Guilherme Tavares Malizia Alves

Projeto Integrado de Estabilidade de Unidades Flutuantes

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Luiz Fernando Martha e
Luiz Cristovão Gomes Coelho

Rio de Janeiro, julho de 2006

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

Guilherme Tavares Malizia Alves

Projeto Integrado de Estabilidade de Unidades Flutuantes

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Luiz Fernando Martha
Orientador - PUC-Rio

Luiz Cristovão Gomes Coelho
Orientador – Tecgraf

Ivan Fábio Mota de Menezes
Tecgraf

Mauro Costa de Oliveira
PETROBRAS

Paulo Batista Gonçalves
PUC-Rio

Rio de janeiro, 31 de julho de 2006

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Guilherme Tavares Malizia Alves

Graduou-se Engenheiro Civil em Dezembro de 2000, pelo Instituto de Tecnologia Aeronáutica (ITA)

Ficha Catalográfica

Alves, Guilherme Tavares Malizia

Projeto Integrado de Estabilidade de Unidades Flutuantes / Guilherme Tavares Malizia Alves; orientadores: Luiz Fernando Martha e Luiz Cristovão Gomes Coelho – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

106 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Estabilidade naval. 3. Unidades flutuantes. 4. Carregamento automático. 5. Linha de praia. 6. KG máxima. 6. Força de vento em unidades flutuantes. 7. Programação linear. I. Martha, Luiz Fernando. II. Coelho, Luiz Cristovão Gomes. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Aos meus pais, amigos e a todos que contribuíram na realização deste trabalho.

Agradecimentos

À PUC-Rio e aos professores do Departamento de Engenharia Civil.

Aos meus orientadores, pela convivência, disponibilidade, incentivo, paciência, pelos conhecimentos transmitidos durante este último ano.

À banca examinadora.

Aos meus colegas durante estes dois anos.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Civil.

Ao Tecgraf, pela oportunidade de realizar este projeto e pelo auxílio financeiro.

Ao Antônio Sérgio Nascimento, pela implementação do diagrama de estabilidade, sem o qual parte deste trabalho não seria possível.

Ao Sérgio Álvares Maffra, pela permissão para incorporação das idéias iniciais dos algoritmos de força de vento e de carregamento automático neste volume.

À Luzia, pelo apoio dado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Resumo

Alves, Guilherme Tavares Malizia; Martha, Luiz Fernando; Coelho, Luiz Cristovão Gomes. **Projeto Integrado de Estabilidade de Unidades Flutuantes.** Rio de Janeiro, 2006. 106p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho está inserido em uma linha de pesquisa do Tecgraf/PUC-Rio de projeto de unidades flutuantes, tais como navios e plataformas. Nesta linha de pesquisa, é desenvolvido o programa gráfico Sstab, para análise e projeto de estabilidade estática de unidades flutuantes. Estabilidade de unidades flutuantes é um critério fundamental em um projeto naval. Para aprovar um projeto naval é necessário satisfazer vários critérios, entre estes, a obtenção da situação de equilíbrio da unidade quando submetida às situações de carregamento, a avaliação satisfatória dos cálculos das solicitações de vento, a avaliação satisfatória da curva de estabilidade limite e a avaliação satisfatória dos planos de borda livre da unidade. O principal objetivo deste trabalho foi implementar no Sstab procedimentos necessários para realização de verificações de projeto de forma integrada e automática. Essas tarefas são divididas em quatro passos distintos, cada um dependente da antecessor: Definição automática de carregamento ótimo; Cálculo das solicitações de vento usando *hardware* gráfico; Definição da curva de estabilidade limite; Definição integrada dos planos de borda livre e integridade estanque do casco. Especificamente, este trabalho tem por objetivo explicar os critérios e algoritmos inerentes a cada um desses passos.

Palavras-chave

Estabilidade naval, Unidades Flutuantes, carregamento automático, linha de praia, KG Máximo, Força de vento em unidades flutuantes, programação linear

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Abstract

Alves, Guilherme Tavares Malizia; Martha, Luiz Fernando(advisor); Coelho, Luiz Cristovão Gomes(advisor). **Integrated Stability Design of Naval Units.** Rio de Janeiro, 2006. 106p. MSc Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The work done is about a research of floating units, as ships and platforms, conducted by Tecgraf/ PUC-Rio. In this line of research, the Sstab program was developed to do the analysis of static stability of floating units. Stability of floating units is a fundamental criterion in developing a naval project. For a project to be approved, there are several criterions that it must satisfy. Among these criterions, the unit must get to an equilibrium position for all possible loading conditions and a satisfactory behavior when put under wind and stream forces situations. The evaluation of the model's KG Max curve must have a satisfactory result and its Beach Line computed and approved. The main objective of this work was to implement in the Sstab program the necessaries algorithms to automatic execute these verifications. There are four main steps to this work: A sequential linear algorithm for automatic loading of a floating unit; An algorithm to compute wind forces by using a graphic hardware; An algorithm to automatic compute the KG Max curve; An automatic computation of the Beach Lines and classification of the opening points of the unit. This document will explain the criterions adopted and the algorithms for each step above.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Keywords

vessel stability, automatic loading, Max KG Curve, Beach Lines, Wind Force, linear programming

Sumário

1 Introdução 17
1.1. Objetivos e organização da tese 18
1.2. Definições, Termos e Nomenclaturas Utilizados no Trabalho 19
1.2.1. Movimentos e Inclinações 20
1.3. Empuxo 23
1.4. Equilíbrio e Metacentro 25
1.4.1. Método dos Pequenos Ângulos Para Cálculo do Metacentro 26
1.5. Organizações internacionais de Segurança Marítima [9] 28
1.5.1. Critérios de Estabilidade Intacta e em Avaria 29
1.5.2. Classificação por Tipo de embarcação 29
1.5.3. Filosofia dos Regulamentos 29

2 O Sstab 31
2.1. Sistema de unidades 31
2.2. A modelagem geométrica 31
2.3. Sistemas de coordenadas 32
2.4. Conceitos básicos de modelagem no Sstab 33
2.4.1. Compartimentos internos e externos 34
2.4.2. Status do Tanque Intacto/Avariado/Alagado 34
2.4.3. Compartimentos de carga 35
2.4.4. Compartimentos de massa 36
2.4.5. Compartimentos de casco 36
2.4.6. Tanques de lastro e de carga 37
2.4.7. Espaços vazios 38
2.4.8. Permeabilidade 38
2.4.9. Pontos de alagamento 39
2.4.10. Ponto crítico de alagamento 39
2.5. Cálculo do volume 39

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

2.6. Equilíbrio 42
2.6.1. Efeito de superfície livre 44
2.6.2. Altura Metacêntrica 45
2.6.3. Alagamento 46

3 Definição automática de carregamento ótimo 48
3.1. Programação Linear 49
3.2. Programação linear aplicada ao carregamento de uma embarcação 50
3.2.1. Forças Externas e Peso 51
3.2.2. Função Objetivo 52
3.3. Programação linear seqüencial 53
3.4. Melhorias no Resultado 54
3.4.1. Minimizar tensão e esforço cortante 54
3.4.2. Minimizar superfície livre 56
3.5. Resultados 57

4 Cálculo das solicitações de vento usando espaço de imagem 61
4.1. Força do vento 62
4.1.1. Modelo 63
4.1.2. Determinação da superfície visível utilizando álgebra vetorial 63
4.1.3. Determinação da área visível utilizando a placa gráfica 64
4.1.4. Configurando o software de Z-Buffer 64
4.1.5. Computando a força do vento 66
4.1.6. Diagrama de Fluxo para computar a força do vento 68
4.1.7. Erros de rasterização 70
4.2. Computando a força da corrente 71
4.3. Cálculo do braço de vento 72
4.4. Resultados 73

5 Definição da curva de estabilidade limite 81
5.1. Condições de Carregamento 81
5.2. Diagrama de Estabilidade 84
5.2.1. Influência de Superfície Livre 85
5.2.2. Regras e Regulamento 85

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

5.2.3. International Maritime Organization (IMO) 85
5.2.4. Norwegian Maritime Directorate (NMD) 87
5.2.5. Outros Órgãos Reguladores e Critérios 89
5.3. Computação do Centro de Gravidade Máximo das Condições 89
5.4. Exemplo 91

6 Definição integrada dos planos de borda livre e integridade estanque do casco 93
6.1. Critérios Utilizados 94
6.2. Pontos de Abertura 96
6.3. Estrutura de dados 97
6.4. Computando o Plano de Borda e Classificando os Pontos de Abertura9
6.5. Exemplo 100

7 Conclusão 103

8 Referências Bibliográficas 105

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Partes de uma plataforma 20
Figura 1.2 – Seções principais de uma plataforma 22
Figura 1.3 – Graus de liberdade de uma unidade flutuante 22
Figura 1.4 – Inclinações de banda e *trim* 23
Figura 1.5 – Tipos de equilíbrio em uma embarcação 24
Figura 1.6 – Método dos pequenos ângulos para o cálculo do momento de retorno 27
Figura 2.1 - Vista em perspectiva dos eixos de coordenadas tratadas no Sstab. 32
Figura 2.2 – Diagrama de tipos de compartimento 33
Figura 2.3: Modelo de casco envolvendo vários compartimentos internos. 37
Figura 2.4: Cálculo do volume de um compartimento por integração das faces 40
Figura 2.5: Cálculo do volume de um compartimento parcialmente imerso. 41
Figura 2.6: Cálculo do volume de um compartimento parcialmente imerso. 41
Figura 2.7: Graus de liberdade usados pelo Sstab no cálculo do equilíbrio. 43
Figura 2.8: Equilíbrio com e sem efeito de superfície livre. 44
Figura 2.9: Cálculo geométrico do metacentro transversal. 46
Figura 3.1- Diagrama de fluxo do algoritmo de carregamento automático. 53
Figura 3.2- Curva de Empuxo para um navio. 54
Figura 3.3- Determinação de TOL_g e TOL_n. 55
Figura 3.4- Carregamento de tanques após utilização do algoritmo de carregamento 57
Figura 3.5 – Navio carregado 58
Figura 3.6-Forças de Cisalhamento referentes à Figura 3.5 59
Figura 3.7 – Momento ao longo do eixo longitudinal referente à Figura 3.5 59
Figura 3.8- Plataforma inclinada devido a um tanque avariado. 60
Figura 4.1- Plataforma de óleo semi-submersível 64
Figura 4.2- Imagem utilizada na computação do vento 65
Figura 4.3 – Fluxograma para geração de imagem e computação da força de vento 69

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Figura 4.4- Erro de Rasterização 70
Figura 4.5 – Vento e Corrente 72
Figura 4.6 - Imagem utilizada na computação da corrente 72
Figura 4.7 – Braço de vento 73
Figura 4.8- Maquete de túnel de vento com cinco graus de inclinação 75
Figura 4.9 – Modelo do Sstab com cinco graus de inclinação 75
Figura 4.10 – Gráfico de Braço de vento para o calado de operação. 76
Figura 4.11 - Maquete de túnel de vento com dez graus de inclinação 76
Figura 4.12 - – Modelo do Sstab com dez graus de inclinação 77
Figura 4.13 – Valores de Braço de vento para o calado de trânsito 78
Figura 4.14 – Aumento da área de vento ao aumentar a inclinação 79
Figura 4.15 – Força do vento em superfícies ocultas. 80
Figura 5.1 – Criação de condições de avaria a partir de uma condição intacta. 83
Figura 5.2 – Diagrama de estabilidade gerado pelo Sstab. 84
Figura 5.3 – *Area Ratio* em um diagrama de estabilidade 86
Figura 5.4 – Diagrama de Estabilidade, critério NMD 88
Figura 5.5 – Fluxograma de obtenção do KG limite de um conjunto de condições L_C 90
Figura 5.6 – Gráfico Resultado da curva de Estabilidade Máxima. 92
Figura 6.1 – Linhas de praia para diversas cotas 93
Figura 6.2 – Corte da linha d'água com uma condição de carregamento, critério IMO. 95
Figura 6.3 - Linha d'água para cota 45 m e calado 35m da condição 96
Figura 6.4 – Diagrama de relacionamento entre classes 97
Figura 6.5 – Exemplo de lista enviada ao HED 98
Figura 6.6 – Fluxograma para construção das linhas de praia e classificação dos pontos de abertura 100
Figura 6.7 – Linhas de corte de área semi-estanque e área seca 101

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Lista de tabelas

Tabela 3.1-Carregamento de tanques para ambos os algoritmos 58
Tabela 4.1-Coeficiente de altura 67
Tabela 4.2-Coeficiente de forma 68
Tabela 4.3 – Deslocamento de cada calado 74
Tabela 4.4 – Valores de braço de vento para o calado de operação 74
Tabela 4.5 – Valores de braço de vento para o calado de trânsito 77
Tabela 5.1 – Exemplo de resultados de KG max. 91
Tabela 6.1 – Pontos da área semi-estanque 101
Tabela 6.2 – Pontos da área seca 102

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Lista de símbolos

Δ, peso deslocado da plataforma

∇, volume deslocado da plataforma

A_P, área do pixel

A_W, área de vento

A_S, área da corrente

B, centro de empuxo

C_H, coeficiente de altura

C_S, coeficiente de forma

C_A, Centro de aplicação da força de vento

C_B, Centro de aplicação da força da corrente

F_W, força do vento

F_S, força da corrente

g, aceleração da gravidade

G, altura do centro de massa da unidade flutuante

GM, distância entre o centro de massa e o metacêntrica

h, altura da imagem

I_L, momento de inércia longitudinal

I_T, momento de inércia transversal

K, altura da quilha em coordenadas globais

KB, distância entre a quilha e o centro de empuxo

KG, distância vertical entre centro de massa e a quilha

KM, distância vertical entre altura metacêntrica e a quilha

L, conjunto de condições de carregamento

L_C, conjunto de uma classe de condições de carregamento

LCG, coordenada longitudinal do centro de gravidade da unidade flutuante

M, metacentro

Mc_L, metacentro longitudinal

Mc_T, metacentro transversal

M_L, momento longitudinal

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

M_T, momento transversal

N_i, conjunto de tanques k vizinhos ao tanque i

P_i, capacidade de bombeamento para cada tanque

Px_{ij}, pixel localizado na posição (i,j)

ρ_i, densidade do líquido do tanque i

ρ_L, densidade do líquido

ρ_W, densidade do ar

T, conjunto de tanques da unidade flutuante

TCG, coordenada transversal do centro de gravidade da unidade flutuante

T_k, conjunto de um mesmo tipo de tanques contendo um mesmo tipo de líquido

TOL_g, tolerância global de variação de volume

TOL_n, tolerância entre vizinhos para variação de volume

Up, vetor utilizado para informar parâmetro a biblioteca do OpenGl

V_W, velocidade do vento

V_i, volume de líquido no tanque i

ΔV_i, variação do volume de líquido no tanque i

V_i^{max}, capacidade máxima de líquido no tanque i

V_i^{min}, volume mínimo de líquido no tanque i

V_k^{total}, volume total de líquido em tanques pertencentes a T_k

V_L, volume de líquido

W, peso total da unidade flutuante

w, largura da imagem

x, eixo na direção longitudinal, no sistema de coordenadas local

X, eixo na direção longitudinal, no sistema de coordenadas global

X_i, coordenada longitudinal do tanque i, no sistema global

y, eixo na direção transversal, no sistema de coordenadas local

Y, eixo na direção transversal, no sistema de coordenadas global

Y_i, coordenada transversal do tanque i, no sistema global

z, eixo na direção vertical, no sistema de coordenadas local

Z, eixo na direção vertical, no sistema de coordenadas global

θ_0, ângulo de inclinação da embarcação em posição de equilíbrio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

θ_1, ângulo de equilíbrio ao adicionar a força de vento externa à embarcação

$\theta 2$, ângulo de equilíbrio ao adicionar a força de vento externa a embarcação

lw_1, valor de GZ para o ângulo de $\theta 1$

lw_2, valor de GZ para o ângulo de $\theta 2$

θ_{fi} o ângulo de inclinação da plataforma em que o ponto de abertura *i* não estanque (vide Seção 6.2) submerge.

θ_{lim} o menor entre θ_2 e o ângulo do primeiro ponto de abertura não estanque que submerge θ_{f1}.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

1
Introdução

Nas últimas décadas desenvolveram-se cascos de grandes navios petroleiros, navios para transporte de *containeres*, plataformas de petróleo, navios de transporte de automóveis, navios com dragas e até mesmo navios com grandes guindastes. Há navios que chegam a ter 500 mil toneladas de peso seco. Com este avanço tecnológico, houve uma necessidade de criar novas normas e regulamentos, exigindo e incentivando práticas de segurança marítima e segurança ambiental.

Este crescimento rápido também ocorre na PETROBRAS e, com isto, há a necessidade de desenvolvimento de novas plataformas pelo CENPES, Centro de Pesquisas da PETROBRAS. Para estas novas plataformas, decidiu-se que seriam adotadas práticas de segurança mais rigorosas, seguindo a tendência mundial.

É importante para uma embarcação que seu modelo atenda sua utilidade, mas também às restrições de flutuação, velocidade, potência, estabilidade e que seja manufaturável e economicamente viável.

O modelo de uma unidade flutuante deve prover a flutuação adequada, mas isto não é suficiente. Deve-se garantir que esta embarcação flutue em seu calado correto de operação, com a inclinação correta, desde uma condição vazia até uma condição carregada, inclusive durante os processos de carga e descarga.

Este trabalho trata das considerações utilizadas para avaliar a estabilidade estática de um navio, estando ou não sujeito a forças externas, podendo apresentar avarias ou inumdações em alguns de seus tanques.

Estabilidade de unidades flutuantes, como navios e plataformas, é um requisito fundamental em um projeto naval. Para aprovar um projeto naval é necessário satisfazer a vários critérios, como a obtenção da posição de equilíbrio da unidade quando submetida às situações de carregamento, a avaliação satisfatória dos cálculos das solicitações de vento, a avaliação satisfatória da curva de estabilidade limite e a avaliação satisfatória dos planos de borda livre da unidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Esses critérios têm por objetivo certificar a capacidade que uma embarcação tem, em uma dada condição, de suportar um momento de emborcamento[1] dentro de limites aceitáveis de inclinação e afundamento, os quais dependerão da finalidade da embarcação.

Uma embarcação pode ser utilizada como navio cargueiro, plataforma, draga, navio de cruzeiro e assim por diante. Neste trabalho, as unidades flutuantes consideradas serão embarcações petrolíferas.

Os fatores que afetam o equilíbrio de uma unidade flutuante são:

- Distribuição de carga na embarcação.
- Geometria submersa e emersa.
- Deslocamentos de pesos na embarcação: avaria, içamento e descarte de pesos, peso solto no convés, etc.
- Ações do meio ambiente: ventos, ondas e correntes marítimas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

1.1. Objetivos e organização da tese

Na avaliação de um modelo, é necessário simular várias situações de carregamento e operação. Neste trabalho, as tarefas de certificação de qualidade de um modelo são divididas em quatro passos distintos, cada um dos quais dependente do seu antecessor:

1. Definição automática de carregamento ótimo.
2. Cálculo das solicitações de vento usando espaço de imagem.
3. Definição da curva de estabilidade limite.
4. Definição integrada dos planos de borda livre e integridade estanque do casco.

Este trabalho tem por objetivo explicar os critérios e algoritmos inerentes a cada um desses passos.

O primeiro passo consiste em como simular, em teoria, uma situação de carregamento em que este modelo pode se encontrar na vida real, caso ele venha a entrar em operação. Este trabalho partiu de um algoritmo, desenvolvido inicialmente por Anderson Pereira e Maffra et al[14], para distribuição e carregamento automático dos tanques, na determinação da carga necessária para

1-Momento de emborcamento é um momento que tende a tirar a embarcação da sua condição de equilíbrio e que pode ter origem externa (vento, onda, abalroamento) ou interna (deslocamento, descarte ou acréscimo de pesos).

se atingir a condição de carregmanto desejada. Uma explicação detalhada deste algoritmo assim como a contribuição deste trabalho para sua extensão, será apresentada no Capítulo 3.

Alguns critérios de avaliação exigem o teste do modelo sujeito às forças de vento e de corrente. Neste trabalho foi dada continuidade ao desenvolvimento de um algoritmo, iniciado por Maffra et al[12], para se estimar as forças e seus pontos de aplicação, dados o calado, a inclinação e a velocidade do vento a que a embarcação está submetida. Estes itens estão descritos no capítulo 4.

Dentre os critérios de avaliação de uma embarcação, está a sua curva de estabilidade, calculada a partir de todas as situações de carregamento criadas para o modelo. Foi desenvolvido um algoritmo para a geração automática desta curva, desde que as condições de carregamento estejam corretamente definidas e seus critérios devidamente selecionados. O capítulo 5 descreve este desenvolvimento original.

As linhas de praia de uma plataforma são retas estabelecidas como limites numa determinada cota (altura) de uma plataforma (num plano xy), que servem para classificar as aberturas existentes naquela cota. Um algoritmo, descrito no capítulo 6, foi criado neste trabalho para delimitar as linhas de praia numa cota especificada e para automaticamente classificar todas as aberturas da unidade.

Dentre as normas adotadas e utilizadas para este trabalho, tem-se como principais referências as normas da Organização Marítima Internacional (IMO) e do Departamento Marítimo da Noruega (NMD), dois órgãos que se tornaram padrões de referência mundial.

Todos os algoritmos descritos neste trabalho foram implementados no programa Sstab [1], um programa de estabilidade de unidades marítimas, desenvolvido numa parceria entre o Tecgraf/PUC-Rio e o CENPES. O capítulo 2 faz uma descrição resumida do Sstab.

1.2. Definições, Termos e Nomenclaturas Utilizados no Trabalho

Nesta seção, apresentam-se os principais termos utilizados na descrição deste trabalho. A Figura 1.1 mostra como uma plataforma se subdivide.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

As principais seções de uma plataforma são ilustradas na Figura 1.2. A seção mestra fica localizada no centro longitudinal da plataforma. Já a linha de centro fica localizada no centro transversal da plataforma. O plano de base é paralelo ao plano xy e fica localizado na altura da quilha.

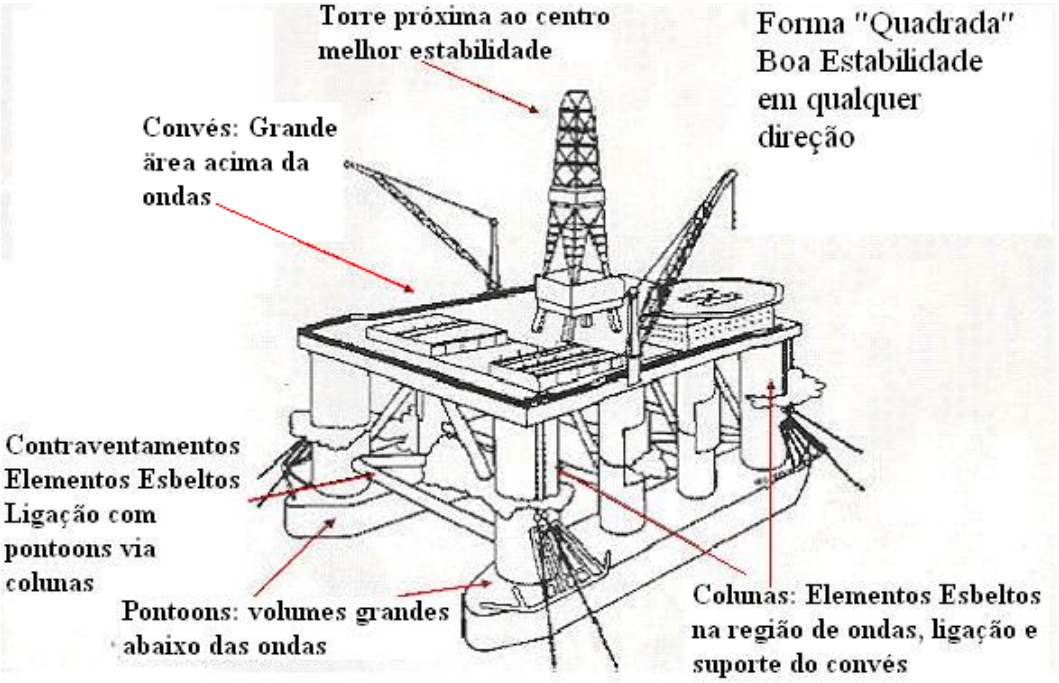


Figura 1.1 – Partes de uma plataforma

Cota é a altura dada em coordenadas locais da plataforma em relação à quilha. Quando se diz que um objeto está a uma cota de 10 metros, isto quer dizer que há uma distância em z de 10 metros entre o objeto e a quilha, ou seja, é o valor da coordenada z do obejto.

Calado é a altura em que a linha d'água do mar corta o eixo z nas coordenadas locais.

1.2.1. Movimentos e Inclinações

Uma unidade flutuante possui 6 graus de liberdade de movimento, sendo 3 de translação (linear) e 3 de rotação em torno de um eixo (angular). As nomenclaturas para estes 6 graus de liberdade estão representadas na Figura 1.3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

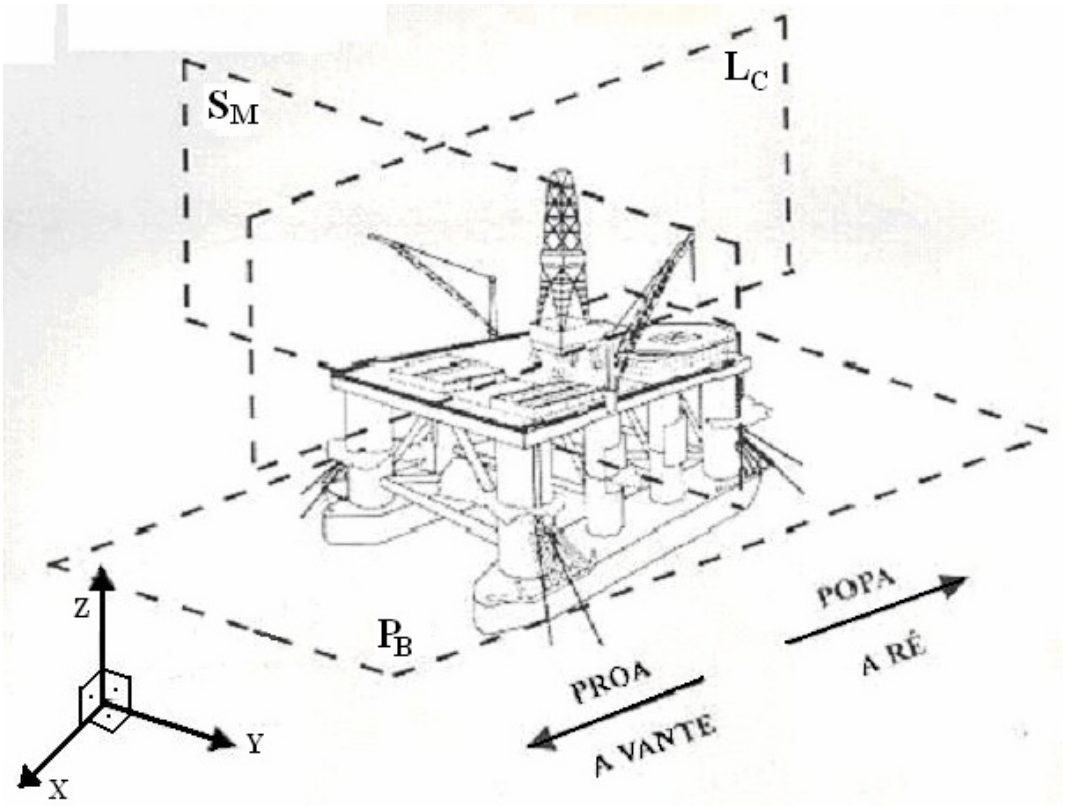
Os deslocamentos (lineares e angulares) de uma plataforma semi-submersível são causados basicamente por ventos e ondas incidindo sobre a mesma e podem ser divididos em dois grupos:

- avanço (*surge*), deriva (*sway*) e guinada (*yaw*): estes movimentos sofrem restrição do sistema de ancoragem da unidade que deve ser projetado para limitá-los a valores aceitáveis;

- Balanço (*Roll*), arfagem (*pitch*) e afundamento (*heave*): estes movimentos sofrem pouca influência do sistema de ancoragem e são limitantes para a operação da unidade. Os parâmetros determinantes para que a unidade apresente movimentos de *roll*, *pitch* e *heave* dentro dos limites operacionais especificados, considerando as condições de vento e onda do local onde irá operar, são as formas das colunas e *pontoons* e a distribuição de massa.

