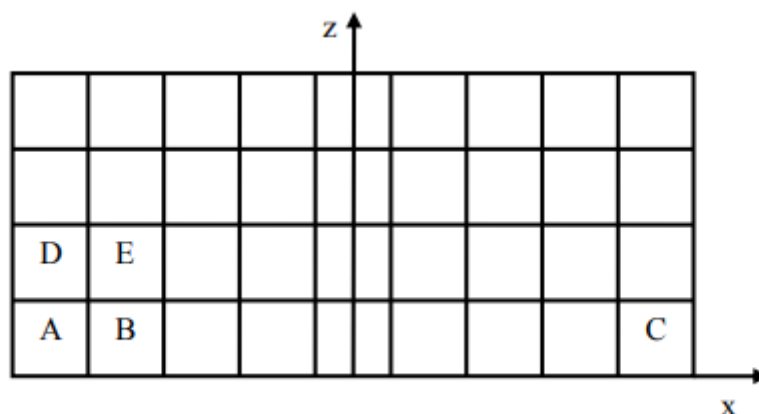


Figura 3: Painéis simétricos a partir do plano Oxz

Para os painéis entre as duas primeiras linhas d'água, o sistema segue a mesma linha de raciocínio. Vamos analisar a imagem acima para exemplificar o desenvolvimento.

A criação de somente os pontos 3 e 4 do mesmo. Este processo termina quando o programa chega ao painel C. Para o painel D, como ele faz fronteira com o painel A, os pontos 2 e 3 já foram criados. Assim, só precisamos de mais dois pontos de cima do painel para completar a configuração. Enquanto para o painel superior direito E para o painel B, resta somente a criação do ponto 4, uma vez que todos os outros já estão criados. A partir de então, todos os outros painéis vão seguindo a lógica, até terminar o processo, na linha d'água mais alta. Podemos notar ainda que o ponto 4 do painel A é ponto 1 do painel B, 3 do D e 2 do E. Assim, o mesmo ponto pertence a diferentes painéis. Por último, são criados os painéis no fundo, na popa e na proa, pois são dois painéis que destoam da lógica contínua.

Desta maneira, toda a embarcação é plotada graficamente. Vale ainda lembrar que o programa considera o navio como sendo simétrico e, assim, todos os painéis são idênticos por considerar a mesma distância nos intervalos, ademais que o vetor normal sempre está fora. Isso requer apenas uma mudança simples na ordem dos pontos pertencentes aos painéis, trocando o ponto 2 com o ponto 4.

Agora para finalizar o vetor normal deve estar alocado da maneira correta, conforme na figura.

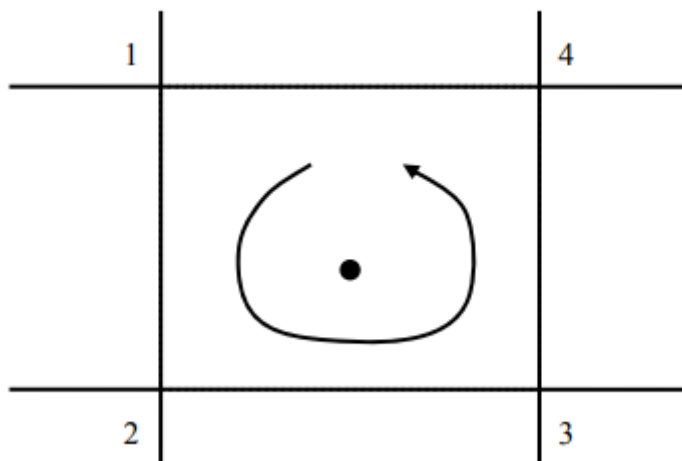


Figura 4: Alocação do vetor normal correspondente de cada painel

Dessa forma a “receita” para determinar as curvas hidrostáticas foi em ordem:

- Determinação do casco e o input das cotas da embarcação;
- Divisão em balizas em linhas das águas, além das já existentes;
- Interpolação por meio das funções spline para cada coordenada y dos pontos das balizas e linhas d’águas intermediárias;
- Determinação dos painéis entre as balizas e linhas d’água interpoladas, definindo a sequência dos pontos de tal forma que o vetor normal do painel tenha sentido para fora do casco.

Fechando o tópico da função Spline, no que se refere à interpolação, é necessário lembrar que a função apenas obtém o contorno das linhas d’água e das balizas. Tanto uma quanto outra são criadas de acordo com a quantidade (precisão) requisitada. O mesmo ocorre para as linhas d’água. Desta forma, uma vez criadas as linhas d’água e as balizas, o programa calcula as funções splines que interpolam os pontos existentes e traça os contornos das linhas d’água e das balizas. Com relação aos painéis de fundo, o programa também os gera, quando necessários, paralelos ao plano xy. Isso permite que o casco fique “fechado”.

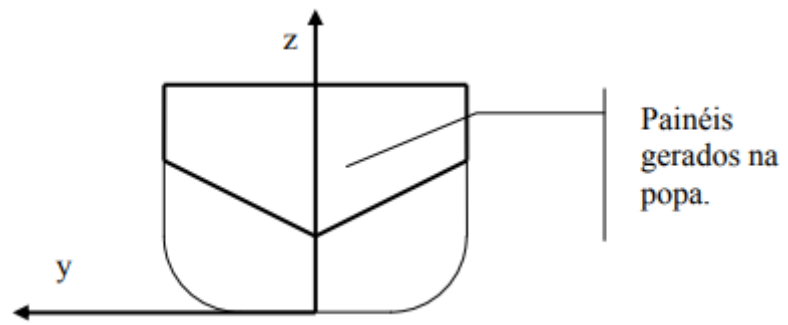


Figura 5: Painéis gerados na popa da embarcação

3.3 Cálculo das propriedades hidrostáticas da embarcação

Finalmente chegamos no objetivo principal desse conglomerado de informações: Calcular as propriedades hidrostáticas, lembrando que a explicação é direcionada ao uso do programa e modelagem computacional. Porém necessita-se de uma base teórica sobre a estabilidade de embarcações.

Somente com a parcela submersa do corpo é possível calcular suas propriedades hidrostáticas, logo a geração de painéis abaixo da linha d'água da embarcação e obtenção das respectivas áreas e centros já fornece todos os valores essenciais para caracterização do comportamento da unidade flutuante. Vale ressaltar que para a realização dos cálculos, apresentados posteriormente neste documento, há a necessidade de posicionar o sistema de coordenadas na mesma altura da linha d'água e apenas os painéis que representam a porção imersa do casco, a sua lateral e seu fundo, são considerados para o cálculo das curvas hidrostáticas.

O volume submerso foi determinado pela soma das parcelas dadas pelo produtos vetoriais $A^{(xyz)}$ e $C^{(xyz)}$ em uma das três direções, o que basicamente simboliza a soma de cada painel, como apresentado anteriormente. A parcela de volume resultante de um painel, a princípio, não discerne entre porções que pertencem ou não ao casco, contudo, painéis opostos possuem sinais também opostos para seus vetores área (e sinais iguais para vetores centro), de forma que apenas a componente externa à embarcação seja subtraída dos cálculos. As Figuras 6 e 7 a seguir permitem visualizar o efeito com maior clareza.

