

IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA METODOLOGIA FORTEMENTE
ACOPLADA PARA ANÁLISE DE SISTEMAS FLUTUANTES OFFSHORE

Rodrigo Almeida Bahiense

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

Eng. Isaías Quaresma Masetti, D.Sc.

Prof. Celso Kazuyuki Morooka, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

BAHIENSE, RODRIGO ALMEIDA

Implementação e Avaliação de uma
Metodologia Fortemente Acoplada para
Análise de Sistemas Flutuantes Offshore [Rio
de Janeiro] 2007

VIII, 127 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Civil, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Sistemas *Offshore*

2. Análise Fracamente Acoplada

3. Análise Fortemente Acoplada

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*Aos meus pais, Danilo e Genilza,
à minha irmã Daniela,
à querida Cida,
e aos meus familiares e amigos.*

AGRADECIMENTOS

À Deus e à todos meus familiares por sempre me darem apoio, incentivo e força em todos os momentos da minha vida.

À Cida pelo amor, carinho e motivação na busca constante de meu crescimento pessoal.

Ao professor Breno Pinheiro Jacob pela valiosa orientação para a realização desse trabalho.

Ao professor Geraldo de Souza Ferreira pelo grande incentivo ao estudo destinado à área de engenharia *offshore*.

Ao professor Francisco Célio de Araújo pelos ensinamentos atribuídos à minha formação acadêmica.

Aos amigos que me acompanharam nessa etapa: Aluizio de Amorim, Sérgio Costa, Rodrigo Pena Silva, Carlos Augusto Manhães e Luiz Felipe Teixeira.

Aos amigos do LAMCSO (Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore): Mônica de Biase di Blasio, Alex Leandro de Lima, Luciano Tardelli Vieira, Antônio Carlos Pinto Pereira, Danilo Machado Lawinsky da Silva, Bruno Martins Jacovazzo, Fábio Simões, Fabrício Nogueira Corrêa, Mauro Henrique Alves e Carl Albrecht.

Aos amigos do grupo de SURF (*subsea, umbilicals, risers and flowlines*) & PIPELINE da Det Norske Veritas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo incentivo à pesquisa e apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA METODOLOGIA FORTEMENTE ACOPLADA PARA ANÁLISE DE SISTEMAS FLUTUANTES OFFSHORE

Rodrigo Almeida Bahiense

Dezembro/2007

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Programa: Engenharia Civil

As recentes atividades de exploração de óleo na indústria *offshore* requerem o uso de sofisticadas ferramentas computacionais na análise do comportamento de sistemas flutuantes *offshore*. Tais ferramentas deveriam ser capazes de realizar análises dinâmicas acopladas no domínio do tempo, considerando a interação não-linear do comportamento hidrodinâmico do casco da plataforma com o comportamento estrutural/hidrodinâmico das linhas de ancoragens e *risers*.

O objetivo deste trabalho é comparar duas formulações para o modelo acoplado. Em ambas implementações, o comportamento hidrodinâmico/estrutural das linhas é representado por modelos de Elementos Finitos acoplados com os 6 graus de liberdade do modelo de corpo rígido que representa o casco da plataforma.

Na primeira metodologia, que será referida como Fracamente Acoplada, o acoplamento é implementado somente como forças atuando no lado direito da equação de movimento da plataforma. Nesta implementação, as linhas são representadas separadamente por modelos de E.F., onde a cada instante de tempo da integração da equação do casco, os movimentos do corpo são prescritos nos nós de conexão das linhas, e as trações de topo, que resultaram do processo de integração do modelo de E.F. de cada linha, são aplicadas na plataforma.