Os movimentos de *roll* e *pitch* são cíclicos (transientes), porém a plataforma também apresenta inclinações permanentes que dependem do seu carregamento. Inclinações permanentes no sentido proa-popa são chamadas de *trim* e terão a mesma convenção de sinais das coordenadas longitudinais, ou seja, se a convenção for positivo a vante, o *trim* será positivo se a proa tiver mais afundada que a popa. Inclinações permanentes no sentido bombordo (BB) boreste (BE) são chamadas de banda e terão a mesma convenção de sinais das coordenadas transversais, ou seja, se a convenção for positivo a BE, a banda será positiva se BE estiver mais afundado que BB. Isto é mostrado na Figura 1.4.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA



S_M	Seção Mestra
L_C	Linha de centro
P_B	Plano de base
x	Eixo longitudinal de coordenada local x
y	Eixo transversal de coordenada local y
z	Eixo vertical de coordenada local z

Figura 1.2 – Seções principais de uma plataforma

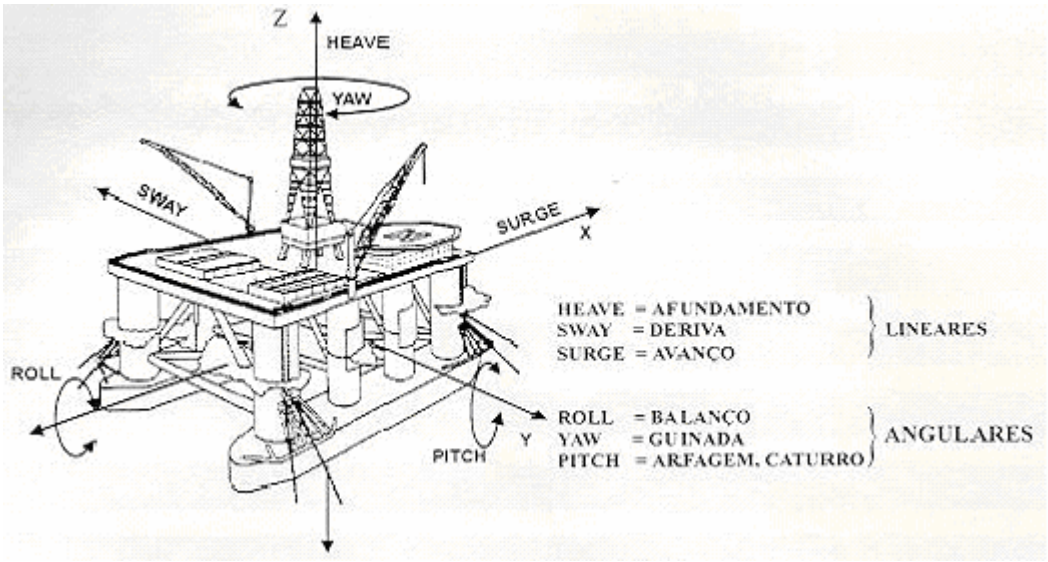


Figura 1.3 – Graus de liberdade de uma unidade flutuante

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

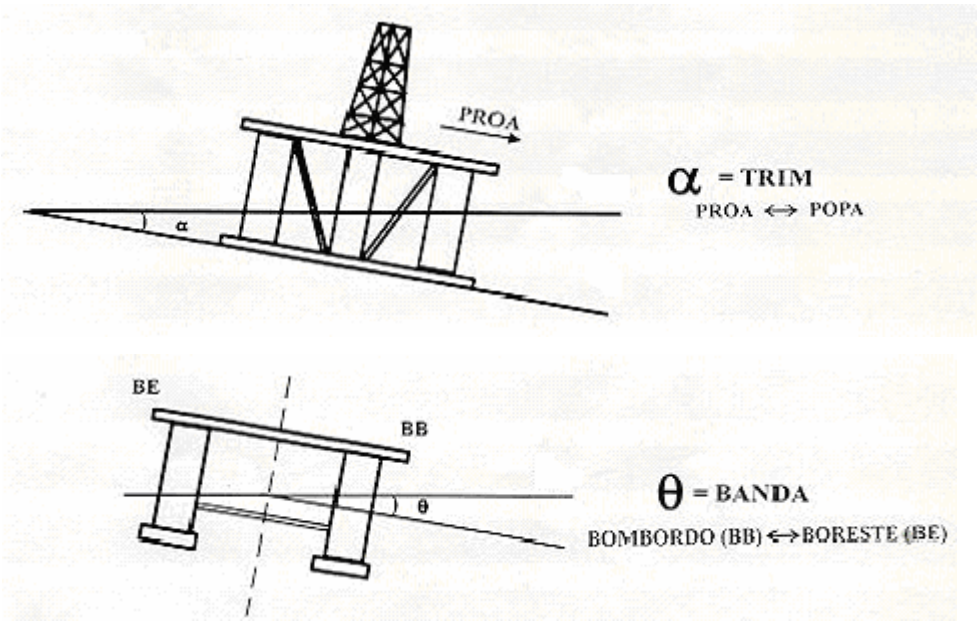


Figura 1.4 – Inclinações de banda e *trim*

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

1.3.Empuxo

O valor do empuxo, que atua em um corpo mergulhado em um líquido, é igual ao peso do líquido deslocado pelo corpo. Esta força vertical é o motivo pelo qual uma embarcação continua flutuando.

Pelo princípio de Arquimedes, sabemos que o empuxo é igual ao peso do liquido deslocado ou como mostrado na equação 1.1:

$$B = \rho_L V_L g \tag{1.1}$$

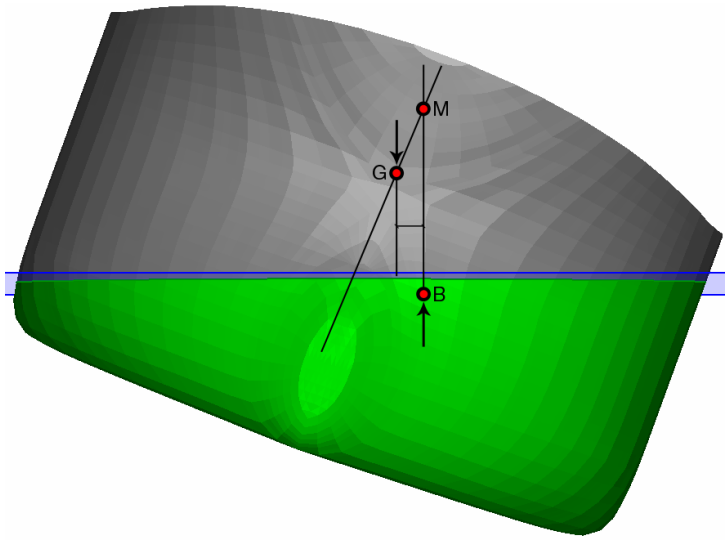
B Valor do empuxo

ρ_L Densidade do líquido

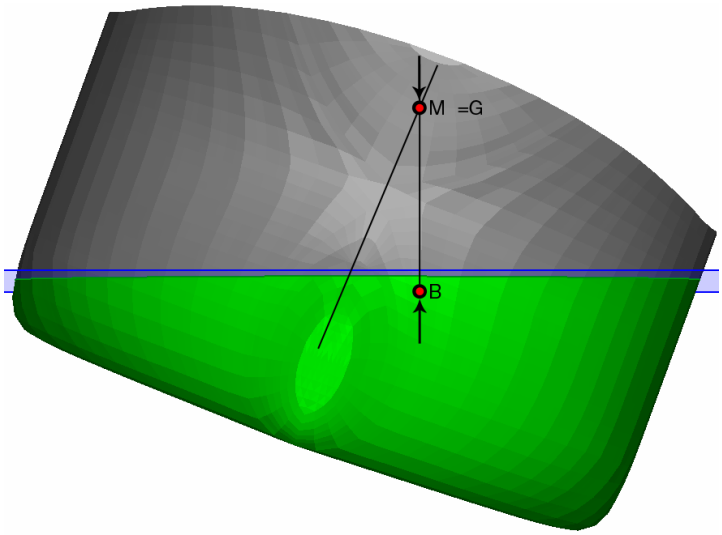
V_L Volume de líquido deslocado

g Aceleração da gravidade

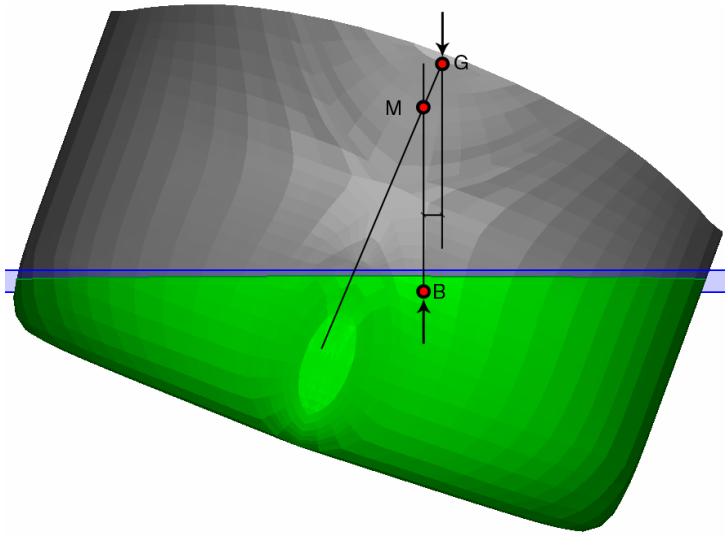
Se um corpo em equilíbrio está totalmente mergulhado em um líquido, seu peso é igual ao empuxo que ele está recebendo. Neste caso, será nula a resultante destas forças e o corpo ficará em repouso na posição em que foi abandonado. É isto que acontece com um submarino submerso, em repouso, a uma certa profundidade.



(a) estável



(b) indiferente



(c) instável

Figura 1.5 – Tipos de equilíbrio em uma embarcação

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Quando o valor do empuxo é menor do que o peso do corpo, neste caso, a resultante destas forças estará dirigida para baixo e o corpo afundará, até atingir o fundo do recipiente. É isto o que acontece quando, por exemplo, se abandona uma pedra dentro d'água.

Quando o valor do empuxo é maior do que o peso do corpo, neste caso, a resultante destas forças estará dirigida para cima e o corpo sobe no interior do líquido. É isto o que acontece quando, por exemplo, se abandona um bloco de madeira no interior de um líquido. O bloco de madeira irá submergir até que a resultante das forças se iguale. Nesta posição o corpo flutuará em equilíbrio.

Destas considerações pode-se concluir que, quando um navio está flutuando em equilíbrio, ele está recebendo um empuxo cujo valor é igual ao seu próprio peso, isto é, o peso do navio está sendo equilibrado pelo empuxo que ele recebe da água.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

1.4. Equilíbrio e Metacentro

Uma unidade flutuante se encontra em estado de equilíbrio enquanto as condições internas (carregamento) e externas (vento, ondas, etc.) não se alterarem. Quando um ou mais destes parâmetros mudarem, a unidade também irá mudar para uma nova condição de equilíbrio e lá permanecer até que algum parâmetro mude novamente. Portanto, o estudo da estabilidade é o estudo da condição de equilíbrio na qual a embarcação se encontra.

O tipo de equilíbrio de um corpo flutuante, ou seja, a estabilidade, será definido pela forma como variam as forças que atuam sobre este corpo quando é deslocado da sua posição inicial. Como as principais forças que atuam sobre um corpo flutuando são o peso e empuxo, são estas que precisam ser analisadas. A Figura 1.5 apresenta os três tipos de equilíbrio em uma embarcação.

Analisando-se mais atentamente a Figura 1.5 (a), nota-se que há duas forças que agem sobre a embarcação: força de peso atuando em G e força de empuxo atuando em B. Nesta figura o equilíbrio é estável, porque a força de empuxo está desalinhada da força de peso causando um momento de retorno. Considerando que o casco do navio está submerso na água, o volume deslocado está gerando a força de empuxo cujo ponto de aplicação B está à direita de sua linha de centro.

Se a altura de G aumentar até que as duas forças se alinhem, mantendo-se a embarcação na mesma posição submersa, o ponto é o metacentro (M), que representa um equilíbrio indiferente mostrado na Figura 1.5 (b). Havendo um metacentro e conhecendo-se a posição de G é possível determinar o braço de retorno (GZ) e o momento de retorno por simples trigonometria. A Figura 1.5 (c) mostra o tipo de equilíbrio instável, porque o momento causado pelo desalinhamento das forças de empuxo e peso faria o navio inclinar ainda mais.

1.4.1. Método dos Pequenos Ângulos Para Cálculo do Metacentro

A existência do metacentro M, ou seja, um ponto fixo por onde sempre passe a vertical do empuxo para qualquer ângulo de inclinação só ocorrerá de fato para um volume submerso que tenha uma forma mais simples, como por exemplo, um cilindro flutuando, considerando o giro em torno do seu eixo longitudinal. Apesar disto, constata-se que mesmo para formas submersas complexas a trajetória de B se assemelha a um arco de círculo para uma certa faixa de pequenos ângulos. A faixa efetiva de ângulos na qual a aproximação é válida será maior quanto mais o volume submerso se assemelhar a um cilindro, na direção de inclinação em questão. O metacentro é então o centro de curvatura, para inclinações infinitamente pequenas, da curva que o centro de carena descreve para pequenas variações do ângulo de inclinação.

A Figura 1.6 representa graficamente como é feito o cálculo do metacentro de B, quando a embarcação está inclinada, de acordo com o método dos pequenos ângulos. Assume-se que B gira em torno de um ponto fixo e calcula-se o raio metacêntrico (BM) para aquela posição de B, conforme mostrado na equação 1.2. Com as coordenadas de B e o raio metacêntrico (BM), sabe-se as coordenadas do metacentro (M). Com a posição de M determinada, calcula-se o braço de retorno (GZ), mostrado na Figura 1.6. A equação 1.3 mostra o cálculo do braço de retorno (GZ) e a equação 1.4 mostra o cálculo do momento de retorno (Mr).

$$BM = \frac{I}{\nabla} \tag{1.2}$$

$$GZ = GM \cdot sen\theta \tag{1.3}$$

$$Mr = \Delta \cdot GM \cdot sen\theta \tag{1.4}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

I	Momento de inércia
∇	Volume total submerso
BM	Raio metacêntrico
θ	ângulo de adernamento da embarcação
GM	distância entre o M e o CG
GZ	braço de retorno
Δ	Peso total da embarcação
Mr	Momento de retorno ou de restauração

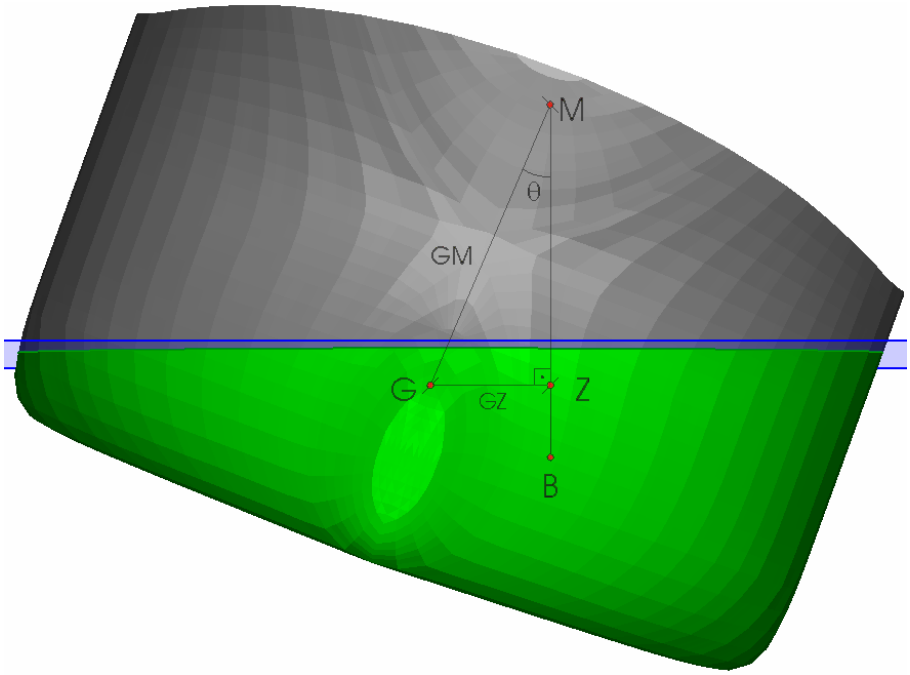


Figura 1.6 – Método dos pequenos ângulos para o cálculo do momento de retorno

O momento de inércia I é matematicamente definido, para a área de linha d'água, como sendo o somatório do produto de cada porção desta área pelo quadrado da sua distância até o eixo de giro da área como um todo. A inércia da área de linha d'água quantifica o montante desta área e o seu grau de afastamento do eixo de giro, ou seja, o quanto o volume em torno da linha dágua se modifica e o centro de empuxo deste volume se desloca lateralmente quando a unidade inclina.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

1.5. Organizações internacionais de Segurança Marítima [9]

As entidades estatutárias são órgãos legislativos cujas regras, critérios e procedimentos devem ser atendidos por força de lei. Elas certificam as embarcações. No âmbito marítimo internacional estas entidades estão agrupadas da seguinte forma:

- *País de Registro*: Toda embarcação é registrada num país, denominado "Bandeira" desta embarcação, cujos regulamentos devem ser atendidos.
- *Área de operação*: São entidades governamentais responsáveis pela fiscalização das embarcações operando em suas águas territoriais e visam basicamente segurança, tráfego e poluição.
- *Acordos Internacionais*: Acordos efetuados entre países que registram plataformas ou abrigam atividades offshore. A principal é a International Maritime Organization (IMO), braço da ONU, que elabora e revisa regulamentos específicos para embarcações móveis engajadas em atividades petrolíferas, e do qual o Brasil é signatário.

Sociedades Classificadoras são entidades privadas e independentes que podem classificar e certificar o projeto, a construção e operação de embarcações. Têm a função de avalista para as seguradoras e controle de qualidade para o armador.

Dentre as entidades estatutárias e sociedades classificadoras, são estas cujos critérios podem ser usados por uma condição de carregamento, implementadas no Sstab:

- DNV 2001 (Det Norske Veritas**)**
- IMO/MODU 2001
- ABS 2004 (American Bureau of Shipping**)**
- NMD1992 (Norwegian Maritime Directorate**,** Amendment March 1999)
- IMO/A18-Res 749 General Criteria
- IMO/A18-Res 749 Weather Criteria
- Marpol 73/78 Regulation 25ª (Damaged) [10]

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Isto significa que cada condição de carregamento estará sujeita a uma ou mais destas normas.

1.5.1. Critérios de Estabilidade Intacta e em Avaria

O conceito de estabilidade remete a "limites aceitáveis de inclinação e afundamento". Estes limites estão bem definidos pelas organizações descritas anteriormente e serão aplicados em fumção dos diferentes critérios das normas citadas. Estes critérios podem ser agrupados em:

- *Estabilidade Intacta*: é a análise da estabilidade da embarcação apenas sob a ação do vento (Capítulo 4).
- *Estabilidade em Avaria*: é a análise da estabilidade da embarcação após ter sofrido uma avaria (Item 5.1) com conseqüente embarque de água (ou perda de empuxo) mais a ação do vento.

Na prática isto significa que os critérios para uma condição de carregamento intacta são diferentes dos de uma condição de carregamento avariada.

1.5.2. Classificação por Tipo de embarcação

Nas análises de estabilidade executadas com o programa Sstab, são utilizados quatro tipos distintos de embarcação:

- barcaça
- estabilizada por coluna
- auto-elevatórias
- navios

Os critérios utilizados regulamentam apenas estes quatro tipos de embarcação e foram deixados de fora qualquer outro tipo. Obviamente, cada tipo de embarcação está sujeita a um conjunto diferente de critérios.

1.5.3. Filosofia dos Regulamentos

O IMO-MODU tem regras de estabilidade relativamente simples e que são a base das regras das Sociedades Classificadoras.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

As regras, tanto da IMO-MODU quanto das Sociedades Classificadoras, direcionam os regulamentos segundo parâmetros indicativos dos riscos operacionais, conforme resumido a seguir.

Local de operação:

- *Irrestrito*: Prevê a operação em qualquer local dentro das áreas petrolíferas comumente exploradas. Considera que o risco é maior do que em locais de operação restritos, pois engloba regiões com condições ambientais severas como Mar do Norte e o Golfo do México.
- *Restrito*: Prevê a operação apenas em uma região definida, por exemplo, a Bacia de Campos, e considera o risco específico da região, limitado a um patamar mínimo.

Está implícito nas regras que condições operacionais permanentes e transitórias, e os calados a elas associados, implicam em níveis de risco e critérios diferenciados, ou seja:

- Calado ou condição permanente: calados nos quais a unidade vai passar a maioria da sua vida útil e, portanto, vai estar sujeita a maiores riscos. Também chamado de calados principais, usualmente: operação, trânsito, sobrevivência, etc.
- Calado ou condição temporária: calados e que a unidade atinge temporariamente, quando passa de uma condição principal para outra. O risco assumido é bem menor. Ex: Passar do calado de trânsito para o de operação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

2
O Sstab

Para entender este trabalho, é necessário entender o programa em que os algoritmos foram implementados.

O Sstab [1] representa o esforço conjunto de duas instituições e equipes de desenvolvimento: o CENPES e o Tecgraf, Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da PUC-Rio, ambas localizadas no Rio de Janeiro. Atualmente ele é o programa de estabilidade naval oficial da PETROBRAS e é utilizado em todos os sistemas flutuantes instalados na Bacia de Campos, neste caso servindo também como um programa de emergência.

O objetivo deste trabalho foi adicionar novas ferramentas e melhorias ao programa, as quais já estão sendo utilizadas pelos engenheiros do CENPES. Essas melhorias visaram principalmente avaliar modelos de unidades flutuantes de forma integrada e automática.

O programa é dividido em módulos, cada um sendo responsável por uma determinada tarefa ou por realizar determinadas verificações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

2.1.
Sistema de unidades

Os dados do Sstab são descritos em sistemas de unidades normalmente adotados em ambientes de projeto e operação de unidades flutuantes, com as medidas de comprimento dadas em *metros*, as medidas de tempo dadas em *segundos*, as medidas de massa dadas em *toneladas* e medidas de força em *toneladaforça*.

2.2.
A modelagem geométrica

O Sstab não particulariza ou restringe o modelo geométrico a um tipo especial de sistema flutuante, podendo ser usado com modelos de navios, plataformas semi-submersíveis ou mesmo sistemas compostos por mais de um

casco, sem restrições. Contudo, o usuário deve ter em mente que o Sstab trata todos os corpos modelados como se estivessem rigidamente conectados, fazendo com que os movimentos que os compartimentos experimentam sejam descritos por seis graus de liberdade (três deslocamentos e três rotações).

2.3. Sistemas de coordenadas

Dois sistemas de coordenadas são utilizados pelo Sstab: o *Sistema Global* fixo de referência e o *Sistema Local* móvel da unidade. O Sistema Local define o plano de quilha (*Keel Plane*), que é paralelo ao Plano XY Global quando a unidade está em calado paralelo. A Figura 2.1 mostra o desenho dos eixos do programa em uma vista em perspectiva de um sistema flutuante inclinado. Na Figura 2.1 o Sistema Global (XYZ) é desenhado na cor preta e o Sistema Local (xyz), que se inclinou com a unidade na Figura, é desenhado na cor azul, com origem na quilha da unidade. Assim como os sistemas de referência, todos os dados exibidos na cor preta referem-se ao Sistema Global, enquanto que os dados exibidos na cor azul são referidos ao Sistema Local.

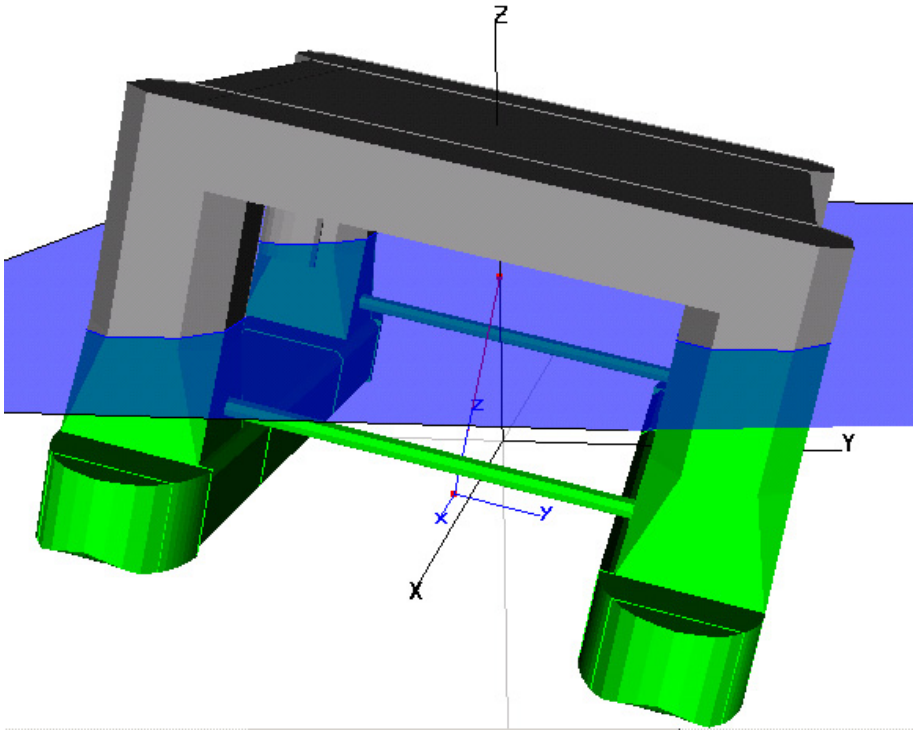


Figura 2.1 - Vista em perspectiva dos eixos de coordenadas tratadas no Sstab.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

O Sistema Global corresponde ao eixo de modelagem que foi usado como referência no modelador geométrico utilizado, MG [4], devendo forçosamente possuir o eixo Z apontando para o sentido contrário ao da força da gravidade. O Sistema Local é fixo ao plano de quilha da unidade.

A forma mais comum de fazer uma modelagem com o MG para análises de estabilidade com o Sstab é dispor a unidade de modo a se ter a quilha na seção do centro da embarcação (meia-nau) nas direções longitudinais e transversais, com o plano da quilha cotado em Z igual a zero, ou seja, o vértice mais baixo do modelo da plataforma ter coordenada Z igual a zero.

2.4. Conceitos básicos de modelagem no Sstab

Ao longo deste documento, serão utilizados termos específicos do meio naval e tornam-se necessários alguns esclarecimentos para um melhor entendimento do trabalho realizado, no que diz respeito ao Sstab.

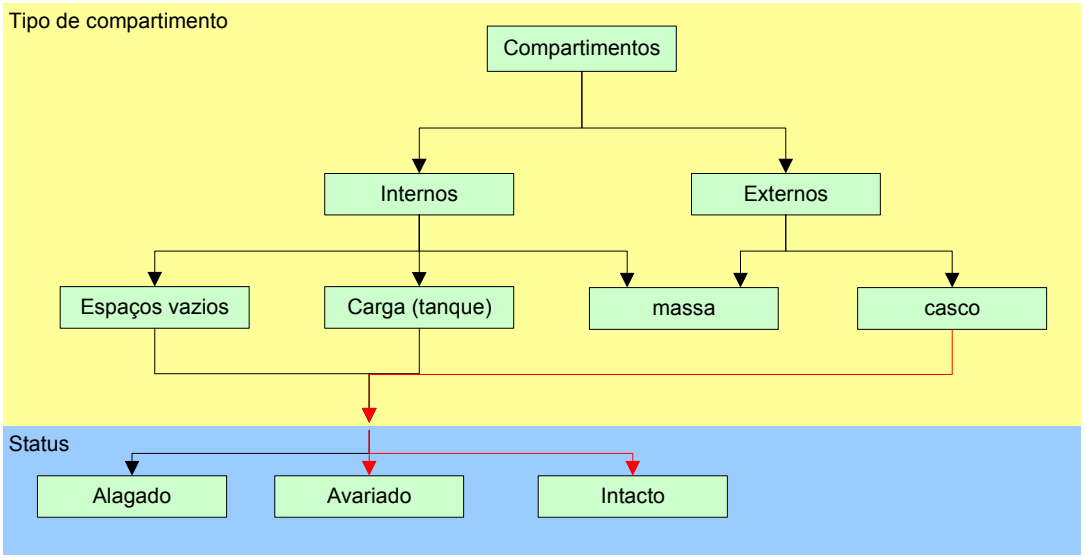


Figura 2.2 – Diagrama de tipos de compartimento

A Figura 2.2 mostra os possíveis tipos de compartimentos existentes e os possíveis *status* que estes podem assumir. Um compartimento de casco só pode estar avariado ou intacto. Já o compartimento de massa não possui *status* nenhum. Todos os outros compartimentos podem estar intactos, alagados ou avariados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

2.4.1.
Compartimentos internos e externos

O modelo geométrico do sistema flutuante é formado por um conjunto de compartimentos independentes, cada um com a sua fronteira definida individualmente. Os compartimentos podem ser *internos*, que correspondem aos que não entram em contato com o meio fluido externo, ou *externos*, ou seja, aqueles que compõem a superfície do casco da unidade.

Compartimentos de casco *(Hull compartments)* são os volumes externos responsáveis pela flutuação. Somente aqueles que não estão contidos nesta categoria podem causar a variação de peso (em configurações intactas) ou deslocamento da unidade, podendo conter fluidos.

Os compartimentos internos podem ser espaços vazios, tanques de lastro, tanques de água potável, tanques de diesel, tanques de óleo, tanques de lama (utilizada na perfuração de poços), paiol de amarras, etc. Os compartimentos externos de uma plataforma semi-submersível são os *pontoons*, os contraventamentos, os *blisters*, as colunas de sustentação, os elementos que formam a base do convés, etc. Em navios-tanque, normalmente existem tanques de óleo e o casco é geralmente modelado como um único volume externo. Desta forma, podem-se classificar os compartimentos modelados em duas categorias básicas:

1. *Internos*: tanques de lastro, tanques de água potável, tanques de diesel, espaços vazios, etc.

2. *Externos*: os compartimentos que formam o casco e possíveis tanques de massa.

2.4.2.
Status do Tanque Intacto/Avariado/Alagado

Outra classificação possível refere-se ao estado de cada compartimento. Os compartimentos podem estar *intactos*, conferindo empuxo ou peso ao sistema, ou podem estar *avariados*, com a conseqüente perda de flutuação. Eles também podem estar *alagados*, causando o aumento de peso de fluidos internos no sistema de carga da unidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Os compartimentos externos só podem estar ou intactos ou avariados, e os compartimentos internos podem estar intactos, avariados ou inundados. Desta forma, podemos fazer uma segunda categorização dos compartimentos com base no seu estado (*status*):

1. *Intactos:* Os dois tipos de compartimentos intactos são os compartimentos de casco que proporcionam empuxo, influenciando o deslocamento do sistema, e compartimentos de carga que proporcionam peso, influenciando o peso total do sistema.

2. *Alagados:* Estes são os compartimentos internos vazios que, quando inundados, aumentam o peso total do sistema, da mesma forma que compartimentos intactos de carga. Compartimentos alagados não possuem superfície livre relacionada com o nível da água do mar, pois o alagamento é interno ao modelo.

3. *Avariados:* Os compartimentos de casco avariados perdem o empuxo abaixo do nível da água do mar, reduzindo o empuxo total do sistema. Se um compartimento interno está avariado, o peso que ele poderia gerar pela presença de líquido no seu interior se perde, reduzindo o peso total, e um volume negativo abaixo do nível da água do mar é calculado, também reduzindo o empuxo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

2.4.3. Compartimentos de carga

Outra classificação que a modelagem dos tanques do Sstab apresenta é a que indica a capacidade de carga que os compartimentos podem ter, dada pela presença de fluido em configurações intactas. Os tanques classificados como compartimentos de carga (*Load compartments*) devem ser internos.