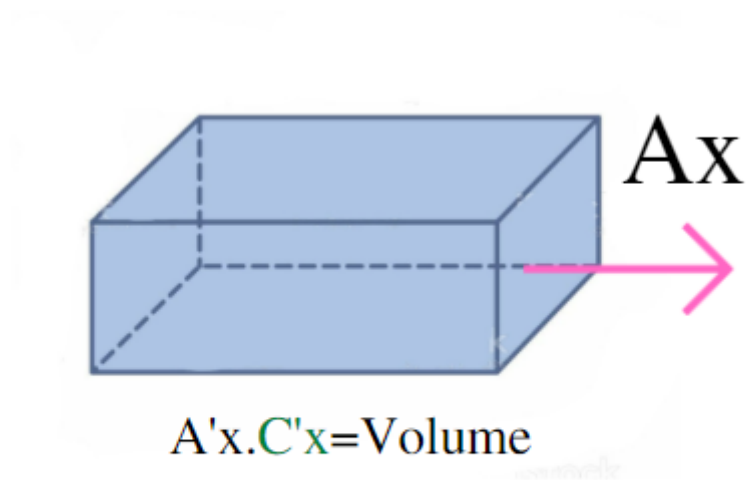


Figura 6: Multiplicação do vetor área com a coordenada em relação ao referencial, resultando o volume de cada painel

Determinado o sistema de coordenadas corretamente, quando realizado o produto escalar na direção Z o mesmo já representa o volume submerso, portanto é desnecessário a utilização de painéis nesta linha (esquema representado na figura 7). Contudo, em casos onde os valores são obtidos a partir de uma tabela de cotas, verifica-se que ocorre o mesmo comportamento na direção Y.

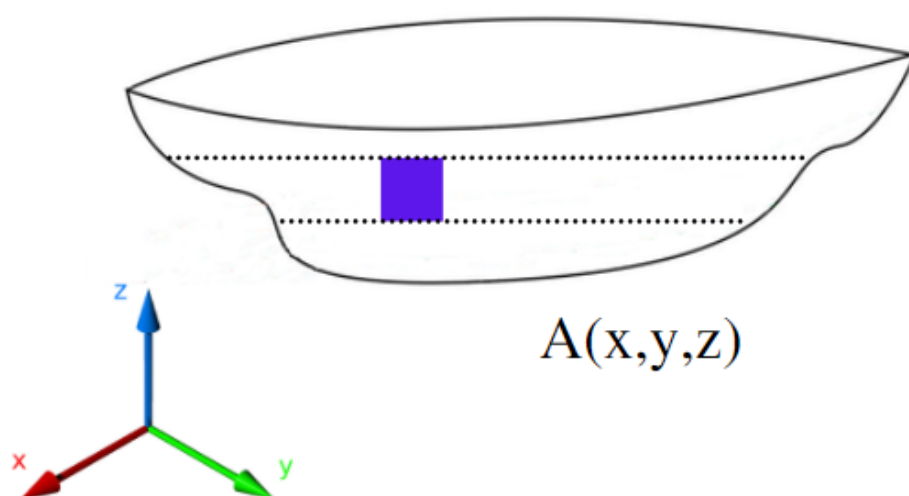


Figura 7: Esquematização do volume de um painel com vista da embarcação

A partir do cálculo do volume submerso, descrito conforme a equação 1, podemos de antemão calcular o deslocamento (em tonelada força) a partir do Princípio de Arquimedes:

$$(1) V = \frac{(\sum_{i=0}^6 A_i(C_i - O))_x + (\sum_{i=0}^6 A_i(C_i - O))_y + (\sum_{i=0}^6 A_i(C_i - O))_z}{3}$$

$$(2) \Delta = \rho * g * V$$

Posteriormente, para o cálculo da área de superfície molhada basta realizar um somatório da norma do vetor área de cada painel, ou seja, a somatória das áreas da superfície molhada:

$$(3) S_w = \sum_{i=0}^n |A_i^{(x,y,z)}|$$

A coordenada Z de cada vetor área pode ser compreendida como a área de um dado painel projetado no plano XY, seria equivalente a cada painel no plano cartesiano:

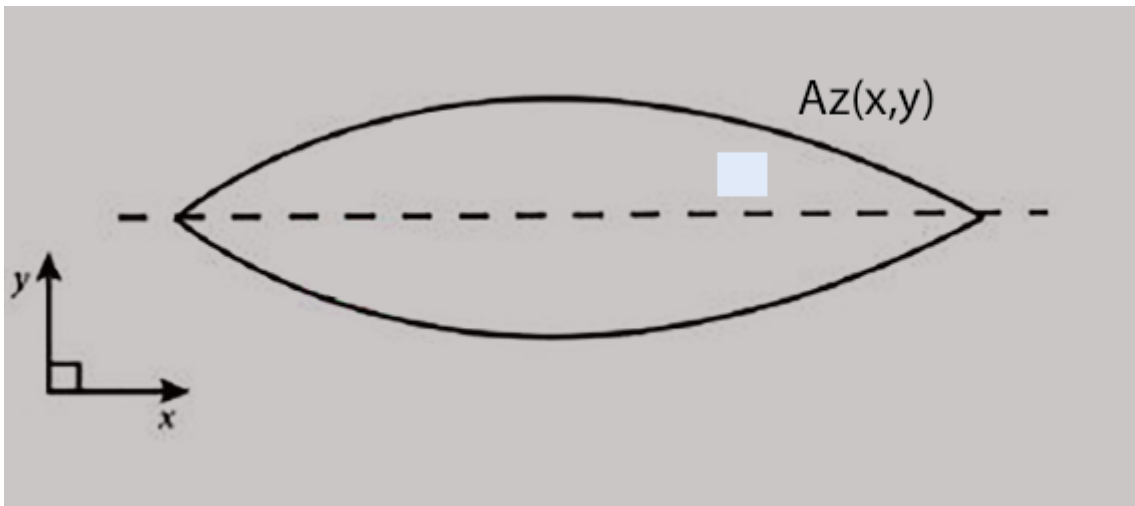


Figura 8: Área de um painel esquematizada no plano cartesiano

Com isso, a soma das coordenadas Z vai projetar a área da nossa embarcação, ou em outra interpretação a área do plano da linha da água. Como a origem do sistema resulta uma coordenada negativa, validando a necessidade de inversão dos pontos explicada na parte de Spline.

$$(4) \quad A_{WL} = \sum_{i=0}^n -A_i^z$$

Possuindo o valor da área de linha d'água, é possível calcular a quantidade de toneladas por unidade de imersão (T_{cm}) (16), considerando que A_{WL} é constante ao imergir a embarcação em um centímetro:

Lembrando que a expressão porta o sinal negativo, pois somente os painéis que têm vetor normal à área projetada no plano xy no sentido negativo do eixo z devem ter suas áreas somadas. Para o cálculo do LCF, é necessário somente calcularmos o ponto no plano de flutuação onde a área a ré deste ponto é igual a área avante. Para isso, basta utilizar a expressão:

$$(5) \quad LCF = \frac{\sum_{i=0}^n (-A_i^z \cdot C_y)}{\sum_{i=0}^n (-A_i^z)}$$

$$(6) \quad TCF = \frac{\sum_{i=0}^n (-A_i^z \cdot C_x)}{\sum_{i=0}^n (-A_i^z)}$$

Repare que para embarcações simétricas em relação ao eixo longitudinal (eixo x) o valor do TCF deve ser nulo. De posse destas duas propriedades, podemos calcular agora os momentos de inércia longitudinal e transversal. Vamos ainda considerar que cada painel tem seu momento de inércia longitudinal e transversal.

$$(7) \quad I_L = \sum_{i=1}^n (-A_i^z * (C_i^x - TCF)^2) + I_L^i$$

$$(8) \quad I_T = \sum_{i=1}^n (-A_i^z * (C_i^y - LCF)^2) + I_T^i$$

Para os cálculos, tanto I_T^i quanto I_L^i podem ser desconsiderados, pois representam valores muito pequenos que não influenciam diretamente nos cálculos dos momentos de inércia.