Na segunda metodologia, desenvolvida e implementada por meio deste trabalho e que será referida como Fortemente Acoplada, as matrizes de E.F. (massa, amortecimento e rigidez) de todas as linhas são agrupadas com as matrizes dos elementos rígidos, criados para representar o corpo flutuante, numa única matriz global totalmente acoplada. A integração no tempo é então realizada simultaneamente, usando um esquema de integração implícito.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

IMPLEMENTATION AND ASSESSMENT OF A STRONGLY COUPLED
METHODOLOGY FOR ANALYSIS OF OFFSHORE FLOATING SYSTEMS

Rodrigo Almeida Bahiense

December/2007

Advisor: Breno Pinheiro Jacob

Department: Civil Engineering

Recent activities in the offshore oil exploitation industry require the use of sophisticated computational tools to analyze the behavior of offshore floating systems. Such tools should be able to perform coupled time-domain dynamic analysis, considering the non-linear interaction of the hydrodynamic behavior of the platform with the structural/hydrodynamic behavior of the mooring lines and risers.

The objective of this work is to compare two approaches for the coupled model. In both implementations, the hydrodynamic/structural behavior of the lines is represented by Finite Element models, coupled with the 6-DOF of the rigid body model that represents the platform hull.

In the first approach that will be referred as Weakly Coupled, the coupling is implemented only as forces acting on the right-hand side of the equations of motion of the platform. In this implementation, the lines are represented separately by their own FE models where at each time step of the integration of the hull equation, body motions are prescribed at the line connections, and the top tensions, that result from the integration process of the FE model of each line, are applied at the platform.

In the second approach which was developed and implemented in this work and that will be referred as Strongly Coupled, the FE matrices (mass, damping and stiffness) of all lines are assembled with the matrices of the rigid elements that represent the floating body, in a single fully coupled global matrix. The time integration is then performed simultaneously using an implicit integration scheme.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.1.1	<i>METODOLOGIA DESACOPLADA</i>	1
1.1.2	<i>METODOLOGIA ACOPLADA; O PROGRAMA PROSIM</i>	3
1.2	OBJETIVO	4
1.3	ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO DA DISSERTAÇÃO	6
2.	SISTEMAS PARA EXPLOTAÇÃO DE PETRÓLEO OFFSHORE	7
2.1	UNIDADES ESTACIONÁRIAS DE PRODUÇÃO PETRÓLEO	7
2.2	SISTEMAS DE ANCORAGEM	12
2.2.1	<i>CONFIGURAÇÕES DE LINHAS DE ANCORAGEM</i>	14
2.3	RISERS	17
3.	CARREGAMENTO AMBIENTAL	19
3.1	MODELOS DE REPRESENTAÇÃO DE ESTADOS DE MAR	19
3.2	CÁLCULO DE FORÇAS GERADAS PELAS ONDAS	22
3.2.1	<i>EQUAÇÃO DE MORISON</i>	23
3.2.2	<i>FORMULAÇÃO DE FROUDE-KRYLOV</i>	25
3.2.3	<i>TEORIA DA DIFRAÇÃO</i>	26
3.2.4	<i>MODELO HÍBRIDO PARA CÁLCULO DAS FORÇAS NA EMBARCAÇÃO</i>	29
3.3	CORRENTEZA	33
3.4	VENTO	33
4.	EQUAÇÕES DE MOVIMENTO	35
4.1	INTRODUÇÃO	35
4.2	SISTEMAS DE COORDENADAS	36
4.2.1	<i>SISTEMA GLOBAL DE COORDENADAS</i>	36
4.2.2	<i>SISTEMAS LOCAIS DA PLATAFORMA</i>	36
4.2.3	<i>SISTEMA LOCAL DOS ELEMENTOS FINITOS DAS LINHAS E DOS MEMBROS DA PLATAFORMA</i>	37
4.3	EQUAÇÃO DE MOVIMENTO DAS LINHAS	38
4.3.1	<i>DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL</i>	38
4.3.2	<i>DISCRETIZAÇÃO NO TEMPO</i>	40
4.3.3	<i>EXTENSÃO PARA PROBLEMAS NÃO-LINEARES</i>	42
4.4	EQUAÇÃO DE MOVIMENTO DO CASCO	44