Para tanto, o Sstab necessita da definição de uma posição 3D, chamada de *Sensor Position*, referente à posição do sensor de alagamento, normalmente situada a alguns centímetros da face do fundo do tanque. O MG gera automaticamente as *Sensor Positions* na menor coordenada Z de cada tanque. Este parâmetro é importante para os operadores de lastro, uma vez que a leitura das alturas dos sensores é feita diretamente do painel de operações, para que possam alterar o lastro informando o nível de água em cada tanque com a mesma medida

do Sstab. O usuário também pode informar o volume, peso, a porcentagem de uso ou mesmo a altura de líquido.

2.4.4. Compartimentos de massa

Uma outra classificação que os volumes podem assumir é a classificação por compartimento de massa (*Mass Compartments*), que está diretamente relacionada com os pesos e momentos de inércia que os volumes podem apresentar para o deslocamento do sistema global e para a distribuição de massa do sistema.

Um compartimento de massa é um pouco diferente dos compartimentos de carga no sentido de que não apresenta fluído interno e efeito de superfície livre. O peso relaciona-se com a distribuição de massa, que pode estar uniformemente distribuída em todo o domínio, no caso de *Internal Mass Compartments* (compartimentos de massa internos), ou pode estar distribuída nas fronteiras, no caso de *Hull Mass Compartments* (compartimentos de massa do casco).

Isso significa que todo volume que pertence a uma classe do tipo *Mass Compartment* será considerado como um ítem de peso.

2.4.5. Compartimentos de casco

Cada compartimento pode ser individualmente identificado como um compartimento de casco (*Hull Compartment*). Uma vez que um volume é classificado como compartimento de casco ele passa a fornecer empuxo ao sistema, de acordo com a sua porção submersa. Um volume não pode ser ao mesmo tempo um compartimento de carga/massa e um compartimento de casco. Desta forma, mesmo quando um compartimento de carga é o limite entre o interior da plataforma e a água do mar, um volume para representar seu empuxo em um compartimento de casco separado deve ser definido. Geralmente um compartimento externo contém mais do que um compartimento interno de carga (como é o caso de plataformas semi-submersíveis, onde se pode criar um único volume de casco que envolve todos os compartimentos de carga).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

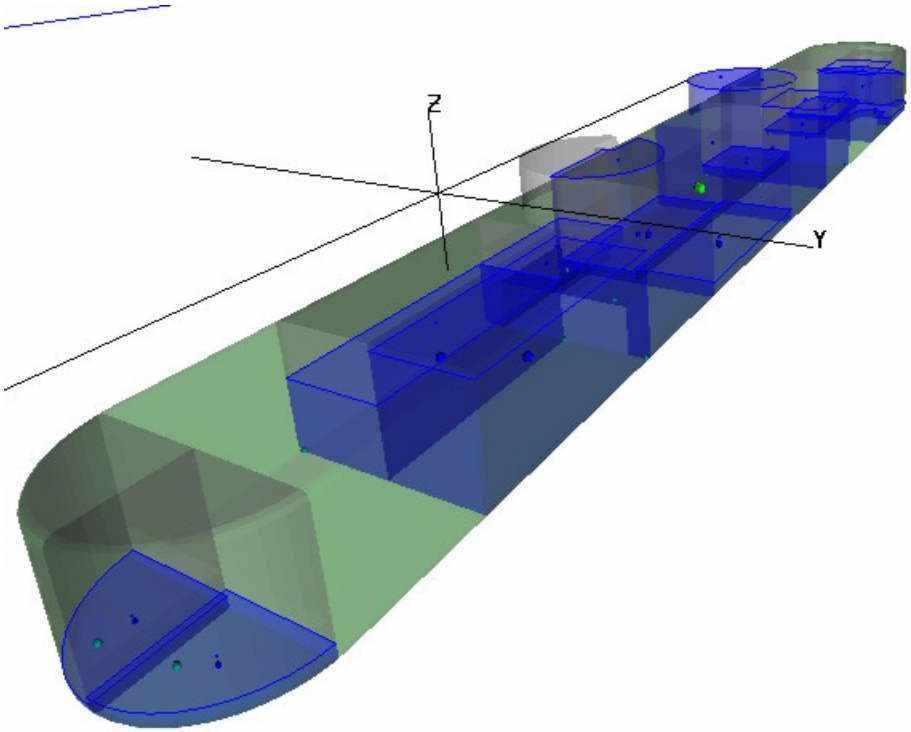


Figura 2.3: Modelo de casco envolvendo vários compartimentos internos.

Este tipo de modelagem para representar o empuxo funciona como uma *pele exterior* e geralmente envolve vários tanques internos, como de lastro, de óleo, etc., que podem compartilhar várias superfícies com esses tanques.

Em uma configuração intacta, os compartimentos de casco apenas influenciarão o empuxo do sistema com o cálculo do volume da parte que está abaixo do nível do mar.

A Figura 2.3 mostra um exemplo de casco envolvendo vários outros compartimentos.

2.4.6. Tanques de lastro e de carga

Segundo as classificações descritas até aqui, pode-se classificar os tanques de lastro, os tanques de água potável, os tanques de lama e os de óleo diesel ou petróleo como compartimentos internos e de carga. Os tanques de lastro intactos apenas influem no cálculo do peso e do centro de gravidade do sistema, que varia de acordo com a acomodação do fluido devido ao efeito da superfície livre (quando ativado).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Para simular um abalroamento de um tanque de carga, muda-se seu *status* para avariado e o Sstab se encarregará de computar a perda do peso de água interno a esse tanque, uma vez que a pressão hidrostática externa se igualou à interna, e descontará o empuxo desse tanque do total dado pelo compartimento do casco externo.

Supondo que se está simulando a avaria de um compartimento de carga vazio que esteja totalmente abaixo do nível da água, tem-se como resultado nenhuma perda de peso, devido à ausência de líquido interno, e uma perda de empuxo, que é subtraída do empuxo total.

2.4.7. Espaços vazios

Tanques que são modelados como espaços vazios (*pump rooms*, *chain lockers*, etc.) são classificados como internos e normalmente intactos, o que faz com que o Sstab ignore a presença desses tanques no cálculo do peso e do empuxo. Estes tanques são geralmente modelados para simular uma avaria ou um alagamento interno, o que é possível informando-se o estado do tanque.

Um tanque interno avariado elimina o empuxo que seria fornecido pela parcela abaixo da linha d'água apenas, não alterando o peso do sistema. Se um tanque interno é alagado, a capacidade de empuxo da plataforma permanece inalterada e o sistema de pesos é acrescido da quantidade de água que invadiu o tanque.

2.4.8. Permeabilidade

Por permeabilidade de um tanque entende-se a razão entre a quantidade volumétrica que preenche o tanque totalmente e o volume de água deslocado pela casca externa do tanque, se considerado como casco. Em outras palavras, a permeabilidade é a porcentagem de água que pode ocupar os espaços vazios de um tanque.

O volume a ser alagado de um compartimento raramente é igual ao seu volume geométrico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Por exemplo, num porão de cargas, apenas a parte não ocupada pela carga pode ser ocupada pela água; de modo semelhante, na casa de máquinas existe um certo volume que não pode ser alagado.

2.4.9. Pontos de alagamento

Definem-se as posições das aberturas ou *flooding points* (pontos de alagamento) no processo de modelagem, podendo-se conectar diversos pontos de alagamento a um único volume.

Um ponto de alagamento possui como parâmetros a posição 3D, o *status* de ativo ou inativo e o *status* de aberto ou fechado. Se um ponto de alagamento está inativo, o programa ignorará a sua existência em todas as situações. Se um ponto de alagamento estiver aberto, quando sua posição estiver abaixo da linha da água os tanques associados a ele serão enchidos até o nível da água do mar, adicionando um alagamento progressivo ao sistema.

2.4.10. Ponto crítico de alagamento

Por *ponto crítico de alagamento* (*Downflooding Point*) entende-se o ponto de alagamento mais baixo no casco que permite a entrada de água do mar no casco de um compartimento intacto devido à inclinação ou à submersão vertical (deslocamento em Z).

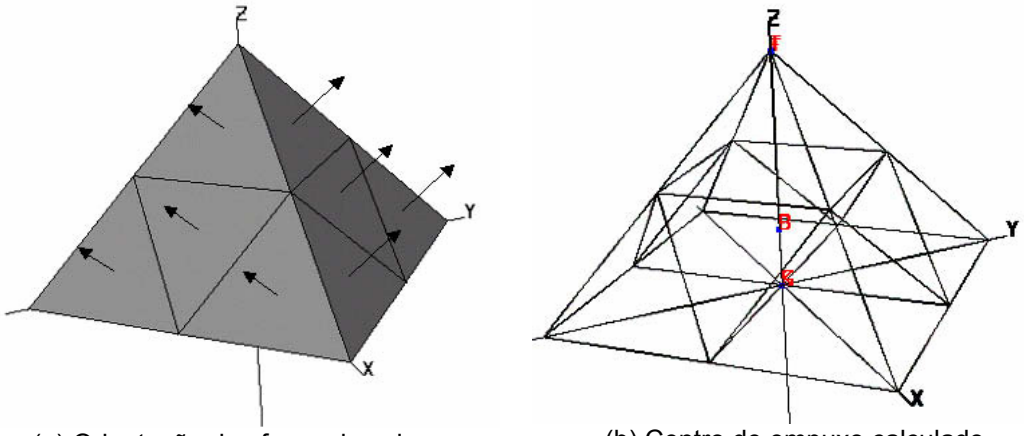
2.5. Cálculo do volume

O Sstab usa uma modelagem feita com a fronteira de cada compartimento sendo representada por um conjunto de faces, o que possibilita o uso do Teorema de Green para calcular áreas como integrais de linha e o Teorema de Stokes para calcular volumes como integrais de superfícies.

Para que os cálculos vetoriais feitos pelo Sstab estejam corretos, é necessário que as faces que formam os compartimentos tenham suas arestas orientadas de forma que a soma do produto vetorial de todos os pares de arestas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

adjacentes forneça um vetor orientado para o exterior deste compartimento, ou seja, a normal da face deve apontar para fora do volume.



(a) Orientação das faces do volume . (b) Centro de empuxo calculado

Figura 2.4: Cálculo do volume de um compartimento por integração das faces

A Figura 2.4 (a) mostra a modelagem de um compartimento piramidal com base quadrada, formado por triângulos orientados para fora. Supondo que o compartimento da Figura 2.4 (a) estivesse totalmente submerso, o Sstab calcularia o volume pela integração das contribuições individuais de cada uma das faces triangulares, fornecendo não apenas o valor escalar do volume mas também a posição do centro de carena B (ou centro de empuxo ou *buoyancy center*), mostrado na Figura 2.4 (b).

O volume de um tanque que se encontra parcialmente submerso é calculado com um "corte" do modelo, separando-se as faces totalmente emersas, as totalmente submersas e as parcialmente submersas. As faces totalmente submersas são integradas na totalidade de sua área, ou seja, considerando-se todas as suas arestas no cálculo do volume. As faces totalmente emersas são descartadas, e as parcialmente submersas são calculadas por um corte que separa as partes acima e abaixo da linha d'água, da maneira ilustrada pela Figura 2.5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

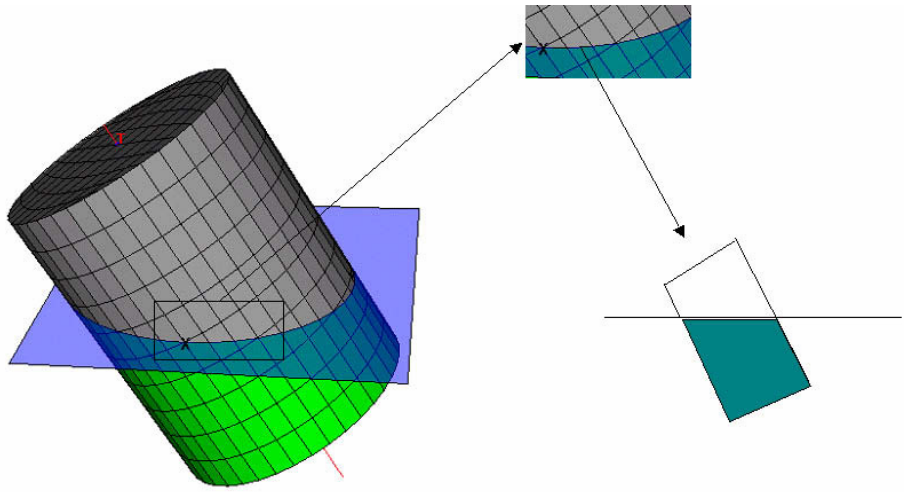


Figura 2.5: Cálculo do volume de um compartimento parcialmente imerso.

Destacando o cálculo de uma face que possui vértices acima e abaixo da linha d'água, a Figura 2.6 mostra a classificação dos vértices da face destacada da Figura 2.5. Seguindo a seqüência mostrada na Figura 2.6, o cálculo do volume se iniciaria pela aresta que conecta os vértices 1 e 2. Ao chegar à aresta 2–3, o Sstab a classifica como parcialmente imersa e determina a posição do vértice de corte 1 (em vermelho), calculando a contribuição desde o vértice 2 original até o vértice de corte 1. Em seguida a aresta 3–4 seria descartada, por estar totalmente emersa. Já a aresta 4–1 se encontra em situação semelhante à aresta 2–3, sendo determinada a posição do vértice de corte 2 (em vermelho), e completando-se a integração com a parcela 1–2 (ambos em vermelho) e a contribuição desde a posição do vértice 2 (em vermelho) até o vértice 1.

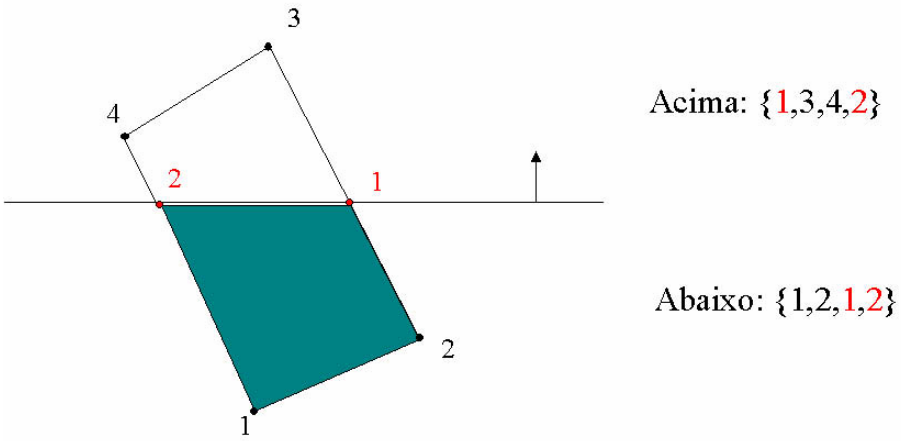


Figura 2.6: Cálculo do volume de um compartimento parcialmente imerso.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

2.6. Equilíbrio

A Figura 2.7 mostra os graus de liberdade relevantes para o cálculo do equilíbrio. Rotações de azimute e movimentos de *SURGE* e *SWAY* não são considerados relevantes para o equilíbrio estático. O azimute só é importante em análises de avarias, quando o ângulo crítico de inclinação não é mais medido em relação ao eixo X global.

O Sstab pode determinar o equilíbrio de três formas distintas:

1. Equilíbrio de forças verticais, momento de *trim* e *banda*;
2. Equilíbrio de forças verticais e momento de *trim*;
3. Equilíbrio de forças verticais apenas.

O primeiro tipo consiste no equilíbrio genérico, no qual todas as forças e momentos devem estar em equilíbrio. A posição relativa inicial da linha d'água e o sistema flutuante definem os momentos e as forças não equilibradas, então a unidade é movimentada até se obter a posição de equilíbrio. O primeiro tipo de equilíbrio é usado para obter o estado flutuante correto da unidade para cada situação intacta e de avaria. O Sstab busca uma posição vertical para o modelo (direção Z global) que faz com que a força total de empuxo, dada pelos volumes do casco que estão abaixo da linha d'água, seja igual ao peso total do sistema. Ao mesmo tempo é feita a busca do equilíbrio de momentos em torno dos eixos X e Y globais, que traduzem o equilíbrio de momentos transversais e longitudinais. Cada passo na busca do equilíbrio é avaliado por uma matriz de rigidez hidrostática, construída a cada iteração pelo método das diferenças finitas. A matriz de rigidez hidrostática consiste em uma matriz 3x3 que é construída a cada passo, realizando pequenos movimentos em cada direção de equilíbrio. Com um pequeno movimento na direção vertical, o programa calcula a mudança de deslocamento e a variação dos momentos de banda e *trim*, definindo os três elementos da primeira linha da matriz. As outras duas linhas são construídas com pequenas mudanças nos ângulos de banda e *trim* a partir da posição atual. Essa busca converge quando as coordenadas possuem uma diferença menor que uma determinada tolerância, proporcional ao tamanho total do modelo. Ao final de algumas iterações o processo converge para uma solução que atende aos três critérios de convergência.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

O segundo tipo de equilíbrio consiste em, para um dado ângulo de banda, obter-se o equilíbrio do momento de deslocamento e momento. Este tipo de equilíbrio é usado na construção dos diagramas de estabilidade, que representam os critérios de estabilidade intacta, avariada ou alagada (capítulo 5). Este tipo de equilíbrio pode ser realizado para ângulos diferentes de azimute, para se obter os diagramas de eixo crítico.

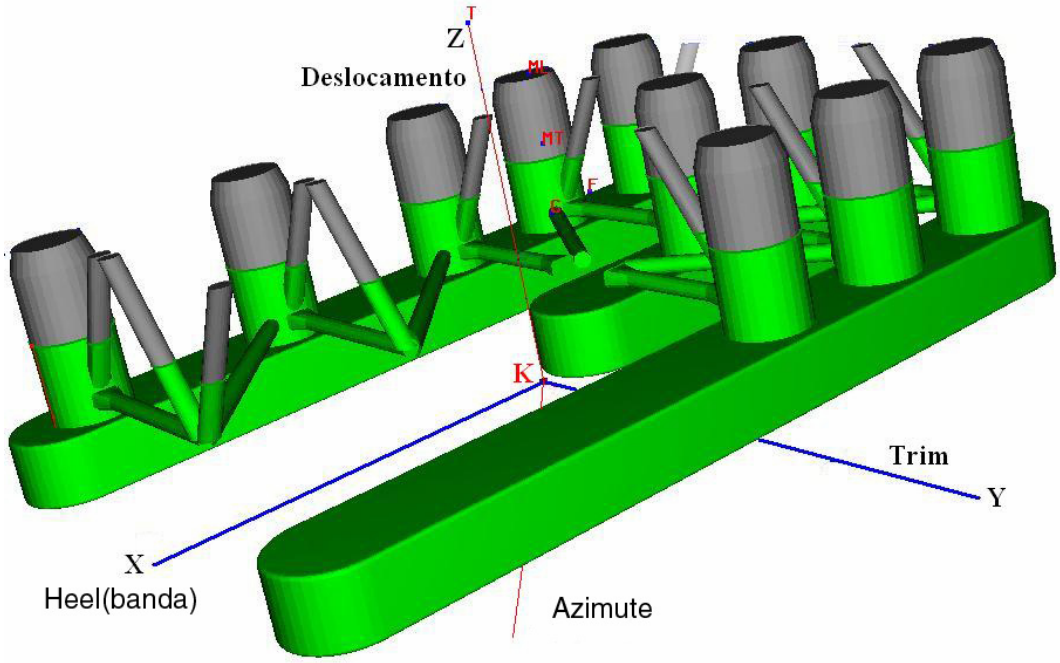


Figura 2.7: Graus de liberdade usados pelo Sstab no cálculo do equilíbrio.

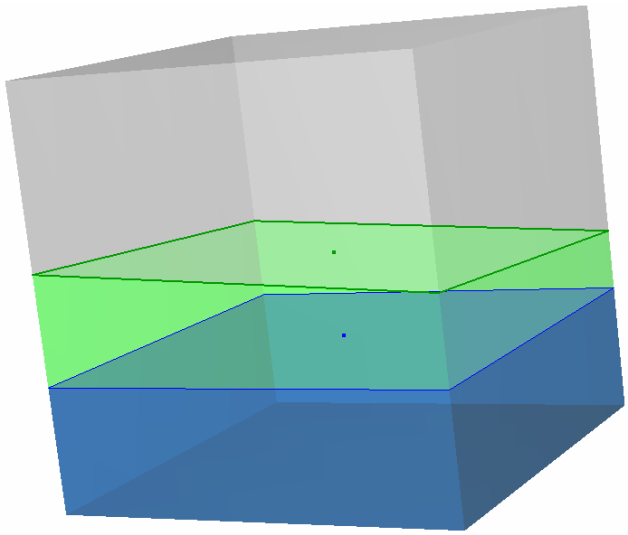
O terceiro tipo de equilíbrio corresponde apenas ao equilíbrio de empuxo e peso, sem a minimização dos braços de alavanca, ou seja, sem considerar o equilíbrio dos momentos de *trim* e banda. O método aqui utilizado emprega uma técnica que computa a posição seguinte de equilíbrio avaliando a matriz de rigidez hidrostática construída pelo método das diferenças finitas. O vetor da posição seguinte é resultado do produto do inverso da matriz de rigidez pelo vetor de erro atual.

Se a posição de equilíbrio não estiver longe da posição inicial e se não houver mudanças significativas na área da linha d'água, o equilíbrio é obtido com poucas iterações.

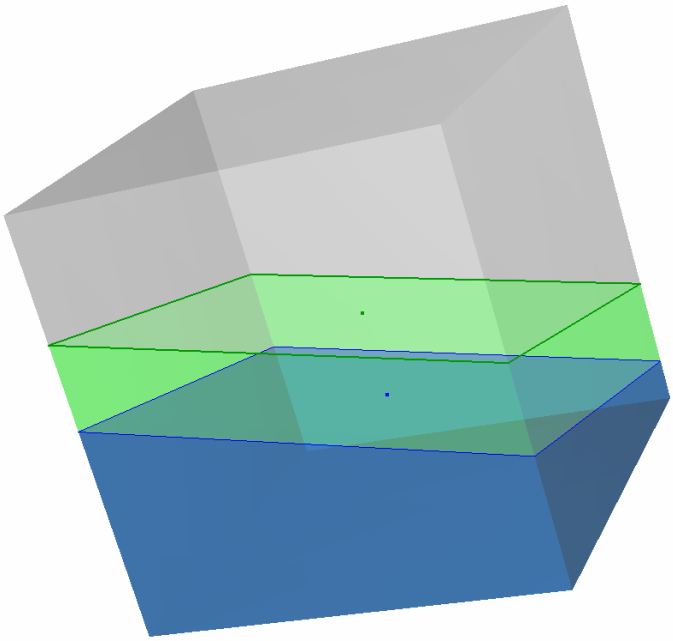
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

2.6.1. Efeito de superfície livre

A superfície livre de líquido dentro de um compartimento ocorre quando o compartimento está parcialmente cheio e a área da superfície de líquido do compartimento varia com a inclinação da embarcação. Um deslocamento do KG do compartimento (distância entre a quilha e o centro de massa do compartimento, ou seja, a posição do centro de massa do compartimento em coordendas locais) ocorre quando há uma mudança na inclinação da embarcação. Esta mudança no KG devido à superfície livre do líquido dentro do compartimento chama-se efeito de superfície livre.



(a) sem efeito de superfície livre



(b) com efeito de superfície livre

Figura 2.8: Equilíbrio com e sem efeito de superfície livre.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Já para um compartimento completamente cheio ou vazio, este efeito não ocorre.

A Figura 2.8 mostra uma comparação do equilíbrio com e sem levar-se em conta o efeito de superfície livre dos líquidos dentro dos compartimentos. Na Figura (a) o equilíbrio a 4,8 graus de inclinação foi obtido sem alterações de superfície livre. Na Figura (b), em que o efeito de superfície livre foi aplicado, a posição de equilíbrio foi obtida com 15,9 graus de inclinação.

A mudança nas coordenadas do KG de um tanque causada pelo efeito de superfície livre é calculada com base nas propriedades da área de cada compartimento de carga que estiver parcialmente preenchido, apenas para tanques com a porcentagem de preenchimento no intervalo entre 5% e 95%.

2.6.2. Altura Metacêntrica

Considerando um casco com geometria simétrica em relação ao eixo longitudinal que inclinou de um determinado ângulo de banda, a linha vertical que passa pelo novo centro de empuxo B1 interceptará a vertical anterior (em calado paralelo) exatamente no metacentro transversal. Com raciocínio análogo, porém impondo rotações de *trim*, define-se o metacentro longitudinal. A Figura 2.9 mostra o cálculo geométrico do metacentro transversal.

O Sstab usa as expressões derivadas da matemática de pequenos ângulos para definir as alturas metacêntricas, que são parâmetros para a aferição da condição de equilíbrio naquele momento e a comparação com as curvas de KG máximo (vide Capítulo 5). Podem-se definir então as distâncias verticais do centro de empuxo até os metacentros como:

$$BMc_T = \frac{I_T}{\nabla} \tag{2.1}$$

$$BMc_L = \frac{I_L}{\nabla} \tag{2.2}$$

onde I_T é o momento de inércia transversal da área de linha d'água, I_L é o momento de inércia longitudinal da área de linha d'água e ∇ é o volume do deslocamento da plataforma.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

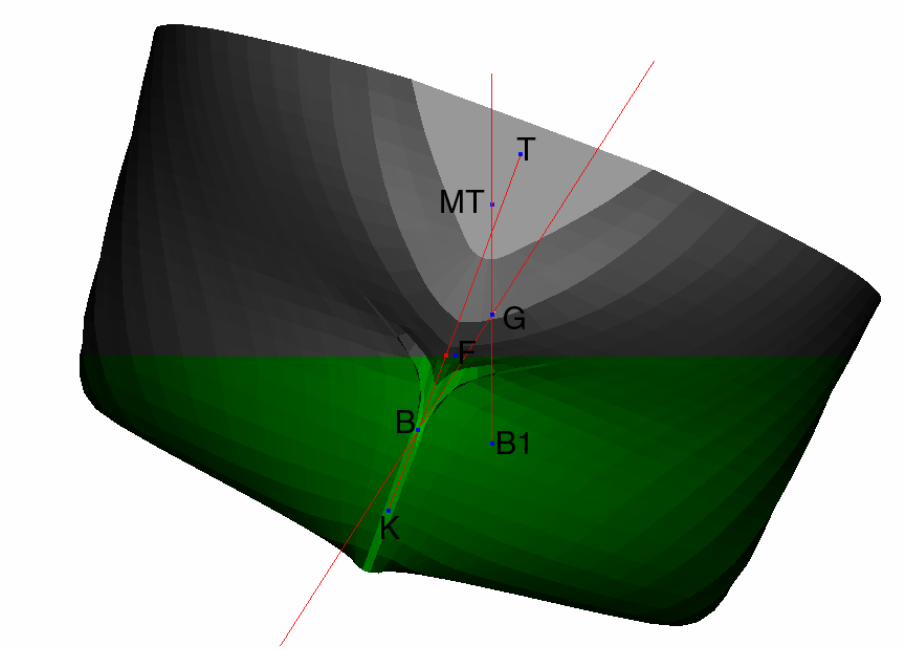


Figura 2.9: Cálculo geométrico do metacentro transversal.

O Sstab busca o equilíbrio de forma geométrica sem considerar as margens de altura metacêntrica determinada por norma. Deve ser iniciativa do usuário observar que o equilíbrio é instável quando a altura metacêntrica é negativa ou baixa, ou seja, que o centro de massa G esteja acima do metacentro M.

2.6.3. Alagamento

O alagamento pode estar associado à entrada de água ou a uma ruptura interna de alguma tubulação de fluido. No primeiro caso teremos uma perda de empuxo e no segundo um acréscimo de peso, podendo ser agravado pelo efeito da superfície livre. O alagamento pode levar às seguintes conseqüências:

• Aumento de calado;

• Variação de caimento, se o compartimento alagado estiver avante ou a ré do centro de flutuação;

• Inclinação transversal, se o compartimento alagado for assimétrico em relação ao plano de mediana ou se a perda de estabilidade for tal que o faça cair numa situação de estabilidade negativa;

• Variação na estabilidade, devido tanto à variação possível na ordenada do centro de gravidade como às variações nos parâmetros hidrostáticos, centro de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

carena e posição do metacentro, ambos dependentes do calado, e este também em função da área intacta da linha d'água.

O efeito combinado desses fatores leva o sistema flutuante a uma nova posição de equilíbrio, que pode eventualmente não ser estável se corresponder a uma condição em que o alagamento possa prosseguir através de volumes não estanques da unidade. Há efetivamente um limite para a condição final de estabilidade, além do qual o sistema flutuante pode estar seriamente comprometido.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

3
Definição automática de carregamento ótimo

A formulação inicial mostrada neste capítulo foi feita por Sérgio Álvares Maffra[11] e parte da implementação foi feita por Anderson Pereira, tendo sofrido algumas modificações ou correções para serem utilizadas no Sstab. As funcionalidades de minimizar superfície livre, segregar por tipo de líquido e minimizar a curva de força cortante também foram adicionadas. Mudanças foram feitas para permitir o uso em casos de avaria e alagamento.

Uma embarcação está em equilíbrio quando as forças que agem sobre ela e os momentos gerados por estas estão em equilíbrio. Portanto, empuxo, peso e forças externas, assim como os momentos gerados por estas devem estar em equilíbrio. Ventos e correntes marítimas são exemplos de forças externas.

O carregamento de uma unidade flutuante neste contexto é a carga de líquidos que pode ser armazenada em seus compartimentos. Neste capítulo, explica-se a utilização da programação linear [2] para realizar carregamento automático de uma unidade flutuante e como este tipo de programação resolve um problema não linear. De modo geral, o algoritmo é um procedimento iterativo que, a cada passo, tenta resolver um problema não linear usando a solução dada por uma aproximação linear, até que convirja para uma solução dentro da tolerância. Especificamente, nos casos tratados neste trabalho, a não linearidade está no fato que as possíveis coordenadas do centro de gravidade (LCG e TCG) variam durante o processo de carregamento e descarregamento da plataforma. Torna-se necessário fazer uma aproximação linear ao considerar cada tanque uma carga pontual e assim o equilíbrio da unidade pode ser alcançado, calculando a variação de volume de cada tanque. Após obter o volume de cada tanque, computam-se as verdadeiras coordenadas do centro de gravidade de cada tanque, a partir de sua geometria. Convergência é obtida quando não há mais uma variação significativa entre as coordenadas da carga pontual consideradas e a verdadeiras coordenadas do centro de gravidade de cada tanque. Usa-se a minimização da variação de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

líquido em cada tanque como a função objetivo e assegura-se um deslocamento mínimo de líquido.