Abordando agora outro tópico importante sobre estabilidade, o centro de carena (KB) está localizado no centro geométrico da parte submersa da embarcação. Advindo das clássicas equações de estabilidade.

$$(9) LCB = C_B^x = \frac{\sum_{i=1}^n [(A_i^{\rightarrow x} * C_i^{\rightarrow x}) * \frac{C_i^{\rightarrow x}}{2}]}{Volume}$$

$$(10) TCB = C_B^y = \frac{\sum_{i=1}^n [(A_i^{\rightarrow y} * C_i^{\rightarrow y}) * \frac{C_i^{\rightarrow y}}{2}]}{Volume}$$

$$(11) KB = C_B^z = \frac{\sum_{i=1}^n [(A_i^{\rightarrow z} * C_i^{\rightarrow z}) * \frac{C_i^{\rightarrow z}}{2}]}{Volume}$$

Com os momentos de inércia calculados, encontra-se os raios metacêntricos longitudinal (BM_L) e transversal (BM_T):

$$(12) BM_L = \frac{I_L}{Volume}$$

$$(13) BM_T = \frac{I_T}{Volume}$$

Para o cálculo do momento para trimar um centímetro, utiliza-se a equação resultante do teste de inclinação de uma unidade. Os cálculos serão mostrados abaixo.

$$tg(\tau) = \frac{trim}{L} \rightarrow \text{tangente do ângulo de trim}$$

$$\text{onde } trim = 1 \text{ cm} = \frac{1}{100} \text{ m}$$

$$(14) GM_L = \frac{M_T}{tg(\tau) * \Delta},$$

isolando M_{Tcm} (momento para trimar 1 centímetro):

$$(15) M_{Tcm} = \frac{GM_L * \Delta}{100 * L}$$

Por fim, a altura metacêntrica longitudinal (GM_L) pode ser substituída pelo raio metacêntrico longitudinal (BM_L). Portanto, é possível calcular pela seguinte expressão:

$$(16) M_{Tcm} = \frac{BM_L * \Delta}{100 * L}$$

4.0 Linguagens utilizadas

Para a realização do exercício-programa, utilizou-se a linguagem de programação Python, com o interpretador Spyder. Além disso algumas bibliotecas que nos auxiliaram durante o processo, são elas:

- Matplotlib: ferramenta essencial para a plotagem de pontos, funções e gráficos, que nos permitiram a visualização de diversos pontos, inclusive das curvas hidrostáticas.
- NumPy: ferramentas de cálculo e álgebra linear, além de operações com matrizes. Utilizamos com grande frequência essa biblioteca para os cálculos durante o exercício programa.
- Pandas: exportação de arquivos do Excel (.xlsx) para o Python.

5.0 Código e sua execução

Com base no que foi dito, o grupo optou pela embarcação da figura 9, o porta-container Miss Princess. Escolhemos ao acaso, mas ele tinha a representação das linhas d'água e balizas, logo já está apto a receber o estudo de curvas hidrostáticas.

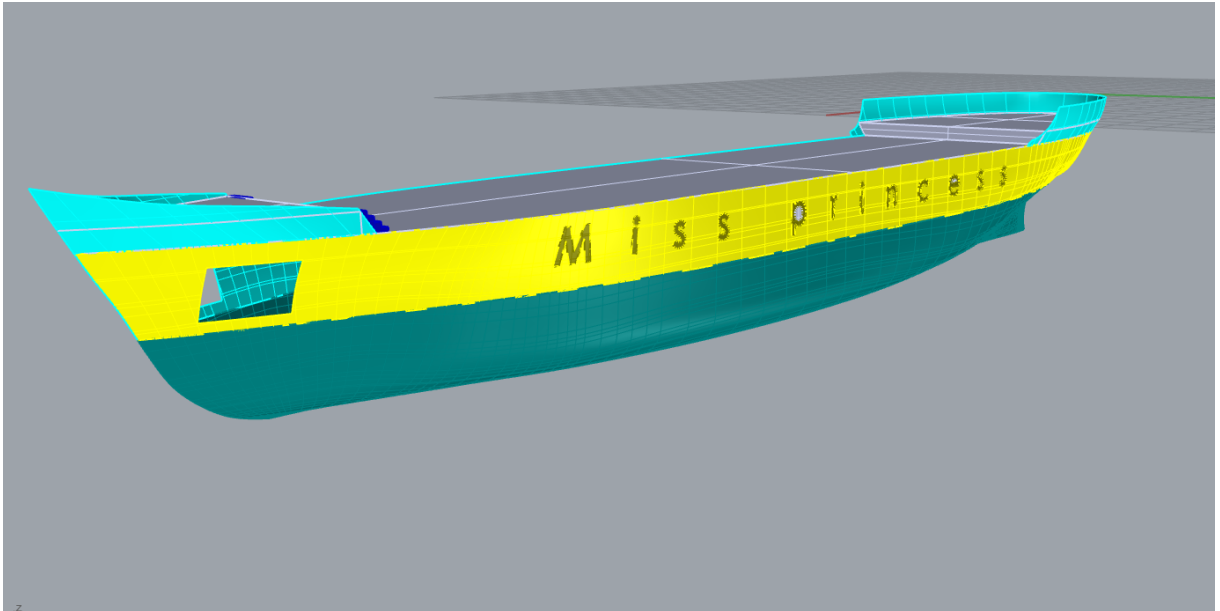


Figura 9: embarcação utilizada para a obtenção das curvas hidrostáticas

5.1 Interpolação e obtenção de splines intermediárias

Antes de iniciar o código, com as extensões mencionadas na seção anterior. Logo em seguida, importa-se os dados da tabela de cotas para uma planilha de Excel em coordenadas XY. O referencial utilizado se encontra na popa, condizente com a origem da embarcação, no mesmo nível de sua quilha. Com a biblioteca Panda, conseguimos importar os dados em .xlsx para nosso estudo feito no Python.

Após a inserção dos dados oriundos da tabela de cotas, é viável a definição de funções, os parâmetros e as matrizes para o cálculo das propriedades hidrostáticas.

Para resumir o método utilizado, foi a resolução do sistema linear para encontrar os intervalos, realizar a fórmula e concatenar os polinômios e será descrito abaixo:

Com a lista em mãos gera-se uma lista com os nossos pontos das coordenadas de WL e baliza, definindo a função spline (recebe as coordenadas) e (retorna os coeficientes de polinômios) b_k , h_k e d_k para o intervalo $k = [1; n]$. Logo um dicionário, que para cada valor que jogamos de coordenadas ele retorna imediatamente os coeficientes. Dando continuidade, para encontrar h (intervalo entre os pontos), ele foi definido em todos os pontos, além de uma função de comprimento das listas.

Até então há em mãos:

- Uma função que retorna a coordenada com seu coeficiente (x , a_k);
- Todos os intervalos entre os pontos e sua posição;
- Tudo isso numerado de $[0, n]$.

Agora busca-se uma maneira de descobrir os valores de c_k , uma vez que os próximos elementos vem naturalmente pelo emprego das equações:

$$\begin{aligned} 4. \text{ os } b\text{'s são dados por } b_k &= \frac{1}{h_k} (a_{k+1} - a_k) - \frac{h_k}{3} (2c_k + c_{k+1}) \\ 5. \text{ os } d\text{'s são dados por } d_k &= \frac{c_{k+1} - c_k}{3h_k} \end{aligned}$$

Porém esse fator vem da construção de um sistema linear, para tal a primeira linha como 1 deve ser de pivô, mais os zeros, do tamanho de elementos da lista n . Para construir a segunda linha é requisitada essa configuração $[h_0, 2(h_1+h_2, h_2, 0)]$. Então para esse intervalo os valores de h são definidos utilizando a função de h para cada

posição pela subtração de $n-1$ `hs = [h[i - 1], 2*(h[i-1] + h[i]), h[i]]`, finalizando essa parte adicionamos os zeros remanescentes na linha com base no processo de escalonamento, para as linhas 2 e 3, dado que a última linha já está definida como $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$, Encerra-se a matriz adicionando tudo com `A.append`, e então está a matriz dos coeficientes finalizada.

Agora nos falta a matriz dos termos independentes uma lista de listas no programa. Cada valor necessário é adicionado em sua respectiva posição, tal que a posição da coluna 1 e 4 é 0, portanto já é definida rapidamente, agora a linha 2 foi descrita como:

`row = 3 * (a[k+1] - a[k]) / h[k] - 3 * (a[k] - a[k-1]) / h[k-1]`,

finalizando outra matriz.