5.	FORMULAÇÃO DOS MODELOS ACOPLADOS	48
5.1	INTRODUÇÃO	48
5.2	MODELO FRACAMENTE ACOPLADO	50
5.2.1	<i>INTEGRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE MOVIMENTO DO CASCO (ESQUEMA EXPLÍCITO)</i>	51
5.2.2	<i>IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL</i>	56
5.3	MODELO FORTEMENTE ACOPLADO	58
5.3.1	<i>INTEGRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE MOVIMENTO CASCO-LINHA (ESQUEMA IMPLÍCITO)</i>	59
5.3.2	<i>ESTRATÉGIA DA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL NO PROGRAMA PROSIM</i>	60
6.	AVALIAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS	65
6.1	INTRODUÇÃO	65
6.2	BÓIA ANCORADA POR TENDÃO VERTICAL	68
6.2.1	<i>CARACTERÍSTICAS DO CASCO</i>	69
6.2.2	<i>CARACTERÍSTICAS DA LINHA</i>	71
6.2.3	<i>CASOS DE CARREGAMENTO</i>	72
6.2.4	<i>RESULTADOS COMPARATIVOS</i>	73
6.3	SEMI-SUBMERSÍVEL ITTC	82
6.3.1	<i>CARACTERÍSTICAS DO CASCO</i>	83
6.3.2	<i>CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS</i>	85
6.3.3	<i>CASOS DE CARREGAMENTO</i>	87
6.3.4	<i>RESULTADOS COMPARATIVOS</i>	88
6.4	SEMI-SUBMERSÍVEL P-001	102
6.4.1	<i>CARACTERÍSTICAS DO CASCO</i>	104
6.4.2	<i>CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS</i>	106
6.4.3	<i>CASOS DE CARREGAMENTO</i>	109
6.4.4	<i>RESULTADOS COMPARATIVOS</i>	110
7.	CONCLUSÕES	121
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
8.	REFERÊNCIAS	124

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Motivação

Com o avanço das atividades de produção de petróleo em águas cada vez mais profundas, tem sido requerido pela indústria do setor o uso de sofisticadas ferramentas numéricas para análise do comportamento de sistemas flutuantes *offshore*.

Os programas de simulação numérica tradicionalmente utilizados na prática dos projetos de plataformas flutuantes ancoradas baseiam-se em procedimentos “desacoplados”. Recentemente, pesquisadores têm reconhecido que os projetos de sistemas flutuantes deveriam considerar uma metodologia “acoplada” que leva em conta a completa interação da embarcação com as linhas de ancoragem e *risers*, constituindo dessa maneira um sistema inteiramente integrado. Tais metodologias são descritas sucintamente a seguir [1,2].

1.1.1 Metodologia Desacoplada

Neste procedimento, são consideradas separadamente duas etapas distintas: a análise dos movimentos do casco da unidade flutuante, e a análise estrutural dos *risers*.

Numa primeira etapa, realiza-se uma análise hidrodinâmica para obtenção dos movimentos do casco, e uma estimativa das trações das linhas de ancoragem, desconsiderando o comportamento não-linear dinâmico das linhas que compõem o sistema de produção. Neste caso, as linhas são representadas simplificadaamente por coeficientes escalares de massa, rigidez e amortecimento, introduzidos na equação de movimento do flutuante (mesmo assim, muitas vezes somente as linhas de ancoragem são consideradas, ignorando-se os *risers*). Tais coeficientes podem ser determinados a partir de modelos analíticos simplificados baseados na equação da catenária, ou calibrados a partir de modelos experimentais.

Já na segunda etapa, os movimentos da embarcação obtidos anteriormente são aplicados no topo de cada *riser*, agora representados por um modelo rigoroso de elementos finitos, para a avaliação de suas respostas estruturais.

O procedimento da análise desacoplada pode ser ilustrado sucintamente da seguinte forma: inicialmente, efetua-se uma análise hidrodinâmica do casco por meio de programas baseados na Teoria Potencial (descrita mais adiante na seção 3.2.3), como o Wamit [3] ou Wadam [4], por exemplo. Tais programas fornecem resultados em termos de coeficientes linearizados e funções de transferência de forças atuantes na plataforma, considerando apenas os carregamentos de onda de altura unitária. Em seguida, os coeficientes hidrodinâmicos gerados por [3] e [4] alimentam programas como o Simo [5] e Dynasim[6], para a obtenção da resposta dinâmica dos movimentos do casco. Estes programas realizam a solução numérica das equações de movimento de corpo rígido, submetido às ações ambientais de vento, onda e correnteza, com as linhas representadas por coeficientes escalares.