O algoritmo proposto ainda possui uma heurística alternativa para minimizar a tensão e esforço cortante ao longo da estrutura. Partindo do princípio que a distribuição dos tanques tenha um formato similar ao casco, faz-se uma distribuição homogênea de líquido ao longo dos tanques de carga, de óleo e de lastro.

Ainda existe uma segunda heurística para minimizar a área de superfície líquida dentro dos tanques, que consiste em tentar concentrar a maior quantidade de líquido no menor número de tanques possíveis.

Estes algoritmos foram implementados no programa Sstab e provaram sua eficiência no desenvolvimento de projetos de navios e plataformas de petróleo (Bacia de Campos, Rio de Janeiro, Brasil) e no desenvolvimento de planos de emergência realizados pelas classificadoras DNV, ABS.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

3.1. Programação Linear

O algoritmo proposto utiliza programação linear para computar a configuração de equilíbrio da embarcação. De modo geral, a programação linear tem dois componentes: um conjunto de restrições lineares dadas como inequações e uma função que deve ser maximizada ou minimizada. Um exemplo de programação linear é dado pelas equações 3.1 a 3.6.

Minimizar / Maximizar $c^t x$ (3.1)

Sujeito a:

$$a_i^t x \geq b_i \qquad i \in M_1 \qquad (3.2)$$

$$a_i^t x \leq b_i \qquad i \in M_2 \qquad (3.3)$$

$$a_i^t x = b_i \qquad i \in M_3 \qquad (3.4)$$

$$x_j \geq 0 \qquad j \in N_1 \qquad (3.5)$$

$$x_j \leq 0 \qquad j \in N_2 \qquad (3.6)$$

Nestas equações, as letras maiúsculas representam vetores e as letras minúsculas representam escalares. X representa o vetor que contém todas as variáveis que devem ser determinadas pelo programa e x representa uma única variável. C^t representa o vetor de pesos que cada uma das variáveis de X pode ter

(equação 3.1). Restrições de igualdade e desigualdade são aceitas. Os três primeiros conjuntos de restrições (*M1, M2 e M3*) contém o vetor *A* e o escalar *b*, que representam as informações de valores associados às restrições.

Uma solução possível deve maximizar ou minimizar a função objetivo (3.1) e respeitar todas estas restrições do problema estabelecidas (3.2 a 3.6). Para se obter a solução de nosso problema linear, foi utilizada a biblioteca GLPK[1].

3.2. Programação linear aplicada ao carregamento de uma embarcação

Das forças descritas acima, apenas o peso resultante do carregamento de líquido nos tanques da embarcação pode ser controlado. Logo, as variáveis utilizadas para realizar o carregamento automático de líquidos devem ser a quantidade de líquido em cada tanque, mais especificamente, a variação de volume dentro de cada tanque. Dadas as variáveis do problema, as restrições de equilíbrio e limites são dadas são descritas pelas equações 3.7 a 3.12.

$$\sum (V_i + \Delta V_i)\rho_i g = B - W \qquad i \in T \qquad (3.7)$$

$$\sum (V_i + \Delta V_i)\rho_i g X_i = -M_L \qquad i \in T \qquad (3.8)$$

$$\sum (V_i + \Delta V_i)\rho_i g Y_i = -M_T \qquad i \in T \qquad (3.9)$$

$$V_i + \Delta V_i < V_i^{\max} \qquad i \in T \qquad (3.10)$$

$$V_i + \Delta V_i > V_i^{\min} \qquad i \in T \qquad (3.11)$$

$$\sum (V_c + \Delta V_c) = V_k^{total} \qquad c \in T_k \qquad (3.12)$$

V_i	Volume inicial do tanque i
ΔV_i	Variação do volume do tanque i
$V_i^{\max}$	Capacidade máxima do tanque i
$V_i^{\min}$	Capacidade mínima do tanque i
ρ_i	Densidade do fluido dentro do tanque i
g	aceleração da gravidade
X_i, Y_i	Coordenadas do centro de gravidade do fluido no tanque i
B	Força de empuxo
W	Peso total da embarcação
M_T, M_L	Momento total resultante de forças externas

1-Biblioteca desenvolvida para o projeto GNU, por Andrew Makhorin, do Departamento de Informática Aplicada do Instituto de Aviação de Moscou, Moscou, Rússia.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

T	Conjunto de tanques da embarcação
T_k	Conjunto de tanques contendo o mesmo tipo de líquido (k)
V_k^{total}	Volume total de líquido nos tanques pertencentes a T_k

A primeira restrição (3.7) garante o equilíbrio de forças. Para estar em equilíbrio, o peso de líquido nos tanques somado ao peso da plataforma deve ser igual à força de empuxo. A segunda e a terceira restrições (3.8 e 3.9) asseguram o equilíbrio de momentos entre forças externas e internas. Estas três restrições são responsáveis por manter a embarcação em equilíbrio.

As restrições 3.10 e 3.11 são relacionadas às variáveis do problema. A primeira garante que o volume do tanque será no máximo igual a sua capacidade máxima e a segunda garante que o tanque nunca ficará abaixo de seu volume mínimo e impede que tenha volumes negativos.

Não é incomum para uma embarcação conter diferentes tipos de tanque (água potável, óleo, água do mar, combustível, etc). Neste caso, é importante que o algoritmo não misture os volumes de cada tipo. Isto se garante ao considerar a equação 3.12. Estas restrições garantem que os tanques pertencentes ao conjunto T_k possuem um determinado volume de líquido.

Criando um conjunto T_k para cada tipo líquido, garante-se que volume total de cada tipo permanecerá constante. Esta restrição não é necessária para tanques de lastro, já que estes utilizam água do mar e podem se livrar e conseguir mais desta. Já tanques de óleo, o volume total dentro destes deve permanecer constante.

Ao se tentar obter um carregamento automático de uma embarcação, deve-se decidir para quais grupos de tanque a sexta restrição (3.12) deve ou não ser usada. Geralmente, esta restrição deve ser utilizada com tanques de óleo, água potável e combustível.

3.2.1. Forças Externas e Peso

As equações de restrição mostradas anteriormente assumem a existência de forças externas e momentos resultantes destas em seu algoritmo. Na implementação deste algoritmo, estes valores são computados diretamente de um modelo geométrico da embarcação. Este modelo é construído como um conjunto de compartimentos individuais que podem ser classificados como externos (casco

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

e elementos de convés) ou internos (espaços vazios, tanques, elevadores, corredores, etc.). Cada elemento composto por um conjunto de faces, que por sua vez são compostas por um conjunto de pontos com coordenadas tridimensionais.

O empuxo é determinado ao computar as partes submersas de cada compartimento externo. Usando o algoritmo de interseção de malha implementado na biblioteca do MG [4], os compartimentos externos são divididos em duas partes, uma acima e outra abaixo do plano de superfície do oceano. O volume de cada parte submersa e seu centro de gravidade é utilizado para calcular a força e o centro do empuxo.

O mesmo procedimento é utilizado para calcular o centro de gravidade de cada tanque. Usando um procedimento similar a busca binária [5], computa-se a posição da superfície livre deste de cada tanque a partir de seu volume e da posição atuais. Após dividir o tanque em dois volumes (superfícies secas e molhadas), de modo similar ao que foi feito com o casco, o centro de gravidade pode ser determinado, utilizando a superfícies molhadas para determinar seu centro geométrico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

3.2.2. Função Objetivo

O último componente a ser discutido é a função objetivo do problema proposto. Como dito anteriormente, a função objetivo é usada como forma de se obter a melhor solução entre aquelas possíveis. Para este caso, escolhe-se como função objetivo a que minimiza a soma da variação total de líquidos em todos os tanques, conforme mostrado na equação 3.13.

Uma segunda possibilidade seria selecionar o meio mais rápido de ajuste dos volumes, ou seja, o meio mais rápido de transferir todo o líquido necessário. Para tanto, seria necessário saber a capacidade de bombeamento para cada tanque. A função objetivo seria a 3.14.

Minimizar $\sum |\Delta V_i|$ $i \in T$ (3.13)

Minimizar $\sum |P_i \Delta V_i|$ $i \in T$ (3.14)

P_i Capacidade de bombeamento para cada tanque

3.3. Programação linear seqüencial

Observa-se que as coordenadas X e Y do centro de gravidade dos tanques não são constantes, variando não só com a posição e orientação do tanque. Na verdade, estas coordenadas são funções também do volume contido no tanque. O algoritmo aqui desenvolvido considera estas duas coordenadas (x_i, y_i) constantes, caso contrário não haveria uma solução linear. Para considerar essa variação do centro de gravidade, o algoritmo deve ser implementado como uma programação linear seqüencial.

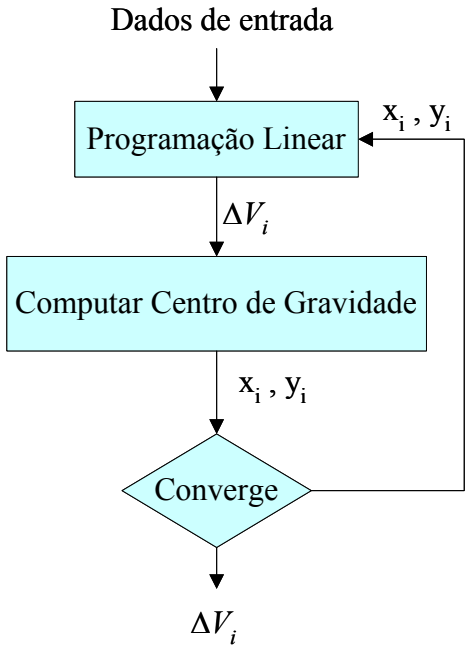


Figura 3.1- Diagrama de fluxo do algoritmo de carregamento automático.

A seqüência deste algoritmo é ilustrada na Figura 3.1. A programação Linear é utilizada para estimar a variação de volume (ΔV_i). Esta variação é então utilizada para calcular o centro de gravidade de cada tanque (x_i, y_i). Finalmente, o novo centro de gravidade é comparado com o anterior. Caso haja um tanque em que a distância entre o antigo e o novo centro de gravidade seja maior que a tolerância, o algoritmo recomeça o processo. Caso contrário, o algoritmo pára e a variação de volume de cada tanque é dada como resultado. O algoritmo também é interrompido caso não haja convergência após um número máximo de iterações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

3.4. Melhorias no Resultado

O equilíbrio de um sistema flutuante é um requisito essencial para um algoritmo de carregamento automático. Em alguns casos, no entanto, é necessário levar outros fatores em conta. Dois requisitos extras foram adicionados ao algoritmo: minimização da tensão e esforço cortante ao longo da estrutura e minimização da superfície líquida dentro dos tanques. A necessidade de minimizar a superfície livre de uma plataforma se deve ao aumento de estabilidade, quando se diminui a superfície livre.

3.4.1. Minimizar tensão e esforço cortante

Testes realizados com o algoritmo de carregamento automático aplicado a modelos de navios mostraram que alguns resultados fornecidos por tal algoritmo resultavam em curvas de momento e esforço cortante acima dos limites admissíveis para grandes navios. Uma curva irregular também foi observada para o esforço cortante. Este fato é decorrente de uma distribuição irregular de peso pelo navio, causada por uma distribuição irregular de líquido pelo navio.

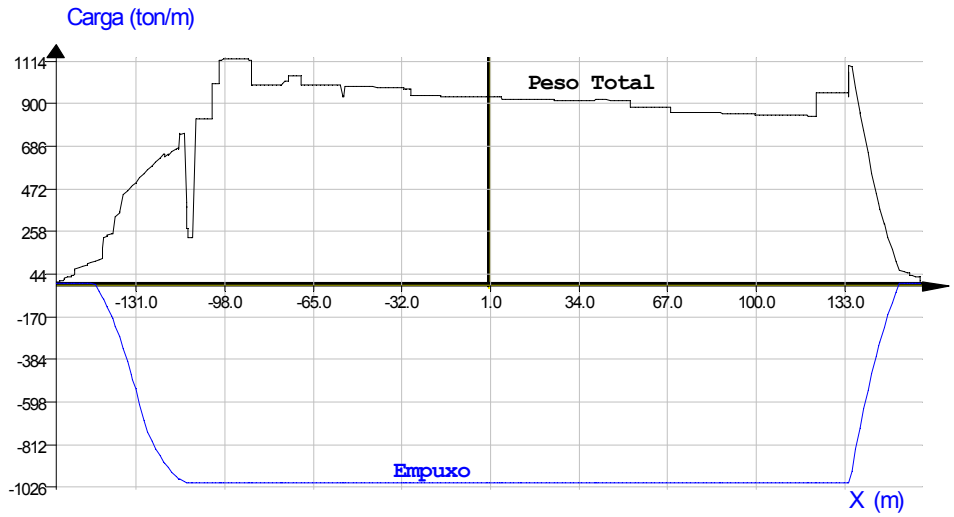


Figura 3.2- Curva de Empuxo para um navio.

Com o objetivo de reduzir este efeito, duas novas restrições foram incorporadas ao algoritmo. Estas duas novas restrições são responsáveis pelo controle do volume dentro dos tanques e tentam gerar uma distribuição homogênea de líquidos. Isto, na maioria dos casos, resultará numa redução da

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

tensão. A Figura 3.2 mostra duas curvas, uma de empuxo e outra de peso total para um navio. Em teoria, se o navio é carregado e a curva deste carregamento equivale à curva de empuxo, as curvas de cisalhamento (diagrama de esforço cortante) e momento (diagrama de momento fletor) se anulariam. Logo, o ideal é que a curva de peso total da embarcação fosse o mais próximo possível do inverso da curva de empuxo, como é demonstrado na Figura 3.2.

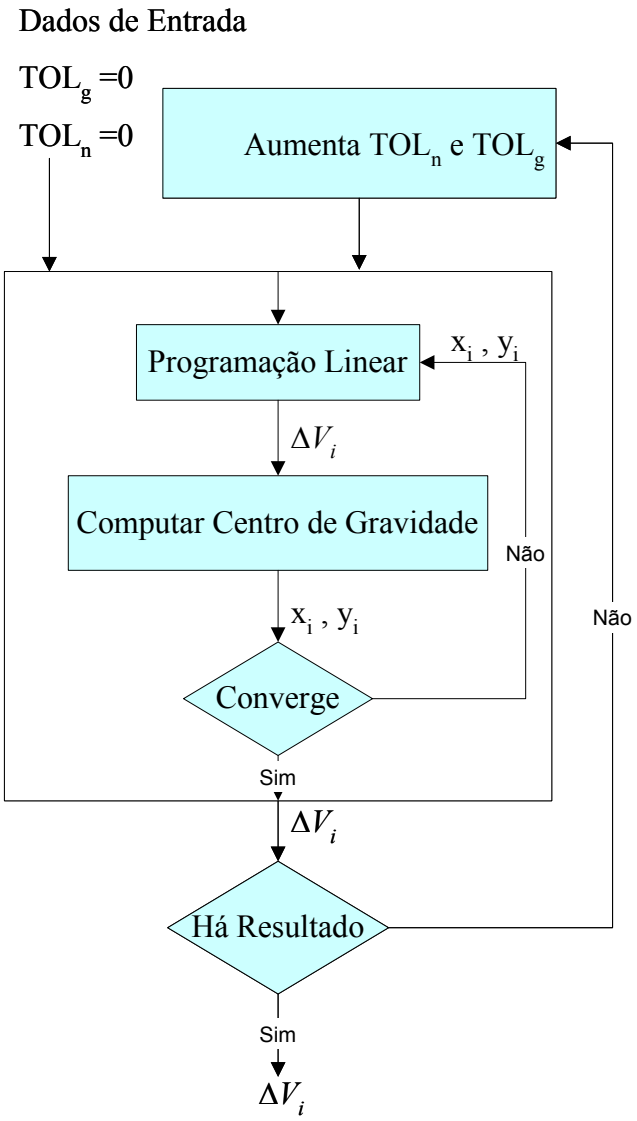


Figura 3.3- Determinação de TOL_g e TOL_n.

As novas restrições podem ser vistas nas equações 3.15 e 3.16. Dois novos parâmetros foram adicionados: tolerância global usada por todos os tanques (TOL_g) e uma outra tolerância usada apenas entre tanques vizinhos (TOL_n). Como as equações 3.15 e 3.16 mostram, a quantidade de líquido num tanque será limitado pelo volume em seus vizinhos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

$$\left| \frac{v_i + \Delta v_i}{V_i^{\max}} - \frac{v_k + \Delta v_k}{V_k^{\max}} \right| < TOL_g \qquad i \in T, k \in T,\ i \neq k \qquad (3.15)$$

$$\left| \frac{v_i + \Delta v_i}{V_i^{\max}} - \frac{v_j + \Delta v_j}{V_j^{\max}} \right| < TOL_n \qquad i \in T, j \in N_i \qquad (3.16)$$

TOL_g Tolerância global de variação de volume

TOL_n Tolerância entre vizinhos para variação de volume

N_i Conjunto de tanques k vizinhos ao tanque i

O valor ideal para TOL_g e TOL_n é zero, o que corresponde à distribuição ideal de líquido. Mas este valor não é aceitável para a maioria dos casos. A determinação de TOL_g e TOL_n é computado utilizando o procedimento iterativo mostrado na Figura 3.3. O algoritmo parte de tolerâncias TOL_g e TOL_n baixas e realizam os procedimentos de programação linear descritos anteriormente, mas adicionam-se as restrições 3.15 e 3.16 à lista de restrições. Ao final, se não há resultados, aumentam-se as restrições e reinicia-se o processo.

3.4.2. Minimizar superfície livre

O efeito de superfície livre ocorre somente quando o tanque está parcialmente cheio. Tanques vazios e tanques completamente cheios não apresentam superfície livre. Em se tratando de plataformas ou auto-elevatórias, há um interesse em se obter uma resposta em que a área total de superfície livre dos tanques seja mínima. Isto porque o efeito de superfície livre faz com que o centro de gravidade da plataforma varie quando a embarcação oscila por algum motivo.

O objetivo então é encontrar uma solução para o conjunto de tanques, em que o maior número possível de tanques estejam vazios ou completamente cheios. Deve-se obter uma função objetivo que maximize o número de tanques vazios e conseqüentemente também acumule o maior volume possível de líquido no menor número possível de tanques, obtendo um maior número de tanques completamente cheios. A função 3.17 então substituirá a função 3.13.

Minimizar $\sum V_i + \Delta V_i \qquad i \in T \qquad (3.17)$

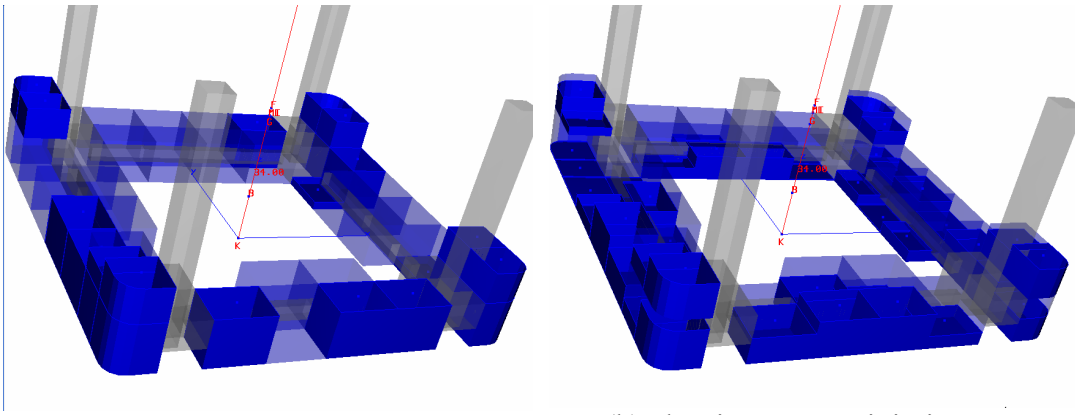
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

3.5. Resultados

Foram selecionados três exemplos para mostrar as possibilidades do algoritmo de carregamento automático.

O primeiro exemplo mostra uma plataforma com capacidade para 54.000 toneladas de água em seus tanques de lastro e operando numa cota de 34,00 metros. O total de peso leve neste exemplo é de 26.200 toneladas e o Centro de gravidade deste peso está em -2,5m longitudinais e 6,8m bombordo (coordenadas locais).

Após selecionar todos os 44 tanques de lastro para balancear o modelo na cota de operação desejada, a Figura 3.4 mostra o carregamento dos tanques definido pelo algoritmo. O líquido dentro dos tanques é mostrado em azul fosco, enquanto os volumes vazios são mostrados transparentes. A Figura 3.4(a) mostra o resultado para o algoritmo com minimização de superfície líquida e a Figura 3.4(b) para o algoritmo sem a minimização. Nota-se que a distribuição de líquido para o primeiro é concentrada no menor número de tanques possíveis. Já o segundo há uma área grande de superfície livre.



(a) algoritmo de minimizar superfície livre (b) algoritmo sem minimização

Figura 3.4- Carregamento de tanques após utilização do algoritmo de carregamento

A Tabela 3.1 mostra esses resultados em números, comparando ambos os algoritmos. Observe como a superfície livre para o algoritmo com minimização de superfície livre ficou pequena e concentrada em apenas 3 tanques. Isto faz com que o KG varie muito pouco quando a plataforma oscila. Já para o algoritmo sem

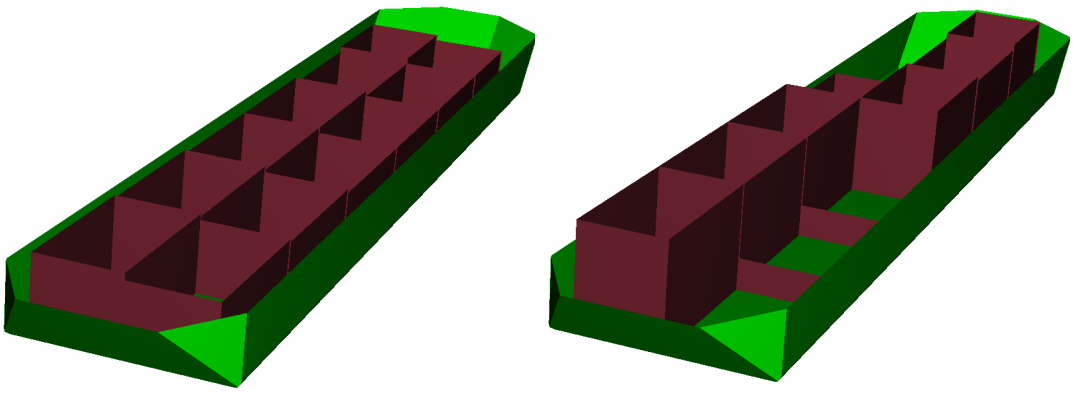
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

minimização, essa superfície ficou imensa e espalhada ao longo de 42 tanques. Isto provoca uma grande variação de KG, quando a plataforma oscila.

	Algoritmo (a) Min. Sup. livre	Algoritmo (b) Sem Min.	Diferença (a) – (b)
Tanques vazios	19	0	19
Tanques completamente cheios	20	2	18
Tanques parcialmente cheios	3	42	-39
Superfície livre (m^2)	388	5434	-5046

Tabela 3.1-Carregamento de tanques para ambos os algoritmos

O segundo exemplo consiste em usar o algoritmo para minimizar a tensão ao longo do eixo longitudinal. O objetivo é manter o peso total igual, mas com uma melhor distribuição da carga para diminuir as forças de cisalhamento e o momento ao longo do eixo longitudinal. A Figura 3.5 (a) mostra o carregamento final dos tanques para o segundo exemplo. A malha em verde mostra o casco externo, enquanto o marrom mostra preenchimento dos tanques de óleo.



(a) algoritmo de cisalhamento mínimo (b) algoritmo sem cisalhamento mínimo

Figura 3.5 – Navio carregado

A Figura 3.5 (b) mostra o mesmo caso, mas não foi utilizado o algoritmo de cisalhamento mínimo. Nota-se que em 3.5(a) há uma melhor distribuição de óleo do que em 3.5(b). Ambas as Figuras estão na mesma posição de equilíbrio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

As Figuras 3.6 e 3.7 mostram os gráficos de força de cisalhamento e momento respectivamente, comparando o resultado para os dois algoritmos. Note que o algoritmo de cisalhamento mínimo dá resultados sempre mais próximos de zero que um algoritmo sem a minimização.

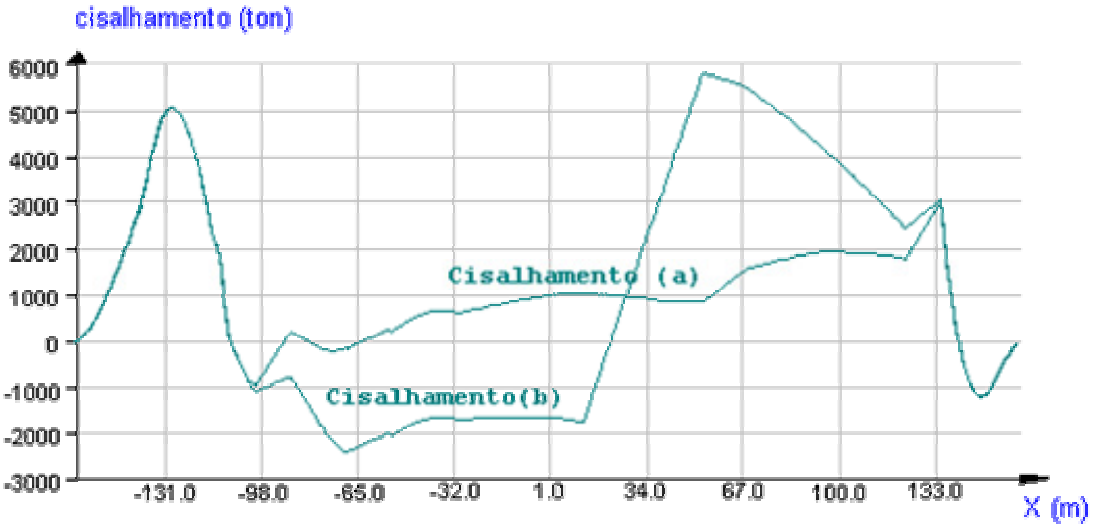


Figura 3.6-Forças de Cisalhamento referentes à Figura 3.5

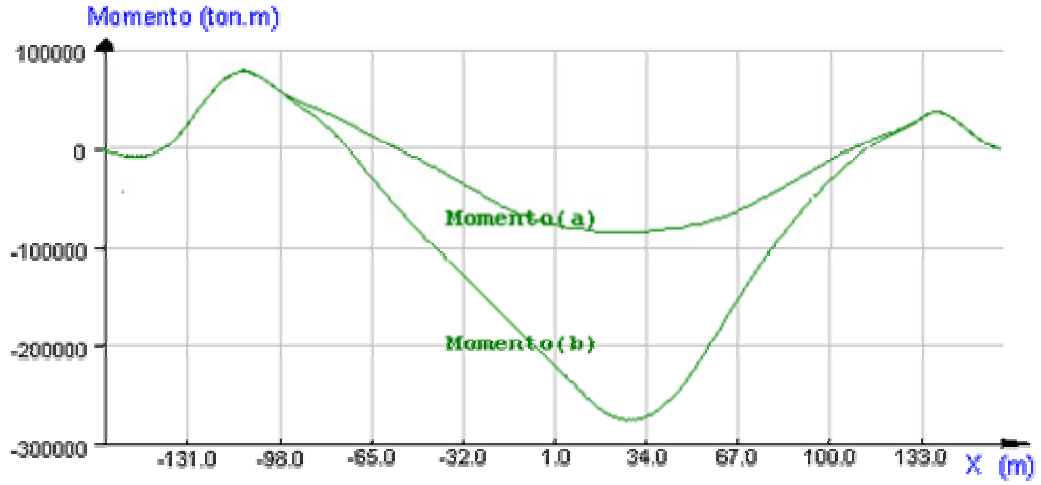


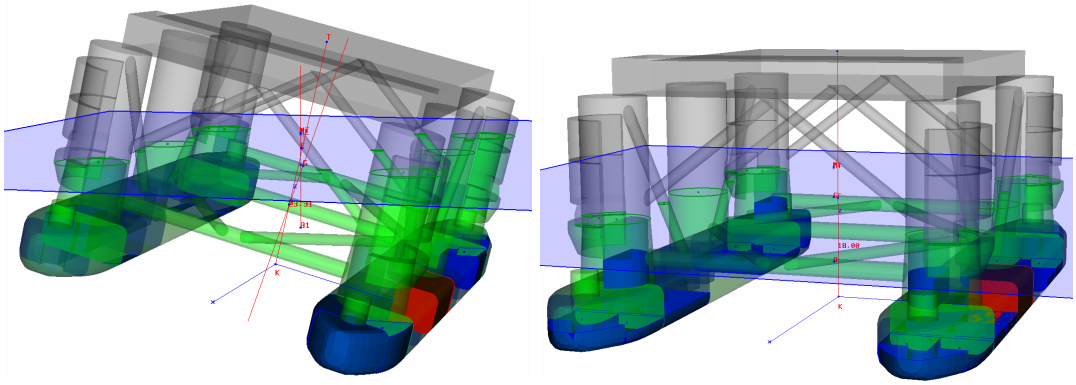
Figura 3.7 – Momento ao longo do eixo longitudinal referente à Figura 3.5

O algoritmo também funciona para plataformas danificadas ou inundadas. O último exemplo mostra o uso do algoritmo numa situação de emergência, quando necessário restaurar a plataforma para a sua posição correta após um tanque ter sido danificado. Considere que a plataforma em operação sofre uma ruptura em um tanque e a Figura 3.8(a) mostra o modelo em equilíbrio após o acidente. O

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

tanque danificado é mostrado em vermelho. O objetivo é retornar a plataforma a uma posição de calado paralelo. Para isto, é necessária uma redistribuição dos líquidos que se encontram nos outros tanques.

Como é visto na Figura 3.8(b), aplicando o algoritmo, foi possível restaurar a plataforma para a sua posição inicial, mesmo tendo um tanque danificado. É possível até mesmo aplicar os algoritmos de minimização de superfície livre ou minimização de tensão ao longo do eixo da embarcação e se obterá o melhor resultado dentro dos limites de uma plataforma danificada. A única diferença é que o líquido dentro de tanques avariados não pode ser alterado pelo algoritmo e entra como força externa nas restrições de equilíbrio, assim como o líquido de tanques inundados.



