



**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



**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

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

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.

## 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 anterior: 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 estanca 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

## 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, Pontificia 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 necessities 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.

## 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



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

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 Abertura	99
6.5. Exemplo	100
 7 Conclusão	 103
 8 Referências Bibliográficas	 105

## 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 <i>trim</i>	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

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 – <i>Area Ratio</i> 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

## 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

## Lista de símbolos

$\Delta$ ,	peso deslocado da plataforma
$\nabla$ ,	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

$M_T$ ,	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)
$\rho_i$ ,	densidade do líquido do tanque i
$\rho_L$ ,	densidade do líquido
$\rho_w$ ,	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
$\Delta V_i$ ,	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
$V_k^{\text{total}}$ ,	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
$\theta_0$ ,	ângulo de inclinação da embarcação em posição de equilíbrio

- $\theta_1$ , 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  $\theta_2$
- $\theta_{fi}$  o ângulo de inclinação da plataforma em que o ponto de abertura  $i$  não estanque (vide Seção 6.2) submerge.
- $\theta_{lim}$  o menor entre  $\theta_2$  e o ângulo do primeiro ponto de abertura não estanque que submerge  $\theta_{f1}$ .