Por fim, os movimentos assim obtidos são fornecidos como dados de entrada para programas como o Anflex [7] ou Riflex [8], que utilizam um modelo de elementos finitos para a análise e o projeto estrutural de cada *riser* individualmente. Mais detalhes podem ser encontrados em [1].

Esta metodologia clássica surgiu para atender a sistemas flutuantes instalados em águas rasas, e introduz algumas simplificações que podem afetar consideravelmente a precisão dos resultados. Por exemplo, considera simplificada o carregamento de correnteza nas linhas de ancoragens e *risers*, assim como o importante efeito do amortecimento das linhas nos movimentos de baixa frequência da embarcação. Segundo Ormberg e Larsen [9], foi observado para um navio ancorado, que em águas ultra-profundas (2000m), o *offset* médio (60%) e os movimentos de baixa frequência (35%) da unidade flutuante constituem em aproximadamente em 95% do *offset* total, ou seja, somente 5% do *offset* total correspondem aos movimentos de frequência de onda (WF). Enquanto que para a lâmina d'água de 70m os movimentos de frequência de onda constituem 50% do *offset* total.

Os efeitos destas simplificações se pronunciam consideravelmente com o aumento da profundidade d'água e do número de linhas do modelo, podendo comprometer a qualidade dos resultados [10,11]. Mesmo assim, essa metodologia desacoplada ainda vem sendo largamente empregada em projetos *offshore* recentes, pois o tempo de CPU requerido é consideravelmente reduzido, configurando-se como sua maior vantagem.

1.1.2 Metodologia Acoplada; o programa Prosim

Com os sistemas de exploração de petróleo *offshore* atuando em lâminas d'água cada vez mais profundas, tem sido reconhecida a necessidade de considerar, na prática de projeto, que o comportamento hidrodinâmico do casco recebe influência do comportamento hidrodinâmico/estrutural não-linear das linhas. Para isto, são consideradas as metodologias “acopladas” de análise que incorporam, em um único código computacional, o modelo hidrodinâmico do casco da unidade flutuante acoplado ao modelo de elementos finitos das linhas de ancoragem e *risers*. Tais metodologias fornecem resultados com alto nível de precisão.

Numa simulação acoplada, todos os efeitos não-lineares dinâmicos do sistema são incluídos implicitamente e automaticamente no esquema de análise. Assim, o equilíbrio é obtido em cada passo de tempo, garantindo um tratamento consistente entre os movimentos da unidade flutuante e a resposta estrutural das linhas, proporcionando ao profissional maior confiabilidade nos resultados.

Neste contexto, pode-se mencionar o programa Prosim [12], que vem sendo desenvolvido desde 1997 em parceria entre a Petrobras e o LAMCSO – Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore, do PEC/COPPE/UFRJ, e baseia-se em um modelo acoplado para a avaliação de sistemas flutuantes.

O Prosim tem sido empregado em diversos projetos na Petrobras desde então, efetuando análises estáticas e dinâmicas não-lineares de sistemas flutuantes de produção de petróleo. Sua estratégia computacional considera o acoplamento do casco com as linhas de ancoragem e *risers*, permitindo obter simultaneamente os movimentos da unidade flutuante e a resposta estrutural de cada linha.

Para a representação do modelo hidrodinâmico do casco, este programa contempla tanto uma formulação híbrida que combina a equação de Morison (mais orientada para plataformas compostas por membros reticulados [13,14]) com o modelo de difração/radiação da Teoria Potencial (mais orientado para plataformas baseadas em navios [15]).