(a) inclinação devido ao tanque avariado (b) plataforma restabelecida

Figura 3.8- Plataforma inclinada devido a um tanque avariado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

4
Cálculo das solicitações de vento usando espaço de imagem

A formulação e a implementação do algoritmo descrito neste capítulo foram feitas por Sérgio Álvares Maffra, tendo sofrido algumas modificações ou correções para serem utilizadas no Sstab [12]. Foram adicionadas novas implementações também para cálculo da correnteza, cálculo do braço de vento e discriminação da área e da força de vento por compartimento.

De acordo com a IMO [3], a força e momento resultantes da ação do vento sobre uma embarcação podem ser computadas como uma função da área projetada do objeto, de seu coeficiente de forma, de seus coeficientes de altura, da velocidade do vento e da densidade do ar:

$$F_W = \frac{1}{2} C_S C_H \rho_W V_W^2 A_W \tag{4.1}$$

F_W Força do vento

C_S Coeficiente de forma

C_H Coeficiente de altura

ρ_W Densidade do ar

V_W Velocidade do ar

A_W Área de vento projetada

Apesar de ser muito mais simples que uma simulação de dinâmica dos fluidos, a metodologia sugerida pela IMO pode ser desafiadora ao lidar com objetos de geometria complexa. Trabalhando diretamente com a geometria do objeto, torna-se necessária a utilização de operações booleanas (interseções, subtrações, adições, etc.), o que é muito difícil de se implementar e gera uma margem de erros devido à imprecisão das variáveis.

Como alternativa, a IMO permite o uso de testes em túneis de vento realizados num modelo da embarcação. Testes em um túnel de vento não são muito práticos, porque geralmente ocorrem muitas mudanças na geometria da

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

plataforma durante a fase de testes e, a cada mudança, um novo modelo teria que ser construído e testado. A IMO exige que a força de vento seja considerada vinda de qualquer direção, o que elevaria o custo de uma análise usando computação para realizar simulações de dinâmica dos fluidos (CFD), considerando elevado o número enorme de simulações e malhas a serem construídas.

Este trabalho faz uma proposta alternativa em que se utilizam diretamente as primitivas geométricas que compõem o modelo, fazendo uso da equação 4.1 e convertendo o modelo em uma imagem (em pixels). Esta alternativa, que pode ser implementada utilizando a biblioteca gráfica de qualquer placa de vídeo moderna, consiste em converter todas as primitivas geométricas num conjunto de pixels, deixando esta operação ser realizada pela placa gráfica. Agora que o conjunto de pixels foi determinado, indicando a área visível do objeto, bastam computar as somas da área e da força aplicada de cada pixel para se obter área de vento e a força de vento.

De acordo com a presente proposta, a área projetada é na verdade uma aproximação da área real. Isto é conseqüência de transformar as primitivas geométricas num conjunto de pixels. Por isso também é apresentada uma maneira de computar uma estimativa desse erro.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

4.1. Força do vento

Determinar a superfície visível [6] de objetos é um conhecido problema na área de computação gráfica. Diferentes algoritmos já foram propostos, os quais podem ser divididos em duas categorias: algoritmo de imagem e algoritmo de objeto [7].

O algoritmo de objeto resolve o problema de visibilidade trabalhando com as primitivas geométricas, ordenando-os desde os mais afastados até os mais próximos da câmera. Quando há interseção, operações booleanas são necessárias para resolver o problema.

A imagem digital é normalmente representada por uma matriz retangular de valores numéricos que representam cores. O algoritmo de imagem explora diretamente essa propriedade, evitando a maior parte das operações geométricas que o algoritmo de objeto precisa realizar. Algoritmos de imagem trabalham em

paralelo, o que facilita uma implementação mais eficiente. Neste trabalho será mostrado como o algoritmo de Z-Buffer [6] pode ser usado para definir a área exposta ao vento de um modelo complexo.

4.1.1. Modelo

Como mencionado nos capítulos anteriores, o modelo a ser trabalhado é composto por um conjunto de compartimentos individuais que podem ser classificados em externos (casco, elementos de convés, etc.) ou internos (espaços vazios, elevadores, tanques, etc.). A Figura 4.1 mostra os compartimentos externos de uma plataforma semi-submersível. Cada compartimento é composto de um conjunto de faces, sendo cada face definida por uma série de posições no espaço tridimensional, no sistema local de coordenadas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

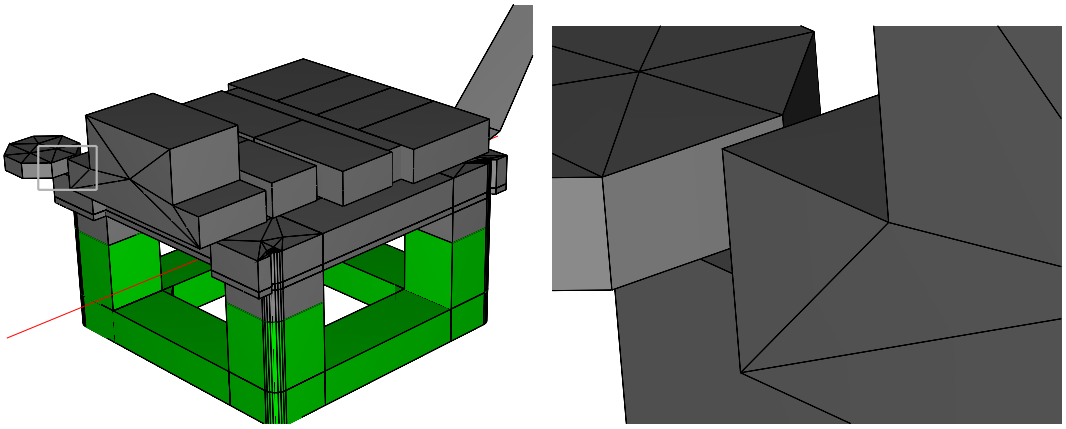
4.1.2. Determinação da superfície visível utilizando álgebra vetorial

Em uma solução tradicional, as partes visíveis de objetos podem ser computadas usando álgebra vetorial clássica num sistema de coordenadas espaciais. Se for considerado que as faces dos compartimentos não se sobrepõem, um algoritmo de árvore BSP [6] pode ser usado para ordenar as faces e definir quais destas são visíveis, mesmo que o algoritmo se torne lento, com o aumento do número de faces. Este algoritmo deve ser utilizado junto com um algoritmo de operação booleana para obter um conjunto de áreas poligonais visíveis.

A Figura 4.1 mostra um modelo de uma plataforma de petróleo semi-submersível. Se o vento for considerado agindo na mesma direção de visão (direção da projeção), a computação da área visível mostrada em detalhe na Figura 4.1(b) é um exemplo em que o uso da operação booleana se torna necessária, pois a interseção entre várias possíveis áreas visíveis projetadas ocorre.

4.1.3.
Determinação da área visível utilizando a placa gráfica

Para produzir a imagem vista na Figura 4.1(a), a placa de vídeo se utilizou da biblioteca do OpenGL que tratou as primitivas. Este mesmo procedimento pode ser utilizado para determinar a área de vento projetada de uma embarcação.



(a) Vista geral (b) Detalhe

Figura 4.1- Plataforma de óleo semi-submersível

A biblioteca gráfica (OpenGL), utilizada neste trabalho contém uma implementação do algoritmo *Z-Buffer*. Como mencionado anteriormente, este algoritmo evita a ordenação das primitivas e as operações booleanas, transformando cada primitiva num conjunto de pixels. Cada pixel possui um valor de profundidade, que é testado contra os outros pixels da mesma posição para se decidir qual é visível. Os pixels visíveis são então armazenados na imagem final. A próxima sessão mostra como configurar o *software* de *Z-Buffer* da placa gráfica para gerar uma imagem apropriada à computação da força de vento e como computar essa força utilizando esta imagem.

4.1.4.
Configurando o software de Z-Buffer

Gerar imagens utilizando o OpenGL pode ser uma tarefa complexa, devido à imensa quantidade de opções e técnicas de geração de imagem que podem ser utilizadas. Felizmente, a imagem necessária neste trabalho é simples e apenas alguns passos são necessários.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

O primeiro passo consiste em configurar a câmera. A câmera precisa estar posicionada de uma maneira que permita observar o objeto inteiro. A direção da câmera (direção de projeção) deve ser a mesma da direção de incidência do vento. Como requerido pela equação 4.1, o plano de projeção precisa ser o plano vertical (vetor Up igual a (0,0,1)). Uma projeção ortográfica deve ser utilizada, para se obter uma medida correta da área. Uma projeção em perspectiva não funcionaria, já que esta deformaria o modelo para criar o efeito de perspectiva na imagem.

O segundo passo consiste em escolher as cores apropriadas para o modelo geométrico que representem os possíveis compartimentos da embarcação. Após a imagem final ter sido gerada, não existe mais relação entre os pixels e o compartimento que este representa.

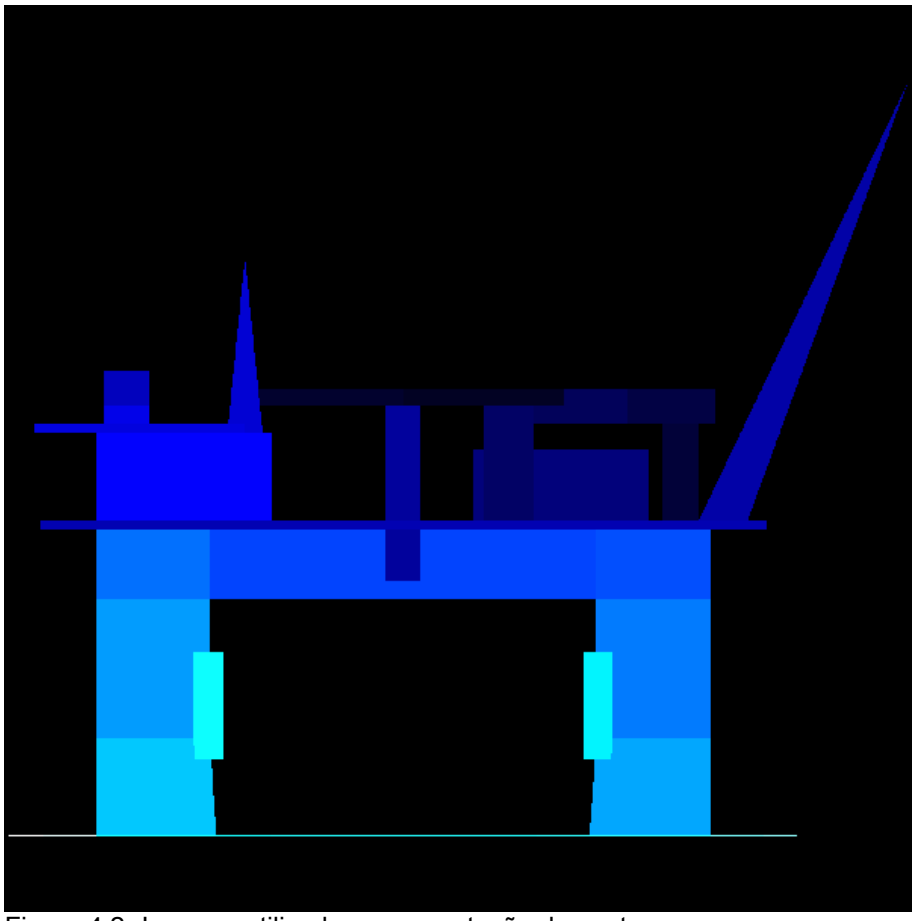


Figura 4.2- Imagem utilizada na computação do vento

Dado um determinado pixel na imagem, é possível determinar todos os parâmetros da equação 4.1, exceto o coeficiente de forma, que só pode ser determinado a partir do compartimento associado ao pixel. A técnica utilizada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

para isso é associar a cada compartimento uma cor diferente e única. Assim é possível associar cada pixel ao seu compartimento examinando sua cor.

Como a computação do sombreamento(*lighting*) na biblioteca da placa gráfica pode alterar a cor do objeto a ser renderizado, a opção de sombreamento deve estar desligada, quando gerar a imagem para a computação do vento.

Após realizar todos os procedimentos descritos acima, é necessário gerar a imagem, para obter todas as informações necessárias ao cálculo do vento. A Figura 4.2 mostra um exemplo da imagem gerada e que é utilizada para computar a força do vento.

4.1.5. Computando a força do vento

Computar a força de vento para a imagem gerada é similar a um procedimento de integração numérica, já que cada pixel da imagem pode ser visto como um elemento de integração. As equações 4.2, 4.3 e 4.4 mostram como computar a área, a força do vento e seu centro de aplicação, respectivamente. Note que a área de vento A_W é ponderada pelo coeficiente de forma e pelo coeficiente de altura.

$$A_W = \sum_{i=1}^{w}\sum_{j=1}^{h}\frac{1}{2}C_S(Px_{ij})C_H(Px_{ij})A_p \tag{4.2}$$

$$F_W = A_w \rho_W V_W^2 \tag{4.3}$$

F_W	Força do vento
A_W	Área de vento
Px_{ij}	Pixel localizado nas coordenadas (i,j) da imagem
ρ_W	Densidade do ar
V_W	Velocidade do ar
A_p	Área do pixel
$C_S(Px)$	Coeficiente de forma do pixel Px
$C_H(Px)$	Coeficiente de altura do pixel Px
w	Largura da imagem em pixels
h	Altura da imagem em pixels

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

A equação 4.2 depende de duas funções que têm o pixel como parâmetro: o coeficiente de forma (C_S) e o coeficiente de altura (C_H). Ambas podem ser implementadas como tabelas que indicam seus resultados.

A tabela de coeficiente de forma tem as cores de cada compartimento como índice, as mesmas cores usadas para representá-los na imagem. Assim, utilizando-se a cor do pixel, pode-se determinar seu compartimento correspondente na embarcação e, conseqüentemente, obter o fator de forma.

$$C_A = \frac{1}{F_W}\sum_{i=1}^{w}\sum_{j=1}^{h}\left[\frac{1}{2}C_S(Px_{ij})C_H(Px_{ij})\rho_W V_W^2 A_p\right]h(Px_{ij}) \tag{4.4}$$

C_A Centro de aplicação da força do vento

$h(Px)$ Altura do pixel ij

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Início (m)	Fim (m)	Coeficiente de altura
---	15,30	1,00
15,30	30,50	1,10
30,50	46,00	1,20
46,00	61,00	1,30
61,00	76,00	1,37
76,00	91,50	1,43
91,50	106,50	1,48
106,50	122,00	1,52
122,00	137,00	1,56
137,00	152,50	1,60
152,50	167,50	1,63
167,50	183,00	1,67
183,00	198,00	1,70
198,00	213,50	1,72
213,50	228,50	1,75
228,50	244,00	1,77
244,00	256,00	1,79
256,00	---	1,80

Tabela 4.1-Coeficiente de altura

Quando se configura a câmera, alguns parâmetros dessa configuração definem o espaço visível da imagem e o número de pixels, definindo desta maneira o espaço coberto pelos pixels. Assim, é possível a partir das coordenadas (i,j) de um pixel na imagem, descobrir suas coordenadas (x_i,y_j) no espaço. Existe uma tabela, indexada por intervalos de altura, que a partir da altura (x_i,y_j) do pixel, define seu coeficiente de altura, conforme visto na Tabela 4.1.

A equação 4.3 computa a força do vento e tem como parâmetros o resultado da área de vento (A_W), a densidade do vento (ρ_W) e a velocidade do vento (V_W).

Forma	C_S
Esférica	0.4
Cilíndrica	0.5
Superfícies planas e grandes (casco, convés, etc)	1.0
Torre de perfuração	1.25
Cabos em geral	1.2
Treliças	1.3
Partes pequenas	1.4
Partes Isoladas (guindastes, vigas, etc)	1.5
Acomodações no convés e similares	1.1

Tabela 4.2-Coeficiente de forma

A Tabela 4.2 mostra alguns exemplos de coeficientes de forma a serem aplicados aos diferentes tipos de compartimentos num modelo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

4.1.6. Diagrama de Fluxo para computar a força do vento

O algoritmo para computar a força de vento fica então dividido em duas partes. Primeiro deve-se criar a imagem e depois processar esta mesma. A Figura 4.3 mostra como estes dois processos funcionam. Na primeira parte, percorrem-se todos os compartimentos, onde é selecionada uma cor única para cada tanque e então este tanque é desenhado com esta cor e numa projeção ortográfica. Ao percorrer todos os compartimentos, definem-se também a posição da câmera e as dimensões da imagem a ser representada a partir das coordenadas mínimas e máximas destes compartimentos.

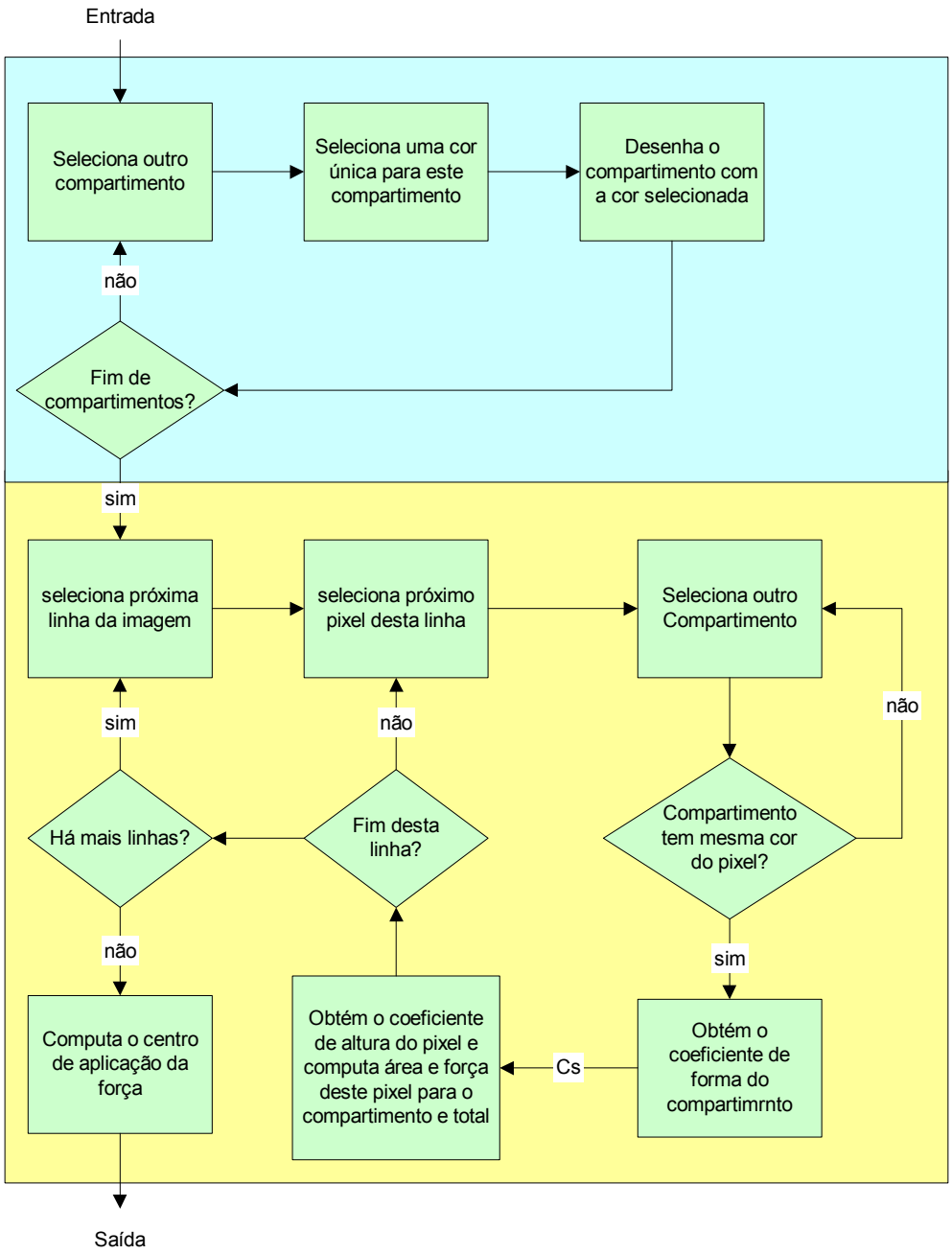


Figura 4.3 – Fluxograma para geração de imagem e computação da força de vento

Na segunda parte serão percorridos todos os pixels da imagem de dimensões *h* x *w*. Cada pixel, que não seja preto, representa uma área A_P e tem um coeficiente de altura determinado para ele pela distância deste à borda inferior da imagem. Isto, porque ao gerar a imagem, sabemos as dimensões desta no mundo real. Mas não temos o coeficiente de forma deste pixel. Para conseguir este coeficiente, é necessário para cada pixel, percorrer a lista de compartimentos novamente, até achar o compartimento referente à cor do pixel. Somam-se então a área e a força deste pixel ao total do modelo e ao compartimento. Isto permite que

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

tenhamos força e área computada para cada compartimento também. As coordenadas do centro de aplicação da força é obtida pela soma da força de cada pixel multiplicada pelas suas coordenadas e então dividida pela soma das forças de todos os pixels.

4.1.7. Erros de rasterização

O processo adotado para se transformar uma primitiva geométrica (geralmente um polígono) em um conjunto de pixels é chamado de rasterização. Sempre que uma primitiva geométrica é rasterizada, erros ocorrem devido ao processo de discretização em imagens digitais. Linhas contínuas são representadas por um conjunto de pixels (quadradinhos) e, portanto, podem não ser corretamente representadas numa imagem digital. Os erros de discretização só ocorrem nas bordas das primitivas. A Figura 4.4 mostra como a rasterização de algumas primitivas ficam numa imagem digital. Nota-se como a rasterização de primitivas tenta acompanhar o formato destas (vermelho marca as primitivas).

Como somente os pixels nas bordas contêm erros, é possível computar uma margem de erro para resultado da área projetada. Este erro é dado pela divisão do número de pixels nas bordas pelo número total de pixels. Quanto menor o erro, mais preciso é o resultado para a força do vento.

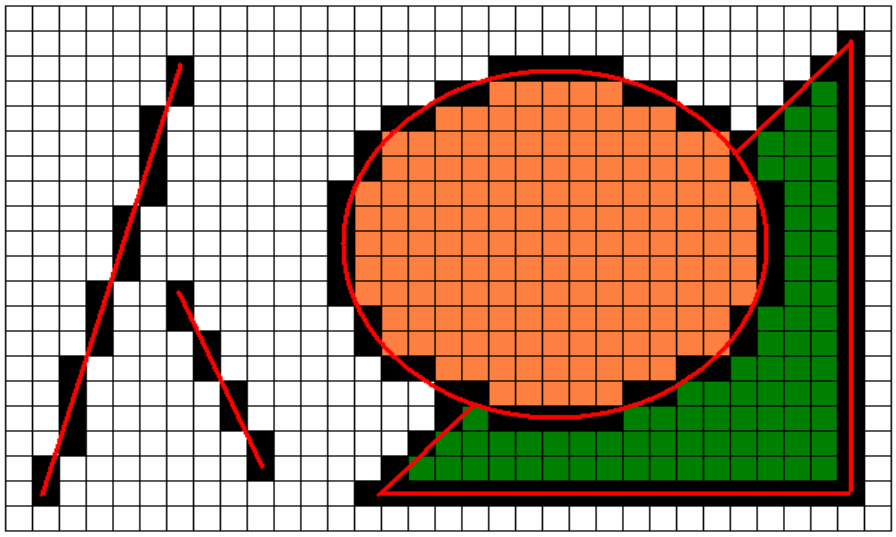


Figura 4.4- Erro de Rasterização

Uma maneira de se reduzir o erro consiste em se aumentar a resolução da imagem gerada. Imagens maiores irão gerar aproximações melhores das

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

primitivas geométricas, ao custo de mais memória e mais tempo para computação dos resultados.

4.2. Computando a força da corrente

No presente algoritmo, ainda seguindo os critérios da IMO, é considerada a existência de uma corrente cuja força resultante apresenta a mesma intensidade da força do vento, porém, aplicada em sentido oposto, conforme visto na Figura 4.5, aumentando ainda mais o momento gerado pelas forças externas. Já definido o valor desta força, é necessário computar o seu centro de aplicação e a área submersa visível sujeita a esta nova força.

$$F_S = F_W \tag{4.5}$$

$$A_S = \sum_{i=1}^{w}\sum_{j=1}^{h}\frac{1}{2}C_S(Px_{ij})A_p \tag{4.6}$$

$$C_B = \frac{1}{A_S}\sum_{i=1}^{w}\sum_{j=1}^{h}\left[\frac{1}{2}C_S(Px_{ij})A_p h(Px_{ij})\right] \tag{4.7}$$

F_S	Força da corrente
A_S	Área da corrente
C_B	Centro de aplicação da força da corrente

O princípio é o mesmo utilizado para computar a área de vento, utilizando o mesmo processo de rasterização de imagem, conforme mostrado na Figura 4.6, em que são convertidos os compartimentos abaixo da linha d'água em pixels.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

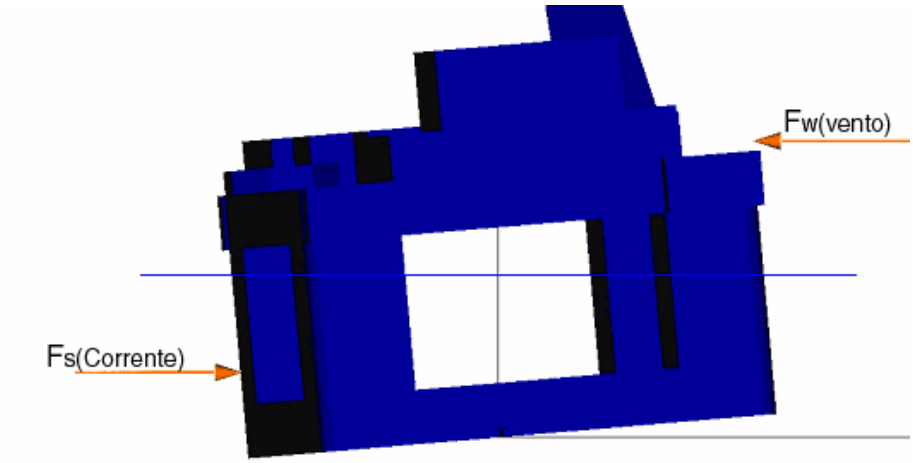


Figura 4.5 – Vento e Corrente

As equações 4.5, 4.6 e 4.7 mostram como computar a força, a área e o centro de aplicação da força da corrente, respectivamente. Nota-se que a área é ponderada apenas pelo coeficiente de forma C_S do compartimento. Não há coeficiente de altura para o cálculo da corrente.

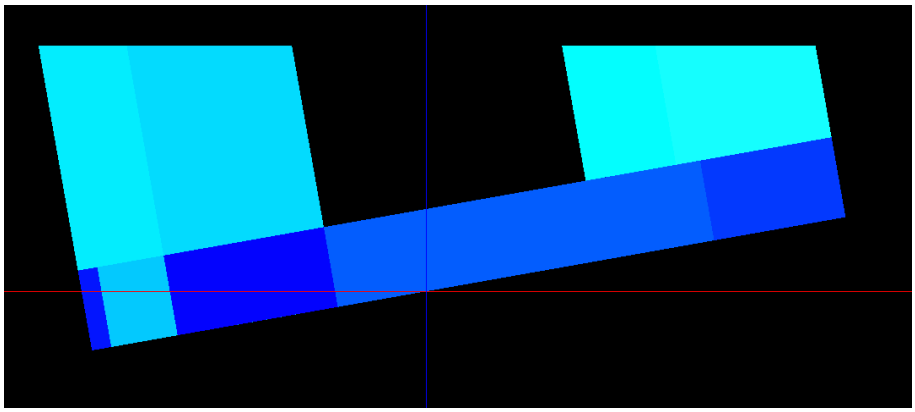


Figura 4.6 - Imagem utilizada na computação da corrente

4.3. Cálculo do braço de vento

A equação 4.8 mostra como é calculado o momento gerado pelas forças de corrente e vento computadas no presente algoritmo, lembrando que F_S=F_W. Sendo B o empuxo gerado pelo casco submerso e h o braço de vento, a equação 4.9 mostra o momento causado pelo deslocamento de B. A equação 4.10 mostra finalmente o cálculo de h. A Figura 4.7 ilustra as medidas de C_A, C_B e o deslocamento h de B.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

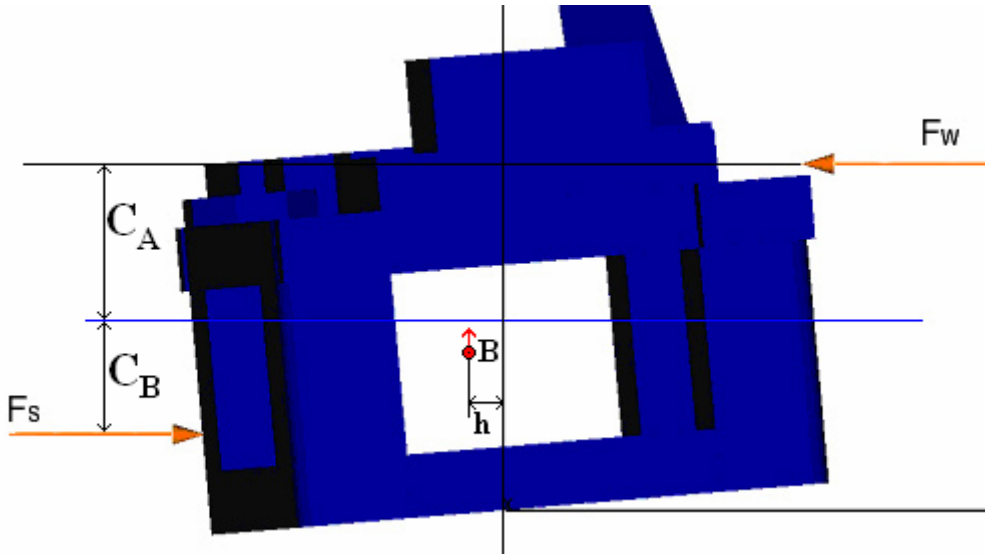


Figura 4.7 – Braço de vento

$$M_W = F_W (C_A + C_B) \tag{4.8}$$

$$M_W = B \cdot h \tag{4.9}$$

$$h = \frac{F_W (C_A + C_B)}{B} \tag{4.10}$$

M_W	Momento provocado pela forças de vento e corrente
B	Empuxo
h	Braço de vento

4.4. Resultados

O algoritmo descrito anteriormente foi implementado no programa Sstab e atualmente está sendo utilizado para calcular as forças de vento e corrente em modelos da Petrobras-BR, para embarcações na fase de projeto e embarcações já existentes. O nome do algoritmo ficou sendo WFE, significando "Wind Force Estimator". Como exemplo do WFE, são mostrados alguns resultados para uma plataforma de petróleo semi-submersível mostrada na Figura 4.1. Os resultados são comparados com os obtidos em um teste realizado pela BMT Fluid Mechanics Limited [8] em um túnel de vento (WTT).

