

**Gil Rudge Cavalcanti de
Albuquerque**

**Modelagem e Simulação da
Dinâmica de Bóias de Superfície
Ancoradas**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro
Outubro de 2008



Gil Rudge Cavalcanti de Albuquerque

**Modelagem e Simulação da Dinâmica de Bóias de
Superfície Ancoradas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Carlos Alberto de Almeida

Rio de Janeiro, outubro de 2008



Gil Rudge Cavalcanti de Albuquerque

**Modelagem e Simulação da Dinâmica de Bóias de
Superfície Ancoradas**

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

Prof. Carlos Alberto de Almeida

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Dr. Márcio Martins Mourelle

PETROBRAS

José Eugenio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico
Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 6 de outubro de 2008

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

Gil Rudge Cavalcanti de Albuquerque

Graduou-se em Engenharia Mecânica na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2005. Atualmente trabalha na área de engenharia *offshore*.

Ficha Catalográfica

Albuquerque, Gil Rudge Cavalcanti de

Modelagem e simulação da dinâmica de bóias de superfície ancoradas / Gil Rudge Cavalcanti de Albuquerque ; orientador: Carlos Alberto de Almeida. – 2009.

134 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2.

CDD: 621

Dedicado aos meus pais José Durval e Ana Maria, pela precisão, delicadeza e amor na educação a mim concedida.

Agradecimentos

Ao Professor Carlos Alberto de Almeida por ajudar a despertar minha paixão pela engenharia e pela excelente orientação prestada durante a realização deste trabalho.

Ao CNPq, pelo Suporte financeiro.

Ao corpo docente do departamento de Engenharia Mecânica pela competência e dedicação nas aulas ministradas.

Aos funcionários da biblioteca setorial do CTC da PUC-Rio pela ajuda concedida na minha pesquisa bibliográfica.

Aos Professores Marco Antônio Meggiolaro e Marcio Martins Mourelle pela cuidadosa leitura de meu trabalho, participação na minha banca e valiosas contribuições.

Resumo

Albuquerque, Gil Rudge; Almeida, Carlos Alberto. **Modelagem e Simulação da Dinâmica de Bóias de Superfície Acoradas**. Rio de Janeiro, 2008. 134p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um método para a simulação dinâmica bi-dimensional de bóias cilíndricas de superfície, sujeitas à ação de ondas e ancorada ao fundo marinho através de uma linha flexível é apresentado neste trabalho. O modelo de elementos finitos adotado por Lustosa (2002) é empregado na descrição do movimento do cabo de ancoragem, onde elementos de vigas de Euler-Bernoulli de dois nós são empregados, com a cinemática do movimento descrita através de grandezas referidas ao sistema local co-rotacionado. No modelo numérico, são consideradas as não-linearidades geométricas resultantes dos grandes deslocamentos da linha e que causam o acoplamento das rigidezes axial e flexional. Na caracterização do movimento da linha consideram-se os seguintes efeitos: peso próprio, empuxo, carregamento hidrodinâmico da correnteza marinha, deslocamentos impostos pela unidade flutuante, forças de inércia e, se presente, a ação de flutuadores. Os deslocamentos do cabo são obtidos da solução do sistema algébrico de equações não-lineares, resultante da integração temporal de Newmark das equações diferenciais temporais do movimento, cuja convergência é garantida através do método iterativo de Newton-Raphson. Para a bóia, considerada para efeito de análise como indeformável, três graus-de-liberdade são considerados: dois de deslocamentos lineares e um de deslocamento angular. As ondas de superfície, monocromáticas e bi-dimensionais, são representadas no modelo através da teoria linear de Airy associada à modificação empírica de Wheeler (Wheeler, 1969). Forças resultantes da ação das ondas sobre a bóia de superfície são obtidas através da integração numérica da equação proposta por Chitrapu et al. (1998) que compõe-se de um termo viscoso - resultante da parcela de arrasto da equação de

Morison - e de um termo não-viscoso - considerado como resultante da soma da força de Froude-Krylov (Chakrabarti, 1987) à parcela de inércia da equação de Morison -. A integração numérica desta equação sobre a superfície “molhada” instantânea do cilindro é realizada, a cada incremento de tempo da análise, empregando-se o método da quadratura adaptativa de Simpson. Finalmente, na integração temporal das equações de movimento da bóia de superfície utiliza-se o método de Runge-Kutta de quinta ordem, com o controle adaptável do passo temporal. O procedimento descrito foi implementado em um programa de computador e os resultados obtidos de algumas análises numéricas comparados com os fornecidos por outras simulações independentes, de forma a verificar a adequabilidade da formulação proposta no estudo da dinâmica de bóias flutuantes.

Palavras-chave

Bóias de superfície; ondas marítimas; dinâmica de linhas marítimas; método de elementos finitos; simulação numérica

Abstract

Albuquerque, Gil Rudge; Almeida, Carlos Alberto (Advisor). **Modeling and Simulation of the Dynamic of Surface Moored Buoys**. Rio de Janeiro, 2008. 134p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work a method for two-dimensional dynamic analysis of a cylindrical buoy under surfaced waves and moored to the seafloor by a flexible riser is presented. The finite element model used to describe the dynamics of the maritime line was developed by Lustosa (2002). This is a two node beam element based on the Euler-Bernoulli theory, with the element kinematics referred to a co-rotational coordinate system attached to the element. The model considers the representation of geometric non-linearities due to the line motion large displacements resulting in axial-bending couplings in the element total stiffness representation. The element displacements in the line are due to the following external loadings: self weight, buoyancy force, hydrodynamic forces due to maritime currents, surface buoy imposed displacements, the forces of inertia, and, if present, the action of floaters. The buoy two displacements and one rotation degrees-of-freedom are measured at its center of gravity and are obtained from the solution of the non-linear algebraic system resulting from the Newmark temporal integration of the differential equations of motion, which solution convergence is granted by a Newton-Raphson iterative method. The linear wave theory – Airy Theory –, associated to the Wheeler empirical modification, is used in this work to represent the monochromatic bi-dimensional surface waves. To obtain the wave forces acting on the surface buoy while in motion, the numerical integration of the equation presented by Chitrapu et al. (1998) is employed. This is the result of a two part equation: the first is evaluated as the Morison viscous drag force and, in a second part, is the sum of the “Froude-Krylov” and the Morison inertia forces. The numerical integration of the resulting equation is evaluated over the instantaneous wet surface of the buoy, in each time-step, using the adaptive recursive Simpson’s

method. Finally the temporal integration of the buoy equations of motion are evaluated using a fifth-order Runge-Kutta method, with an adaptive control of the temporal time step. This procedure has been implemented in a computer program and the results obtained from some numerical analysis are compared to the ones obtained from independent simulations, so as to verify the ability of this proposed method to describe the dynamic of floating buoys.

Keywords

Surface buoy, water waves, dynamic of maritime lines, finite element method, numerical simulation.

Sumário

1 Introdução	18
2 Formulação Estrutural e Hidrodinâmica da Linha pelo Método de Elementos Finitos	20
2.1. O Método dos Elementos Finitos	20
2.2. Não-Linearidades Presentes no Comportamento Estrutural de Risers e Linhas de Ancoragem	21
2.3. Análise Incremental Não-Linear	22
2.4. Descrição do Movimento	24
2.5. Equação de Equilíbrio	26
2.6. Decomposição Incremental e Linearização da Equação de Equilíbrio	28
2.7. Discretização da Estrutura	29
2.8. Matrizes e Vetores dos Esforços Internos e Externos	38
2.9. Matrizes e Vetores – Representação no Sistema Global	44
2.10. Equações Incrementais de Movimento	45
2.11. Solução Incremental das Equações de Movimento	45
2.11.1. Método de Newmark	46
2.11.2. Amortecimento Estrutural	48
2.11.3. Método de Newton-Raphson na Análise Dinâmica Não-Linear	49
2.11.4. Prescrição de Movimentos	50
2.12. Rotação de Corpo Rígido e Rotação de Deformação	51
3 Teoria de Ondas Marítimas	55
3.1. Introdução	55
3.2. Formulação do Problema de Ondas de Superfície	56
3.3. Solução do Modelo Matemático de Ondas	62
3.3.1. Teoria Linear de Airy	63

4 Dinâmica da Bóia de Superfície e Avaliação dos Esforços	69
4.1. Equações de Movimento	69
4.2. Avaliação dos Esforços	73
4.2.1. Formulação de Morison	74
4.2.2. Teoria de Froude-Krylov	76
4.2.3. Teoria da Difração	77
4.2.4. Forças e Momentos Hidrodinâmicos	78
5 Procedimento Numérico	89
5.1. Configuração Estática Inicial da Linha	90
5.2. Comprimento Submerso da Bóia de Superfície	90
5.3. Integração Numérica de Forças e Momentos	92
5.4. Solução das Equações de Movimento	94
5.5. Análise Dinâmica da Linha	97
6 Simulações Numéricas	98
6.1. Análise de Uma Linha Flexível em Configuração Steep-Wave	98
6.2. Análise de Uma Plataforma do Tipo “ <i>Spar</i> ” Sob Ação de Ondas Oceânicas	104
6.3. Análise de um Sistema Bóia-Linha Flexível	116
7 Conclusões	129
8 Referências Bibliográficas	132

Lista de figuras

Figura 2.1 - Procedimento Incremental Iterativo.	24
Figura 2.2 - Descrição do Movimento Usando-se um Sistema de Coordenadas Convectivo Co-Rotacionado.	25
Figura 2.3 - Elemento (m) e suas variáveis de estado para o caso tri-dimensional.	31
Figura 2.4 - Elongação da linha neutra devido ao deslocamento transversal $v(x)$.	29
Figura 2.5 - Aceleração Considerada na Regra Trapezoidal.	47
Figura 2.6 - Determinação da Rotação de Corpo Rígido do elemento (m) através das Rotações Nodais.	52
Figura 3.1 - Esquema de um trem de ondas progressivo e seus valores característicos.	57
Figura 3.2 - Localização da altura atual e efetiva utilizada na modificação de $K_p(z)$.	68
Figura 4.1 - Sistemas de coordenadas inercial O_{xyz} e estrutural $O_b x_b y_b z_b$.	70
Figura 4.2 - Coordenadas cilíndricas utilizadas.	80
Figura 4.3 - Posição relativa entre os sistemas de coordenada caracterizado por x_{cm} , z_{cm} e β .	82
Figura 5.1 - Vetores posição X_{cm} e X_p utilizados no cálculo de L_{sup} .	92
Figura 5.2 - Diagrama de blocos representativo do modelo dinâmico da bóia de superfície implementado no programa Simulink.	96
Figura 6.1 - Riser em configuração “steep-wave” (L. Virgin et al., 2007).	99
Figura 6.2 - Configuração da linha em Catenária.	101
Figura 6.3 - Configurações Estáticas para Diferentes	

Comprimentos do Segmento de Flutuadores $L2$.	102
Figura 6.4 - Configurações de Equilíbrio da Linha para Diversos Comprimentos do Segmento Superior $L3$.	103
Figura 6.5 - Configurações de Equilíbrio da Linha para Diversos Valores do Empuxo por Unidade de Comprimento do Segmento $L2$.	103
Figura 6.6 - Efeitos da Correnteza Constante, com Velocidade v , na Configuração Estática da Linha.	104
Figura 6.7 - Esboço da Plataforma <i>Spar</i> (Agarwal & Jain, 2002).	105
Figura 6.8 - Deslocamento Horizontal (surge) da plataforma <i>Spar</i> Submetida à Ação de Ondas, sem Correnteza.	108
Figura 6.9 - Deslocamento angular (Pitch) da Plataforma <i>Spar</i> Submetida à Ação de Ondas, sem Correnteza.	109
Figura 6.10 - Deslocamento horizontal (surge) da Plataforma <i>Spar</i> Submetida à Ação de Ondas com Correnteza Constante ($v=0.5\text{m/s}$).	110
Figura 6.11 - Deslocamento Angular (pitch) da Plataforma <i>Spar</i> Submetida à Ação de Ondas com Correnteza Constante ($v=0.5\text{m/s}$).	111
Figura 6.12 - Movimento em Uma Escala de Tempo Longa para o Caso com Ondas apenas (Todos os Parâmetros são iguais aos das Figuras 6.8 e 6.9) e para o Caso com Ondas e Correnteza Constante (todos os Parâmetros são iguais aos das Figuras 6.10 e 6.11).	113
Figura 6.13 - Parâmetros Utilizados na Comparação dos Resultados do Movimento de surge e pitch.	114
Figura 6.14 - Linha Flexível em Configuração “Steep-Wave” Fixa ao Centro de Massa da Bóia de Superfície Através de sua Extremidade Superior.	117
Figura 6.15 - Aplicação Gradual da Ação dos Flutuadores.	120

Figura 6.16 - Sucessivas Configurações da Linha com a Aplicação Gradual da Ação de Flutuadores.	120
Figura 6.17 - Deslocamento Horizontal do Centro de Massa da Bóia de Superfície Devido à Ação de Correnteza e Ondas.	122
Figura 6.18 - Comparação das Componentes Horizontais da Força de Arraste e da Força de Tração da Linha.	123
Figura 6.19 - Configurações do Flexível para os Três Casos Considerados.	124
Figura 6.20 - Posição Vertical do Centro de Massa da Bóia de Superfície, Medida a Partir da Superfície Média.	125
Figura 6.21 - Componente Vertical da Força de Froude-Krylov para os Casos (b), onde $H = 6m$, e (c), onde $H = 10m$.	126
Figura 6.22 - Deslocamento Angular (<i>pitch</i>) Sofrido pela Bóia de Superfície.	127
Figura 6.23 - Momento Resultante da Força de Arraste Equilibrado pelo Momento de Restituição da Pressão Hidrostática, para o Caso (a).	128

Lista de tabelas

Tabela 6-1 – Características da Plataforma Spar Considerada na Análise Numérica.	106
Tabela 6-2 – Comparação dos Resultados, obtidos Graficamente em Chitrapu et al. (1998) e Ma & Patel (2001), para o Primeiro Caso (sem correnteza).	115
Tabela 6-3 – Comparação dos resultados, obtidos graficamente em Chitrapu et al. (1998) e Ma & Patel (2001), para o caso com correnteza constante (0.5m/s).	116
Tabela 6-4 – Características Físicas e Geométricas da Bóia de Superfície, Linha Flexível e Flutuadores.	118

As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain; and as far as they are certain, they do not refer to reality.

Albert Einstein, “*Geometry and Experience*”, January 27, 1921