Em posse das matrizes A e B , encontra-se g_k resolvendo o sistema linear $A.x = B$, lembrando que $x = (b_0, b_1, \dots, b_k)^T$ e $b_k = g_k / 2$. Agora, com todos dados anteriores, são computados os parâmetros restantes: a_k e c_k . Todas variáveis passam a estar definidas para cada intervalo e para cada plano diferente. Assim, torna-se possível plotar todas funções $s_k(x)$ (e consequentemente $S_3(x)$) para qualquer plano da embarcação, gerando seu plano de linhas. Algumas imagens foram geradas, que variam de acordo com a quantidade de balizas intermediárias. Algumas abaixo:

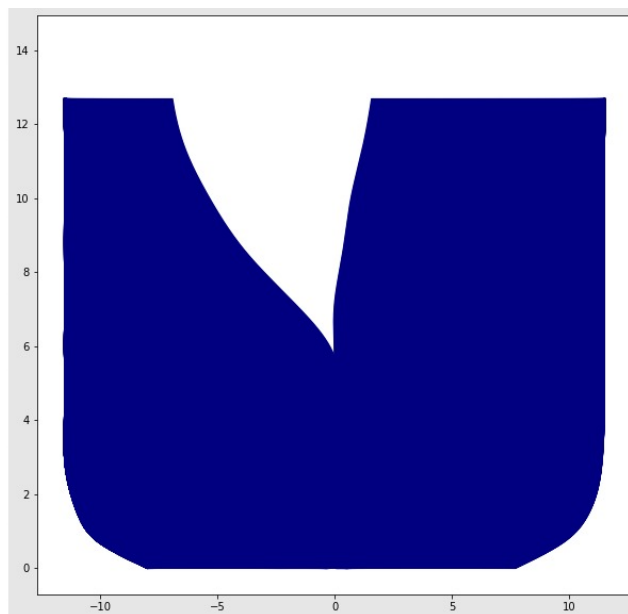


Figura 10: Configuração para 75 balizas intermediárias

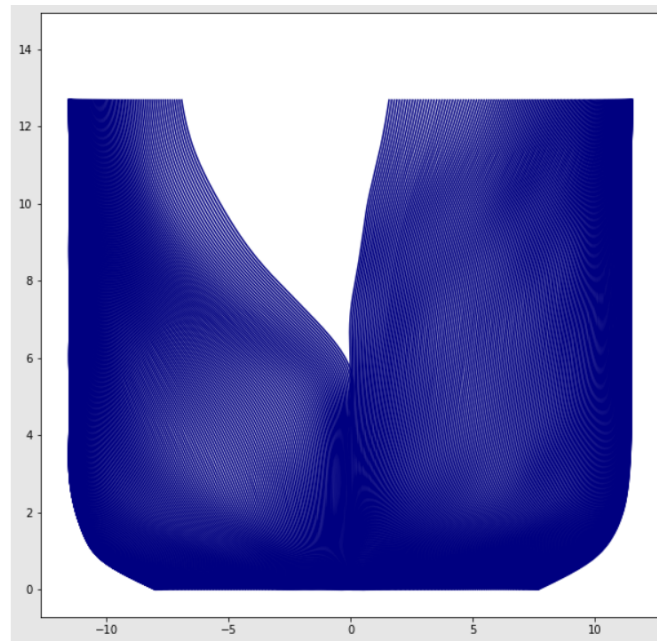


Figura 11: 20 balizas intermediárias entre 2 pontos

5.2 Construção dos Painéis

Dando continuidade no projeto, o próximo rumo ao objetivo é determinar os painéis. Mas como fazer isso tendo uma tabela com as balizas e linhas d'água ?

Para solucionar esse problema, a abordagem vetorial é recomendável, ou seja para a variação da WL com o calado pegamos a diferença entre os intervalos em seguida armazenamos isso em uma lista, repetimos o mesmo processo para a coluna nas balizas, vale lembrar que a lista após interpolação sofreu um aumento de linhas e colunas.

Calculando as balizas intermediárias através de splines, ficamos com diversos pontos meia boca, a partir deles, traçamos as linhas d'águas intermediárias da embarcação. Agora, com diversas linhas d'águas e balizas, construímos vários painéis, que são de extrema importância para o cálculo das propriedades hidrostáticas da embarcação. Reforçando o parágrafo anterior, a precisão dos cálculos acaba aumentando junto com a quantidade de painéis, pois a interpolação nos ajuda a determinar pontos que antes não eram conhecidos.

5.3 Obtenção das propriedades hidrostáticas

Foi uma longa construção até aqui, porém finalmente pode-se determinar as propriedades hidrostáticas. Por incrível que pareça, tratando-se da parte da programação essa, sem dúvidas é a parte com menos segredos. Pois já sabe-se tudo aquilo que é preciso.

Basicamente, a partir de agora cria-se funções para cada fórmula presente na metodologia, e posteriormente o recurso de plotar os resultados para melhor observação dos resultados.

5.4 Código

- Durante o código diversas funções que serão explicadas abaixo (**def Calc_g, def Calc_b, def Calc_d**);
- Essas 3 funções servem para cálculos de parâmetros que foram utilizados para calcular parâmetros importantes das splines. Depois essas funções foram reunidas em uma função main (**def Spline**);
- Depois disso, uma nova tabela já foi interpolada, para não modificar a original. Essa nova tabela conta com as meia bocas e balizas intermediárias (**df_novo**);
- Foram calculadas as linhas d'águas referentes às meia bocas intermediárias (**df_novo2**);
- A partir disso, o cálculo dos painéis e também suas áreas referentes (**def obterA**);
- Depois temos o cálculo dos centróides (**Cx, Cy e Cz**);
- A partir disso, o cálculo do volume (**def Volume**);
- Por fim, restam apenas os cálculos hidrostáticos e a plotagem dos gráficos.

6.0 Resultados

Nesse tópico apresentam-se todos esses gráficos obtidos pelo grupo ao longo da realização do relatório. Devido ao eixo de simetria a origem do sistema de coordenadas foi considerada na popa, sobre o eixo de simetria longitudinal, além da popa na altura da linha base. Então foram omitidas as posições transversais do Centro de Carena e do Centro de Flutuação, pois o casco é considerado simétrico e sua posição permanece no eixo de simetria.

6.1 Volume submerso (∇)

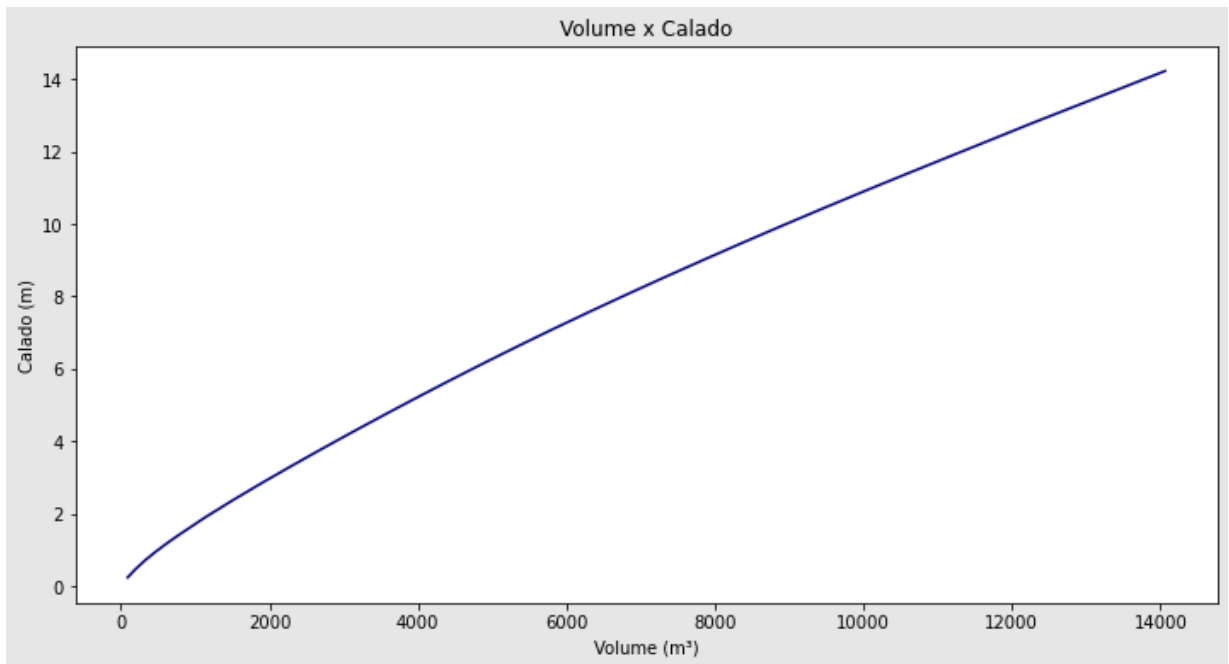


Figura 12: Volume submerso (∇) x Calado (m)