O relatório dos testes realizados no túnel de vento apresentava resultados para a cota de trânsito e cota de operação. Foram selecionados casos em que o azimute é de 320 graus com relação ao eixo longitudinal, ângulo em que há maior

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

inclinação da plataforma. Os testes foram realizados com velocidades de vento de: 25,7 m/s, 37,0 m/s e 51,4 m/s. Na tabela 4.3 pode-se ver o deslocamento para cada calado. Estes deslocamentos foram calculados pelo modelo no Sstab e utilizados no WTT como os pesos da plataforma para suas duas cotas. Os resultados são mostrados na tabela 4.4 para o calado de operação e na tabela 4.5 para o calado de trânsito.

Calado(m)	Deslocamento(t)
34	105237,00
16	76590,00

Tabela 4.3 – Deslocamento de cada calado

Ângulo (graus)	Velocidade do Vento	25,7 m/s	37,0 m/s	51,4 m/s
0	WTT	0,188m	0,389m	0,750m
	WFE	0,164m	0,349m	0,655m
	WFE - WTT	-12,77 %	-12,60 %	-12,67 %
5	WTT	0,192m	0,397m	0,767m
	WFE	0,189m	0,391m	0,754m
	WFE - WTT	-1,56 %	-1,51 %	-1,69 %
10	WTT	0,183m	0,379m	0,730m
	WFE	0,214m	0,443m	0,854m
	WFE - WTT	16,94 %	16,89 %	16,99 %
15	WTT	0,187m	0,388m	0,750m
	WFE	0,236m	0,490m	0,945m
	WFE - WTT	26,20 %	26,29 %	26,00 %
20	WTT	0,179m	0,372m	0,718m
	WFE	0,258m	0,535m	1,032m
	WFE - WTT	44,13 %	43,82 %	43,73 %
25	WTT	0,135m	0,281m	0,541m
	WFE	0,278m	0,577m	1,113m
	WFE - WTT	105,93 %	105,34 %	105,73 %

Tabela 4.4 – Valores de braço de vento para o calado de operação

Figuras 4.8 e 4.9 mostram o modelo utilizado no túnel de vento e o modelo utilizado para o algoritmo WFE, respectivamente. Os dois modelos estão inclinados a 5 graus e em calado de operação. Nas Figuras, supõe-se que a direção do vento está da esquerda para a direita da plataforma. A cor cinza da Figura 4.9

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

representa a área acima da linha d'água exposta ao vento, equivalente ao modelo da Figura 4.8. Pode-se notar a diferença nos detalhes entre o modelo da Figura 4.8 e 4.9 no convés.

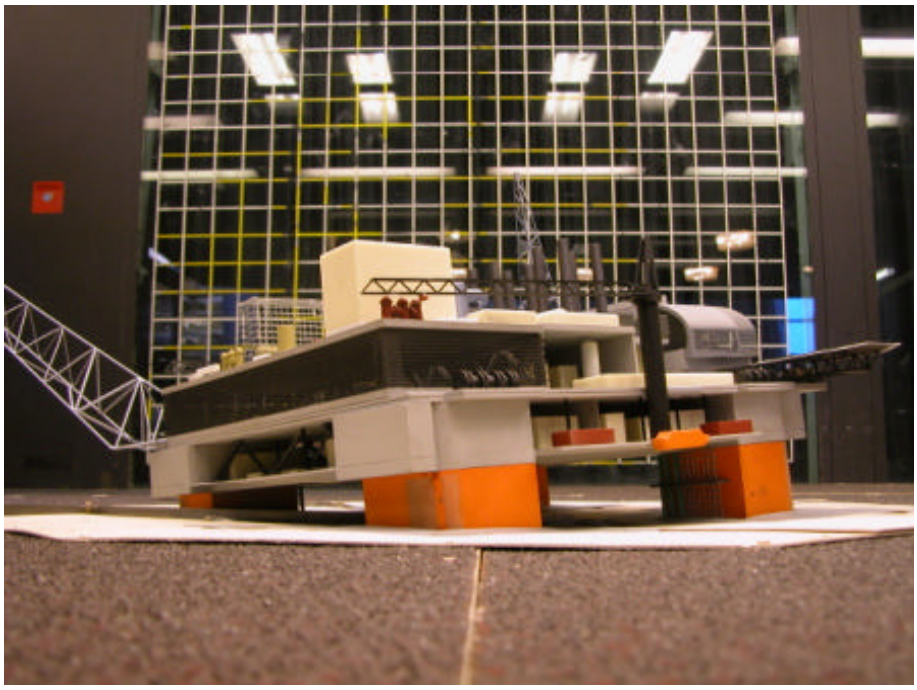


Figura 4.8- Maquete de túnel de vento com cinco graus de inclinação

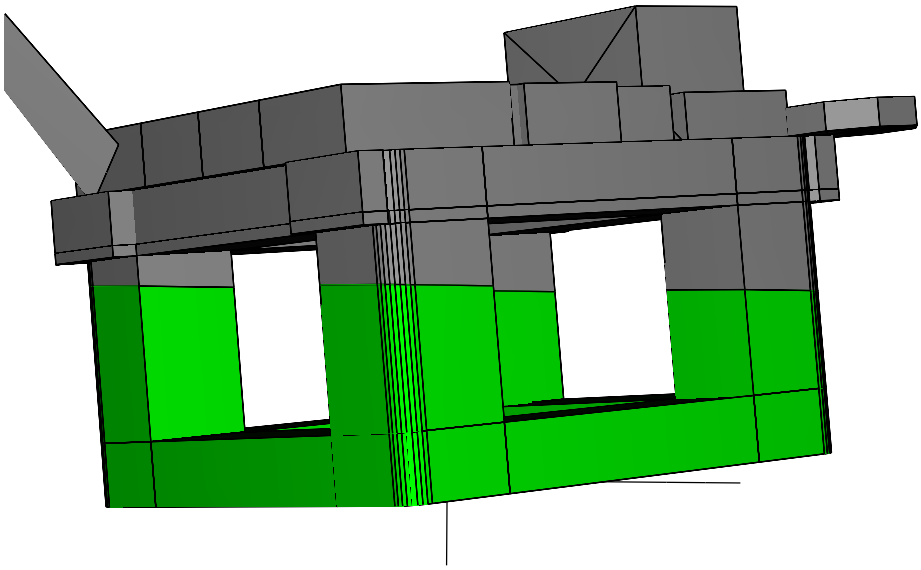


Figura 4.9 – Modelo do Sstab com cinco graus de inclinação

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

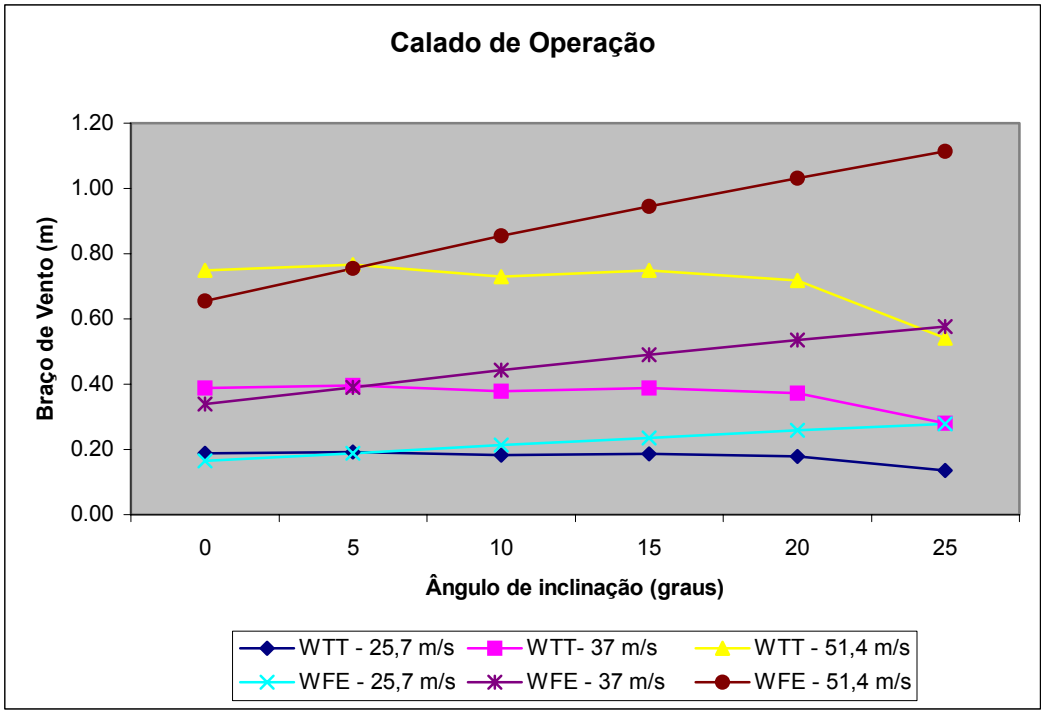


Figura 4.10 – Gráfico de Braço de vento para o calado de operação.

Outro par de imagens, apresentado nas Figuras 4.11 e 4.12, mostra a plataforma a uma inclinação de dez graus. Nestas imagens, percebe-se que o convés da plataforma começa a submergir.

As Figuras 4.10 e 4.13 mostram os gráficos para as curvas de vento nos calados de operação e de trânsito, respectivamente.

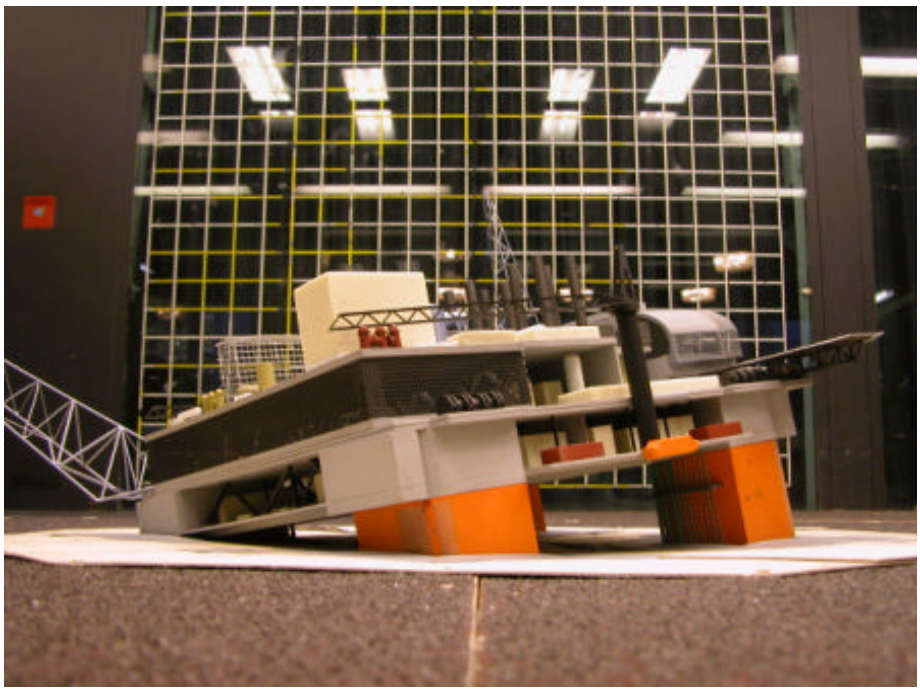


Figura 4.11 - Maquete de túnel de vento com dez graus de inclinação

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

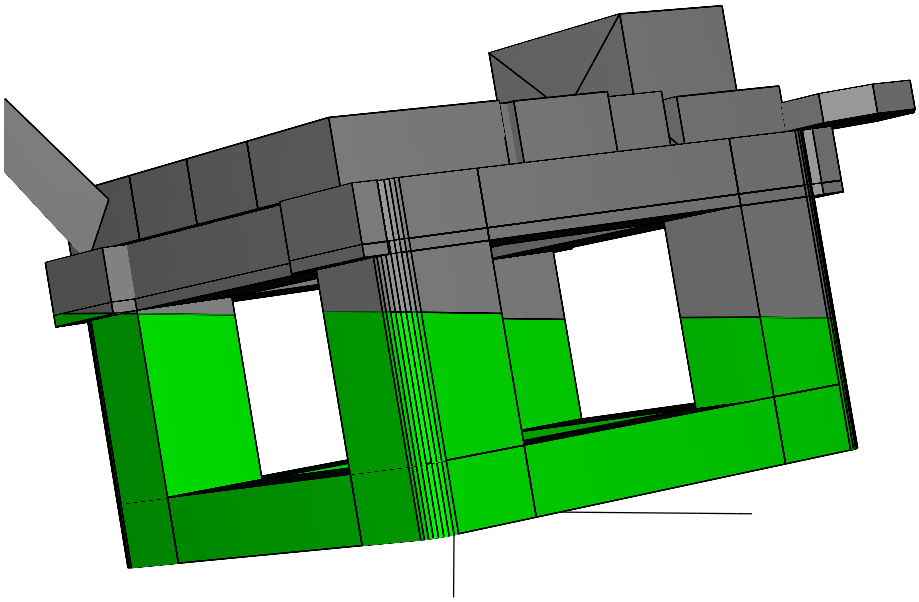


Figura 4.12 - – Modelo do Sstab com dez graus de inclinação

ângulo (graus)	Velocidade do Vento	25.7 m/s	37.0 m/s	51.4 m/s
0	WTT	0,432m	0,895m	1,727m
	WFE	0,311m	0,645m	1,245m
	WFE - WTT	-28,01 %	-27,93 %	-27,91 %
5	WTT	0,410m	0,850m	1,640m
	WFE	0,350m	0,726m	1,401m
	WFE - WTT	-14,63 %	-14,59 %	-14,57 %
10	WTT	0,363m	0,753m	1,452m
	WFE	0,391m	0,811m	1,564m
	WFE - WTT	7,71 %	7,70 %	7,71 %
15	WTT	0,342m	0,709m	1,369m
	WFE	0,433m	0,897m	1,730m
	WFE - WTT	26,61 %	26,52 %	26,37 %
20	WTT	0,328m	0,680m	1.312m
	WFE	0,474m	0,982m	1,895m
	WFE - WTT	44,51 %	44,41 %	44,44 %
25	WTT	0,294m	0,610m	1,177m
	WFE	0,510m	1,056m	2,038m
	WFE - WTT	73,47 %	73,11 %	73,15 %

Tabela 4.5 – Valores de braço de vento para o calado de trânsito

Nos resultados do WFE, são considerados os verdadeiros pesos dos calados de operação e de trânsito, calculados pelo Sstab, ao equilibrar a embarcação em

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

cada um dos dois calados, respectivamente. Já no túnel de vento, não é garantida a utilização do peso correto da plataforma. Para a equação (4.2), todos os Coeficientes de Forma foram considerados segundo a Tabela 4.2. Ainda para o WFE, para um mesmo calado do braço de vento, quanto maior a inclinação, maior a área de vento exposta e maior valor para o braço de vento, conforme visto na Figura 4.14. Este aumento da área de vento se deve ao fato dos compartimentos do convés superior terem sido modelados como compartimentos fechados, enquanto na maquete isto não ocorre.

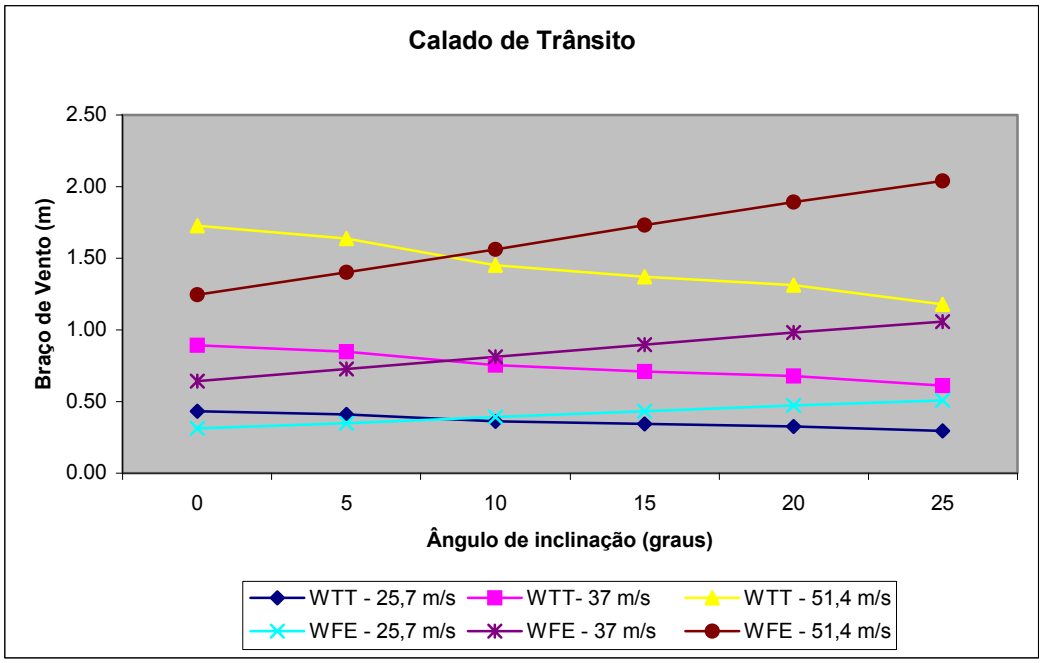


Figura 4.13 – Valores de Braço de vento para o calado de trânsito

Já para o túnel de vento, há uma queda pequena no resultado, conforme se aumenta a inclinação. Para a embarcação em cota paralela, os resultados entre o WTT e WFE foram próximos, mas conforme aumenta a inclinação, o WFE apresentou valores muito maiores, devido ao aumento da área de vento.

Para cota paralela, o WFE sempre obteve resultados abaixo do WTT. Acredita-se que isto ocorra, porque existe uma força aplicada às colunas escondidas da plataforma. Percebe-se na Figura 4.2, que existem duas colunas escondidas e não contribuem para o resultado do algoritmo WFE, mas que na verdade uma força de vento é aplicada sobre estas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

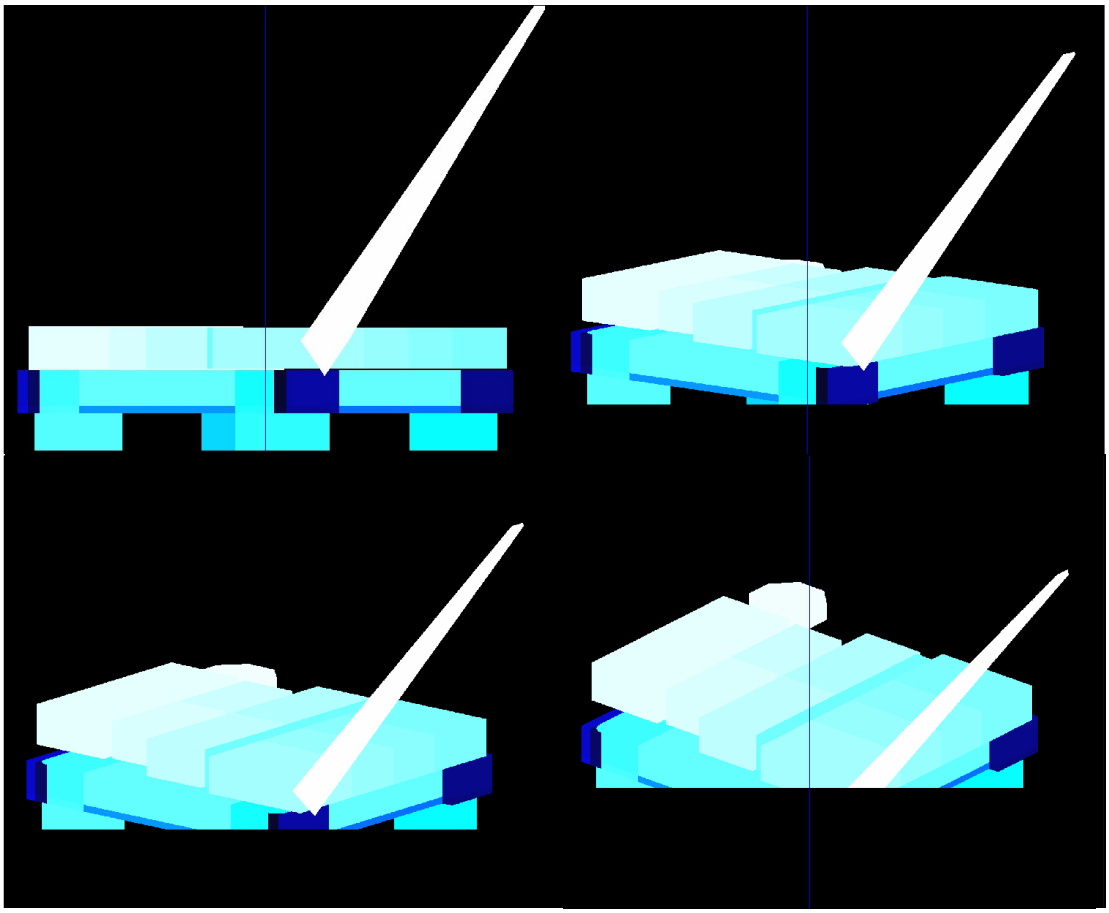


Figura 4.14 – Aumento da área de vento ao aumentar a inclinação

A Figura 4.15 mostra uma seção transversal do modelo e as linhas de vento que mostram a o provável motivo da diferença de resultados. Nota-se como o vento contorna a coluna A e depois se choca com a coluna B. Esta força aplicada à coluna B não seria computada no algoritmo de WFE. Este problema, claro, não acontece para navios.

Um meio de corrigir esse problema é considerar o efeito de Sombra no cálculo da força de arrastro entre dois cilindros [15] [16].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

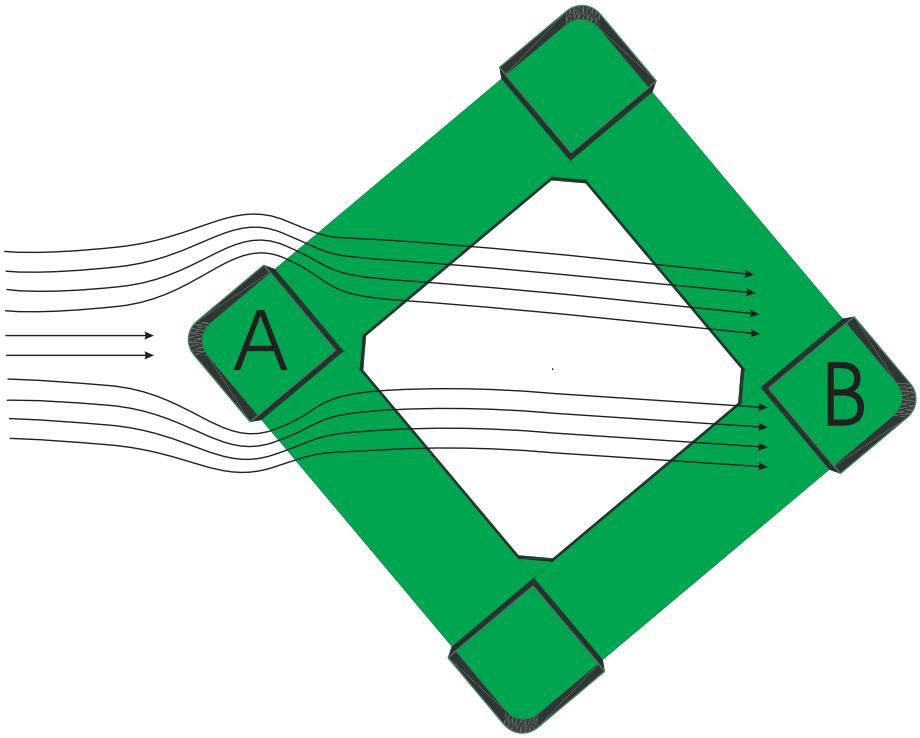


Figura 4.15 – Força do vento em superfícies ocultas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

5
Definição da curva de estabilidade limite

A curva de estabilidade limite é a representação gráfica dos critérios de estabilidade intacto e avariado, em que o GM é mínimo ao longo da faixa de calados de interesse. Geralmente ela é apresentada na forma da envoltória determinada pelo menor KG entre todas as condições de um mesmo calado, quando se eleva ao máximo possível o KG de cada condição dentro dos limites de estabilidade aprovados pelas normas. Portanto, esta curva ao ser respeitada pelos responsáveis, implica no atendimento a todos os critérios de estabilidade.

Ao se carregar ou descarregar uma unidade, deve-se observar se nesta nova condição de operação o KG esteja abaixo do KG máximo permitido por esta curva de estabilidade para aquele calado. Além disso, é necessário que se verifique o KG de situações intermediárias em que a embarcação se encontrará no processo de carga e descarga.

Ao realizar testes em um modelo, é essencial que a sua curva de estabilidade limite seja aprovada pelos critérios de organizações internacionais de segurança marítima, entre estas a IMO [3], a DNV, a ABS e a NMD. Estas organizações exigem em suas normas que um modelo seja testado em diferentes condições de carregamento, estando especificados os critérios para estas condições.

Neste capítulo, serão descritos os critérios de condições e de testes de estabilidade destas condições, com o objetivo de validar um modelo. O objetivo destes procedimentos é determinar se a embarcação é satisfatoriamente estável, determinando se esta passa pelos critérios de estabilidade das organizações.

5.1.
Condições de Carregamento

O programa Sstab gerencia diferentes condições de carregamento e situações de flutuação, mantendo um conjunto de condições. É comum, tanto em fases de projeto quanto em simulações de emergência, manter em uma estrutura

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

de dados separada, qualquer nova configuração que seja necessária especificar. Definine-se então:

L Conjunto das condições de carregamento

Para cada condição é necessário armazenar:

1. Os parâmetros referentes aos volumes de compartimentos.
2. Os parâmetros referentes ao sistema de pesos distribuídos.
3. Os parâmetros referentes à condição de carregamento dos itens de peso.
4. Os parâmetros referentes à condição de equilíbrio.
5. Os parâmetros referentes à modelagem de vento.
6. Os estados de pontos de alagamento.

As condições de carregamento são organizadas em classes de condições, que usualmente separam os casos em condições intactas, avariadas ou alagadas, em fases de projeto. Uma outra possibilidade é organizar essas condições em classes que dividem as condições por seus calados como, por exemplo, uma classe para calado de operação e outra para calado de trânsito. Adotando este último critério, definine-se:

L_C conjunto de uma classe de condições de carregamento

Deve-se então percorrer e subdividir L em conjuntos menores L_C usando como critério o calado de cada condição de carregamento.

Os critérios usados para se criar novas condições de carregamento são bem definidos pelas organizações de segurança marítima. Um desses critérios indica que o modelo deve ser testado em seus calados de trânsito e de operação, ambos passando por situações de avaria. Logo, partindo de uma condição intacta, deve-se criar condições de avaria para cada tanque.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

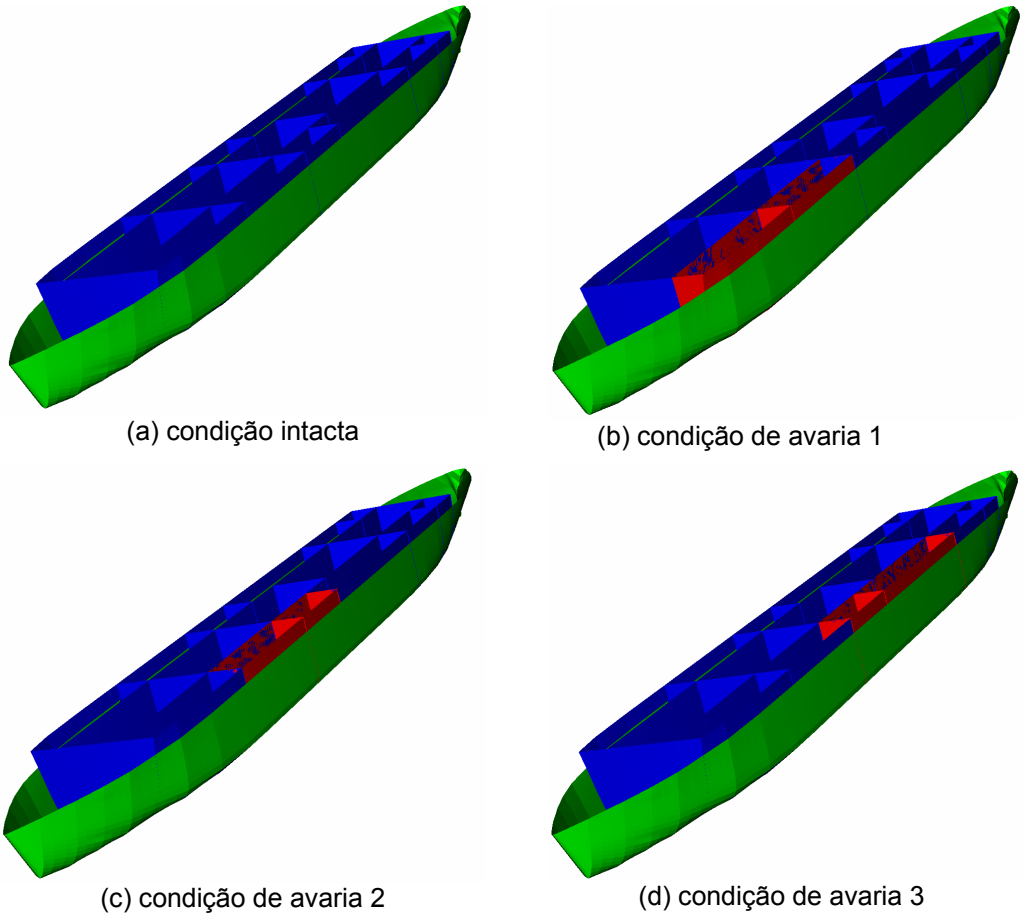


Figura 5.1 – Criação de condições de avaria a partir de uma condição intacta.