O programa Prosim possui uma interface gráfica de pré e pós-processamento para gerar automaticamente os arquivos com modelos numéricos e para a visualização dos resultados. Os módulos de pré-processamento desta interface gráfica, denominada SITUA, dispõem de recursos para geração de modelos, incluindo situações de instalação e avaria de unidades ancoradas. Assim, ao conjunto composto pelos sistemas de interface gráfica (código em Visual Basic e Fortran) e programa de análise (linguagem em Fortran), tem sido denominado como SITUA-Prosim.

Existem ainda outros programas baseados em metodologias acopladas. Como, por exemplo, pode-se mencionar o programa DeepC [16], desenvolvido pela integração dos códigos computacionais dos programas Simo [5] e Riflex [8], citados anteriormente.

1.2 Objetivo

A formulação original do acoplamento empregada no Prosim, e de alguns outros programas de análise acoplada que surgiram mais recentemente, incluindo por exemplo o TPN – Tanque de Provas Numérico [17], baseia-se em uma metodologia que pode ser denominada como Fracamente Acoplada (**FrA**). Neste caso, como será detalhado mais adiante, o acoplamento é implementado pelo lado direito da equação de movimento do casco, com a transferência das forças de topo de cada linha.

Uma outra forma mais complexa de implementar o acoplamento é a denominada metodologia Fortemente Acoplada (**FoA**). Nesta metodologia, o modelo hidrodinâmico do casco passa a ser introduzido, por meio de nós/elementos adicionais, no modelo de elementos finitos das linhas de ancoragem e *risers*. Dessa forma, todas as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, tanto do casco como das linhas, são armazenadas numa única matriz global.

Neste sentido, este trabalho teve por objetivo desenvolver rotinas especiais para a implementação computacional da metodologia Fortemente Acoplada no programa Prosim. Desse modo, foi possível efetuar a comparação entre as duas metodologias acopladas existentes no programa de análise: a metodologia Fracamente Acoplada, largamente estudada e já consagrada no programa [18,19,20]; e a metodologia, Fortemente Acoplada, que foi incorporada no Prosim ao longo dos trabalhos desta dissertação de mestrado.

Em ambas as metodologias, o comportamento estrutural/hidrodinâmico das linhas é representado por modelos de elementos finitos, acoplados com os 6 graus de liberdade do modelo de corpo rígido que representa o casco da plataforma. O que se diferencia é na estratégia computacional desenvolvida para caracterizar o acoplamento entre o modelo hidrodinâmico da unidade flutuante e modelo de Elementos Finitos dos sistemas de *risers* e linhas de ancoragem.

Como aplicações, foram realizadas análises de sistemas *offshore* típicos, incluindo uma bóia e duas plataformas semi-submersíveis, de modo a avaliar a implementação desenvolvida por este trabalho.

Desta forma, além de se incorporar mais uma opção de análise no programa Prosim para que próximos estudos possam vir a se basear neste tipo metodologia, avaliações comparativas puderam ainda ser realizadas entre ambas as metodologias acopladas, destacando-se suas principais características.

Neste contexto, o presente trabalho visa a colaborar cada vez mais com pesquisas utilizando ferramentas numéricas acopladas para o projeto de sistemas de produção *offshore*.

1.3 Estruturação do Texto da Dissertação

Inicialmente, o capítulo 2 apresenta alguns conceitos de sistemas *offshore* para produção de petróleo e gás, descrevendo sobre as plataformas típicas existentes e seus componentes de ancoragens e linhas de produção empregadas tradicionalmente pela indústria.

O capítulo 3 apresenta aspectos teóricos para a avaliação de carregamentos ambientais que atuam sobre os sistemas flutuantes (unidades e linhas). Uma maior ênfase será dada para os procedimentos de cálculo das forças geradas pelas ondas, sendo esta considerada como um dos carregamentos ambientais mais importantes a ser avaliado.

Em seguida, são descritas no capítulo 4 as formulações matemáticas para a avaliação e resolução das equações de movimentos do casco das unidades e das linhas de ancoragens e *risers*.

No capítulo 5, são discutidas as formulações dos modelos acoplados. Neste capítulo, são apresentados como os esquemas de implementação computacional dos modelos Fracamente e Fortemente Acoplados são considerados nas análises dos modelos numéricos.