6.2 Deslocamento (Δ)

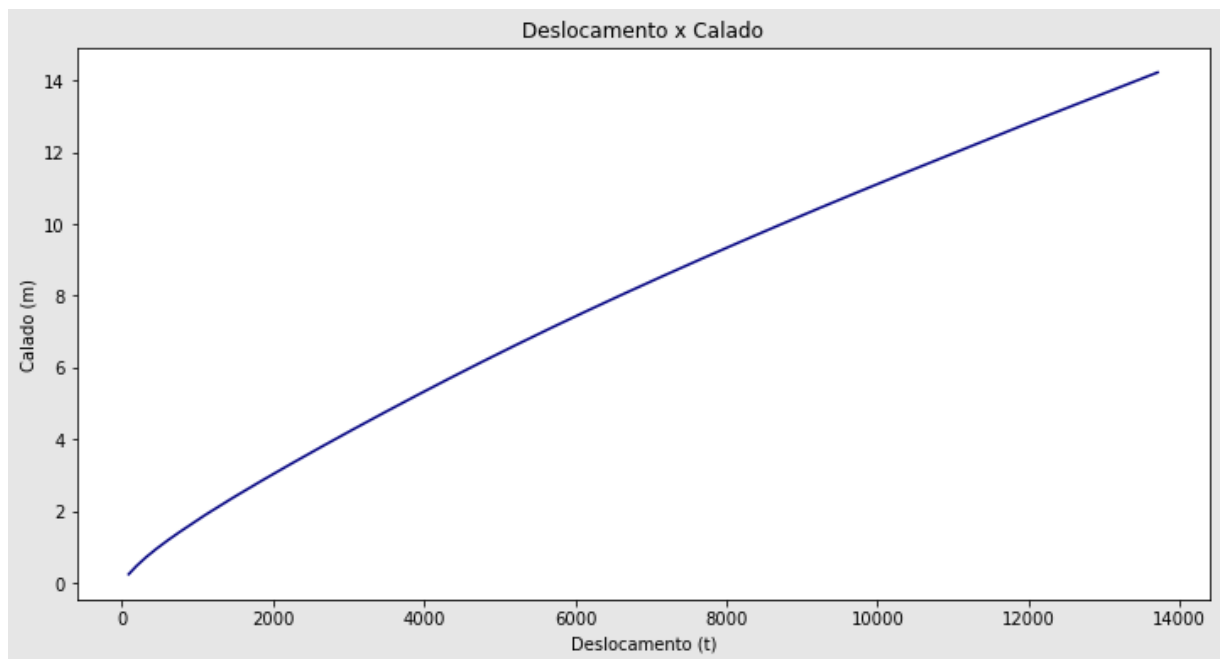


Figura 13: Deslocamento (Δ) x Calado (m)

6.3 Posição Longitudinal do CB (LCB)

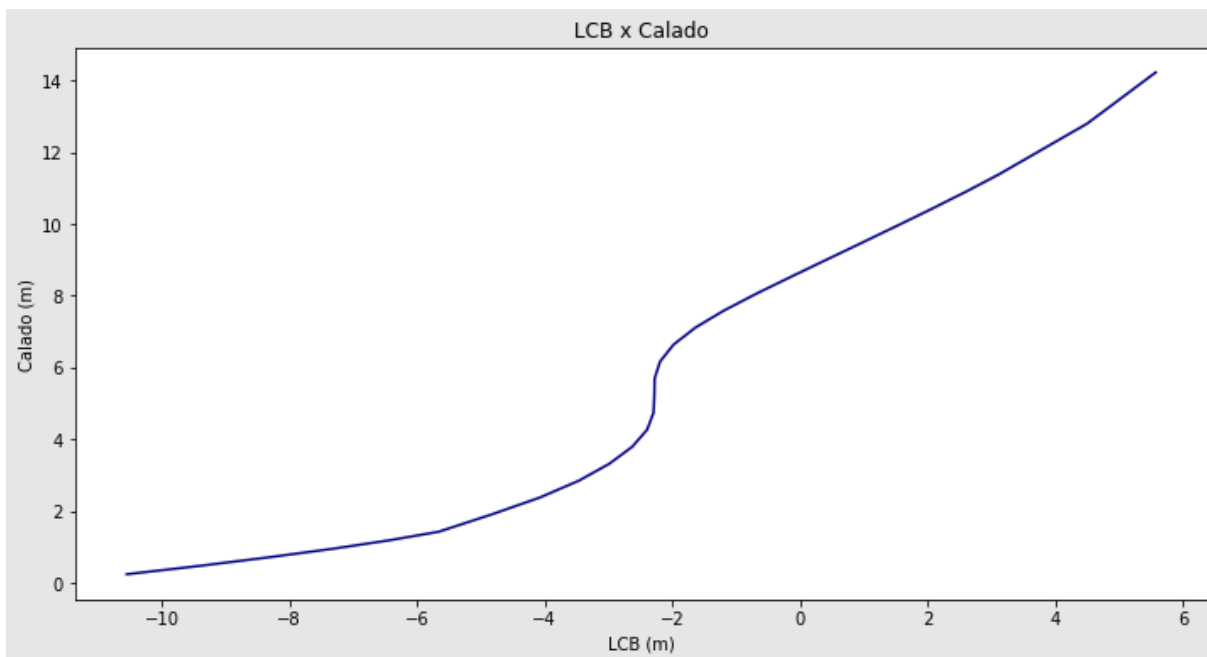


Figura 14: Posição longitudinal CB (m) x Calado (m)

6.4 Área molhada (S_w)

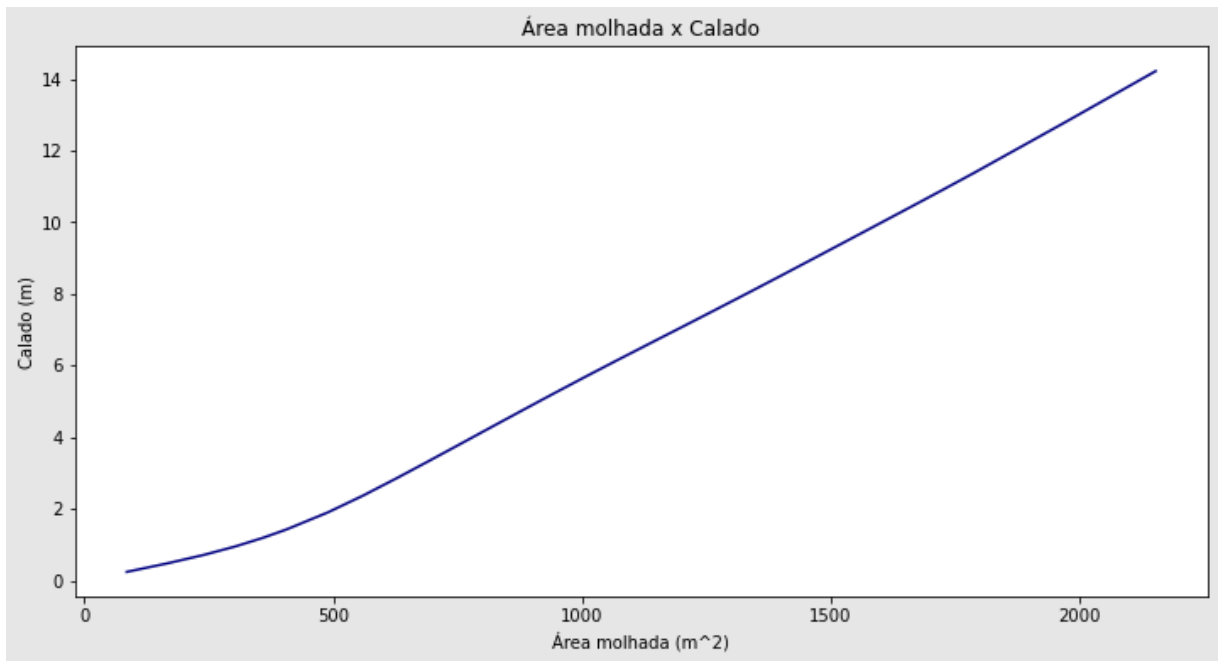


Figura 15: Área molhada (m^2) x Calado (m)

