
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica

Determinação das propriedades hidrostáticas de unidades flutuantes.

Bolsista: Rodrigo Loureiro Prado Alvarez
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ramos Martins

Maio/2004

SUMÁRIO

1	RESUMO	4
2	INTRODUÇÃO.....	5
3	INTERPOLAÇÃO E GERAÇÃO DE PAINÉIS	7
3.1	INTRODUÇÃO	7
3.2	MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESTUDADOS	7
3.3	FUNÇÕES <i>SPLINE</i> PARA INTERPOLAÇÃO	8
3.4	GERAÇÃO DE PAINÉIS.....	10
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A INTERPOLAÇÃO E GERAÇÃO DOS PAINÉIS..	14
4	OBTENÇÃO DAS CURVAS HIDROSTÁTICAS A PARTIR DO CÁLCULO VETORIAL	16
4.1	INTRODUÇÃO	16
4.2	EXPLANAÇÃO TEÓRICA.....	16
4.3	CÁLCULO DAS PROPRIEDADES HIDROSTÁTICAS DE UMA EMBARCAÇÃO.....	18
4.4	OBTENÇÃO DOS PAINÉIS SUBMERSOS.....	21
4.5	IMPLEMENTAÇÃO DOS MOVIMENTOS EM RELAÇÃO AOS EIXOS XYZ	23
5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	25
5.1	INTRODUÇÃO	25
5.2	COMPARAÇÃO COM UMA CHATA.....	25
5.3	COMPARAÇÃO COM O PRIMEIRO PETROLEIRO	28
5.4	COMPARAÇÃO COM O SEGUNDO PETROLEIRO	31
5.5	COMPARAÇÃO COM A PLATAFORMA	34
6	CONCLUSÃO	36
7	CRONOGRAMA	37
8	BIBLIOGRAFIA	38
9	APÊNDICES	39
	APÊNDICE A: DEDUÇÃO DA MATRIZ DE MUDANÇA DE SISTEMA DE COORDENADAS. ...	40
	APÊNDICE B: ARQUIVO DE ENTRADA DO PROGRAMA PARA COTAS DE NAVIOS.	43
	APÊNDICE C: ARQUIVO DE ENTRADA DO PROGRAMA PARA PAINÉIS DE PLATAFORMAS.	45
	APÊNDICE D: CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA PRÓPRIO DE UM PAINEL.	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Exemplificação de uma função interpoladora (contorno de uma linha d'água).	10
Figura 3.2: Painel criado pelo programa com a linha d'água e a baliza interpoladas.	11
Figura 3.3: Painel utilizado para cálculo vetorial.	12
Figura 3.4: Ordenação dos pontos para que o vetor tenha sentido para fora da embarcação.	12
Figura 3.5: Geração de painéis em um casco.	13
Figura 3.6: Painéis gerados no fundo da embarcação.	15
Figura 3.7: Painéis gerados na popa da embarcação.	15
Figura 4.1: Cubo utilizado para exemplificação do cálculo vetorial.	17
Figura 4.2: Cubo com vetores posicionados no centro de cada painel.	17
Figura 4.3: Cubo com sistema de coordenadas posicionado na linha d'água.	18
Figura 4.4: Possíveis divisões de um painel pela linha d'água.	22
Figura 5.1: Desenho da chata utilizada para a primeira comparação (vistas superior e lateral).	25
Figura 5.2: Desenho da chata utilizada para a primeira comparação (vista frontal).	26
Figura 5.3: Plano de linhas do primeiro petroleiro comparado com o programa.	28
Figura 5.4: Plano de linhas do segundo petroleiro comparado com o programa.	32
Figura 5.5: Plataforma utilizada para comparação.	34
Figura 9.1: Transformações de coordenadas para o movimento de <i>yaw</i>	40

Figura 9.2: Transformações de coordenadas para o movimento de <i>pitch</i>	41
Figura 9.3: Transformações de coordenadas para o movimento de <i>roll</i> .	41
Figura 9.4: Painei que será utilizado como referência.	46
Figura 9.5: Triângulo utilizado para referência no cálculo do momento de inércia.	47
Figura 9.6: Rotação dos eixos coordenados.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Principais dimensões da chata.	26
Tabela 5.2: Resultados do programa para a chata, comparados com a teoria.	26
Tabela 5.3: Principais dimensões do primeiro petroleiro comparado. ..	29
Tabela 5.4: Resultados do programa para o primeiro petroleiro, comparados com o paper.	29
Tabela 5.5: Principais dimensões do primeiro petroleiro comparado. ..	32
Tabela 5.6: Resultados do programa para o segundo petroleiro, comparados com o paper.	32
Tabela 5.7: Resultados do programa para a plataforma, comparados com a teoria.	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1: Curvas hidrostáticas teóricas e calculadas pelo programa para a chata.	28
Gráfico 5.2: Curvas hidrostáticas obtidas do paper e calculadas pelo programa para o primeiro petroleiro.	31
Gráfico 5.3: Curvas hidrostáticas obtidas do paper e calculadas pelo programa para o segundo petroleiro.	34

1 RESUMO

Devido a constante necessidade de construções de novas embarcações, quer seja pela demanda do mercado, quer seja pela renovação da frota, o desenvolvimento de programas computacionais capazes de ajudar no projeto das mesmas tornam-se bastantes úteis, auxiliando bastante nas etapas de projeto de um navio.

Com esta finalidade, foi desenvolvido ao longo deste segundo semestre de 2003 um programa que auxilia no cálculo das propriedades hidrostáticas de uma embarcação. Tais propriedades são calculadas a partir da construção de painéis pelo programa para a representação do casco, com base nas cotas fornecidas pelo usuário. A partir dos painéis, é possível utilizar propriedades do cálculo vetorial para obtenção das curvas hidrostáticas.

O programa foi inicialmente desenvolvido para a análise de navios, mas, posteriormente, com algumas alterações em sua estrutura, também calcula propriedades de plataformas. Foram feitas validações com petroleiros cujas cotas e curvas hidrostáticas já eram conhecidas e o resultado obtido foi bem próximo ao esperado, mostrando uma boa acurácia do programa. Para o caso da plataforma, o programa executa o cálculo vetorial com base nos painéis fornecidos, já que para este tipo de unidade flutuante os painéis devem ser obtidos externamente e fornecidos ao programa.

Ainda neste mesmo programa foi implementado um método para se obter as propriedades de uma embarcação quando esta apresenta movimentos em relação aos eixos x, y e z, a saber: *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* e *yaw*. No entanto, os resultados ainda não foram validados e, por isso, não constam neste relatório.

O desenvolvimento do programa foi feito no Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, sob orientação do professor Dr. Marcelo Ramos Martins e com bolsa paga pela ANP (Agência Nacional do Petróleo).

2 INTRODUÇÃO

O projeto de um navio é algo que leva muito tempo para ser realizado, necessitando do esforço de muitas pessoas em sua execução. Devido a sua complexidade, programas computacionais podem ajudar em muito a torná-lo algo mais rápido e também mais barato.

As propriedades hidrostáticas de uma embarcação são de extrema importância dentro do projeto. A partir delas, pode-se fazer uma análise a respeito do comportamento do navio como, por exemplo, em relação a sua estabilidade estática.

Com estas crescentes necessidades de demanda do mercado, foi criada uma forma de obtenção de tais propriedades de um navio a partir de suas cotas. O programa visa prioritariamente o cálculo de propriedades hidrostáticas para navios petroleiros, uma vez que no Brasil eles são largamente utilizados, devido ao grande crescimento da área de exploração de petróleo em auto mar.

Com as cotas do navio, através de um processo de interpolação que será depois descrito, o programa gera uma malha de painéis com os quais, posteriormente, utilizando-se propriedades do cálculo vetorial, fornece as propriedades hidrostáticas. Estas propriedades podem ser obtidas para diversos calados, inclusive o de projeto.

Assim sendo, utilizando apenas métodos de interpolação agregados ao cálculo vetorial com painéis, é possível de se obter:

- Volume;
- LCF – Posição longitudinal do CF (centro de flutuação);
- TCF – Posição transversal do CF;
- LCB – Posição longitudinal do CB (centro de carena);
- TCB – Posição transversal do CB;
- KB – Altura do CB;
- Momentos de inércia longitudinal e transversal do plano de flutuação;
- Área do plano de flutuação;
- Área molhada;

- Altura do BM (raio metacêntrico) longitudinal e transversal.

O método para cálculo da interpolação, bem como das propriedades acima mencionadas, serão apresentados no decorrer deste relatório.

3 INTERPOLAÇÃO E GERAÇÃO DE PAINÉIS

3.1 Introdução

A partir das cotas de um navio, pode-se traçar os contornos das balizas e linhas d'água do mesmo. Pode-se ainda dividir em quantas linhas d'água e quantas balizas se queira. Para isso, é necessário apenas aplicar o conceito de interpolação.

Dados determinados números de pontos, podem-se obter pontos intermediários a esses utilizando-se a interpolação. A interpolação consiste em aproximar uma função ou um conjunto de pontos por uma nova função, de tal forma que satisfaça as propriedades impostas. Com a nova função, utiliza-se esta em lugar da anterior para obtenção de pontos intermediários.

Neste capítulo será apresentado o método de interpolação utilizado pelo programa e como foi feita sua aplicação a unidades flutuantes, com base em suas cotas fornecidas a priori.

Vale ressaltar no entanto que o método de interpolação é utilizado somente para geometria do tipo navio. No caso das plataformas, os painéis devem ser determinados externamente e fornecidos ao programa no mesmo formato do mostrado no Apêndice C.

3.2 Métodos de interpolação estudados

No caso em que estudamos, como necessitamos de uma função que interpole pontos já existentes para o fornecimento de outros intermediários, foi buscado na bibliografia métodos que atendam a nossa finalidade. Dentre eles, podemos citar:

- Interpolação polinomial: obtém-se um polinômio de grau menor ou igual ao número de pontos fornecidos menos um;
- Interpolação *spline*: obtém-se polinômios de graus menores para um conjunto de pontos também menores, dentro do conjunto de pontos fornecidos, impondo-se algumas condições para que a função seja contínua e que tenha derivadas contínuas até uma determinada ordem.

O primeiro tipo de interpolação estudado 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

pode ser conseguida ou através da solução de um sistema linear, ou pelos métodos de Lagrange ou de Newton.

Todavia, a obtenção de um polinômio pode causar resultados muito ruins entre alguns pontos, devido às oscilações, não servindo como bom interpolador para uma grande quantidade de valores. Outro ponto crítico na utilização de polinômios é a não garantia do carenamento das linhas. Assim, foi adotado no programa a interpolação através de funções *spline*, cujas vantagens serão apresentadas a seguir.

3.3 Funções *spline* para interpolação

Uma função *spline* $S_p(x)$ de grau p com os nós nos pontos x_i ($i = 0, 1, \dots, n$) é definida com as seguintes condições:

- Em cada subintervalo de pontos $[x_i, x_{i+1}]$, com $i = 0, 1, \dots, (n-1)$, $S_p(x)$ é um polinômio de grau p : $s_p(x)$;
- $S_p(x)$ é contínua e tem derivada contínua até ordem $(p-1)$ no intervalo em que é considerada;
- $S_p(x)$ passa pelos pontos do intervalo.

Há alguns graus de funções *splines* que são utilizados para interpolação. São eles: grau 1 (função linear), grau 2 (função quadrática) e grau 3 (função cúbica).

Se considerarmos a *spline* linear para interpolar pontos perceberemos que ela apresenta como grande desvantagem o fato de ter derivada primeira descontínua nos nós. Já as *splines* quadráticas têm derivadas contínuas até ordem 1, não garantindo que a curvatura mantenha-se a mesma nos nós (pontos fornecidos). Desta forma, a *spline* mais utilizada e que é adotada no programa é a *spline* de grau três ou *spline* cúbica interpolante.

A *spline* de grau 3 apresenta duas derivadas contínuas, não permitindo que a função interpoladora tenha picos ou mudança abrupta em sua curvatura nos nós.

Para cada intervalo entre dois pontos $[x_k, x_{k+1}]$ com $k = 1, 2, \dots, (n-1)$, onde n é o número de pontos fornecidos por onde deve passar a função *spline* interpoladora, existe um polinômio $s_k(x)$ de grau 3, que é escrito como:

$$s_k(x) = a_k(x - x_k)^3 + b_k(x - x_k)^2 + c_k(x - x_k) + d_k \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde a_k , b_k , c_k e d_k são os coeficientes que devem ser encontrados para cada valor de $k = 1$ a $n-1$. Se denotarmos:

$$g_k = s_k''(x_k) \quad \text{e} \quad h_k = x_k - x_{k-1} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

podemos encontrar os valores de a_k , b_k , c_k e d_k , pelas seguintes expressões:

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{g_k - g_{k-1}}{6h_k} \\ b_k &= \frac{g_k}{2} \\ c_k &= \left[\frac{y_k - y_{k-1}}{h_k} + \frac{2h_k g_k + g_{k-1} h_k}{6} \right] \\ d_k &= y_k \end{aligned} \right\} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

e os valores de g_k podem ser obtidos pela solução do sistema $Ax = b$, em que:

$$A = \begin{pmatrix} h_1 & 2(h_1 + h_2) & h_2 & 0 & 0 \\ 0 & h_2 & 2(h_2 + h_3) & h_3 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & h_{n-1} & 2(h_{n-1} + h_n) & h_n \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$b = 6 \cdot \begin{pmatrix} \frac{y_2 - y_1}{h_2} - \frac{y_1 - y_0}{h_1} \\ \frac{y_3 - y_2}{h_3} - \frac{y_2 - y_1}{h_2} \\ \vdots \\ \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} - \frac{y_{n-1} - y_{n-2}}{h_{n-1}} \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

e

$$x = (g_0, g_1, \dots, g_n)^T \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Como este tipo de interpolação é bastante comum, não vamos entrar aqui em detalhes sobre o processo de solução do sistema ou na dedução de tais fórmulas apresentadas. Maiores informações podem ser encontradas na bibliografia [1].