No capítulo 6, encontram-se os estudos de aplicação de três modelos típicos de sistemas *offshore*: um modelo acadêmico de uma bóia ancorada por um único tendão e duas plataformas semi-submersíveis.

E por fim, o capítulo 7 descreve as conclusões relativas ao tema de estudo proposto, com também, sugestões para desenvolvimentos de futuros trabalhos.

2. SISTEMAS PARA EXPLOTAÇÃO DE PETRÓLEO *OFFSHORE*

O presente capítulo visa apresentar os conceitos básicos das estruturas marítimas empregadas pela indústria para produção de petróleo no mar. Inicialmente, descrevem-se os modelos de plataformas tipicamente adotadas no setor. Em seguida, uma breve abordagem sobre os sistemas de ancoragem de unidades flutuantes, e mais adiante são apresentados os aspectos relativos aos *risers*.

2.1 Unidades Estacionárias de Produção Petróleo

Um conceito inicial de plataforma marítima instalada em profundidades de cerca de 100m (consideradas atualmente como águas rasas para produção de óleo), como no caso do Brasil, surgiu por meio de **plataformas fixas**. Tais estruturas podem ser constituídas de aço ou concreto, sendo fixadas no fundo do oceano. Devido a sua elevada rigidez estrutural, os efeitos dinâmicos submetidos às condições ambientais extremas são pouco significativos, tornando-se mais importantes para as condições operacionais (fadiga), onde neste caso, podem ser tratados por métodos simplificados (análise no domínio da frequência). O comportamento não-linear da estrutura submetida às ações ambientais, também não se apresenta de forma muito significativa, devido aos pequenos deslocamentos que sofrem. Porém, nota-se que, a consideração de efeitos não-lineares deve ser atribuída para avaliações relativas à interação solo-estrutura (solo-estacas).



Figura 1 – Plataforma fixa (Jaqueta).

Com a necessidade de exploração em campos petrolíferos mais profundos, alcançando cerca de 2000m de profundidade, a instalação de plataformas fixas deixou de ser técnica e economicamente viável. Assim, outras concepções foram desenvolvidas para viabilizar a escala produtiva, como por exemplo, os sistemas flutuantes de produção.

Operando na produção de petróleo *offshore* utilizando o conceito de unidades flutuantes de produção, transfere-se ao Brasil uma das mais altas tecnologias de exploração de óleo em águas profundas. Estas embarcações são ancoradas no fundo do mar por meio de cabos (em aço ou poliéster) e/ou “amarras” (correntes em aço), de modo a comportar-se como um conjunto bastante complacente quando submetidas aos carregamentos ambientais de onda, vento e correnteza marítima. Este conceito de estrutura complacente apresenta grandes deslocamentos como resposta às ações ambientais impostas, o que vem caracterizar seu comportamento dinâmico altamente não-linear. Dentre os sistemas flutuantes pode-se citar as seguintes embarcações: os navios FPSOs, semi-submersíveis e TLPs.

Os **FPSOs (Floating Production, Storage and Offloading)** são unidades de trabalho para atividades de produção de petróleo que, como pelo próprio nome sugere, possuem a condição de possibilitar, além da produção, também o armazenamento do petróleo e gás. Em muitos casos são utilizados navios que foram convertidos a partir de embarcações petroleiras, de maneira a atender a sua designada finalidade (Figura 2).



Figura 2 – Navio FPSO.

Um novo conceito tecnológico de FPSO foi empregado recentemente pela Petrobras para produção de óleo, destacando-se por ser o primeiro do tipo construído no mundo, cuja principal característica é possuir o casco em formato cilíndrico. Este FPSO mono-coluna, foi concebido como uma opção bastante econômica, devido à simetria estrutural, tornando assim o processo construtivo mais simples se comparado com a conversão de um navio petroleiro em uma unidade de produção e armazenamento. A Figura 3 ilustra a referida unidade de produção, localizada sobre uma embarcação de transporte.



Figura 3 –FPSO monocoluna.