6.5 Área do plano de flutuação (A_{WL})

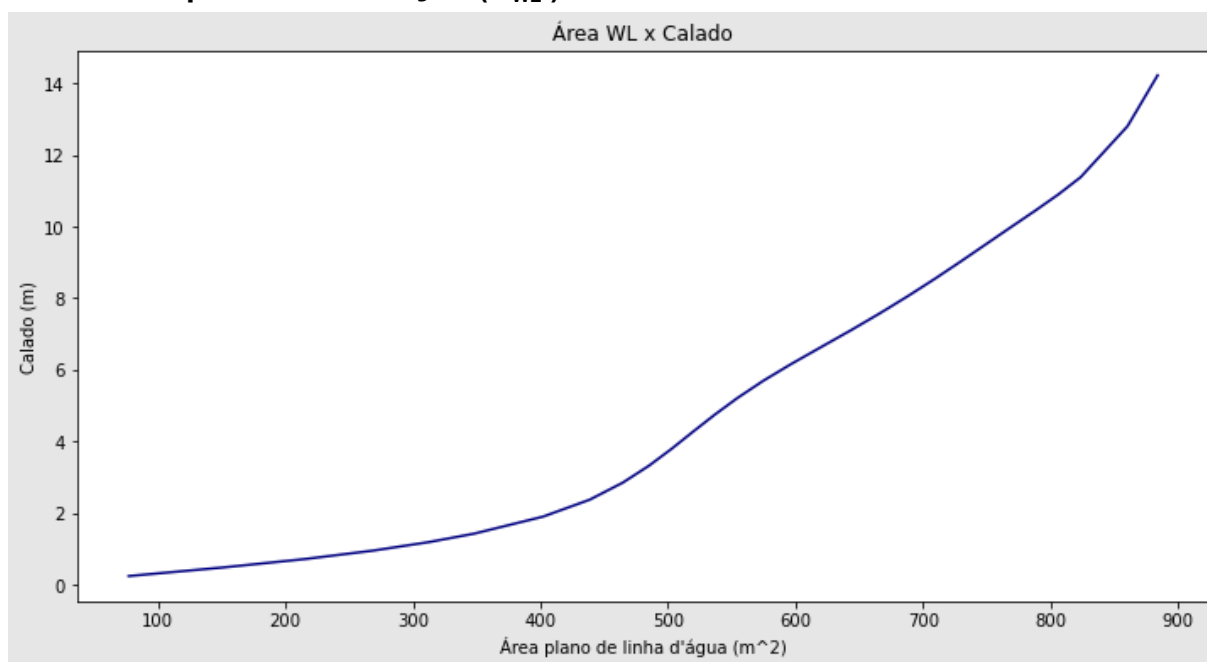


Figura 16: Área do plano de flutuação (m^2) x Calado (m)

6.6 Posição Longitudinal do Centro de Flutuação LCF

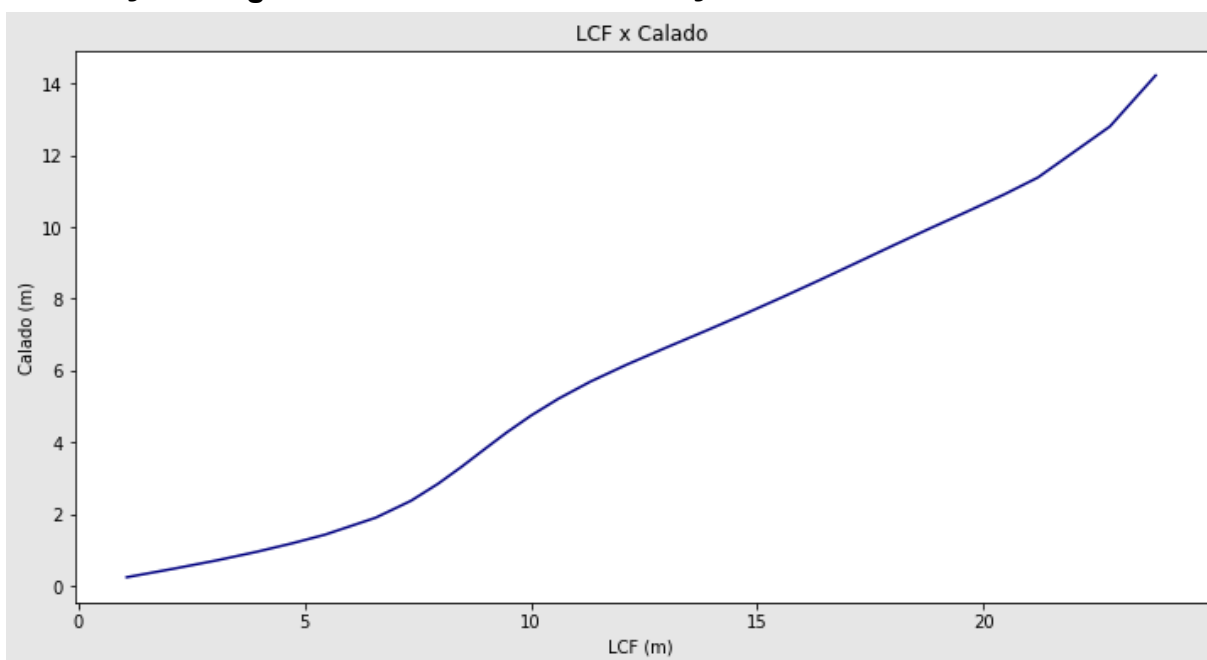


Figura 17: Posição Longitudinal do Centro de Flutuação LCF (m) x Calado (m)

6.7 Momento de Inércia Longitudinal

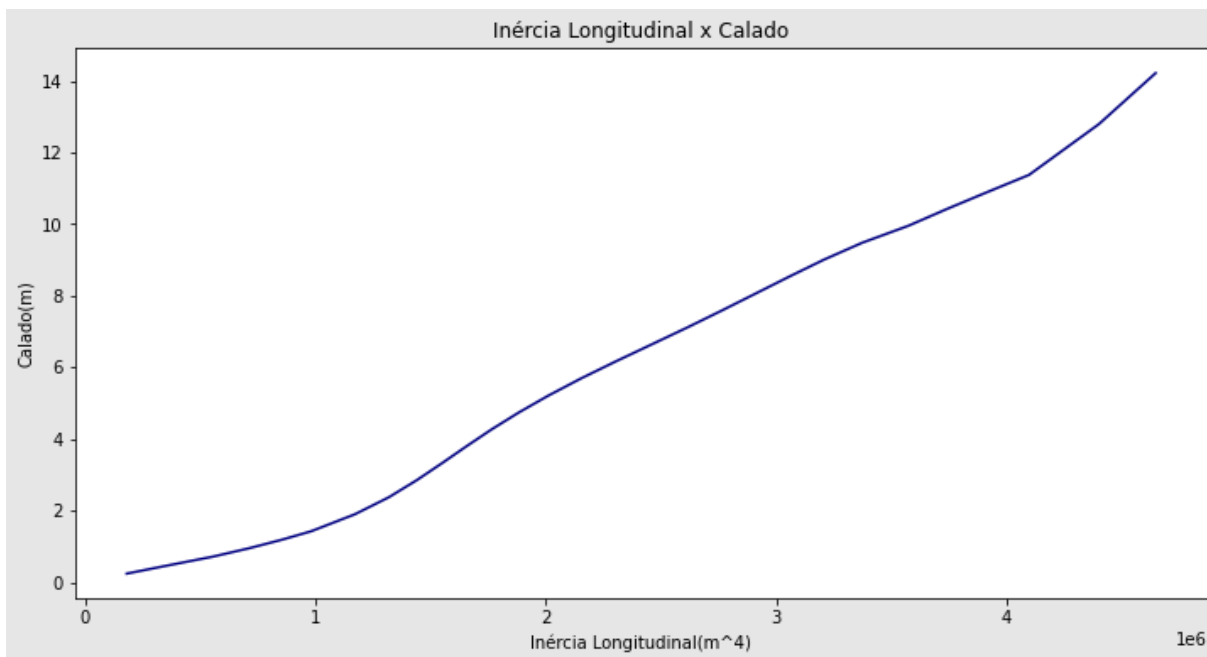


Figura 18: Momento de inércia Longitudinal (m^4) x Calado (m)

6.8 Momento para gerar um trim de 1 cm

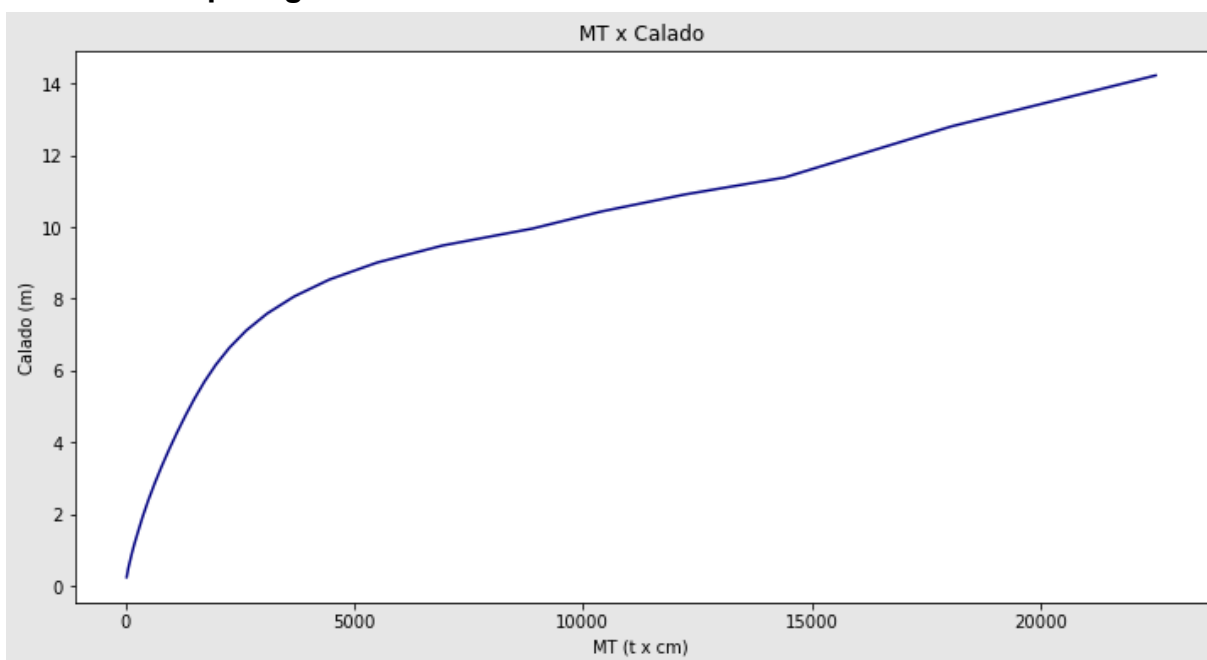


Figura 19: Momento para gerar um trim de 1 cm (t x cm) x Calado (m)

6.9 Posição longitudinal BML

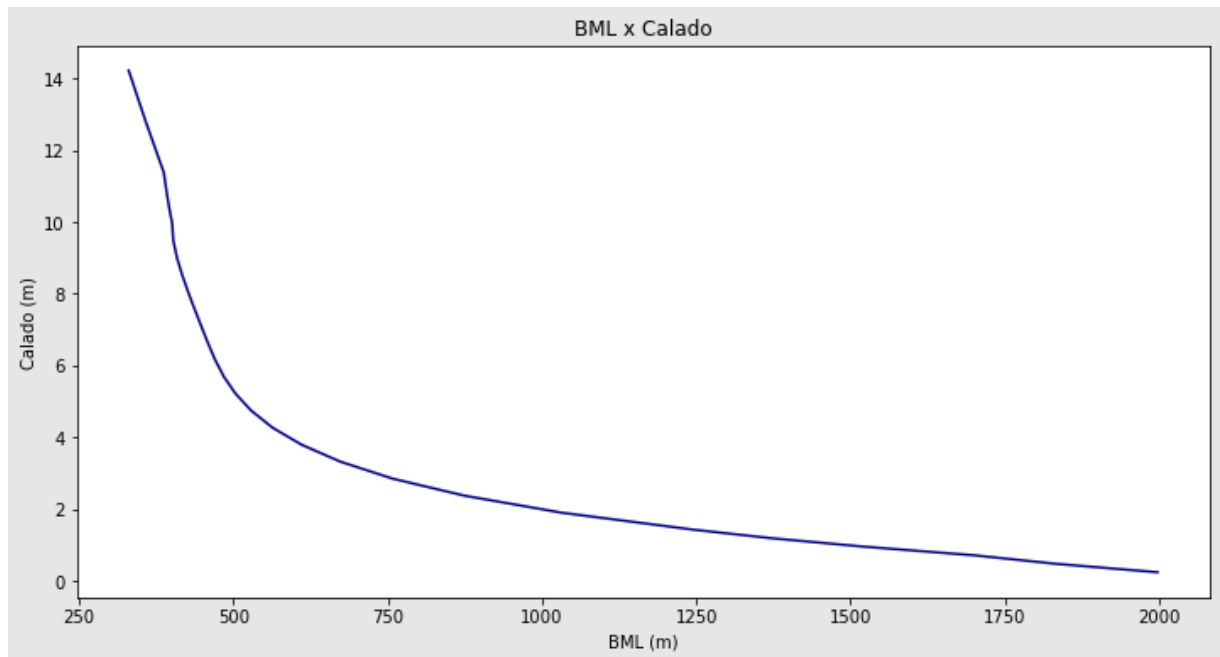


Figura 20: Posição longitudinal (BM_L) x Calado (m)

6.10 Posição longitudinal BMT

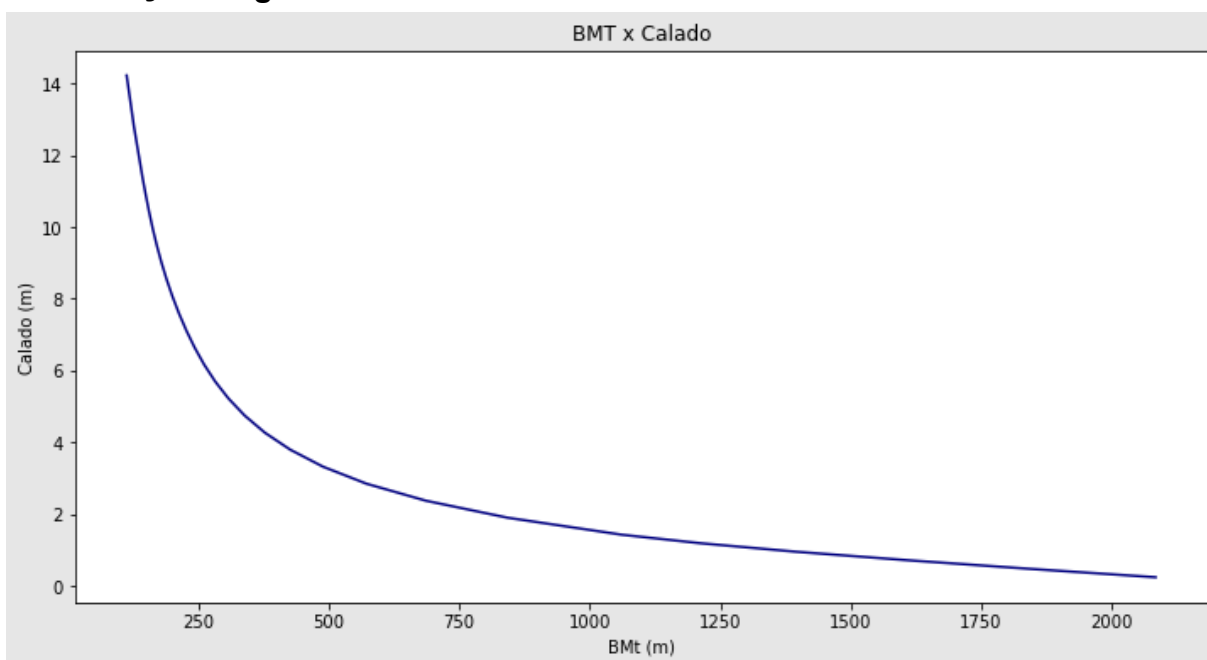


Figura 21: Posição longitudinal (BM_T) x Calado (m)

6.11 Resultado Final

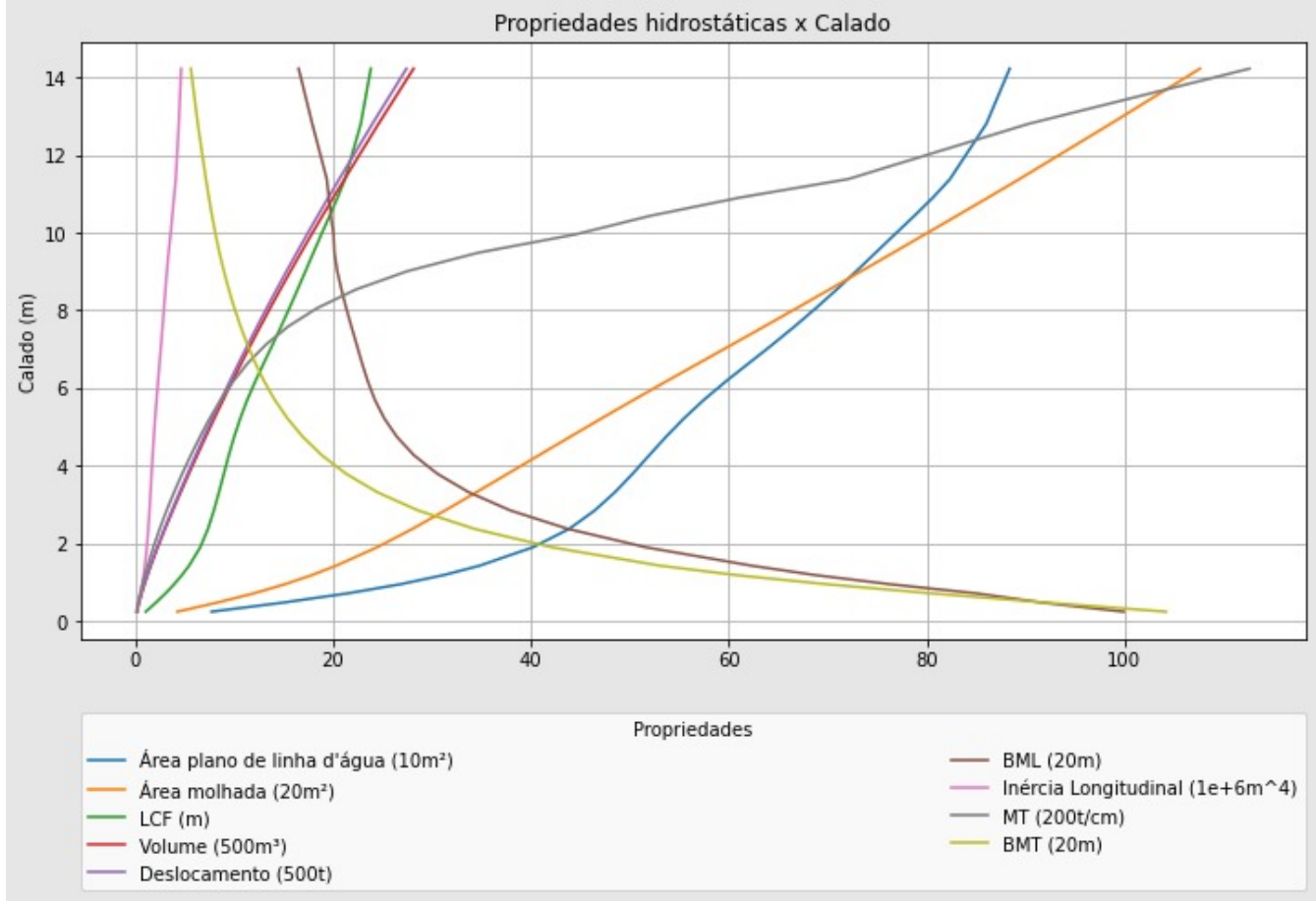


Figura 22: Propriedades hidrostáticas Miss Princess

7.0 Conclusão

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um exercício prático conforme os conceitos apresentados em sala de aula, visando uma maior compreensão entre os membros do grupo sobre a teoria apresentada.

A utilização de programação para a obtenção das curvas hidrostáticas de uma embarcação tornou-se ultrapassada. Atualmente utilizam-se softwares especializados para o cálculo das características de uma embarcação. Neste programa, utilizamos de dados comparativos oriundos do software MaxSurf e Orca3d visando a comparação com os dados obtidos com nosso programa. O casco apresentado neste programa foi modelado utilizando o Rhinoceros 7, encontrado em um fórum de desenvolvedores de AutoCad.

Com os dados obtidos pelo programa modelado, é notório que houve uma severa diferença entre os dados obtidos pelo software. O principal fator que causou essa discrepância se encontra na modelagem imprópria do casco, este apresenta algumas imperfeições que desencadearam resultados não precisos na obtenção das curvas hidrostáticas calculadas pelos softwares.

Vale ressaltar que o método de obtenção das curvas hidrostáticas utilizando os painéis têm uma maior precisão em função da quantidade de painéis gerados. Porém, quanto maior a quantidade de painéis obtidos maior o tempo de processamento do programa, sendo que os valores tendem à convergência e os gráficos à continuidade conforme diminui-se as arestas dos quadrados.

8.0 Bibliografia

MARTINS, Marcelo Ramos.**Determinação das propriedades Hidrostáticas de unidades flutuantes**,2004.Díspónível em:<<https://www.labrisco.usp.br/~marcelo/PNV3315/Determinacao%20das%20Propriedades%20Geometricas%20do%20Casco%20-%20Splines.pdf>>. Acesso em: 16/06/2021.

SINGH, Gurchetan.**Introduction to Regression Splines (with Python codes)**,2018.Díspónível em:<<https://www.analyticsvidhya.com/blog/2018/03/introduction-regression-splines-python-codes/>>. Acesso em: 20/06/2021

CHAKRABORTY, SOUMYA. **Ship Stability – Introduction to Hydrostatics and Stability of Surface Ships**, 2021. Disponível em:<<https://www.marineinsight.com/naval-architecture/ship-stability-introduction-hydrostatics-stability-surface-ships/>>. Acesso em 15/06/2021.