A Figura 5.1 ilustra este procedimento. Em azul estão todos os tanques intactos. Em vermelho estão os tanques avariados. Verde representa o casco do navio. A Figura 5.1(a) representa o navio numa determinada condição de equilíbrio para um determinado calado. Observa-se como a cada nova condição, um par diferente de tanques vizinhos está avariado. Isto ocorrerá até que toda a lista de tanques sujeitos a avaria seja exaurida. O conjunto de todas essas condições, inclusive a condição intacta, constituiria um conjunto L_C. Este procedimento se repetiria para cada calado.

É importante ressaltar que nem todas as condições de carregamento devem ser aprovadas em todos os critérios de cada organização. Isto ocorre porque algumas organizações exigem aprovação de critérios de modelos em determinadas situações de carregamento não exigidas por outras. Isto significa que cada condição de carregamento está sujeita a um determinado conjunto de critérios próprios, não necessariamente iguais aos critérios de outras condições. Logo, os

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

critérios de cada condição também são características particulares a serem armazenadas juntas com as outras já citadas.

5.2. Diagrama de Estabilidade

Esta ferramenta é amplamente utilizada nesta parte do trabalho e deve ser entendida.

Dada uma determinada condição de carregamento e uma configuração de empuxo, o algoritmo já existente constrói os diagramas de estabilidade impondo ângulos de inclinação para um dado ângulo de incidência e velocidade do vento. Cada ponto da construção é feito com o Tipo 2 de equilíbrio (vide Seção 2.6) que resulta por definir a posição vertical que determina o deslocamento desejado, e o *trim* que elimina o momento de *trim*. Um diagrama de estabilidade típico é mostrado na Figura 5.2.

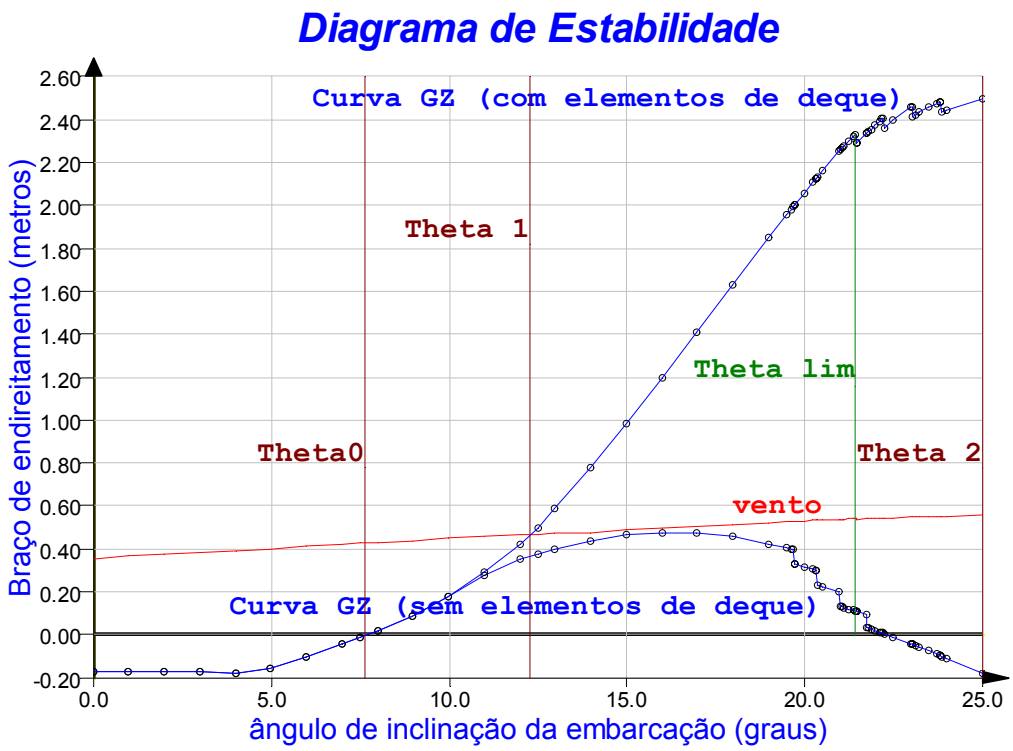


Figura 5.2 – Diagrama de estabilidade gerado pelo Sstab.

Note que existem duas curvas de braço de endireitamento (curva GZ). Uma com os elementos de deque e outra sem os elementos de deque. Elementos de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

deque são todos os compartimentos de casco que estão acima de uma determinada cota determinada para o projeto.

5.2.1.
Influência de Superfície Livre

O algoritmo de geração do diagrama de estabilidade calculará cada posição avaliando a influência mais precisa da variação do centro de gravidade dos compartimentos de carga.

5.2.2.
Regras e Regulamento

As propriedades necessárias para a verificação com os critérios implementados anteriormente são computadas na criação do diagrama. O Sstab faz a verificação dos parâmetros extraídos de cada diagrama de estabilidade gerado segundo os critérios selecionados. Todos os códigos implementados apresentam critérios semelhantes, limitando a razão entre as áreas das curvas de braços de restauração e de vento, o menor ângulo de entrada não estanque (*downflooding*), o intervalo de estabilidade, a velocidade mínima de vento, etc.

Os critérios de estabilidade intacta, estabilidade em avaria ou de estabilidade em alagamento são previamente selecionados para cada condição, conforme visto anteriormente, antes das verificações de estabilidade.

5.2.3.
International Maritime Organization (IMO)

Criada em 1948 numa convenção em Genebra com o nome de Organização Marítima Inter-Governamental (*Inter-Governmental Maritime Consultative Organization, IMCO*), teve seu nome mudado para IMO em 1982.

O objetivo desta organização é a de promover a cooperação entre governos na criação de regulamentos no que diz respeito ao comércio marítimo internacional. A organização deve encorajar e facilitar a adoção de práticas padrão de segurança marítima, eficiência na navegação e prevenção e controle de poluição marítima gerada pelas embarcações. A organização também foi imbuída

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

de poder para resolver problemas administrativos e legais relacionados à navegação marítima.

A Convenção Internacional de segurança marítima (SOLAS) de 1974, atualmente em vigor, foi adotada pela IMO e entrou em vigor em 1980. Desde então, inúmeros protocolos e emendas já foram adicionados a estas normas.

A IMO define θ_0 como sendo o ângulo de inclinação da embarcação em posição de equilíbrio, pelo eixo de azimute crítico de uma condição de carregamento. θ_1 é o primeiro ângulo de equilíbrio ao adicionar a força de vento externa à embarcação. θ_2 é o segundo ângulo de equilíbrio ao adicionar a força de vento externa à embarcação, isto porque ao continuar girando a embarcação em torno de sua reta de azimute crítico, a plataforma pode chegar a uma segunda condição de equilíbrio. θ_{fi} é o ângulo de inclinação da plataforma em que o ponto de abertura *i* não estanque (vide Seção 6.2) submerge. lw_1 é a o valor de GZ para o ângulo de θ_1 e lw_2 é o valor de GZ para θ_2, com elementos de deque. θ_{lim} é o menor entre θ_2 e o ângulo do primeiro ponto de abertura não estanque que submerge θ_{f1}. *Stability Range* é a diferença entre o ângulo θ_{lim} e o ângulo θ_1. *Area Ratio* é a razão entre a área abaixo da curva de GZ, dividida pela área abaixo da curva de vento WHL, conforme demonstrado na Figura 5.3. Em cinza está a área abaixo de GZ e em amarelo está a área abaixo da curva WHL. A área listrada mostra onde as áreas se sobrepõem.

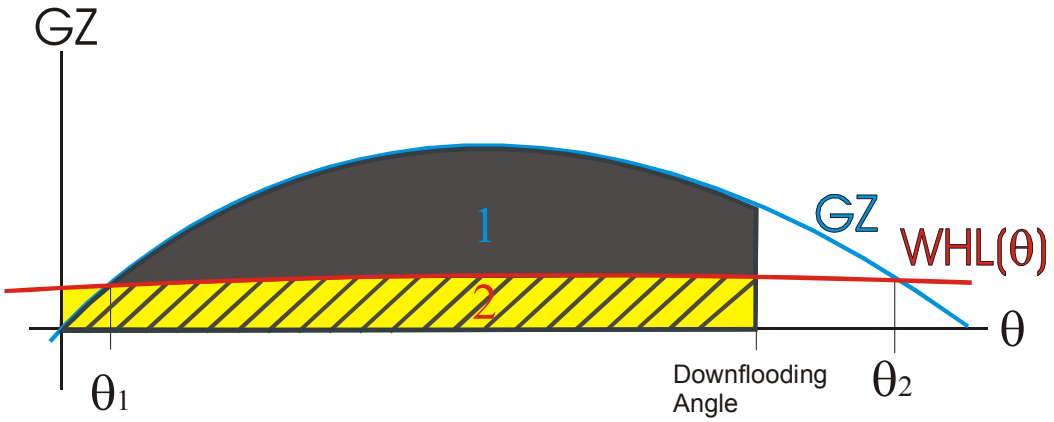


Figura 5.3 – *Area Ratio* em um diagrama de estabilidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

5.2.3.1.
Critérios de aprovação da IMO MODU Code (semi-submersível)

Segundo a IMO, para uma determinada condição de carregamento exigida pela norma ser aprovada em seu diagrama de estabilidade, os seguintes critérios devem ser satisfeitos:

Para casos de condições de carregamento intacto:

- Area Ratio > 1.3
- Velocidade do vento > 36 m/s.
- GM transversal > 1.0 (Critério Petrobrás)

Para casos de condições de carregamento danificados:

- $\theta_1 < 17$ graus.
- Velocidade do vento na criação do diagrama deve ser maior que 25.8 m/s.
- *Stability Range* deve ser maior que sete.
- GZ/WHL > 2 no ponto máximo da curva de WHL(θ).

Para casos de condições de carregamento com compartimentos inundados:

- $\theta_0 < 25°$.
- $\theta_0 + 7 < \theta_2$

O critério segundo o qual GM deve ser maior que 1.0 é exclusivo da Petrobrás. Originalmente, a IMO exige que GM seja maior que zero apenas.

5.2.4.
Norwegian Maritime Directorate (NMD)

A NMD é o órgão responsável pela segurança marítima na Noruega e se tornou referência mundial. As normas da NMD de estabilidade marítima estão implementadas no Sstab e cabe aqui explicar algumas definições usadas para este trabalho.

A NMD define θwa como sendo o mínimo ângulo necessário para garantir a integridade de pontos de abertura estanques, em uma condição de carregamento. θwa deve respeitar duas restrições:

- Deve ser um ângulo maior do que aquele em que curva GZ com elementos de deque atinge 2.5m.
- Deve ser um ângulo maior do que aquele em que a diferença entra as duas curvas GZ atinja 1.0m.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

θwe é o mínimo ângulo necessário para garantir a integridade de pontos de abertura semi-estanques, em uma condição de carregamento. θwe deve ser maior ou igual a θ_1+10 e maior ou igual a θwa. A Figura 5.4 demonstra esses critérios da NDM. Em azul estão as duas curvas GZ. Em vermelho está a curva de braço de vento, que varia conforme muda o ângulo θ de inclinação (vide Seção 4.3).

5.2.4.1. Critérios de aprovação da NMD

A NMD apresenta critérios de aprovação diferentes daqueles vistos na IMO. Os critérios utilizados aplicam-se somente para casos danificados e inundados. Para casos de condições de carregamento danificadas:

- θ_1 < 17 graus.
- Velocidade do vento na criação do diagrama deve ser maior que 25.8 m/s.
- Area Ratio > 1.0
- Stability Range deve ser maior que 10.
- Em θwa, GZ deve ser superior a 2.5m e diferença entre o GZ das duas curvas neste ponto deve ser superior a 1.0.

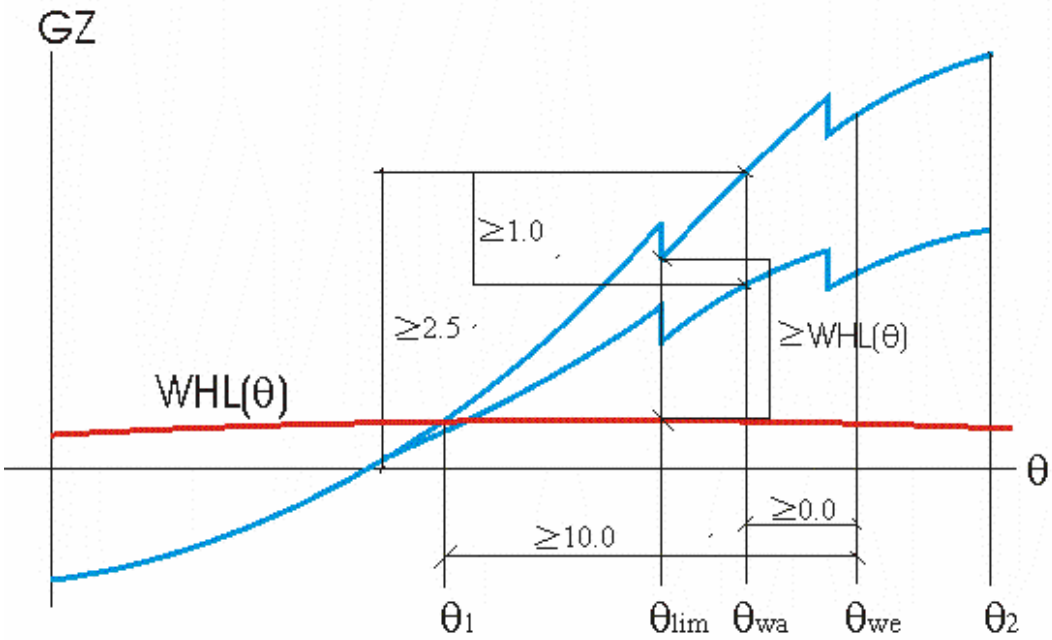


Figura 5.4 – Diagrama de Estabilidade, critério NMD

Para casos de condições de carregamento com compartimentos inundados:

- Velocidade do vento na criação do diagrama deve ser maior que 36.0 m/s.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

- Stability Range deve ser maior que 10.
- Em θwa, GZ deve ser superior a 2.5m e diferença entre o GZ das duas curvas neste ponto deve ser superior a 1.0.

5.2.5. Outros Órgãos Reguladores e Critérios

Existem outros órgãos reguladores importantes, que também tiverem seus critérios implementados no Sstab. Mas os critérios destes outros órgãos, como a DNV e a ABS, já estão contidos nos critérios da IMO ou da NMD. Apenas dois novos critérios foram adicionados:

- A ABS exige que $\theta_1 < \theta_{lim}$ para casos danificados e inundados.
- A DNV exige $\theta_0 < 15.0$ para casos danificados e inundados.

5.3. Computação do Centro de Gravidade Máximo das Condições

O algoritmo de obtenção do KG limite de um conjunto de condições L_C é apresentado na Figura 5.5. Em amarelo está o procedimento de obtenção do máximo KG que uma condição de carregamento pode chegar dentro dos limites de estabilidade. O KG limite de L_C será o menor valor dentre todos os máximos KGs obtidos de todas as condições de L_C.

O máximo KG de uma condição deve estar necessariamente entre o seu KB (distância quilha ao centro de empuxo) e o seu KM (distância quilha ao metacentro), ambos calculados em cota paralela, ou seja, são os valores da condição intacta original. Logo, a interpolação tem que ser entre esses dois valores. O valor de KG é alterado artificialmente, ao alterar sua posição em z a partir de sua posição de equilíbrio da condição.

Dentro do procedimento de obtenção do máximo KG de uma condição de carregamento encontram-se dois passos fundamentais:

- Teste de equilíbrio.
- Teste de critérios das reguladoras selecionados para a condição.

O teste de equilíbrio é realizado ao chamar um método do Sstab para tentar colocar a plataforma na sua nova posição de equilíbrio (Vide Equilíbrio, Tipo 1, na seção 2.6). Se alcançado um novo estado de equilíbrio, deve-se verificar se este

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

é estável, comparando seu KG com o metacentro calculado para este novo equilíbrio. Se KG é maior, considera-se que não há equilíbrio, pois trata-se de um equilíbrio instável.

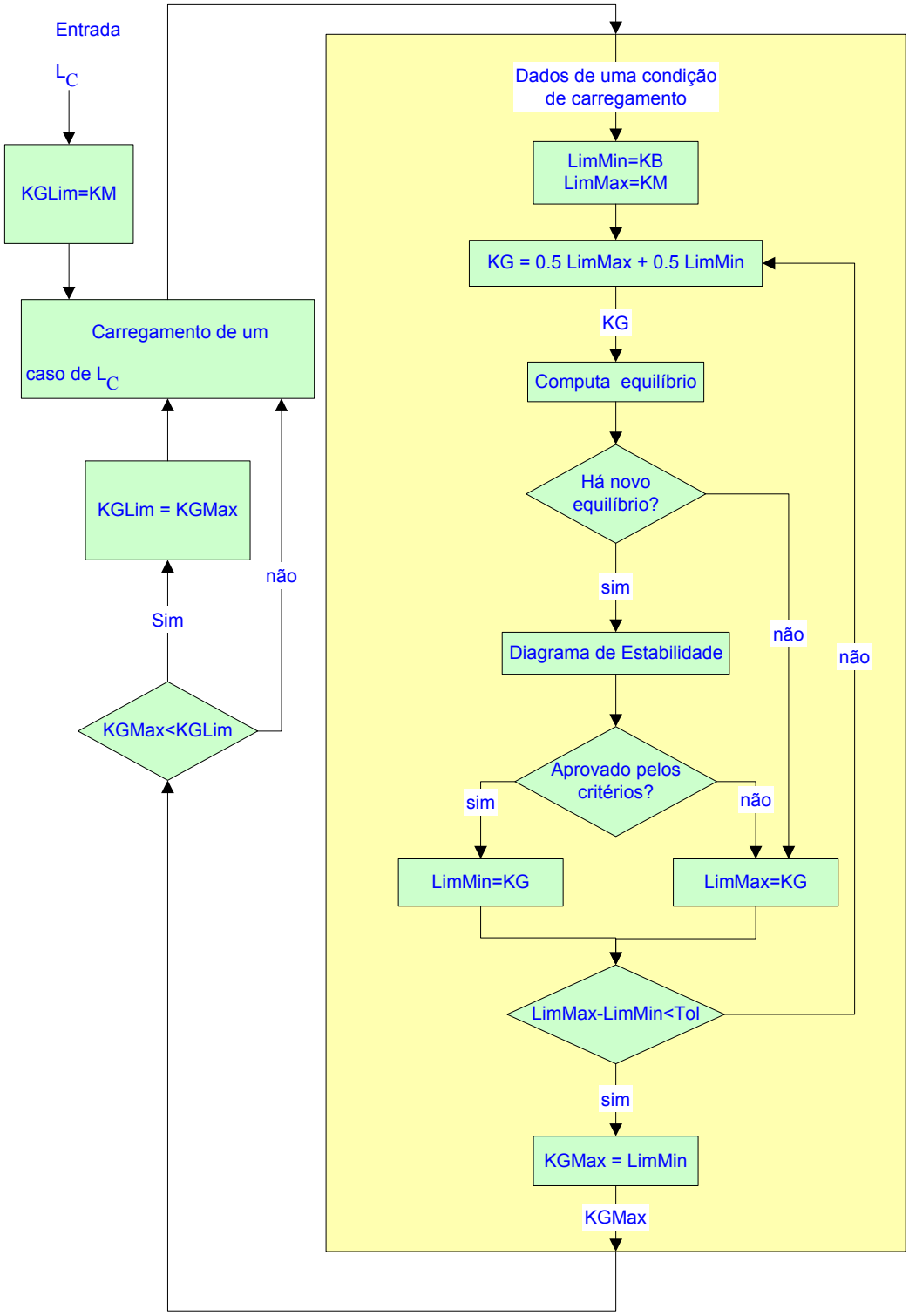


Figura 5.5 – Fluxograma de obtenção do KG limite de um conjunto de condições L_C

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

O teste de critérios das reguladoras é feito ao gerar um diagrama de estabilidade. Gerando um diagrama de estabilidade para este novo estado de equilíbrio, é possível certificar se este novo estado de equilíbrio é aprovado pelas reguladoras, verificando se seus valores encontram-se dentro dos limites permitidos.

Este processo é repetido até que o máximo KG da condição seja obtido com a precisão desejada. Então, até que todas as condições tenham se esgotado, uma nova condição é carregada.

5.4. Exemplo

Como exemplo de resultado da curva de estabilidade limite, adotou-se um modelo de plataforma semi-submersível. Cada ponto na curva é o resultado da compilação de uma condição de carregamento intacta e suas derivações para os casos de avaria. O calado varia de condições vazias a condições completamente carregadas. A Tabela 5.1 mostra o resultado obtido na última coluna para cada conjunto de condições.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Calado(m)	Carga (%)	Carga (t)	KB (m)	KMt (m)	**Critério Limitante**	**Max. KG(m)**
25,0	0	87004,10	8,62	32,51	**GM_min>1.0**	**31,51**
30,0	20	94477,10	10,12	32,12	**GM_min>1.0**	**31,11**
32,5	30	98197,13	11,76	32,08	**GZ>2,5 em θ_{wa}**	**30,13**
35,0	40	101935,97	11,76	32,15	**GZ>2,5 em θ_{wa}**	**29,09**
37,5	50	105696,50	12,63	32,29	**GZ>2,5 em θ_{wa}**	**28,69**
40,0	60	109413,67	13,52	32,51	**GZ>2,5 em θ_{wa}**	**28,28**
45,0	80	121594,13	16,50	37,38	**GZ>2,5 em θ_{wa}**	**30,62**
50,0	100	135353,13	19,59	39,10	**Stab_range>7**	**19,79**

Tabela 5.1 – Exemplo de resultados de KG max.

A Figura 5.6 mostra estes resultados num gráfico, representados por uma linha azul. Conforme se aumenta o calado, diminui-se o máximo KG. A linha rosa representa o valor de KMT, limitante superior destes valores e em amarelo, KB, limitante inferior destes valores.

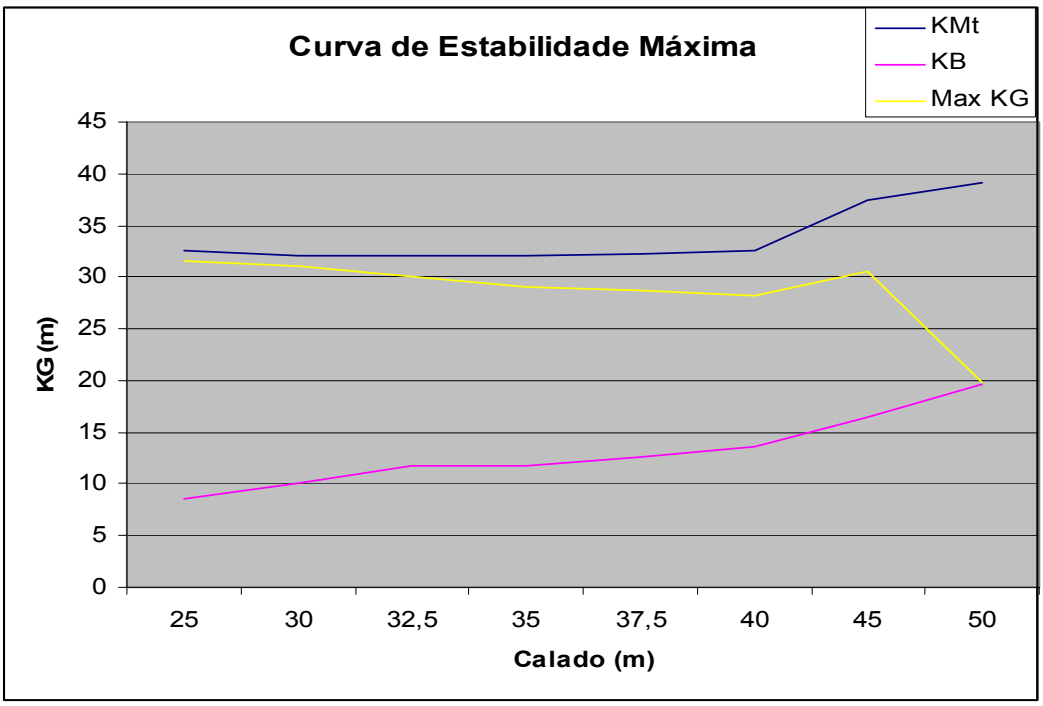


Figura 5.6 – Gráfico Resultado da curva de Estabilidade Máxima.

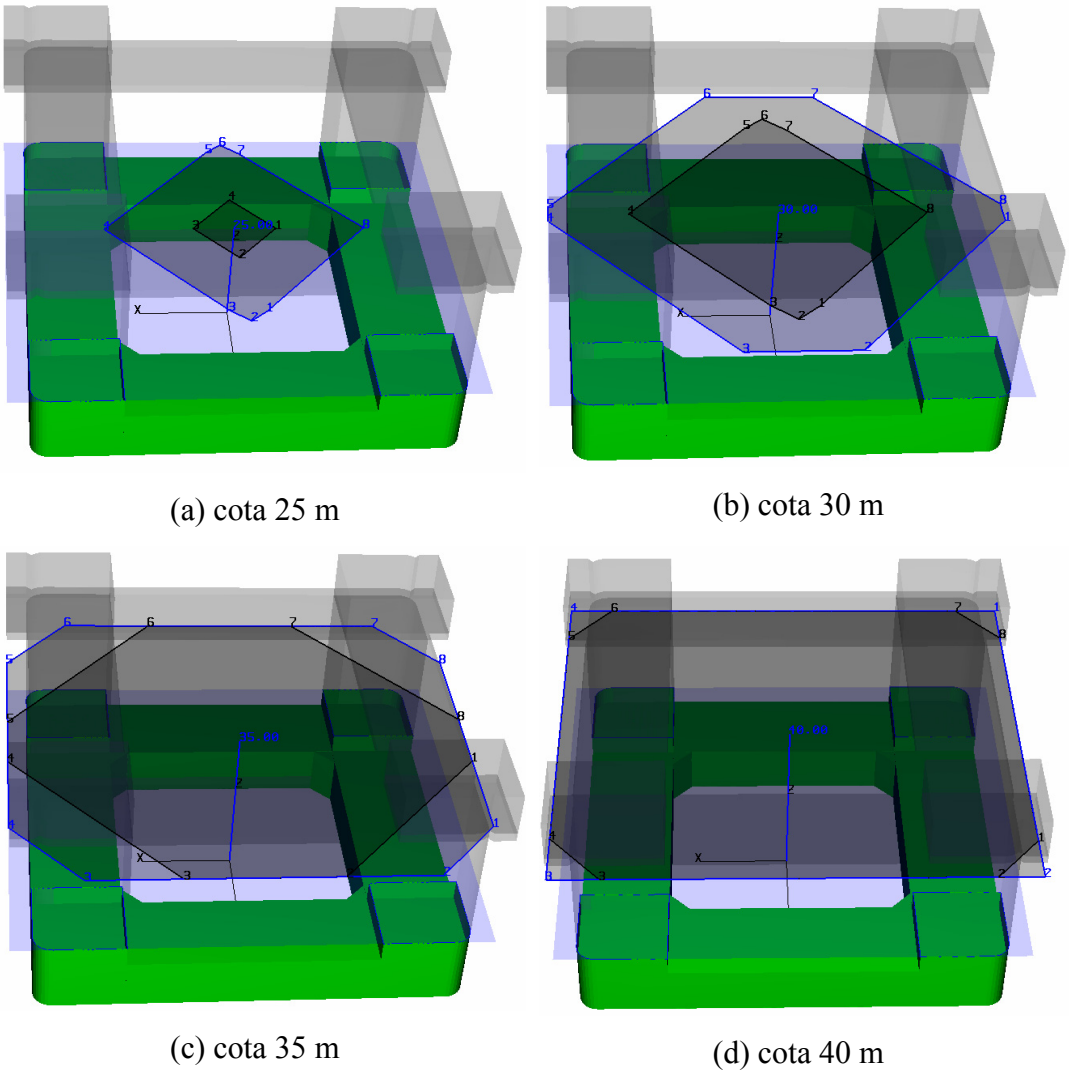
Este exemplo mostra uma curva aceitável para o modelo adotado, em que todas as condições foram analisadas favoravelmente, já que a curva Max KG está afastada da curva KB e próxima a curva KMt. A própria curva de KMt tem um afastamento aceitável de KB. Curvas de Max KG mais próximas de KB significa que a embarcação sofreria mais riscos ao ser carregada e seu centro de massa teria que permanecer sempre baixo.

Para o calado de 50m, o valor obtido de Max KG não foi aceitável, mas este calado está muito acima do calado de operação e este ponto entrou apenas para ilustrar um exemplo de um ponto que não seria aceito.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

6
Definição integrada dos planos de borda livre e integridade estanque do casco

Linha de praia é um conjunto de coordenadas de mesma cota que determinam um polígono no convés de um navio, por exemplo. Este polígono serve como limitante para classificar as aberturas que se encontram naquela mesma cota.



(a) cota 25 m (b) cota 30 m

(c) cota 35 m (d) cota 40 m

Figura 6.1 – Linhas de praia para diversas cotas

Neste capítulo será discutido o algoritmo que calcula as linhas de praia de uma plataforma. Para determinar as linhas de praia de uma plataforma, é

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

necessário percorrer todas as condições de carregamento em L (conjunto das condições de carregamento de um modelo), levando-se em conta os critérios das reguladoras selecionados para cada condição.

A Figura 6.1 mostra um exemplo de linha de praia obtido para diversas cotas. A área poligonal mais escura no centro da plataforma representa a área seca da plataforma naquela cota, em que as aberturas não serão estanques. Não há restrições impostas a escotilhas, portas e janelas nesta área. O polígono em azul representa a área sujeita às condições do tempo. Qualquer abertura nesta área azul deve ser resistente às condições variadas do tempo. Já qualquer abertura fora deste polígono azul deve ser completamente estanque. Quanto mais alta a cota, maior se torna a área seca e menor a área molhada.