As plataformas **semi-submersíveis** são estruturas compostas em sua base por grandes flutuadores denominados de “pontoons”, nos quais se apóiam as colunas contraventadas que dão sustentação aos conveses. Tais unidades flutuantes são amplamente empregadas para produção, completção e perfuração de poços de petróleo.

A seguir apresenta-se a Figura 4 que ilustra a plataforma semi-submersível descrita.



Figura 4 – Plataforma Semi-submersível.

Uma outra unidade flutuante estacionária seria a plataforma **TLP (Tension Leg Platform)**, como ilustra a Figura 5 a seguir. Sua concepção estrutural do casco apresenta semelhanças com a semi-submersível, diferindo-se basicamente em seu sistema de ancoragem. Esta unidade flutuante é mantida em posição por meio de tendões que estão submetidos a elevadas trações aplicadas em seu topo, provenientes da força resultante de restauração hidrostática (diferença entre peso e empuxo) em que a mesma foi projetada, de modo a assegurar que a flambagem dos tendões não ocorrerá.

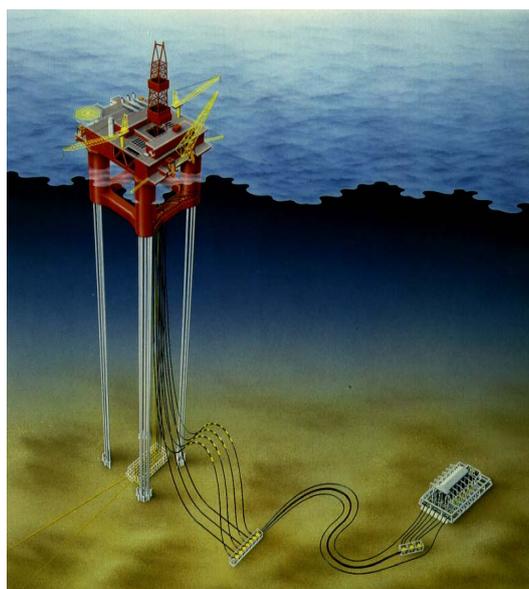


Figura 5 – Plataforma TLP.

O presente item descreveu de forma sucinta apenas 4 tipos diferentes de unidades estacionárias dentre as empregadas para a exploração de petróleo *offshore*. A seguir a Figura 6 ilustra, além das plataformas anteriormente citadas, outros tipos de sistemas também utilizados na produção de petróleo.

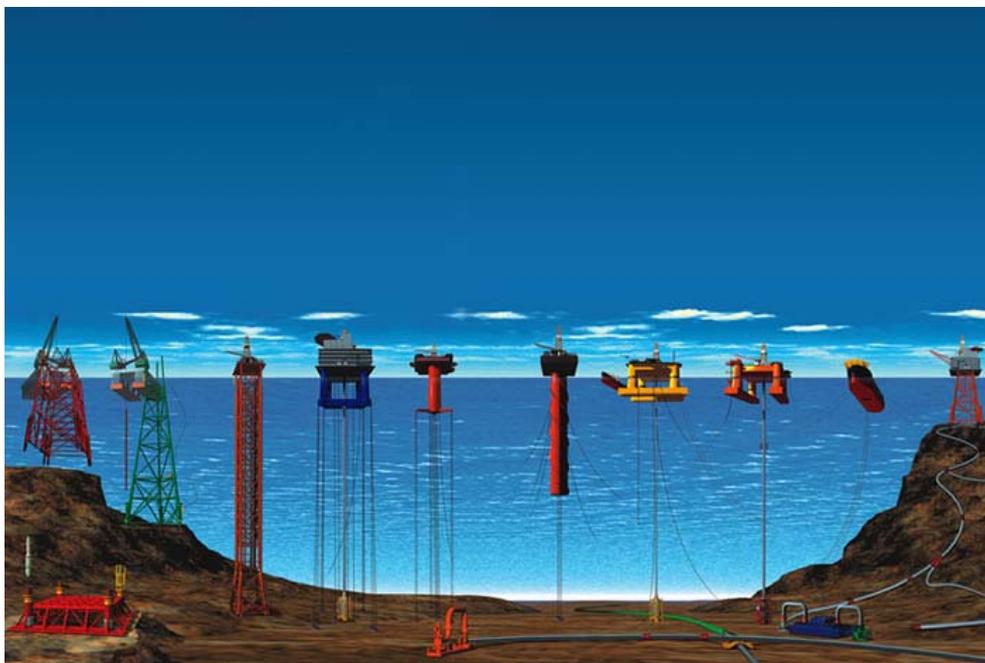


Figura 6 – Unidades de Produção de Petróleo offshore.