3.4 Geração de painéis

Tendo em vista que é possível fazer a interpolação de pontos através de funções, conforme mostrado no item anterior, podemos agora apresentar como são feitas a interpolação e a criação de painéis pelo programa. Vamos considerar primeiramente que seja fornecido ao programa alguns pontos para uma certa linha d'água, conforme mostra a Figura 3.1.

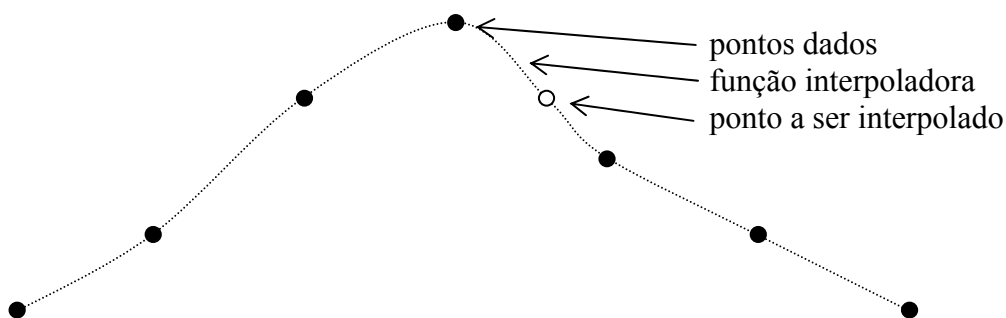


Figura 3.1: Exemplificação de uma função interpoladora (contorno de uma linha d'água).

Com base nos pontos fornecidos, podemos encontrar as coordenadas de qualquer ponto intermediário ao intervalo considerado, através da geração de funções *splines*, conforme já explicado. Isso permite que seja possível encontrar para balizas intermediárias, para uma mesma linha d'água existente ou para uma criada pelo programa, as distâncias dos pontos de intersecção entre elas em relação a um eixo longitudinal que vai de popa a proa.

Imaginemos, portanto, que tenham sido fornecidas ao programa as cotas de uma determinada embarcação, contendo 10 linhas d'água, 10 balizas e suas correspondentes distâncias em relação ao eixo longitudinal.

Se quisermos discretizar melhor a embarcação, podemos interpolar, para cada linha d'água criada, quantas balizas desejarmos. Com isso, discretizamos o navio e podemos obter mais precisamente as suas características (propriedades hidrostáticas). É justamente com este intuito que são criados os painéis. Os painéis situam-se entre as balizas e linhas d'água. No caso adotado pelo programa, os painéis possuem sempre quatro pontos e são gerados de tal forma que o vetor normal à superfície tenha sentido para fora da embarcação.

Vamos imaginar duas linhas d'água e duas balizas fornecidas e, entre elas, uma linha d'água e uma baliza, ambas geradas pelo programa, conforme mostra a Figura 3.2.

Os painéis gerados ficam justamente entre as linhas d'água e as balizas interpoladas pelo programa. Desta maneira, facilmente constata-se que, quanto mais linhas d'água e mais balizas, isto é, menor espaçamento entre elas, menor será o tamanho dos painéis e, conseqüentemente, melhor será a discretização da embarcação.

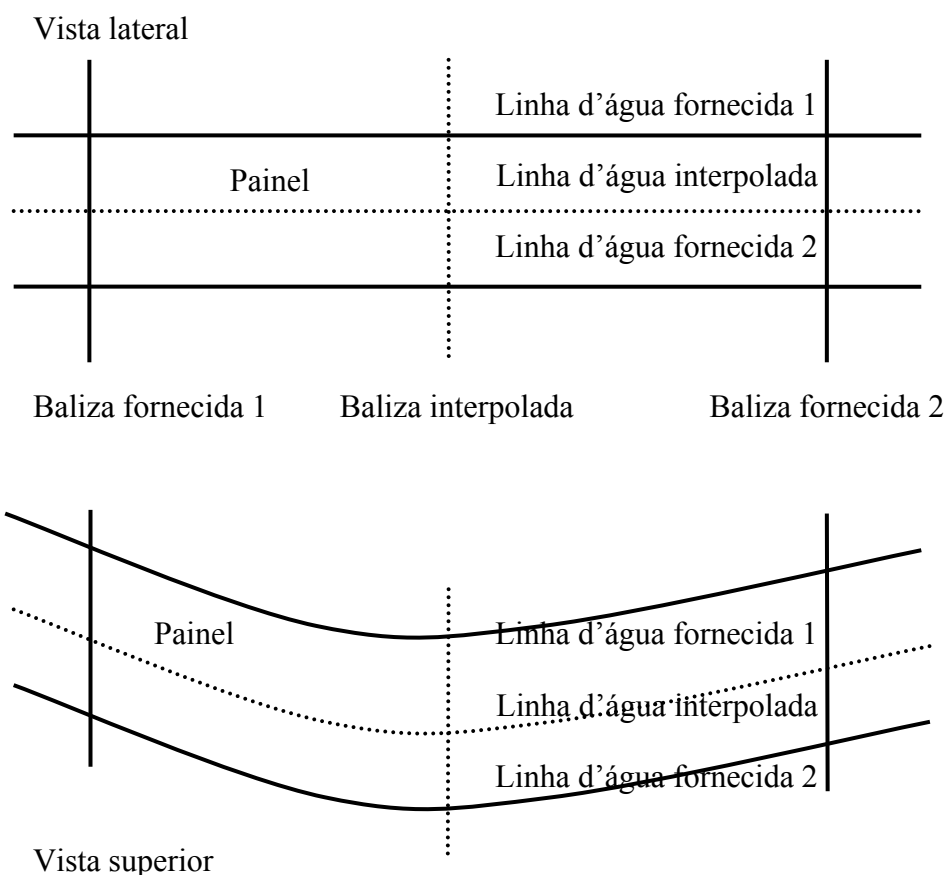


Figura 3.2: Painel criado pelo programa com a linha d'água e a baliza interpoladas.

No exemplo da Figura 3.2 percebemos que o painel gerado possui quatro pontos e que também estes pertencem a outros painéis ao mesmo tempo. O formato que este painel pode assumir depende da disposição dos pontos que o forma. Em geral, eles não definem um plano, devido as irregularidades dos cascos, mas como os cálculos são feitos através de vetores, o formato do painel não afeta o resultado.

Uma vez apresentada a configuração dos painéis, falta agora definirmos o vetor normal a eles. Para isso, considere agora a Figura 3.3.

Se tomarmos como referência o painel mostrado na Figura 3.3, juntamente com o sistema de coordenadas apresentado na mesma figura, notamos que a única forma do vetor normal ter sentido para fora do navio é se as ordens dos pontos no painel ficarem conforme mostrado na Figura 3.4.

O motivo para que o sentido do vetor seja para fora da embarcação será mostrado na apresentação do cálculo vetorial utilizado.

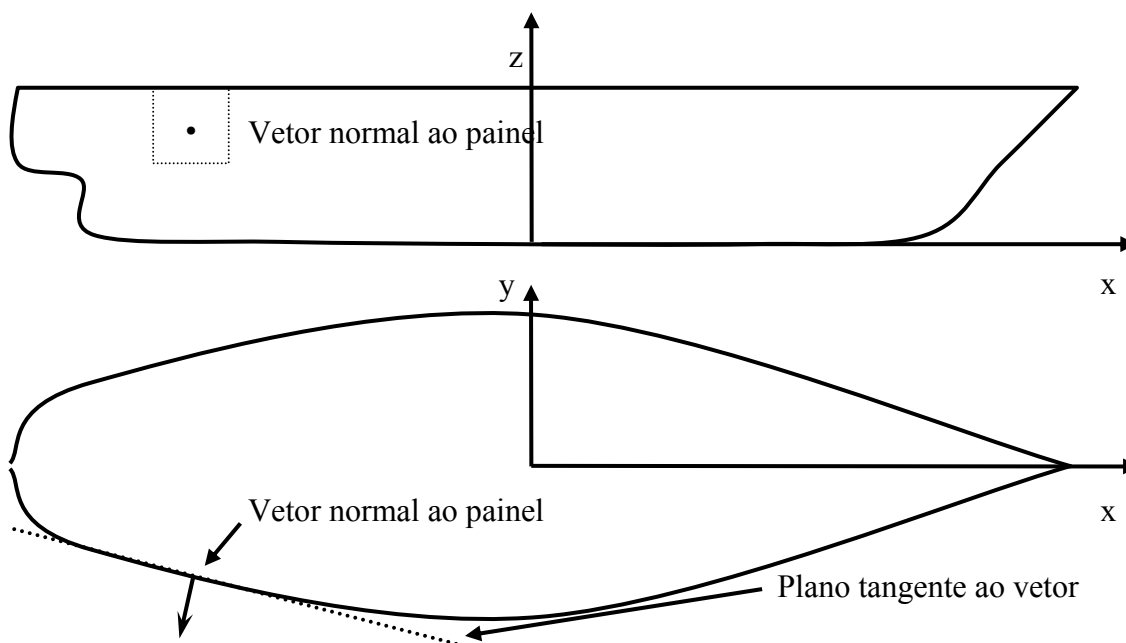


Figura 3.3: Painel utilizado para cálculo vetorial.

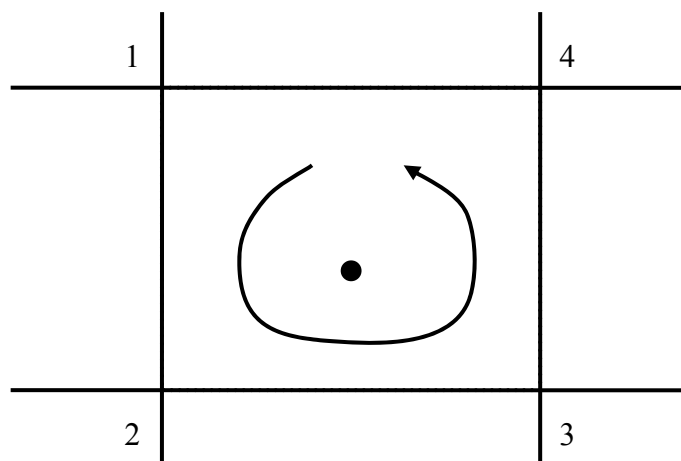


Figura 3.4: Ordenação dos pontos para que o vetor tenha sentido para fora da embarcação.

Ainda com relação à geração dos painéis, o programa cria-os da parte inferior da embarcação (linha d'água zero) para a parte superior (última linha d'água) e da popa

para a proa. Vamos mostrar como é feita esta criação através da Figura 3.5, que mostra uma embarcação do tipo paralelepípedo.

Inicialmente, o programa cria os quatro pontos do painel A da figura, numerando-os como apresentado na Figura 3.4. Repare que o início é feito na popa e na linha d'água zero. Como as embarcações são consideradas simétricas, outro painel, simétrico ao painel A em relação ao eixo x, é criado no outro bordo da embarcação. Terminada a ordenação dos pontos do painel A e de seu simétrico, o programa começa a criação do painel B. No entanto, os dois pontos deste último painel e que pertencem ao painel A, também, já estão criados. Assim, para o painel B, somente são criados os pontos correspondentes a 3 e 4 da Figura 3.4.

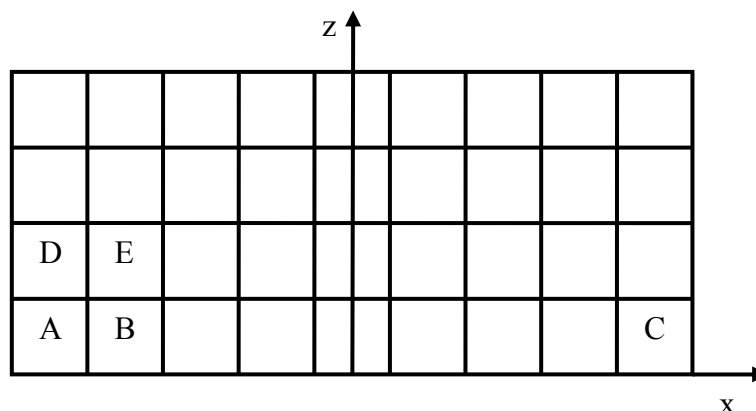


Figura 3.5: Geração de painéis em um casco.