6.1. Critérios Utilizados

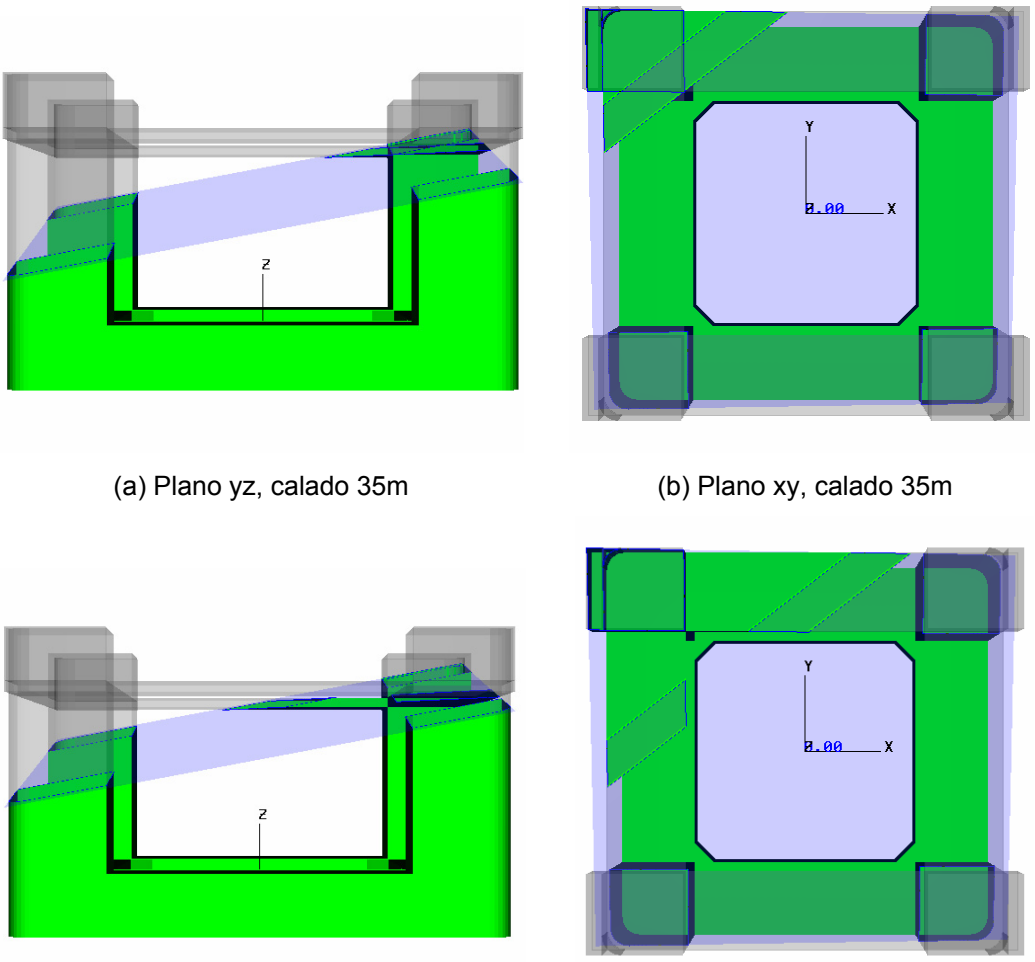
Para realizar os diagramas de estabilidade, foram utilizados as normas da IMO, da NMD e da Marpol apenas, sendo as duas últimas somente para os casos assinalados para ela.

A IMO dita que para se computar a linha de praia de uma plataforma, para cada um dos casos assinalados para este critério, a plataforma deve ser girada a partir de sua posição em cota paralela de um ângulo igual a θ_1, em torno de seu azimute crítico. O calado deve ser o seu calado em equilíbrio para a linha de resistência à água (*watertight*). O calado mais quatro para a linha de resistência ao tempo (*weathertight*).

A Figura 6.2 ilustra como este procedimento é realizado. Para uma condição de carregamento qualquer, com calado igual a trinta e cinco metros, primeiro deve-se girar esta condição em um ângulo de θ_1 retirado do diagrama de estabilidade computado da própria condição. As Figuras 6.2(a) e 6.2(b) mostram este primeiro corte do plano d'água com a plataforma, que é utilizado para delimitar o polígono externo (azul), na Figura 6.3. Em seguida, eleva-se o calado em 4m, para se obter o segundo corte do plano d'água com a plataforma, utilizado para delimitar o polígono interno (preto). A Figura 6.3 mostra para uma cota de 45m este resultado e como ambos contribuem para o resultado final da área seca e a área sujeita ao tempo. A área externa aos dois polígonos, como dito

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

anteriormente, define a área molhada. As linhas em vermelho representam os cortes para ambos os calados para esta cota.



(a) Plano yz, calado 35m (b) Plano xy, calado 35m

(c) Plano yz, calado 35+4m (d) Plano xy, calado 35+4m

Figura 6.2 – Corte da linha d'água com uma condição de carregamento, critério IMO.

Já os critérios da NMD ditam que se deve usar o ângulo θwa para definir a linha d'água e o ângulo θwe para definir a linha da região seca, ambas no calado de equilíbrio da condição, girado em torno de seu azimute crítico. No resto, o procedimento é similar ao da IMO. Para ambos os ângulos, tiram-se as duas linhas de corte entre o plano da cota e o plano d'água. A linha de corte referente a θwa entra como delimitador do polígono azul e a linha de θwe como delimitador do polígono escuro. θwe é o maior entre θ_1+10 e θwa.

A Marpol dita que o ângulo para definir as entradas estanques ao tempo deve ser maior ou igual a θ_1+20, que o braço de restauração residual neste ângulo

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

seja maior ou igual a 0.1 metros e que a área de restauração seja maior ou igual a 0.0175 metros radianos.

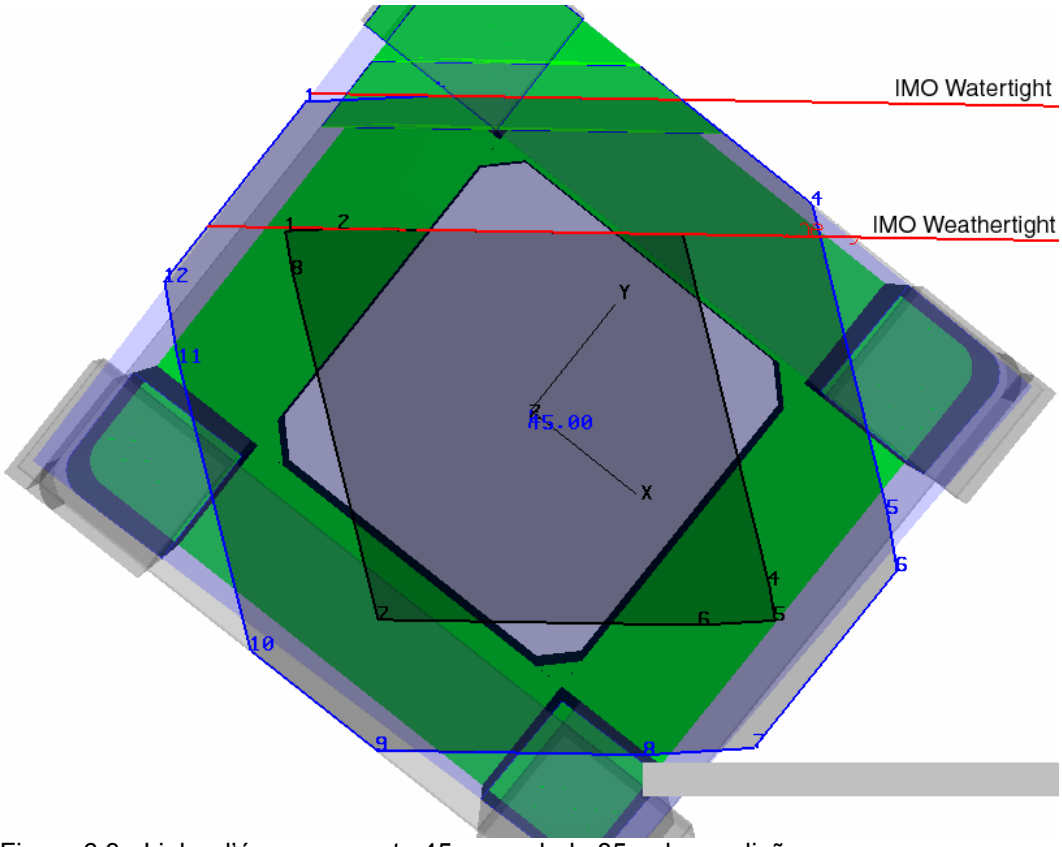


Figura 6.3 - Linha d'água para cota 45 m e calado 35m da condição

6.2. Pontos de Abertura

Pontos de abertura são pontos pelos quais a água poderia entrar na embarcação, como por exemplo, escotilhas, portas, janelas, entradas de ar. Esses pontos podem ser classificados em três tipos:

- Abertura não estanque (*Downflooding*): por aqui a água entra, sem restrições.
- Abertura estanque ao tempo (*Weathertight*): resistente às condições do tempo, se ficar muito tempo submerso, eventualmente a água começará a entrar.
- Abertura completamente estanque (*Watertight*): mesmo o ponto estando submerso, a água nunca entra.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

O objetivo é que se tenha a classificação automática destes pontos, a partir de suas coordenadas locais, realizada pelo algoritmo. Para isto é preciso que para cada posição de cada condição de carregamento, também se tenha a posição transformada desses pontos. Combinando-se o resultado para todas as condições, se tem o resultado para os pontos.

6.3. Estrutura de dados

É necessária uma estrutura de dados robusta para armazenar os resultados de cada condição de carregamento e depois combinar estes resultados em um polígono resultante.

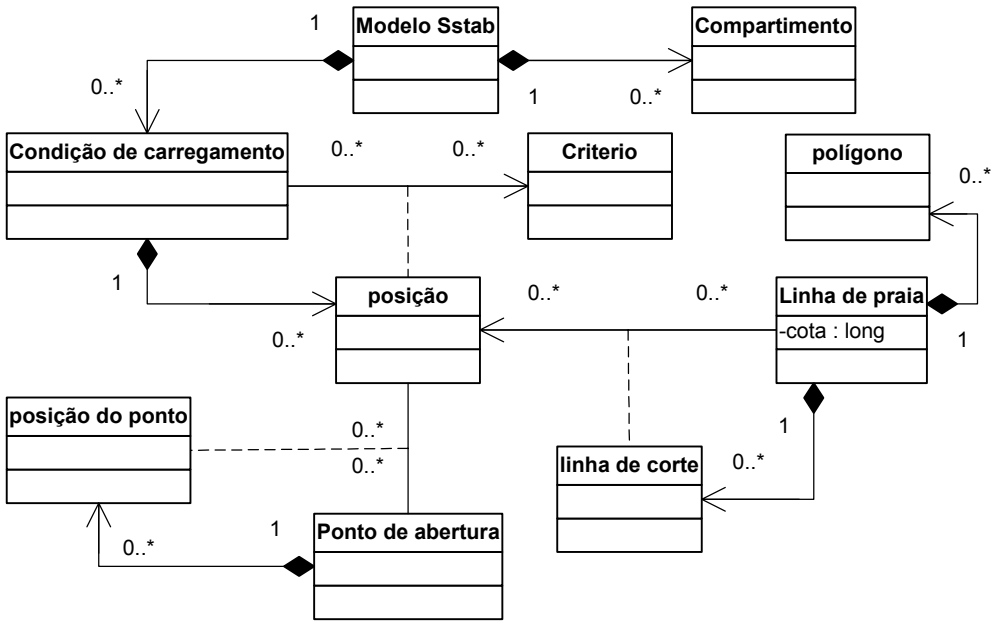


Figura 6.4 – Diagrama de relacionamento entre classes

A Figura 6.4 mostra o diagrama de relacionamento entre classes da estrutura de dados proposta. Existe um modelo do Sstab, composto por compartimentos e responsável por gerenciar suas condições de carregamento. Cada condição de carregamento está associada a uma lista de critérios, da IMO ou da NMD. Cada condição percorre sua lista de critérios e a cada critério, gera uma nova posição para aquele carregamento. A posição de uma condição de carregamento é na verdade armazenada numa matriz transformação geométrica para o modelo, dentro da classe posição. Conforme visto no capítulo anterior, cada condição terá

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

no máximo cinco posições, mas nada impede que este número possa aumentar, se o número de critérios for aumentado.

Ao criar uma linha d'água nova (responsável por criar os dois polígonos de corte), define-se uma cota. Esta cota serve para definir a que altura, em coordenadas locais da plataforma, deve-se realizar o corte. Este corte é realizado entre o plano definido pela cota e o plano definido pela linha d'água. Cada corte destes é armazenado como uma linha de corte.

Estas linhas de corte representam limitações da linha de praia e o conjunto destas linhas deve ser utilizado para se computar o polígono resultante da linha de praia. Existe um polígono para área seca e outro para área sujeita ao tempo, conforme dito anteriormente.

De maneira similar à linha de praia, cada ponto de abertura combinado a uma nova posição resultará numa nova posição do ponto. Esta lista de posições de um ponto será computada para estabelecer sua classificação (não estanque, semi-estanque, estanque).

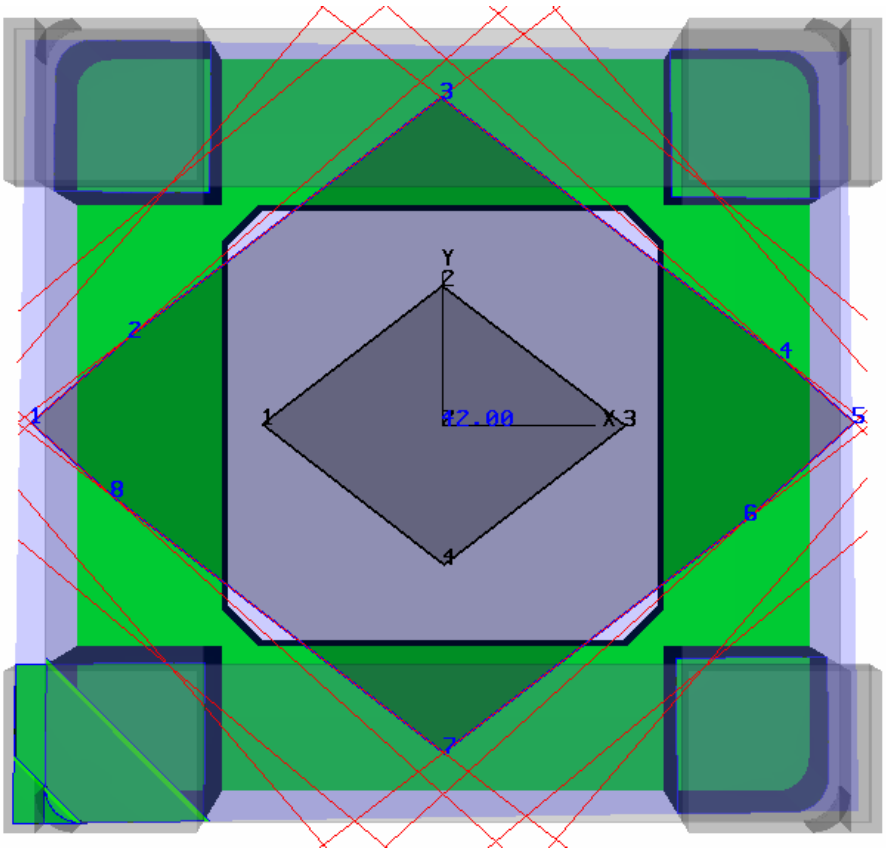


Figura 6.5 – Exemplo de lista enviada ao HED

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

6.4. Computando o Plano de Borda e Classificando os Pontos de Abertura

De posse de todas as linhas de corte, é necessário uni-las em um polígono interno a elas. Para tanto, usamos uma biblioteca chamada HED [13][14], desenvolvida pelo Tecgraf, que faz a interseção das linhas e reconhecimento automático dos polígonos gerados, após ser alimentada com todas as retas referentes às linhas de corte.

A Figura 6.6 nos mostra como todo o procedimento é realizado. Já ciente de nossa estrutura de dados mostrada na Figura 6.4, sabe-se como as informações de cada passo são armazenadas. Em amarelo estão os procedimentos para gerar todas as posições do modelo. Percorre-se a lista inteira de condições de carregamento e para cada critério associado àquela condição, uma nova posição do modelo é gerada. Ao final deste primeiro passo, teremos um conjunto de posições separadas em duas listas. A primeira é utilizada para definir a área seca, a segunda para gerar a área semi-estanque. Estas duas listas também servem para classificar se um ponto de abertura é não estanque, estanque ao tempo ou completamente estanque.

O segundo passo, em verde, é quando se percorre a lista de linhas de praia, para gerar seus resultados. Cada linha de praia tem sua própria cota definida e para cada uma delas, percorrem-se todas as posições do modelo gerando a linha de corte. Duas listas de retas são carregadas no HED, uma da área seca e outra da área semi-estanque. Após passar por todas as posições, o HED retorna os dois polígonos desejados. A Figura 6.5 é um exemplo de uma lista enviada ao HED para que este criasse o polígono resultante. Em vermelho estão todas as retas enviadas, resultantes do processo descrito. Em azul estão os pontos que definem o polígono interno a todas estas retas, neste caso, o polígono que limita a área semi-estanque.

No terceiro passo, em azul, classificam-se os pontos de abertura. Para tanto, percorre-se novamente a lista de posições e para cada posição transforma-se o ponto novamente a partir de sua posição original. Logo, cada ponto de abertura tem uma lista de novas posições para ele. Com esta lista, o ponto é classificado, sendo a posição mais crítica a definidora de seu tipo. Isto significa que, se para uma determinada posição definida por um critério, o ponto puder ser não

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

estanque, mas em outra posição tiver que ser estanque, sua classificação será como estanque.

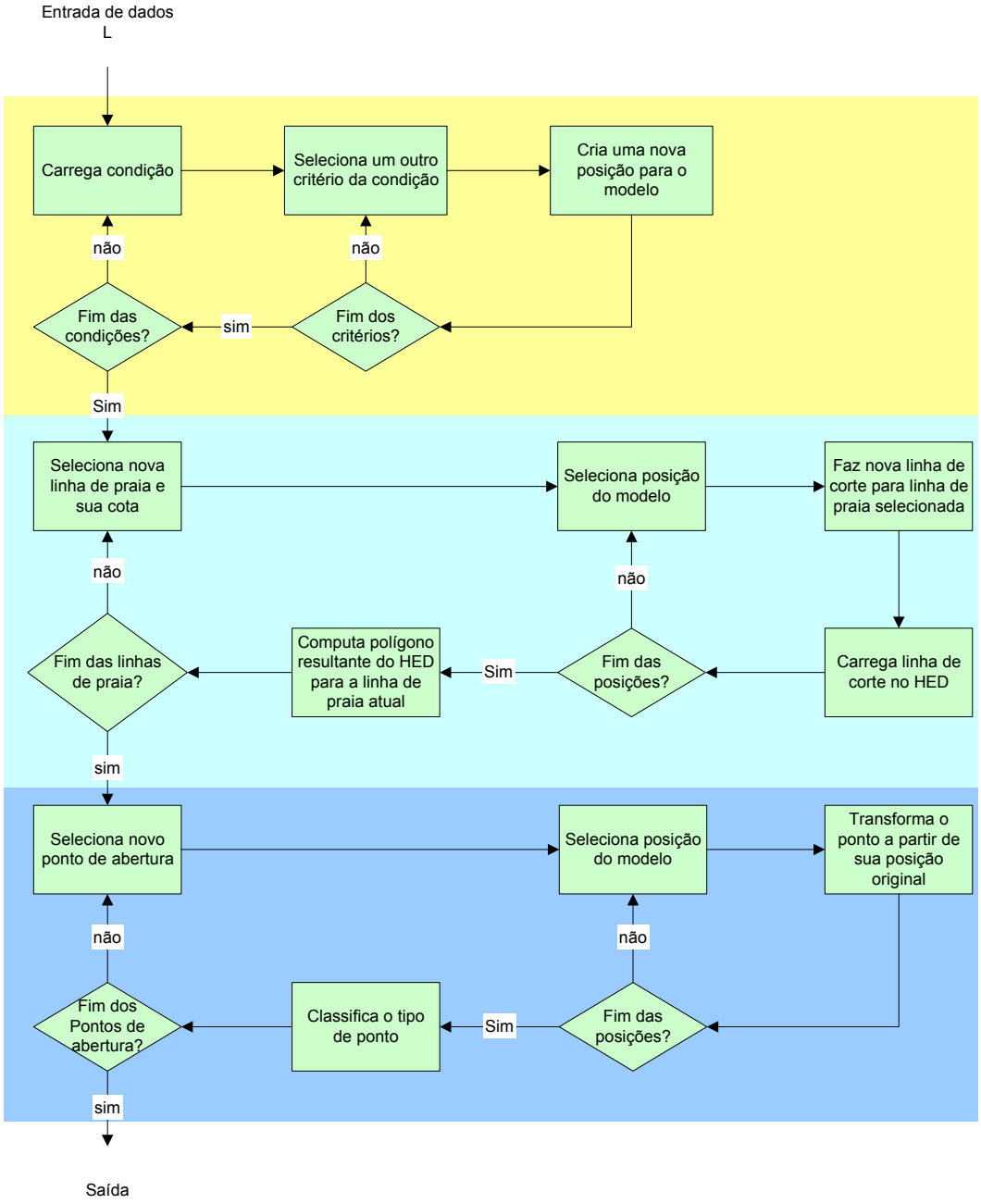


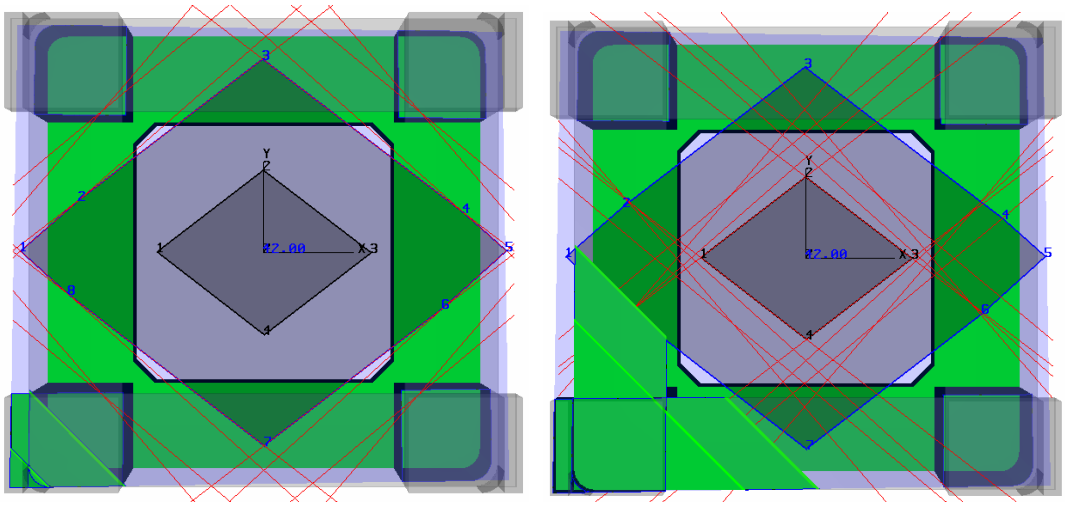
Figura 6.6 – Fluxograma para construção das linhas de praia e classificação dos pontos de abertura

6.5. Exemplo

O exemplo escolhido é o resultado de um modelo que possui vinte e quatro condições de carregamento. A cota escolhida foi de 42m, altura em que terminam

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

as colunas e começam os compartimentos do deque. Foi utilizada apenas a Norma da IMO, ignorando a NMD. A Figura 6.7 mostra os dois polígonos gerados e suas respectivas linhas de corte. A Figura 6.7(a) representa o polígono externo, o limite entre a área semi-estanque e a área estanque. A Figura 6.7(b) representa o polígono interno, o limite entre a área não estanque e área semi-estanque.



(a) Definição da área semi-estanque (b) Definição da área seca

Figura 6.7 – Linhas de corte de área semi-estanque e área seca

Pt.	x	y	z
1	-47,376	0,283	42,000
2	-36,008	10,259	42,000
3	-0,194	37,806	42,000
4	38,930	7,836	42,000
5	47,312	0,348	42,000
6	34,928	-10,882	42,000
7	0,097	-37,696	42,000
8	-37,998	-8,179	42,000

Tabela 6.1 – Pontos da área semi-estanque

A Tabela 6.1 mostra os valores dos vértices do polígono externo, dados em coordenadas locais da plataforma. Isso significa que qualquer ponto de abertura nesta cota de 42m, que esteja fora deste polígono, necessariamente será estanque.

A Tabela 6.2 mostra os valores dos vértices do polígono interno, também em coordenadas locais da plataforma. Todos os pontos de abertura nesta cota, que

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

estejam internos a este polígono, serão não estanques. Os pontos localizados entre os dois limites definidos por estes polígonos serão semi-estanques.

Pt.	x	y	z
1	-20.768	0.148	42.000
2	-0.045	16.087	42.000
3	20.980	-0.019	42.000
4	0.147	-16.057	42.000

Tabela 6.2 – Pontos da área seca

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

7
Conclusão

Todos os algoritmos aqui apresentados foram implementados com sucesso no programa Sstab. O primeiro deles, utilizado para balancear a carga nos tanques, é responsável por definir as condições de operação e trânsito de unidades flutuantes que estão sendo desenvolvidos pela Petrobrás.

No momento usa-se muito as ferramentas de minimizar a área de superfície livre ou de minimizar o esforço cortante na criação de uma nova condição de carregamento, para se definir o carregamento dos compartimentos.

O propósito principal do algoritmo de computação da força de vento é aplicar essa força na geração do diagrama de estabilidade. Apesar do algoritmo ser rápido, ele tem que ser chamado inúmeras vezes na criação do diagrama de estabilidade, já que esta força muda para cada nova posição da plataforma. Isto, até o momento, inviabilizou o uso deste algoritmo no programa.

Os algoritmos de geração da curva de KG Max e de geração da linha de praia se tornaram muito utilizados no desenvolvimento das novas unidades, entre elas, a P-52, a P-55, a P-57 e a MonoBr. Isto porque eles compilam numa análise final todos os critérios necessários para avaliação do modelo. O exemplo da curva de KG Max mostrado neste trabalho foi feito com um modelo de uma dessas novas unidades que está sendo desenvolvida na Petrobras.

Todos os algoritmos são rápidos o suficiente para rodar em computadores comuns, com uma CPU de 2.8 GHz, 512 Mb de RAM e 64Mb de placa de vídeo.

A definição da curva de estabilidade limite provou ser o algoritmo mais demorado, levando alguns minutos para processar inúmeras condições de carregamento. Para condições de carregamento às quais se aplicam as normas da NMD, leva-se em média 3 minutos para achar o KG máximo de uma condição. Condições de carregamento às quais as normas da NMD não se aplicam, leva-se em média menos de 1 minuto para achar o KG máximo de uma condição. Isto ocorre, porque as Normas da NMD exigem que duas curvas sejam traçadas para gerar o diagrama de estabilidade, conforme visto na Figura 5.2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

O algoritmo da geração da linha de praia mostrou-se rápido, quando todas as condições já tiverem seus equilíbrios computados e seus diagramas de estabilidade gerados. Neste caso, leva-se em média menos de 1 minuto para processar até 100 condições de carregamento e gerar as linhas de praia. A este tempo, acrescenta-se o tempo de computar o equilíbrio e gerar o diagrama de estabilidade para cada uma das condições em que isto não tiver sido feito anteriormente.

Os outros procedimentos se mostraram bem rápidos, levando apenas alguns segundos de processo. Estas estimativas, é claro, dependem da complexidade do modelo e do número de faces deste.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

8
Referências Bibliográficas

[1] COELHO, L.C.G. et al. **Equilibrium, Ballast Control and Free-Surface Effect Computations Using the Sstab System**, Proceedings of the 8th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles - Stab, pp. 377-388, 2003.

[2] BERTSIMAS, D; TSITSIKLIS, J. **Introduction to Linear Optimization,** Athenas Scientific, 1997. 608p.

[3] **CODE for the Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units**. International Maritime Organization, Resolução MSC.187(79) , 2001.

[4] COELHO, L.C.G.; FIGUEIREDO, L.H.; GATTAS, M. **Intersecting and trimming parametric meshes on finite-element shells**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 47. No. 4, pp. 777-800, 2000.

[5] CORMEN, T.H. et al. **Introduction to Algorithms**, 2.ed. MIT Press, 2001.

[6] FEINER,S.K. et al. **Computer Graphics: Principles and Practice,** 2.ed. Addison Wesley Professional, 1995.

[7] RIJ, T. **Object Space versus Image Space: A Comparison of Image Synthesis Algorithms**. Technical Report: CS-R9426. CWI, Department of Interactive Systems.1994.

[8] BMT Fluid Mechanics Limited, **P-55 Semi-submersible Wind Tunnel Tests**, Project no. 43640/00, 2006.

[9] NOGGUEIRA, S. **Estabilidade de Plataformas Semi-Submersíveis: Teoria e Controle de Emergência.** Apostila de uso interno, Petrobras**,** 2002.

[10] **The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships**, International Maritime Organization, Protocolo, 1978.

[11] MAFFRA, S.A. et al. **A Sequential Linear Program for the Automatic Loading of Vessels**, Proceedings of the 9th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles – Stab, 2006.

[12] MAFFRA, S.A. et al. **Using the graphics hardware to compute wind forces**, Proceedings of the 9th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles – Stab, 2006.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

[13] CAVALCANTI, P.R. et al. **Criação e Manutenção de Subdivisões do Espaço**, Dissertação de mestrado, Departamento de Informática, PUC-Rio, 1992.

[14] CAVALCANTI, P.R.; MARTHA,L.F.; CARVALHO, P.C. **Nonmanifold Modeling: Na Approach Based on Spatial Subdivision**, Computer-Aided Design, Volume 29, March, 1997. pp. 209-220.

[15] HUSE, E. et al**. Experimental Study of Non-Linear Loads on Vertical Cylinders in Steep Random Waves**, Hague, ISOPE 1995.

[16] FUCATO, C.H. **Desenvolvimento de um Modelo de Sombra para Simulador Dinâmico para Análise de dois Navios em Tandem.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado em Engenharia Naval., 2003. p.165

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421256/CA

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo