1 Introdução

Nos últimos anos, a crescente expansão das atividades de exploração de petróleo em águas profundas tem motivado o desenvolvimento de sistemas computacionais dedicados à simulação numérica do comportamento estático e dinâmico não-linear de estruturas submersas e flutuantes. Estes sistemas constituem-se em ferramentas de uso cada vez mais amplo por empresas exploradoras de petróleo, tanto na fase de concepção dos projetos, quanto nas fases de instalação (lançamento) e operação destas estruturas. Diversos tipos de estruturas offshore são utilizados no processo de exploração de petróleo, tais como as plataformas marítimas, os navios petroleiros e rebocadores, os risers e as linhas de ancoragem.

Spar-buoys são estruturas *offshore* flutuantes, usadas nas diversas etapas de produção em águas profundas como: perfuração, produção, processamento e armazenamento de óleo e gás. Seu grande casco possui um formato cilíndrico vertical, com dimensões que chegam a 200 metros de altura e 40 metros de diâmetro. Esta configuração de casco possui algumas vantagens intrínsecas como: (a) simplicidade estrutural, (b) excelentes características dinâmicas, mesmo quando exposta à condições ambientais severas, devido aos seus longos períodos naturais, (c) baixo custo de fabricação e (d) aplicabilidade a uma grande faixa de profundidades de lâmina d'água (Ran, 1999). Apesar de sua concepção não ser recente, a primeira *Spar-buoy* de produção foi instalada em 1997, no Golfo do México (Vardeman et al., 1997).

Risers e linhas de ancoragem são estruturas esbeltas sujeitas a carregamentos dinâmicos, como correntes marinhas e ondas, que causam a movimentação da estrutura. Esses movimentos dinâmicos resultam em variações temporais nos esforços a que a estrutura está sujeita podendo ser a causa de danos por excesso de carga ou falhas por fadiga.

Atualmente, o projeto de sistemas flutuantes, normalmente compostos pelo casco da unidade flutuante, linhas de ancoragem e *risers*, possuem metodologias e

critérios que não consideram a integração entre os modelos do casco, das linhas de ancoragem e dos risers. Com isto, os efeitos não-lineares da interação entre o comportamento hidrodinâmico do casco e o comportamento estrutural e hidrodinâmico das linhas e *risers* não são considerados (Senra, 2004).

No presente estudo é efetuada a simulação numérica bi-dimensional da dinâmica de uma bóia de superfície, ancorada pelo seu centro de massa ao fundo marinho, através de uma linha flexível, no domínio do tempo. A bóia é modelada como um cilindro indeformável com três graus de liberdade, dois de deslocamento linear e um de rotação, definidos no seu centro de gravidade. Para a simulação do movimento da bóia, são necessários a obtenção das suas equações de movimento e das forças e momentos que atuam sobre ela devido às ondas, correntes marítimas, peso próprio, empuxo e interação com a linha de ancoragem, que está fixa em seu centro de gravidade.

Para a representação estrutural da linha flexível utiliza-se o modelo de elementos finitos desenvolvido por Lustosa (2000), onde métodos para a obtenção das equações de equilíbrio e posterior integração direta são empregados. Neste estudo, um programa de computador foi desenvolvido no MATLAB para a análise estática e dinâmica de linhas flexíveis, onde emprega-se um tratamento não-linear aos grandes deslocamentos e rotações sofridos pela estrutura, bem como à modelagem das forças hidrodinâmicas e ao acoplamento entre a rigidez axial e transversal da estrutura.

O procedimento adotado para o cálculo das forças hidrodinâmicas atuantes na bóia de superfície baseia-se na teoria de corpos esbeltos. Neste modelo, assume-se que a bóia possui dimensão característica pequena em relação ao comprimento da onda de superfície, o que permite desprezar-se os efeitos da difração e da radiação de onda pela estrutura. Utiliza-se uma abordagem similar à desenvolvida por Chitrapu *et. al* (1998), onde a força viscosa é considerada igual à parcela de arraste da equação de Morison e a força não-viscosa é aproximada através da soma de uma força de Froude-Krylov com a parcela de inércia da equação de Morison. Para a modelagem das ondas regulares de superfície, foi adotada a teoria linear de ondas - teoria de Airy -, e a integração das forças hidrodinâmicas até a superfície livre é realizada de forma aproximada através do emprego do critério de extrapolação de Wheeler (Wheeler, 1969).

Para a análise numérica da dinâmica do conjunto bóia-linha, desenvolveu-se um algoritmo que engloba o modelo hidrodinâmico para a representação da unidade flutuante (bóia de superfície) e o modelo de elementos finitos, para a representação do comportamento hidrodinâmico da linha flexível, em uma única estrutura de código e de dados. A cada instante do processo de integração no tempo das equações de movimento da unidade flutuante, efetua-se uma análise dinâmica não-linear da linha flexível, sujeita aos efeitos do peso próprio, empuxo, correnteza, flutuadores (quando presentes), e deslocamentos transmitidos pela unidade flutuante. A força de tração atuante na extremidade superior da linha (ponto de conexão bóia-linha) é, então, adicionada às forças das ondas, da correnteza, do peso próprio e de empuxo e é considerada nas equações de movimento da unidade flutuante para a integração no próximo instante de tempo. Com isto, obtêm-se os deslocamentos da unidade flutuante, levando-se em consideração a resposta estrutural da linha flexível.

No capítulo 2, são derivadas as equações de equilíbrio da dinâmica da linha flexível e detalhados os procedimentos de discretização temporal e espacial. Apresenta-se o método de integração direta de Newmark acoplado ao procedimento de aproximações sucessivas de Newton-Raphson, adotado para a solução do problema não linear. No capítulo 3 desenvolve-se o modelo utilizado para a representação das ondas, que consiste na aplicação da Teoria Linear de Airy para a resolução do caso bi-dimensional. O capítulo 4 apresenta a contribuição de forças ambientais como carregamentos externos aplicados à unidade flutuante. São brevemente apresentadas e discutidas as características das teorias de Morison, Froude-Krylov e Difração para o cálculo destas forças, e ainda, apresentado o procedimento implementado no presente estudo. No capítulo 5 são apresentadas as características referentes à implementação e à simulação numérica coordenada do modelo da bóia de superfície que interage com ondas de superfície e correnteza, e do modelo de elementos finitos na representação da linha flexível. No capítulo 6, estão apresentados os resultados de algumas análises numéricas que qualificam o modelo empregado, discutindo-se as suas potencialidades e limitações e, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do presente estudo e propostas para trabalhos futuros.