Para os painéis entre as duas primeiras linhas d'água, o sistema é o mesmo. Criação de somente os pontos 3 e 4 do mesmo. Este processo termina quando o programa chega ao painel C. Para o painel D, os pontos correspondentes aos números 2 e 3 já foram criados no painel A. Assim, são criados somente os dois pontos de cima do painel (pontos 1 e 4). Para o painel E, 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 utilizando os três pontos já existentes dos painéis anteriores e criando o ponto 4 correspondente a eles, 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, quando necessários. Desta maneira, toda embarcação é “fechada”. Vale ainda lembrar que o programa considera o navio como sendo simétrico e, assim, painéis idênticos são

criados no outro bordo do navio (simétricos em relação ao eixo x da Figura 3.3), mantendo o vetor normal sempre para fora. Isso requer apenas uma mudança simples na ordem dos pontos pertencentes aos painéis, trocando o ponto 2 com o ponto 4 da Figura 3.4.

Assim, podemos resumir a etapa de interpolação e geração de painéis como:

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

3.5 Considerações finais sobre a interpolação e geração dos painéis

No que se refere à interpolação, é necessário dizer que a função *spline* só é criada para obter-se os contornos das linhas d'água e das balizas. Tanto uma quanto outra são criadas de acordo com a quantidade (precisão) que o usuário requisitar. Por exemplo, se usuário quiser dividir a embarcação em 20 balizas, o programa dividirá a embarcação em 20 balizas espaçadas igualmente entre si. O mesmo ocorre para as linhas d'água.

Desta forma, uma vez criadas as linhas d'água e as balizas requisitadas, 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 do fundo, o programa também os gera, quando necessários, paralelos ao plano xy mostrado na Figura 3.3. Isso permite que o casco fique “fechado”. Para exemplificar isso, vamos considerar a Figura 3.6. Repare nesta figura que para a linha d'água zero, somente foi fornecido o primeiro ponto de intersecção desta com a baliza. Sendo a embarcação considerada simétrica, são criados painéis no fundo da mesma que compreendam a parte plana da linha d'água zero.

O mesmo ocorre com as partes da popa e da proa, também quando necessário “fechá-las”. A Figura 3.7 ilustra este caso.

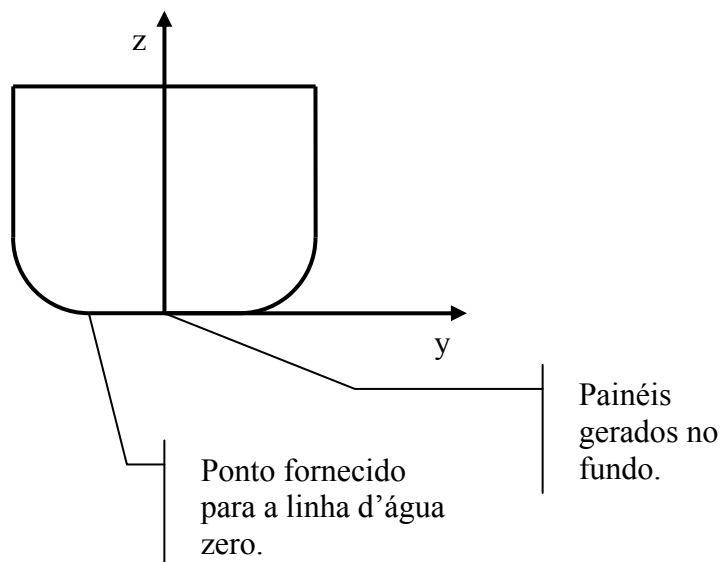


Figura 3.6: Painéis gerados no fundo da embarcação.

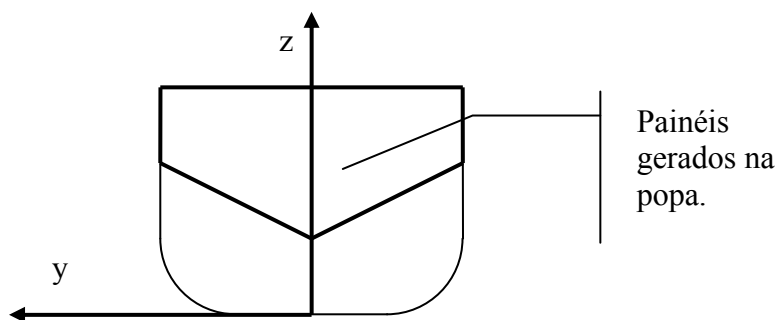


Figura 3.7: Painéis gerados na popa da embarcação.

4 OBTENÇÃO DAS CURVAS HIDROSTÁTICAS A PARTIR DO CÁLCULO VETORIAL

4.1 Introdução

De acordo com a teoria proposta por Arquimedes, é possível calcular as forças atuantes em um corpo submerso unicamente a partir da descrição de sua geometria.

Desde então, os cálculos de unidades flutuantes vêm sendo feitos com base nessa teoria. No entanto, há um sério empecilho: os cálculos baseados em uma geometria tridimensional podem se tornar tão complexos quanto mais complexa se torna a geometria. Ainda tratando-se da geometria de unidades flutuantes, pode-se dizer que é praticamente impossível descrevê-las analiticamente, pois, em geral, tratam-se de formas carenadas e irregulares.

Assim, a descrição geométrica da unidade flutuante por meio de painéis para cálculo computacional de suas características hidrostáticas relevantes torna-se uma importante ferramenta na área naval, buscando resolver a maior parte possível dos problemas práticos existentes.

4.2 Explicação teórica

Partindo-se do que foi mencionado anteriormente, podemos calcular as características hidrostáticas de uma unidade flutuante com base em sua geometria submersa. Desta maneira, vamos partir de um exemplo simples para explicarmos como o cálculo vetorial pode nos fornecer tais propriedades.

Imaginemos um cubo de arestas unitárias e situado em relação ao sistema de coordenadas xyz , de acordo com a Figura 4.1.

Imaginemos agora que em cada face deste cubo há um vetor perpendicular a mesma, cujo módulo é igual a área da face e com sentido para fora do cubo. Assim, fica fácil perceber que a soma dos módulos de cada um dos seis vetores das faces é igual a área total do cubo e que a soma vetorial é igual a zero. Cada face será tratada daqui em diante como painéis.

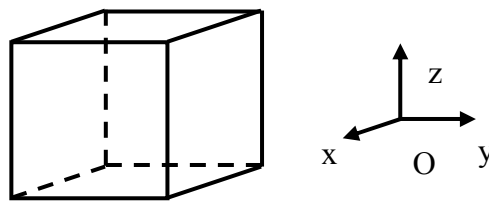


Figura 4.1: Cubo utilizado para exemplificação do cálculo vetorial.

Agora, imaginemos que sejam conhecidas as posições dos centros de cada uma dessas faces e que cada um dos vetores de módulo igual à área esteja posicionado exatamente sobre este ponto, conforme mostra a Figura 4.2.

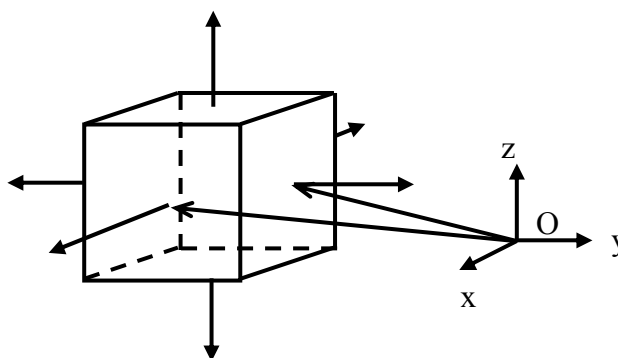


Figura 4.2: Cubo com vetores posicionados no centro de cada painel.

Com base na álgebra linear, pode-se mostrar que sendo C_i a coordenada do centro de cada uma das faces em relação à origem O e A_i cada um dos vetores cujo módulo é área da face do cubo (com $i = 1, \dots, 6$), o volume do paralelepípedo pode ser expresso por:

$$V = \frac{\left(\sum_{i=1}^6 A_i (C_i - O) \right)_x + \left(\sum_{i=1}^6 A_i (C_i - O) \right)_y + \left(\sum_{i=1}^6 A_i (C_i - O) \right)_z}{3} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Na verdade, o volume pode ser obtido por cada uma das três parcelas desta expressão. Objetivando-se reduzir as imprecisões numéricas, calcula-se o volume como sendo a média das três parcelas. Extrapolando-se o resultado para o caso de uma forma geométrica genérica (n faces ou n painéis), vemos que o volume de um sólido facetado é:

$$V = \frac{\left(\sum_{i=1}^n A_i (C_i - O) \right)_x + \left(\sum_{i=1}^n A_i (C_i - O) \right)_y + \left(\sum_{i=1}^n A_i (C_i - O) \right)_z}{3} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Com o mesmo princípio apresentado nesta formulação para o cálculo do volume, podemos encontrar as outras propriedades hidrostáticas de um corpo qualquer, conforme será mostrado adiante.

A necessidade de se utilizar o sentido do vetor normal para fora da embarcação consiste na utilização do sinal do vetor-área na formulação das propriedades hidrostáticas, conforme será visto o próximo item.

4.3 Cálculo das propriedades hidrostáticas de uma embarcação

Ao receber os painéis da embarcação, o programa posiciona o sistema de coordenadas na linha d'água e a meia-nau. Para explicar o motivo do posicionamento da referência, vamos manter o exemplo do cubo apresentado anteriormente, mas agora com a referência global modificada, segundo mostra a Figura 4.3.

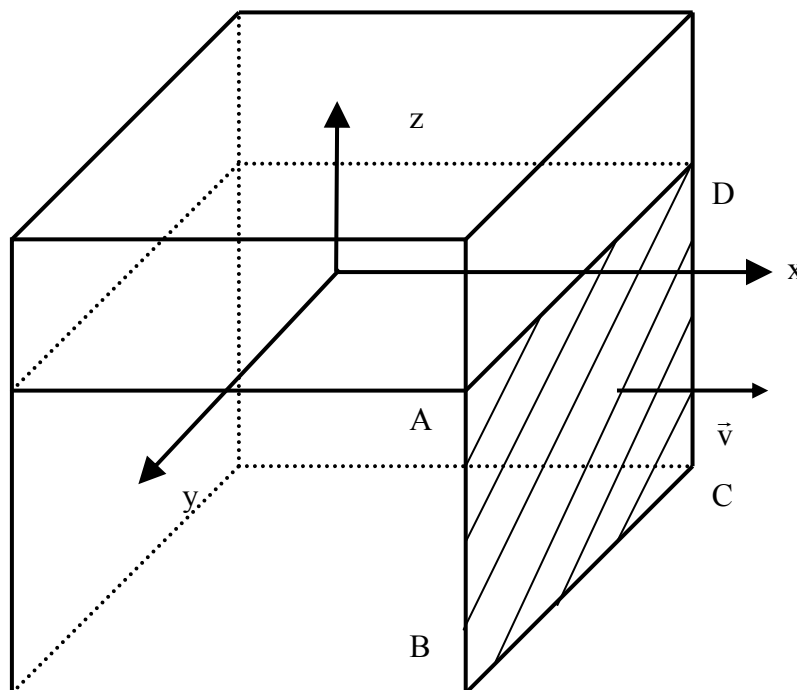


Figura 4.3: Cubo com sistema de coordenadas posicionado na linha d'água.

Como a linha d'água é definida, o programa passa a considerar para o cálculo somente a parte submersa (coordenada z negativa). Desta maneira, os vetores que apontam para fora do corpo e que têm a área do painel como módulo (o vetor \vec{v} da Figura 4.3 representa um destes vetores), passam a considerar também somente a parte submersa do corpo (painel ABCD), ficando posicionados no centro do painel (no

exemplo, à mesma distância da base e da linha d'água) e com área igual à área do painel submerso (painel ABCD).

Utilizando-se a mesma Eq. 4.1 somente para o vetor \vec{v} da Figura 4.3, notamos que o volume referente à face que ele representa corresponde à metade do volume submerso. A outra metade do volume corresponde ao vetor (referente ao painel oposto ao ABCD) oposto a ele. Desta forma, se fizermos o cálculo com todos os vetores (não considerar que exista um vetor na área da linha d'água apontando para cima), perceberemos que o volume do corpo foi calculado três vezes. Isto justifica a divisão por três na Eq. 4.1.

O programa não constrói painéis na linha d'água com vetor normal apontando no sentido positivo do eixo z. O motivo para isso pode ser encontrado na própria Figura 4.3. O vetor que está no painel localizado na base do corpo já calcula todo o volume do mesmo até a linha d'água.

Este exemplo de cálculo do volume com o cubo pode ser extrapolado para uma embarcação qualquer. O princípio adotado pelo programa é o mesmo: adota-se o sistema de coordenadas na linha d'água e a meia-nau, constroem-se os painéis de acordo com o número de linhas d'água e balizas fornecidas, encontram-se os vetores normais a eles e aplica-se a Eq. 4.2.

Vamos analisar o painel da Figura 3.2. Antes de ser iniciado o cálculo das propriedades da embarcação, são encontradas algumas propriedades referentes ao mesmo. Imaginemos as coordenadas para os quatro pontos do painel da Figura 3.2 (p_1 , p_2 , p_3 e p_4 , respectivamente), na mesma ordem dos pontos do painel da Figura 3.4:

$$p_1 = (x_1, y_1, z_1); p_2 = (x_2, y_2, z_2); p_3 = (x_3, y_3, z_3); p_4 = (x_4, y_4, z_4)$$

$$\vec{v}_1 = p_2 - p_1; \vec{v}_2 = p_4 - p_1; \vec{v}_3 = p_4 - p_3; \vec{v}_4 = p_2 - p_3$$

Com estes pontos, podemos calcular a projeção da área nas três direções xyz e a área do painel, pelas expressões:

$$\bar{A}^{(x,y,z)} = \frac{(\vec{v}_1 \times \vec{v}_2) + (\vec{v}_3 \times \vec{v}_4)}{2} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$|A^{(x,y,z)}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Também é possível, através do cálculo vetorial, encontrar a distância ($C_i - O$) entre o centro do painel e a origem do sistema de coordenadas, definindo, assim, as propriedades de cada painel que serão utilizadas.

De posse da Eq. 4.4, podemos encontrar a área da superfície molhada, bastando para isso somar o módulo das áreas de todos os painéis, ou ainda:

$$S_w = \sum_{i=0}^n |\vec{A}_i^{(x,y,z)}| \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Somando-se todas as projeções da áreas dos painéis no plano xy, podemos encontrar a área do plano da linha d'água, ou:

$$A_{WL} = \sum_{i=0}^n -\vec{A}_i^z \quad (\text{Eq. 4.6})$$

O sinal negativo que aparece na expressão é justificado pelo fato de que somente os painéis que têm vetor normal à área projetada no plano xy no sentido negativo do eixo z devem ter suas áreas somadas. Isto serve para também ser possível utilizar o cálculo vetorial para navios que apresentem bulbos ou outros tipos de saliências.

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 utilizamos a expressão:

$$LCF = \frac{\sum_{i=1}^n (-\vec{A}_i^z * C^x)}{\sum_{i=1}^n -\vec{A}_i^z} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Como o cálculo do TCF é exatamente o mesmo que o do LCF, mas alterando somente o eixo em relação ao qual calculamos (eixo x para o LCF), a expressão fica:

$$TCF = \frac{\sum_{i=1}^n (-\vec{A}_i^z * C^y)}{\sum_{i=1}^n -\vec{A}_i^z} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

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 o

momento de inércia próprio de cada painel. A dedução do momento de inércia próprio de cada painel está mostrada no Apêndice D. Assim, as expressões ficam:

$$I_L = \sum_{i=1}^n \left(-\vec{A}_i^z * (\vec{C}_i^x - \text{TCF})^2 \right) + I_L^i \quad (\text{Eq. 4.9})$$

$$I_T = \sum_{i=1}^n \left(-\vec{A}_i^z * (\vec{C}_i^y - \text{LCF})^2 \right) + I_T^i \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Outra propriedade bastante importante é a posição do centro de carena. Como o centro de carena está localizado no centro geométrico da parte submersa da unidade flutuante, sua obtenção pode ser dada pela expressão (em relação a cada eixo):

$$\text{LCB} = C_B^x = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(\vec{A}_i^x * \vec{C}_i^x) * \frac{\vec{C}_i^x}{2} \right]}{\text{Volume}} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

$$\text{TCB} = C_B^y = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(\vec{A}_i^y * \vec{C}_i^y) * \frac{\vec{C}_i^y}{2} \right]}{\text{Volume}} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

$$\text{KB} = C_B^z = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(\vec{A}_i^z * \vec{C}_i^z) * \frac{\vec{C}_i^z}{2} \right]}{\text{Volume}} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Por último, podemos obter, a partir das propriedades já calculadas, o BM longitudinal e transversal, pelas expressões:

$$\text{BM}_L = \frac{I_L}{V} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

$$\text{BM}_T = \frac{I_T}{V} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Com todas as expressões, e para uma série de calados, podemos construir as curvas hidrostáticas de uma embarcação.

4.4 Obtenção dos painéis submersos

Faz-se necessário aqui, descrever como o programa busca pelos painéis que estão abaixo da linha d'água, ou seja, submersos.

Primeiramente o programa busca por todos aqueles que estão inteiramente abaixo da linha d'água considerada. No entanto, podem existir alguns que possuam somente uma parte. Para estes painéis em especial, é adotado um procedimento diferente, uma vez que apenas necessitamos da parte do painel que está submersa.

Vamos considerar novamente o painel apresentado na Figura 3.4. Notamos que existem 12 casos em que a linha d'água pode cortar cada painel. Para melhor ilustrar isso, vamos atentar para a Figura 4.4.

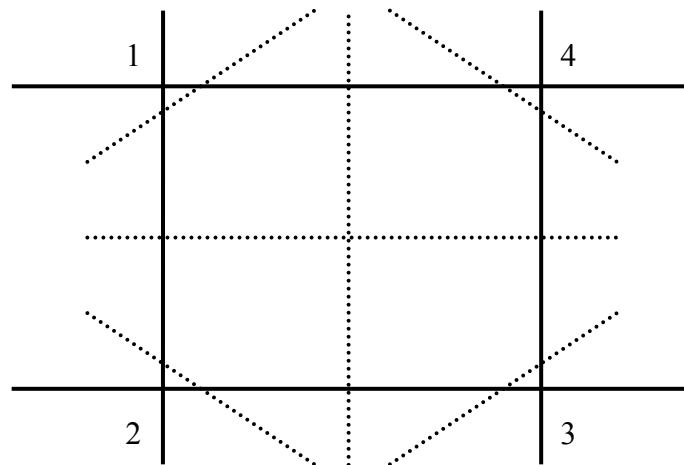


Figura 4.4: Possíveis divisões de um painel pela linha d'água.

Podemos verificar que foram feitos nesta figura todos as possíveis possibilidades de cruzamento da linha d'água em um painel (linhas d'água representadas pelas linhas tracejadas). Podemos ter um painel que possua, como vértices submersos:

1. Somente os pontos (1), (2), (3) ou (4);
2. Pontos (2, 3 e 4); (1, 3 e 4); (1, 2 e 4); (1, 2 e 3);
3. Pontos (2 e 3); (1 e 4); (1 e 2); (3 e 4);

Desta maneira, o programa verifica quais são os vértices submersos e passa a considerar somente a parte dele que está abaixo da linha d'água, criando sobre esta os vértices que serão utilizados para calcular as propriedades do painel.

O painéis também poderiam ser gerados para cada calado em que se está trabalhando. Desta forma, tem-se sempre ou painéis submersos ou emersos. O inconveniente seria ter que construí-los para cada calado a ser analisado para o traçado das curvas hidrostática (maior tempo de processamento).

4.5 Implementação dos movimentos em relação aos eixos xyz

O objetivo destes movimentos é avaliar as características hidrostáticas para unidades apresentando trim, banda ou ambos.

Apesar de ainda não ter sido validada esta opção disponível no programa, ele apresenta a possibilidade da embarcação realizar os seis movimentos em relação aos eixos x, y e z, a saber:

- surge (s): movimento translacional sobre o eixo x;
- sway (w): movimento translacional sobre o eixo y;
- heave (h): movimento translacional sobre o eixo z;
- roll (r): movimento rotacional em relação ao eixo x.
- pitch (p): movimento rotacional em relação ao eixo y;
- yaw (y): movimento rotacional em relação ao eixo z;

Se todos os painéis e respectivos vetores normais estiverem posicionados em relação ao sistema de coordenadas e com vetor posição \vec{X} (coordenadas de cada nó dos painéis), as rotações em torno dos três eixos xyz (movimentos de *roll*, *pitch* e *yaw*, respectivamente) podem ser calculadas, desde que também sejam fornecidas as rotações, se implementarmos uma matriz de mudança de sistema M. Tal matriz está mostrada abaixo e sua dedução está presente no Apêndice A.

$$M = \begin{bmatrix} \cos(p)\cos(y) & \cos(y)\sin(r)\sin(p) - \cos(r)\sin(y) & \sin(y)\sin(r) + \cos(y)\sin(p)\sin(r) \\ \sin(y)\cos(p) & \cos(y)\cos(r) + \sin(y)\sin(p)\sin(r) & \cos(r)\sin(p)\sin(y) - \cos(y)\sin(r) \\ -\sin(p) & \cos(p)\sin(r) & \cos(p)\cos(r) \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Assim, as novas coordenadas \vec{X}' dos pontos dos painéis podem ser obtidas pela expressão:

$$\{\vec{X}'\} = [M] \cdot \{\vec{X}\} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

Já para os movimentos de *sway* e de *surge* há alteração apenas das coordenadas, mas não afeta as propriedades hidrostáticas da embarcação. O movimento de *heave* somente altera a posição do calado com a alteração das coordenadas em z. Desta forma,

estes três últimos movimentos não entram na matriz de transformação M . São apenas somados ou subtraídos das coordenadas (movimentos translacionais).

5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1 Introdução

A validação do programa através de comparações de resultados permite que seja verificada a sua acurácia. Para isso, foram feitos quatro testes, com quatro diferentes embarcações e para diferentes calados.

A primeira embarcação é uma chata, com a qual podemos fazer os cálculos manualmente e verificar os resultados obtidos pelo programa. As outras duas são petroleiros, cujas cotas e curvas hidrostáticas foram retiradas da bibliografia [2]. Por último, foi feito um teste com uma plataforma, comparando o resultado do programa com o obtido teoricamente.

Este último teste trata-se de uma adaptação do programa a outro tipo de corpo flutuante. Para tal, foi necessária uma alteração do código para adaptar-se à entrada de dados da plataforma. Vale lembrar ainda que, neste caso, não é realizada a interpolação e os painéis para representação do casco devem ser fornecidos. Os resultados estão apresentados a seguir.

5.2 Comparação com uma chata

A chata que foi utilizada para comparação apresenta as seguintes dimensões apresentadas na Figura 5.1 e na Figura 5.2.

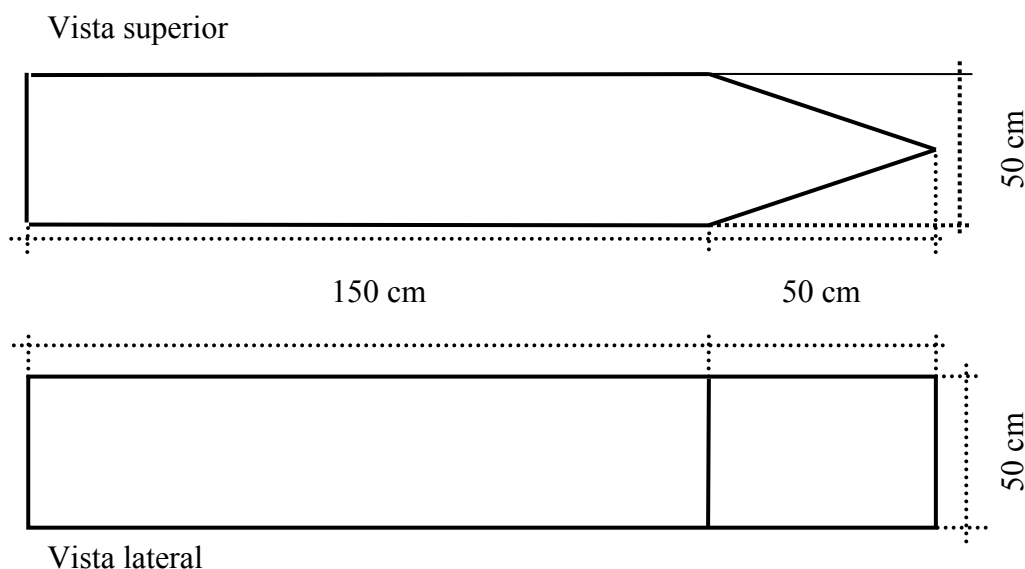


Figura 5.1: Desenho da chata utilizada para a primeira comparação (vistas superior e lateral).

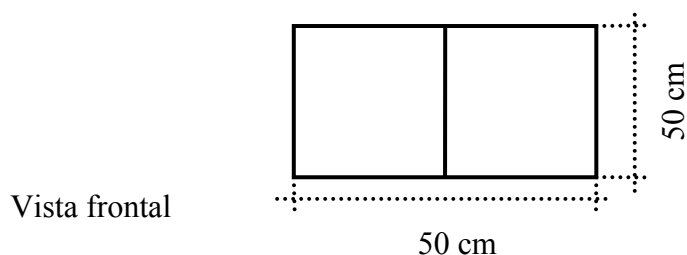


Figura 5.2: Desenho da chata utilizada para a primeira comparação (vista frontal).

As principais dimensões da chata estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Principais dimensões da chata.

Comprimento	200 cm
Boca	50 cm
Pontal	50 cm
Calado	30 cm

As cotas da chata foram retiradas a partir do desenho mostrado e fornecidas ao programa através de um arquivo de entrada semelhante ao apresentado no Apêndice B. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultados do programa para a chata, comparados com a teoria.

	LCB (cm)			KB (cm)			LCF (cm)		
Calado	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio
5 cm	-11,9	-11,95	0,42%	2,5	2,49	0,40%	-11,9	-11,9	0,00%
10 cm	-11,9	-11,96	0,50%	5,0	4,98	0,40%	-11,9	-11,9	0,00%
15 cm	-11,9	-11,97	0,58%	7,5	7,46	0,54%	-11,9	-11,9	0,00%
20 cm	-11,9	-11,97	0,58%	10,0	9,95	0,50%	-11,9	-11,9	0,00%
25 cm	-11,9	-11,97	0,58%	12,5	12,43	0,56%	-11,9	-11,9	0,00%
30 cm	-11,9	-11,97	0,58%	15,0	14,92	0,54%	-11,9	-11,9	0,00%
35 cm	-11,9	-11,97	0,58%	17,5	17,4	0,57%	-11,9	-11,9	0,00%
40 cm	-11,9	-11,97	0,58%	20,0	19,89	0,55%	-11,9	-11,9	0,00%
45 cm	-11,9	-11,97	0,58%	22,5	22,38	0,54%	-11,9	-11,9	0,00%
50 cm	-11,9	-11,97	0,58%	25,0	24,86	0,56%	-11,9	-11,9	0,00%

	BM _L (cm)			BM _T (cm)			Volume (cm ³)		
Calado	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio
5 cm	531,18	533,30	0,40%	38,69	38,84	0,38%	43750	43576,22	0,40%
10 cm	265,59	266,88	0,48%	19,35	19,44	0,49%	87500	87077,45	0,49%
15 cm	177,06	177,97	0,51%	12,90	12,96	0,49%	131250	130578,67	0,51%
20 cm	132,79	133,50	0,53%	9,67	9,72	0,49%	175000	174079,89	0,53%
25 cm	106,24	106,81	0,54%	7,74	7,78	0,54%	218750	217581,12	0,54%
30 cm	88,53	89,01	0,54%	6,45	6,48	0,49%	262500	261082,34	0,54%
35 cm	75,88	76,30	0,55%	5,53	5,56	0,59%	306250	304583,56	0,55%
40 cm	66,40	66,76	0,54%	4,84	4,86	0,49%	350000	348084,79	0,55%
45 cm	59,02	59,35	0,56%	4,30	4,32	0,49%	393750	391586,01	0,55%
50 cm	53,12	53,41	0,55%	3,87	3,89	0,54%	437500	435112,23	0,55%
	I _L (cm ⁴)			I _T (cm ⁴)			Área do plano de flutuação (cm ²)		
Calado	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio
5 cm	23239088	23239096	0,00%	1692708	1692708	0,00%	8750	8750	0,00%
10 cm	23239088	23239096	0,00%	1692708	1692708	0,00%	8750	8750	0,00%
15 cm	23239088	23239096	0,00%	1692708	1692708	0,00%	8750	8750	0,00%
20 cm	23239088	23239096	0,00%	1692708	1692708	0,00%	8750	8750	0,00%
25 cm	3239088	23239096	0,00%	1692708	1692708	0,00%	8750	8750	0,00%
30 cm	23239088	23239096	0,00%	1692708	1692708	0,00%	8750	8750	0,00%
35 cm	3239088	23239096	0,00%	1692708	1692708	0,00%	8750	8750	0,00%
40 cm	3239088	23239096	0,00%	1692708	1692708	0,00%	8750	8750	0,00%
45 cm	23239088	23239096	0,00%	1692708	1692708	0,00%	8750	8750	0,00%
50 cm	23239088	23239096	0,00%	1692708	1692708	0,00%	8750	8750	0,00%
	Área molhada (cm ²)								
Calado	Teoria			Programa			Desvio		
5 cm	11059,02			11064,05			0,05%		
10 cm	13368,03			13383,11			0,11%		
15 cm	15677,05			15702,16			0,16%		
20 cm	17986,07			18021,21			0,20%		

25 cm	20295,08	20340,27	0,22%
30 cm	22604,1	22659,32	0,24%
35 cm	24913,12	24978,37	0,26%
40 cm	27222,14	27297,43	0,28%
45 cm	29531,15	29616,48	0,29%
50 cm	31840,17	31932,53	0,29%

As curvas hidrostáticas também são apresentadas de maneira gráfica. O Gráfico 5.1 apresenta estas curvas.

Podemos perceber através dos resultados que os valores teóricos e obtidos pelo programa são muito próximos, apresentando desvio em geral, menor que 1% para as características hidrostáticas.

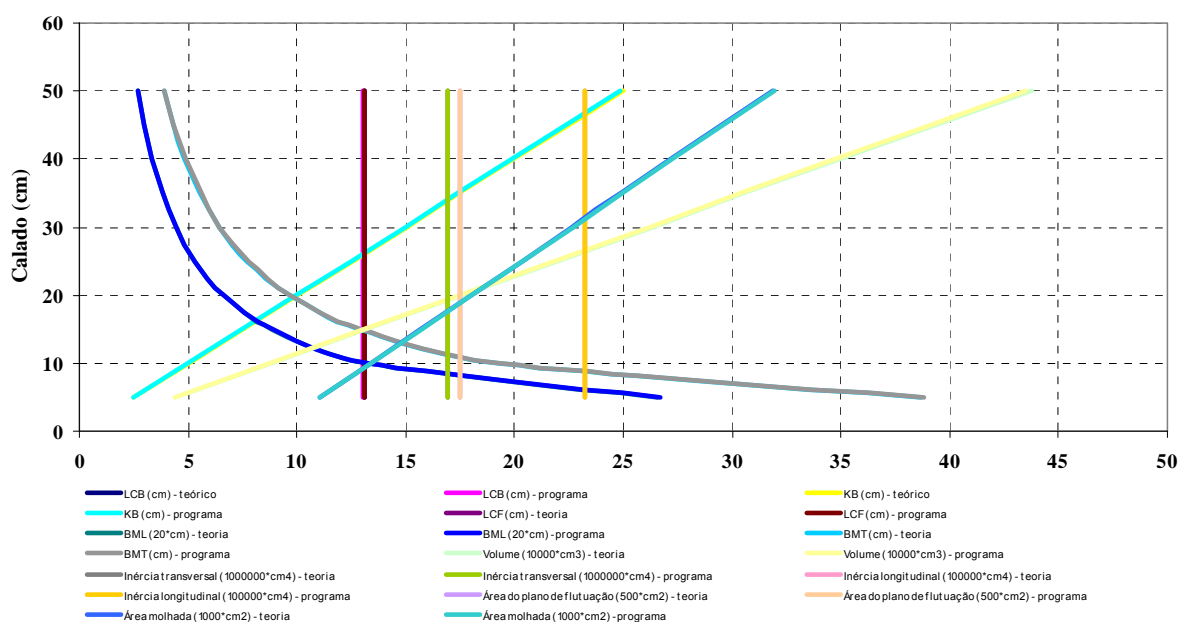


Gráfico 5.1: Curvas hidrostáticas teóricas e calculadas pelo programa para a chata.

5.3 Comparação com o primeiro petroleiro

O primeiro petroleiro comparado apresenta os planos mostrados na Figura 5.3.

(Após a revisão, eu incluo aqui o plano de linhas)

Figura 5.3: Plano de linhas do primeiro petroleiro comparado com o programa.

As principais dimensões deste petroleiro estão apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Principais dimensões do primeiro petroleiro comparado.

Comprimento	180 m
Boca	28 m
Pontal	16,8 m
Calado	10,5 m

As cotas do petroleiro foram retiradas da bibliografia [2]. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Resultados do programa para o primeiro petroleiro, comparados com o paper.

	LCB (m)			KB (m)			LCF (m)		
Calado	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio
1,05 m	5,13	5,7	10,00%	0,54	0,54	0,00%	4,908	4,69	4,65%
2,1 m	4,94	5,35	7,66%	1,09	1,09	0,00%	4,643	4,35	6,74%
3,15 m	4,78	5,03	4,97%	1,64	1,64	0,00%	4,313	3,97	8,64%
4,2 m	4,6	4,78	3,77%	2,13	2,18	2,29%	3,92	3,54	10,73%
5,25 m	4,41	4,61	4,34%	2,73	2,73	0,00%	3,458	3,05	13,38%
6,3 m	4,19	4,5	6,89%	3,27	3,28	0,30%	2,881	2,5	15,24%
7,35 m	3,93	4,03	2,48%	3,82	3,83	0,26%	2,166	1,78	21,69%
8,4 m	3,63	3,75	3,20%	4,37	4,38	0,23%	1,276	0,92	38,70%
9,45 m	3,29	3,2	2,81%	4,93	4,93	0,00%	0,355	-0,17	308,82%
10,5 m	2,92	2,72	7,35%	5,38	5,49	2,00%	-0,359	-1	64,10%
12,6 m	2,24	2,3	2,61%	6,6	6,62	0,30%	-1,17	-2,04	42,65%
14,7 m	1,67	2,34	28,63%	7,72	7,75	0,39%	-1,323	-2,27	41,72%
16,8 m	1,28	2,21	42,08%	8,85	8,88	0,34%	-0,928	-1,94	52,16%
	BM _L (m)			BM _T (m)			Volume (m ³)		
Calado	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio
1,05 m	1448,53	1432,34	1,13%	52,37	50,99	2,71%	3270,7	3254	0,51%
2,1 m	779,84	769,18	1,39%	27,46	26,84	2,31%	6912,4	6881,99	0,44%
3,15 m	544,88	535,5	1,75%	18,63	18,23	2,19%	10711,4	10665,85	0,43%
4,2 m	423,55	415,09	2,04%	14,14	13,85	2,09%	14616,1	14551,73	0,44%
5,25 m	349,71	341,55	2,39%	11,42	11,2	1,96%	18603,4	18516,54	0,47%

6,3 m	301,13	292,04	3,11%	9,6	9,5	1,05%	22664,7	22549,1	0,51%
7,35 m	267,76	258,02	3,77%	8,3	8,2	1,22%	26798,3	26662,18	0,51%
8,4 m	244,56	233,13	4,90%	7,32	7,29	0,41%	31008,7	30841,72	0,54%
9,45 m	227,14	215,64	5,33%	6,56	6,54	0,31%	35300,9	35108,64	0,55%
10,5 m	211,84	200,5	5,66%	5,96	5,94	0,34%	39670,7	39446,89	0,57%
12,6 m	187,67	176,51	6,32%	5,06	5,05	0,20%	48621,4	48326,17	0,61%
14,7 m	169,26	159,18	6,33%	4,42	4,4	0,45%	57826,7	57456,33	0,64%
16,8 m	154,34	145,31	6,21%	3,93	3,92	0,26%	67256,9	66801,51	0,68%
	I _L (m ⁴)			I _T (m ⁴)			Área do plano de flutuação (m ²)		
Calado	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio
1,05 m	4737623	4691888	0,97%	171284	165931	3,23%	3352,5	3340,9	0,35%
2,1 m	5390587	5332749	1,08%	189843	184746	2,76%	3555,6	3545,52	0,28%
3,15 m	5836355	5760329	1,32%	199585	194427	2,65%	3673,1	3661,78	0,31%
4,2 m	6190628	6101213	1,47%	206687	201611	2,52%	3760,4	3749,28	0,30%
5,25 m	6505929	6400446	1,65%	212498	207310	2,50%	3833,7	3822,17	0,30%
6,3 m	6825017	6724526	1,49%	217519	214107	1,59%	3902,1	3888,49	0,35%
7,35 m	7175495	7042970	1,88%	222298	218731	1,63%	3972,2	3957,08	0,38%
8,4 m	7583530	7425809	2,12%	226937	224988	0,87%	4048	4030,52	0,43%
9,45 m	8018312	7853745	2,10%	231731	229677	0,89%	4126	4114,92	0,27%
10,5 m	8403823	8228709	2,13%	236587	234441	0,92%	4196,4	4189,15	0,17%
12,6 m	9124958	8920958	2,29%	246187	244043	0,88%	4325	4321,35	0,08%
14,7 m	9787807	9593395	2,03%	255523	252947	1,02%	4439,6	4443,46	0,09%
16,8 m	10380263	10184069	1,93%	264354	261646	1,03%	4539,2	4548,63	0,21%
	Área molhada (cm ²)								
Calado	Teoria			Programa			Desvio		
1,05 m	3471,8			3458,04			0,40%		
2,1 m	3903,5			3892,28			0,29%		
3,15 m	4295,9			4286,84			0,21%		
4,2 m	4675,5			4669,73			0,12%		
5,25 m	5050,8			5048,46			0,05%		

6,3 m	5431,3	5426,24	0,09%
7,35 m	5819,7	5815,9	0,07%
8,4 m	6214,8	6209,47	0,09%
9,45 m	6613,3	6619,27	0,09%
10,5 m	7007	7023,62	0,24%
12,6 m	7792,6	7838,54	0,59%
14,7 m	8571,6	8668,13	1,11%
16,8 m	9346,7	9502,1	1,64%

As curvas hidrostáticas também são apresentadas de maneira gráfica. O Gráfico 5.2 apresenta estas curvas.

Podemos perceber através dos resultados que os valores apresentados pelo paper e obtidos pelo programa são muito próximos. No entanto, ocorre um aumento da diferença entre os dois conforme o aumento de calado devido a falta de informações das cotas da embarcação em sua popa e proa.

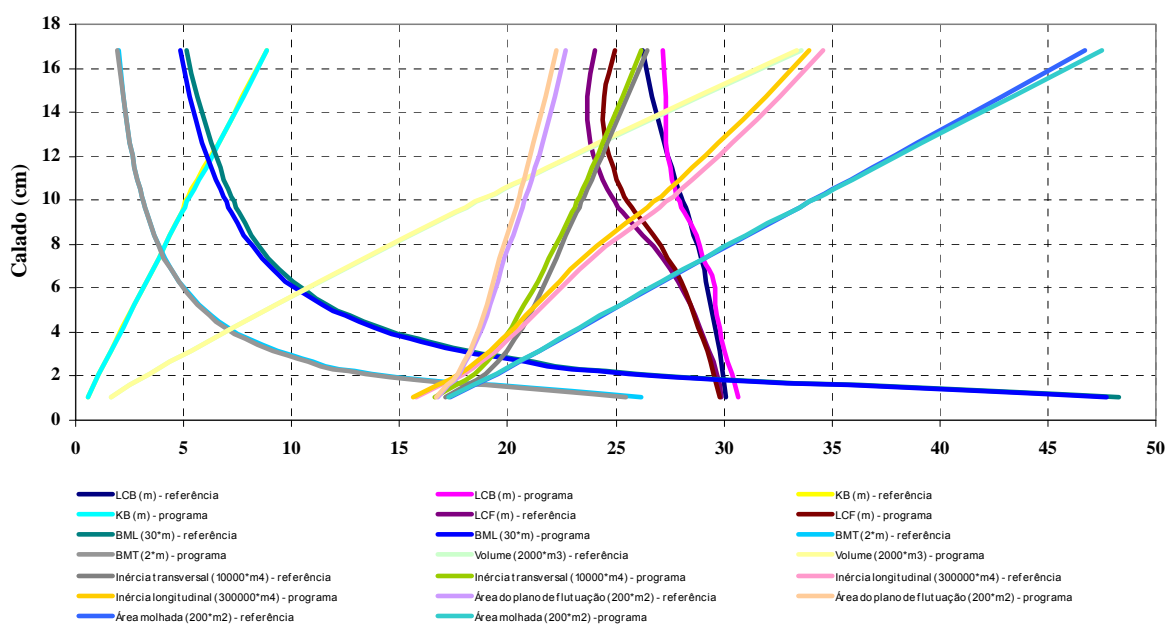


Gráfico 5.2: Curvas hidrostáticas obtidas do paper e calculadas pelo programa para o primeiro petroleiro.

5.4 Comparação com o segundo petroleiro

O segundo petroleiro comparado apresenta os planos mostrados na Figura 5.4.

(Após a revisão, eu incluo aqui o plano de linhas)

Figura 5.4: Plano de linhas do segundo petroleiro comparado com o programa.

As principais dimensões deste petroleiro estão apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Principais dimensões do segundo petroleiro comparado.

Comprimento	187 m
Boca	29 m
Pontal	17,5 m
Calado	10,95 m

As cotas do petroleiro foram também retiradas da bibliografia [2]. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Resultados do programa para o segundo petroleiro, comparados com o paper.

	LCB (m)			KB (m)			LCF (m)		
Calado	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio
1,09 m	6	6,15	2,44%	0,6	0,56	7,14%	5,6	5,58	0,36%
2,19 m	5,5	5,75	4,35%	1,1	1,13	2,65%	5	5,31	5,84%
3,28 m	5,2	5,34	2,62%	1,8	1,7	5,88%	4,7	4,74	0,84%
4,38 m	5,1	4,92	3,66%	2,2	2,27	3,08%	4,3	4,34	0,92%
5,47 m	4,9	4,03	21,59%	2,8	2,84	1,41%	3,9	3,76	3,72%
6,56 m	4,5	3,43	31,20%	3,3	3,41	3,23%	3,2	3,11	2,89%
7,66 m	4,2	3,03	38,61%	3,9	3,98	2,01%	2,5	2,44	2,46%
8,75 m	4	2,77	44,40%	4,4	4,55	3,30%	1,6	1,39	15,11%
9,84 m	3,7	2,06	79,61%	5	5,12	2,34%	0,8	0,64	25,00%
10,94 m	3,5	1,49	134,90%	5,585	5,7	2,02%	0,1	-0,07	242,86%
12,03 m	3	1,6	87,50%	6,2	6,28	1,27%	-0,2	-0,72	72,22%
13,1 m	2,7	1,7	58,82%	6,9	6,86	0,58%	-0,8	-1,14	29,82%
15,31 m	2,1	1,85	13,51%	8	8,02	0,25%	-1	-1,3	23,08%
	BM _L (m)			BM _T (m)			Volume (m ³)		
Calado	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio
1,09 m	1637,50	1623,01	0,89%	54,00	50,29	5,89%	4000	3892,62	2,76%
2,19 m	852,27	874,22	2,51%	27,27	28,31	3,66%	8800	8162,63	7,81%
3,28 m	645,16	605,85	6,49%	20,24	19,12	5,87%	12400	12634,13	1,85%

4,38 m	472,22	474,35	0,45%	14,56	14,64	0,58%	18000	17223,77	4,51%
5,47 m	393,18	392,11	0,27%	12,13	11,9	1,99%	22000	21923,97	0,35%
6,56 m	335,82	335,84	0,01%	10,15	10,03	1,19%	26800	26699,31	0,38%
7,66 m	300,63	293,12	2,56%	8,80	8,62	2,06%	31600	31539,69	0,19%
8,75 m	275,00	272,96	0,75%	7,92	7,69	2,95%	36000	36434,72	1,19%
9,84 m	248,78	248,91	0,05%	7,02	6,86	2,40%	41000	41415,32	1,00%
10,94 m	228,06	230,79	1,18%	6,22	6,22	0,07%	47137	46453,59	1,47%
12,03 m	212,64	216,01	1,56%	5,73	5,68	0,84%	52200	51573,47	1,21%
13,1 m	199,65	181,56	1,99%	5,24	4,6	0,58%	57600	56753,47	1,49%
15,31 m	177,94	1623,01	0,89%	4,57	50,29	5,89%	68000	67298,78	1,04%
Calado	I _L (m ⁴)			I _T (m ⁴)			Área do plano de flutuação (m ²)		
	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio	Teoria	Programa	Desvio
1,09 m	6550000	6317771	3,68%	216000	195761	8,81%	3820	3754,77	1,74%
2,19 m	7500000	7135966	5,10%	240000	231124	3,84%	4080	4032,77	1,17%
3,28 m	8000000	7654384	4,52%	251000	241598	3,89%	4200	4149,8	1,21%
4,38 m	8500000	8170170	4,04%	262000	252115	3,92%	4300	4256,4	1,02%
5,47 m	8650000	8596681	0,62%	267000	260978	2,31%	4340	4334,59	0,12%
6,56 m	9000000	8966788	0,37%	272000	267888	1,53%	4420	4407,91	0,27%
7,66 m	9500000	9244907	2,76%	278000	271768	2,29%	4460	4458,87	0,03%
8,75 m	9900000	9945041	0,45%	285000	280207	1,71%	4520	4533,53	0,30%
9,84 m	10200000	10308734	1,05%	288000	284117	1,37%	4600	4594,57	0,12%
10,94 m	10750000	10720935	0,27%	293000	289046	1,37%	4640	4664,88	0,53%
12,03 m	11100000	11140295	0,36%	299000	293035	2,04%	4720	4728,6	0,18%
13,1 m	11500000	12218560	0,97%	302000	309534	0,47%	4800	4790,07	0,21%
15,31 m	12100000	6317771	3,68%	311000	195761	8,81%	4920	4909,36	0,22%

As curvas hidrostáticas também são apresentadas de maneira gráfica. O Gráfico 5.3 apresenta estas curvas.

Podemos perceber através dos resultados que os valores apresentados pelo paper e obtidos pelo programa são muito próximos. No entanto, ocorre um aumento da

diferença entre os dois conforme o aumento de calado devido a falta de informações das cotas da embarcação em sua popa e proa.

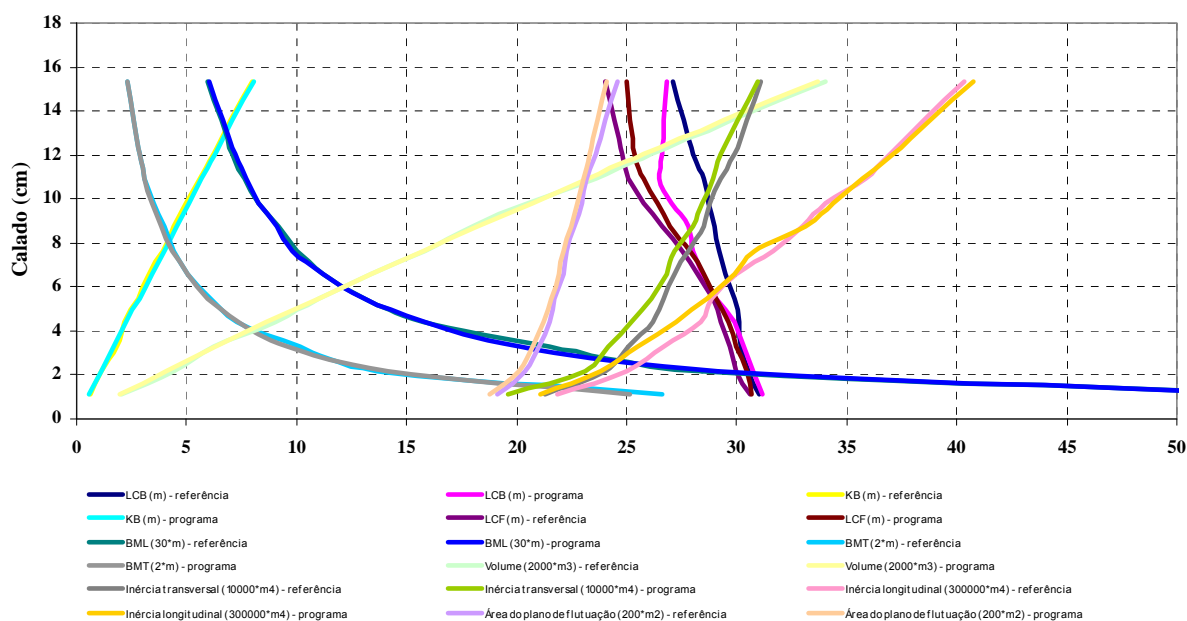


Gráfico 5.3: Curvas hidrostáticas obtidas do paper e calculadas pelo programa para o segundo petroleiro.

5.5 Comparação com a plataforma

A plataforma utilizada para comparação apresenta como características um calado de projeto de 20 m e a localização do centro de gravidade KG igual a 17,5 m. Ambos em relação a parte mais inferior de cada *pontoon* (quilha).

Ela é composta por dois *pontoons*, oito colunas, oito reforços estruturais interligando as colunas entre si e oito reforços ligando-as ao convés emerso. A Figura 5.5 apresenta a discretização utilizada desta plataforma

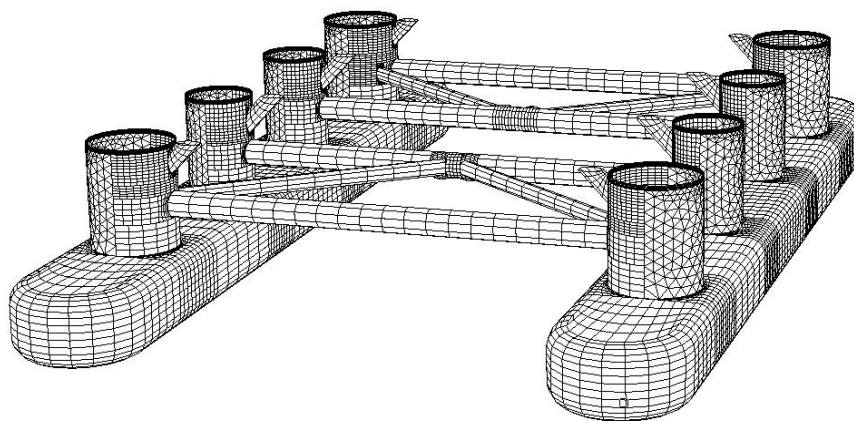


Figura 5.5: Plataforma utilizada para comparação.

Os resultados comparados entre a teoria e o programa estão apresentados na Tabela 5.7. O sistema de coordenadas está posicionado na quilha e nas posições de simetria longitudinal e transversal da plataforma.

Tabela 5.7: Resultados do programa para a plataforma, comparados com a teoria.

Características	Teoria	Programa	Desvio
KB (m)	6,34	6,29	0,86 %
LCB (m)	0,0	0,0	0,0 %
LCF (m)	0,0	0,0	0,0 %
Volume deslocado (m ³)	34028,39	33677,98	1,04 %
BM _T (m)	13,65	13,54	0,81 %
BM _L (m)	14,26	14,24	0,14 %
Área da superfície de linha d'água (m ²)	550,76	542,68	1,49 %
Superfície molhada (m ²)	14913,62	14577,79	2,30 %

Como foram comparadas somente as propriedades da plataforma em seu calado de projeto, não foram traçadas as curvas hidrostáticas da mesma, conforme apresentadas para os exemplos anteriores.

Na verdade, o teste com a plataforma foi realizado para demonstrar a versatilidade do programa e que o cálculo vetorial implementado, bem como o método de análise, são válidos para qualquer unidade flutuante. Os resultados apresentam-se satisfatórios para todos os casos testados.

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu a criação de uma ferramenta computacional capaz de ajudar no projeto de unidades flutuantes, desde embarcações simples como chatas até mais complexas, como plataformas. Este trabalho foi desenvolvido em duas partes distintas e analisadas separadamente. A primeira diz respeito à interpolação e, a segunda, ao cálculo vetorial.

Este desenvolvimento em duas partes permitiu uma análise mais detalhada de cada problema, uma vez que um não está relacionado diretamente ao outro. Desta maneira, foi possível concatenar as duas partes em um programa só, possibilitando a obtenção das propriedades hidrostáticas unicamente a partir das cotas.

Ainda a este trabalho, podem ser adicionados outros cálculos, além de uma implementação do código. Isto daria ao programa uma maior robustez, abrangendo também outros tipos de embarcação. Conforme visto no trabalho, o cálculo vetorial permite esta ampla aplicação.

No entanto, dentro do período trabalhado e proposto no cronograma, foi possível desenvolver todas as propostas apresentadas, considerando os resultados obtidos como bastantes satisfatórios.

7 CRONOGRAMA

O quadro abaixo apresenta o cronograma de atividades, em meses, deste projeto de pesquisa, mostrando as atividades cumpridas.

Cada atividade foi feita seguindo seu período estipulado no cronograma.

Atividades	Meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisão bibliográfica	✓	✓										
Estudo dos métodos de interpolação		✓	✓									
Implementação dos métodos de interpolação			✓	✓								
Estudo do cálculo vetorial e propriedades hidrostáticas				✓	✓							
Implementação do cálculo vetorial					✓	✓	✓	✓				
Testes, comparações validações				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Relatório final											✓	✓



Tarefas realizadas

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] RUGGIERO, M.A.G. ; LOPES, V.L.R. **Cálculo Numérico – Aspectos Teóricos e Computacionais**. Editora Makron Books, 2^a. Edição;
- [2] VERSLUIS, A. **Computer Aided Design of Shipform by Affine Transformation**. International Shipbuilding Progress, volume 24, junho 1977, no. 274.

9 APÊNDICES

Apêndice A: Dedução da matriz de mudança de sistema de coordenadas.

Vamos considerar na matriz de mudança de sistema de coordenadas somente os movimentos de rotação ao redor dos três eixos XYZ (*roll*, *pitch* e *yaw*, respectivamente). Para os outros três movimentos de translação (*surge*, *sway* e *heave*), basta que somemos ou subtraímos valores sobre o eixo, não envolvendo muitas dificuldades.

Consideremos primeiramente o movimento de *yaw*. Este movimento de rotação é dado em torno do eixo Z. Vamos considerar y como sendo o ângulo de rotação em torno deste eixo. Assim, a passagem de coordenadas do sistema E para o sistema F mostrado na Figura 9.1, pode ser obtido pelas transformações apresentadas na Eq. 9.1.

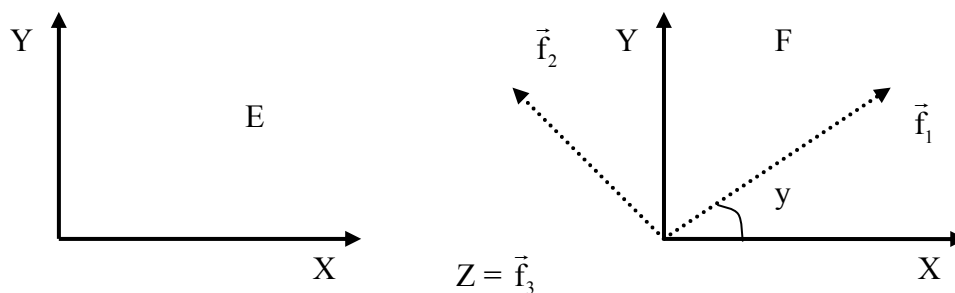


Figura 9.1: Transformações de coordenadas para o movimento de *yaw*.

$$\begin{aligned}\vec{f}_1 &= (\cos(y), \sin(y), 0)_E \\ \vec{f}_2 &= (-\sin(y), \cos(y), 0)_E \\ \vec{f}_3 &= (0, 0, 1)_E\end{aligned}\quad (\text{Eq. 9.1})$$

Desta maneira, temos que a passagem do sistema de coordenadas E para F ($E \xrightarrow{J} F$), pode ser dada pela matriz J abaixo:

$$J = \begin{pmatrix} \cos(y) & \sin(y) & 0 \\ -\sin(y) & \cos(y) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 9.2})$$

Consideremos agora o movimento de *pitch*. Este movimento de rotação é dado em torno do eixo Y. Vamos considerar p como sendo o ângulo de rotação em torno deste eixo. Assim, a passagem de coordenadas do sistema F para o sistema G mostrado na Figura 9.2, pode ser obtido pelas transformações apresentadas na Eq. 9.3.

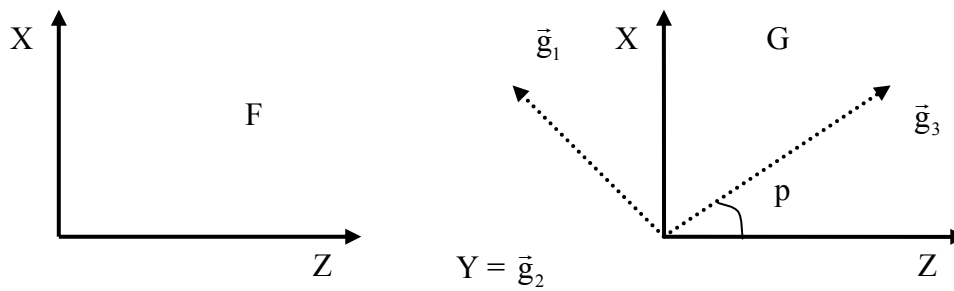


Figura 9.2: Transformações de coordenadas para o movimento de *pitch*.

$$\begin{aligned}\vec{g}_1 &= (\cos(p), 0, \sin(p))_F \\ \vec{g}_2 &= (0, 1, 0)_F \\ \vec{g}_3 &= (\sin(p), 0, \cos(p))_F\end{aligned}\quad (\text{Eq. 9.3})$$

Desta maneira, temos que a passagem do sistema de coordenadas F para G ($F \xrightarrow{N} G$), pode ser dada pela matriz N abaixo:

$$N = \begin{pmatrix} \cos(p) & 0 & \sin(p) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(p) & 0 & \cos(p) \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 9.4})$$

Por último, consideremos o movimento de *roll*. Este movimento de rotação é dado em torno do eixo X. Vamos considerar r como sendo o ângulo de rotação em torno deste eixo. Assim, a passagem de coordenadas do sistema G para o sistema H mostrado na Figura 9.3, pode ser obtido pelas transformações apresentadas na Eq. 9.5.

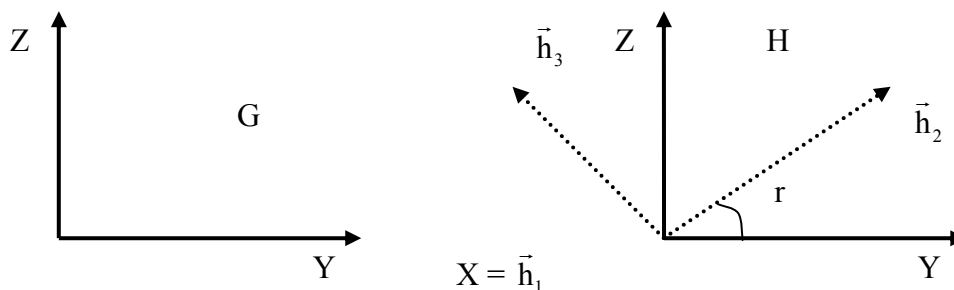


Figura 9.3: Transformações de coordenadas para o movimento de *roll*.

$$\begin{aligned}
 \vec{h}_1 &= (1, 0, 0)_G \\
 \vec{h}_2 &= (0, \cos(r), \sin(r))_G \\
 \vec{h}_3 &= (0, -\sin(r), \cos(r))_G
 \end{aligned}
 \quad (\text{Eq. 9.5})$$

Desta maneira, temos que a passagem do sistema de coordenadas G para H ($G \xrightarrow{K} H$), pode ser dada pela matriz K abaixo:

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(r) & -\sin(r) \\ 0 & \sin(r) & \cos(r) \end{pmatrix}
 \quad (\text{Eq. 9.6})$$

Assim, para acoplarmos as três rotações, devemos fazer a multiplicação das três matrizes J, N e K ($E \xrightarrow{J.N.K} H$), obtendo a matriz M abaixo:

$$M = \begin{bmatrix} \cos(p)\cos(y) & \cos(y)\sin(r)\sin(p) - \cos(r)\sin(y) & \sin(y)\sin(r) + \cos(y)\sin(p)\sin(r) \\ \sin(y)\cos(p) & \cos(y)\cos(r) + \sin(y)\sin(p)\sin(r) & \cos(r)\sin(p)\sin(y) - \cos(y)\sin(r) \\ -\sin(p) & \cos(p)\sin(r) & \cos(p)\cos(r) \end{bmatrix}
 \quad (\text{Eq. 9.7})$$

Esta matriz é idêntica a mostrada na Eq. 4.16.

Apêndice B: Arquivo de entrada do programa para cotas de navios.

Segue abaixo um exemplo de um arquivo de entrada para o programa, com a explicação de cada valor fornecido. Estes dados foram os mesmos usados para comparação com o primeiro petroleiro apresentado no capítulo de comparações.

361	35	// quantidade de balizas e linhas d'água que serão criadas, respectivamente										
669		// quantidade de pontos fornecidos ao programa										
25		// quantidade de balizas fornecidas										
29		// quantidade de linhas d'água fornecidas										
0 4.5 9.0 13.5 18.0 27.0 36.0 45.0 54.0 63.0 72.0 81.0 90.0 99.0 108.0 117.0 126.0 135.0 144.0 153.0 162.0 166.5 171.0 175.5												
180.0 // posição das balizas												
16.8 15.75 14.7 13.65 12.6 11.55 10.5 9.97 9.45 8.92 8.4 7.87 7.35 6.82 6.3 5.77 5.25 4.72 4.2 3.67 3.15 2.62 2.1 1.57 1.06 0.79												
0.52 0.26 0.0 // posição das linhas d'água												
// o primeiro número de cada linha informa quantas coordenadas existem para cada baliza, em cada linha d'água												
// os demais números de cada linha são as cotas entre os cruzamentos das balizas fornecidas e das linhas d'água												
11	5.99		5.62	5.17	4.61	3.97	3.24	2.45	2.0	1.51	0.93	0.09
15	7.69		7.35	6.96	6.34	5.66	4.89	4.03	3.56	3.05	2.49	1.85
29	9.11	1.26	0.71	0.39	0.21							
		8.79	8.38	7.85	7.2	6.45	5.6	5.13	4.64	4.09	3.58	
		3.07	2.61	2.22	1.88	1.6	1.37	1.2	1.05	0.93	0.82	0.72
29	10.31	0.64	0.6	0.5	0.46	0.4	0.35	0.18				
	10.03	9.67	9.2	8.62	7.94	7.15	6.71	6.26	5.8	5.33	4.86	
	4.39	3.76	3.56	3.22	2.91	2.63	2.38	2.14	1.93	1.73	1.55	
29	11.36	1.18	1.16	1.04	0.9	0.69	0.23					
	11.12	10.81	10.41	9.93	9.33	8.65	8.28	7.88	7.48	7.06	6.63	
	6.2	5.78	5.38	5.0	4.64	4.29	3.96	3.63	3.33	3.05	2.76	
29	12.94	2.43	2.07	1.86	1.6	1.23	0.43					
	12.78	12.59	12.34	12.05	11.69	11.27	11.03	10.77	10.49	10.19	9.88	
	9.56	9.22	8.87	8.51	8.14	7.76	7.37	6.98	6.57	6.13	5.65	
29	13.76	5.14	4.47	4.09	3.56	2.87	1.47					
	13.7	13.61	13.51	13.38	13.21	13.01	12.89	12.75	12.61	12.44	12.27	
	12.07	11.86	11.64	11.39	11.13	10.84	10.53	10.18	9.79	9.33	8.8	
29	13.99	8.19	7.39	6.9	6.3	5.45	3.43					
	13.98	13.97	13.96	13.92	13.88	13.82	13.78	13.74	13.69	13.63	13.57	
	13.50	13.42	13.32	13.21	13.07	12.91	12.73	12.51	12.25	11.93	11.53	
29	14.00	11.01	10.35	9.95	9.46	8.73	6.36					
	14.00	14.00	14.00	14.01	14.01	14.00	14.00	13.99	13.99	13.98	13.98	
	13.97	13.95	13.93	13.9	13.87	13.82	13.76	13.68	13.57	13.42	13.22	
29	14.00	12.96	12.56	12.31	11.94	11.39	9.77					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	13.99	13.97	13.93	13.87	
29	14.00	13.76	13.56	13.41	13.17	12.78	11.86					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.99	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.15	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.15	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
29	14.00	13.98	13.83	13.69	13.48	13.16	12.21					
	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.				

29 13.13	12.89	12.66	12.43	12.21	12.0	11.81	11.71	11.62	11.52	11.43	11.33
	11.23	11.13	11.02	10.9	10.76	10.6	10.41	10.2	9.94	9.64	9.25
	8.76	8.16	7.76	7.29	6.58	4.74					
29 10.91	10.48	10.09	9.74	9.43	9.13	8.86	8.73	8.6	8.48	8.36	8.24
	8.12	7.99	7.86	7.72	7.57	7.4	7.21	6.99	6.73	6.44	6.08
	5.64	5.1	4.76	4.27	3.54	1.81					
29 9.34		8.81	8.32	7.88	7.5	7.18	6.9	6.77	6.65	6.53	6.42
	6.31	6.19	6.08	5.95	5.82	5.68	5.53	5.36	5.17	4.95	4.7
	4.39	4.0	3.51	3.21	2.82	2.27	0.81				
29 7.58		6.96	6.38	5.86	5.4	5.03	4.73	4.61	4.5	4.4	4.3
	4.2	4.11	4.01	3.91	3.8	3.68	3.56	3.42	3.28	3.11	2.91
	2.66	2.36	1.96	1.7	1.4	0.99	0.2				
28 5.67		4.99	4.34	3.73	3.21	2.79	2.47	2.35	2.25	2.16	2.08
	2.01	1.94	1.87	1.79	1.71	1.64	1.56	1.47	1.37	1.26	1.12
	0.95	0.76	0.5	0.35	0.13	0.03					
6 3.65	2.9	2.17	1.51	0.79	0.55						
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 // translações de <i>surge</i> , <i>sway</i> e <i>heave</i> e ângulos de <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i>					
10.5	// calado de projeto										
16	// número de calados que serão utilizados para cálculo das propriedades										

Apêndice C: Arquivo de entrada do programa para painéis de plataformas.

No caso de plataformas, como o programa não gera os painéis, é necessário o fornecimento dos mesmos através de um arquivo de entrada. Tal arquivo deve ser similar ao produzido pelo programa no cálculo de navios. Segue abaixo um exemplo deste arquivo de entrada de maneira bem simplificada.

```
#vertices 17588 // número de vértices que serão fornecidos
1      16      30      16.873 // o primeiro número é o número do vértice. Os três números seguintes
2      15.9653 29.4743 16.872992 // representam as coordenadas x, y e z, respectivamente para este vértice.
3      15.9653 29.4743 16.49839
4      16      30      16.4984
.      .      .      .
.      .      .      .
.      .      .      .
17585  -15.9508 -29.3743 19.7
17586  -15.9508 -29.3743 19.8
17587  -15.9508 -29.3743 19.9
17588  -15.9508 -29.3743 20

#faces 17896 // número de painéis
4      1      2      3      4 // o primeiro número mostra quantos são os pontos que formam o painel.
4      4      3      5      6 // O programa somente aceita painel com quatro pontos.
4      6      5      7      8 // os números seguintes são os números dos pontos relacionados acima que
4      8      7      9      10 // formam o painel de tal modo que ele tenha normal apontada para fora.
4      10     9      11     12
4      2      13     14     3
.      .      .      .      .
.      .      .      .      .
.      .      .      .      .
4      17584  17375  17377  17585
4      17585  17377  17379  17586
4      17586  17379  17381  17587
4      17587  17381  17383  17588
```

Apêndice D: Cálculo do momento de inércia próprio de um painel.

Vamos imaginar um painel como o mostrado na Figura 9.4. Este painel está projetado no plano XY, ou seja, o painel é bidimensional.

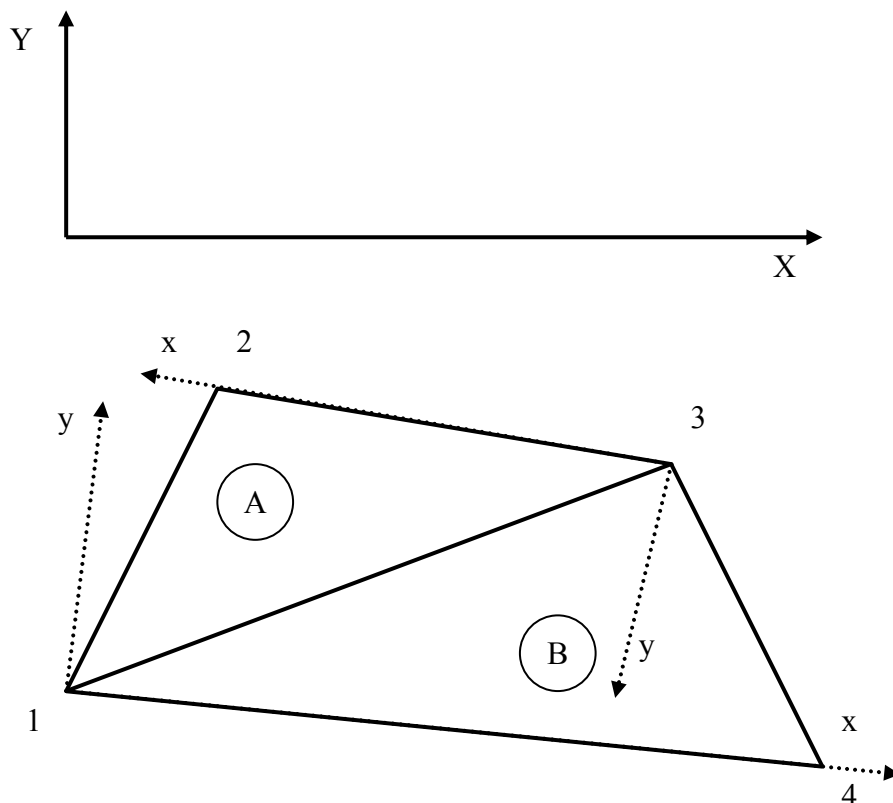


Figura 9.4: Painel que será utilizado como referência.

Vamos dividir o painel em dois triângulos para o cálculo do momento inércia. Faremos aqui uma apresentação dos cálculos para o triângulo A somente, uma vez que para o triângulo B podemos fazer a mesma análise somente mudando a origem do eixo auxiliar (vértice 1 para 3).

Sabemos que momento de inércia para um triângulo é dado pelas expressões:

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{Eq. 9.8})$$

$$I_y = \frac{bh}{12}(3b^2 - 3bc + c^2) \quad (\text{Eq. 9.9})$$

$$I_{xy} = \frac{bh^2}{24}(3b - 2c) \quad (\text{Eq. 9.10})$$

onde a, b e c estão mostrados na Figura 9.5.

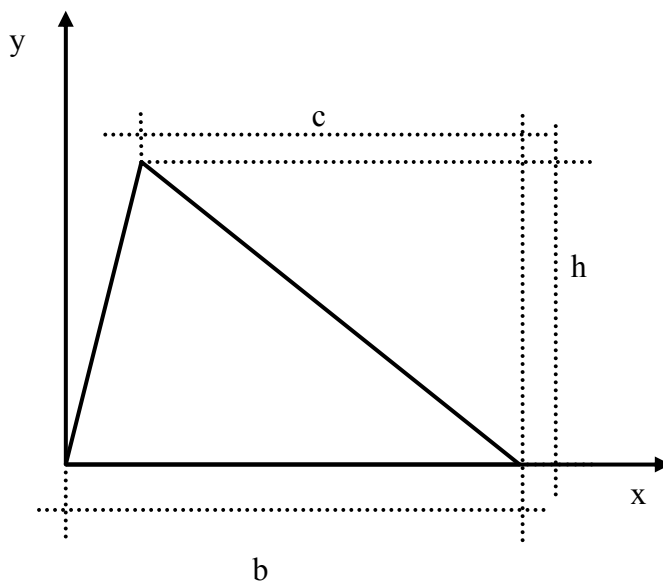


Figura 9.5: Triângulo utilizado para referência no cálculo do momento de inércia.

A partir deste resultado devemos transferir o momento de inércia para o eixo longitudinal da embarcação (eixo X).

Se o eixo x do painel for paralelo ao eixo longitudinal da embarcação (X) e distante d, então:

$$I_X = I_x + Ad^2 \quad (\text{Eq. 9.11})$$

Porém, o eixo x do painel não necessariamente é paralelo ao eixo X da embarcação. Neste caso, será necessário rotacionar, conforme mostra a Figura 9.6.

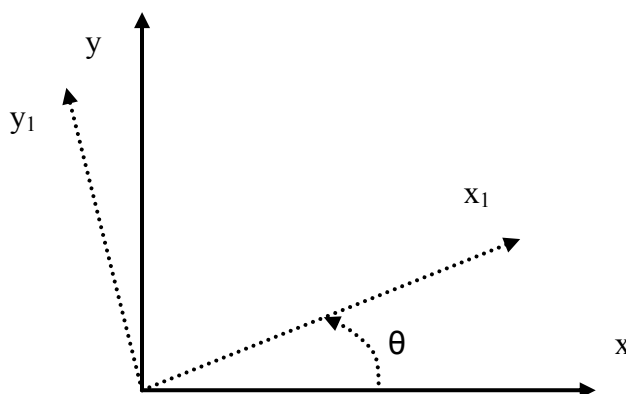


Figura 9.6: Rotação dos eixos coordenados.

Obteremos então:

$$x_1 = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (\text{Eq. 9.12})$$

$$y_1 = y \cos \theta - x \sin \theta \quad (\text{Eq. 9.13})$$

e:

$$\begin{aligned} I_{x1} &= \int y^2 dA = \int (y \cos \theta - x \sin \theta)^2 dA = \\ &= \cos^2 \theta \int y^2 dA + \sin^2 \theta \int x^2 dA - 2 \sin \theta \cos \theta \int xy dA \end{aligned} \quad (\text{Eq. 9.14})$$

ou:

$$I_{x1} = I_x \cos^2 \theta + I_y \sin^2 \theta - 2I_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (\text{Eq. 9.15})$$

De modo análogo:

$$I_{y1} = I_x \sin^2 \theta + I_y \cos^2 \theta + 2I_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (\text{Eq. 9.16})$$

ou:

$$I_{x1} = \frac{I_x + I_y}{2} + \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\theta - I_{xy} \sin 2\theta \quad (\text{Eq. 9.17})$$

$$I_{y1} = \frac{I_x + I_y}{2} - \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\theta + I_{xy} \sin 2\theta \quad (\text{Eq. 9.18})$$

Assim, para o nosso caso do triângulo A e utilizando a nomenclatura do equacionamento mostrada na página 19 temos o comprimento da base b_A do triângulo:

$$b_A = \sqrt{(v_4^x)^2 + (v_4^y)^2} \quad (\text{Eq. 9.19})$$

Se h_A é a altura do triângulo, ela será dada por:

$$h_A = \frac{|v_4^y \cdot p_1^x - v_4^x \cdot p_1^y - p_3^x \cdot p_2^y + p_3^y \cdot p_2^x|}{b_A} \quad (\text{Eq. 9.20})$$

A distância c da Figura 9.5 (c_A) é obtida por:

$$c_A = \sqrt{(v_A^x)^2 + (v_A^y)^2 - h_A^2} \quad (\text{Eq. 9.21})$$

Vamos definir aqui, duas constantes auxiliares m_A e a_A , dadas por:

$$m_A = \frac{b_A \cdot h_A}{12} \quad (\text{Eq. 9.22})$$

$$a_A = 3b_A \quad (\text{Eq. 9.23})$$

Desta forma, os momentos e o produto de inércia relação a x e y ficam:

$$I_x^A = m_A \cdot h_A^2 \quad (\text{Eq. 9.24})$$

$$I_y^A = m_A (a_A \cdot b_A - a_A \cdot c_A + c_A^2) \quad (\text{Eq. 9.25})$$

$$I_{xy}^A = m_A \cdot h_A \left(\frac{a_A}{2} - c_A \right) \quad (\text{Eq. 9.26})$$

Se o ângulo de rotação θ for obtido por:

$$\theta_A = \arctg \left(\frac{V_4^y}{V_4^x} \right) \quad (\text{Eq. 9.27})$$

Podemos dizer que o momento de inércia próprio dos painéis será:

$$I_{x1}^A = \frac{I_x^A + I_y^A}{2} + \frac{I_x^A - I_y^A}{2} \cos 2\theta_A - I_{xy}^A \sin 2\theta_A \quad (\text{Eq. 9.28})$$

$$I_{y1}^A = \frac{I_x^A + I_y^A}{2} - \frac{I_x^A - I_y^A}{2} \cos 2\theta_A + I_{xy}^A \sin 2\theta_A \quad (\text{Eq. 9.29})$$

Devemos somente transladar este momento para o centro do triângulo. Isto é conseguido através de uma simples diferença entre pontos. O mesmo raciocínio poderá ser aplicado ao triângulo B e somado. Como a embarcação é considerada como simétrica, multiplicamos o valor obtido para cada painel por dois.

Com a soma do termo $6 \cdot m_1 (p_3^y - TCF)^2$, já se consegue obter diretamente momento de inércia próprio do triângulo mais a translação, para o triângulo A.