2.2 Sistemas de Ancoragem

No presente item são abordados modelos clássicos utilizados em sistemas de ancoragem de unidades de produção de petróleo *offshore*.

Três tipos de sistemas de ancoragem podem ser adotados em plataformas flutuantes como: amarração com quadro de ancoragem *Spread Mooring*, amarração em ponto único denominado de *Single Point Mooring* e o Posicionamento Dinâmico.

Na ancoragem **SM (Spread Mooring)**, as linhas de ancoragem se encontram distribuídas em pontos de conexão em torno da embarcação. O número de linhas utilizado varia de acordo com a necessidade do sistema, geralmente adota-se entre 8 a 20 linhas de ancoragem para cada unidade.

Este sistema de ancoragem tem sido largamente empregado em navios e plataformas semi-submersíveis de produção. A Figura 7 ilustra uma plataforma de produção ancorada pelo referido sistema de ancoragem descrito.

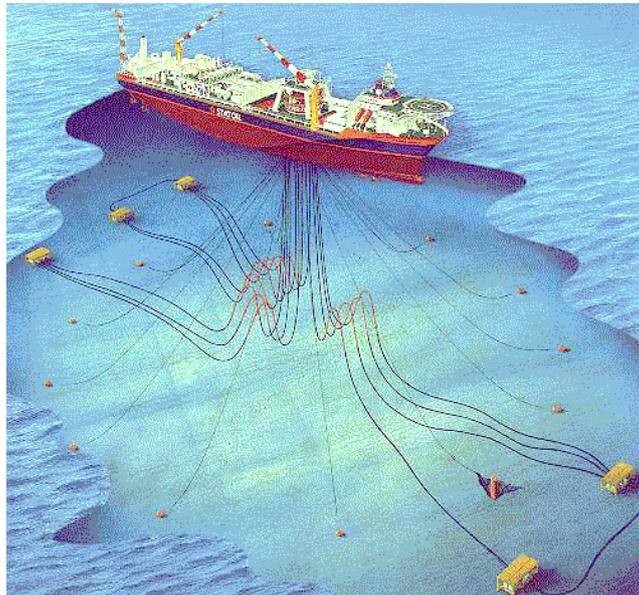


Figura 7 – Sistema SM com FPSO ancorado.

A ancoragem **SPM (Single Point Mooring)** tem sido empregada em três tipos de sistemas, como a Ancoragem com *Turret*, CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*) e SALM (*Single Anchor Leg Mooring*). Neste item, somente será abordada o conceito da ancoragem com *Turret*, maiores informações para os demais sistemas podem ser obtidos a partir da referência [21].

O sistema de **Ancoragem com Turret** pode ser aplicado a unidades como FPSO's (*Floating Production, Storage and Offloading*) consistindo de um determinado número de linhas conectadas a este sistema, e que permite a unidade flutuante se alinhar com a direção de incidência do carregamento ambiental, tornando-se reduzida a resultante das cargas atuantes sobre a mesma. A Figura 8 apresenta um navio FPSO utilizando o sistema de amarração mencionado.



Figura 8 – Vista Geral do navio com ancoragem tipo turret.

O sistema **DP (Dynamic Position)** é utilizado em navios ou plataformas semi-submersíveis. Suas respectivas posições são mantidas em uma determinada localização com o auxílio de um conjunto de propulsores submetidos as condições de carregamentos ambientais atuantes, como ilustrado pela Figura 9 mais adiante. Tal sistema é bastante utilizado para as atividades de perfuração, completação e intervenção em poços petrolíferos.

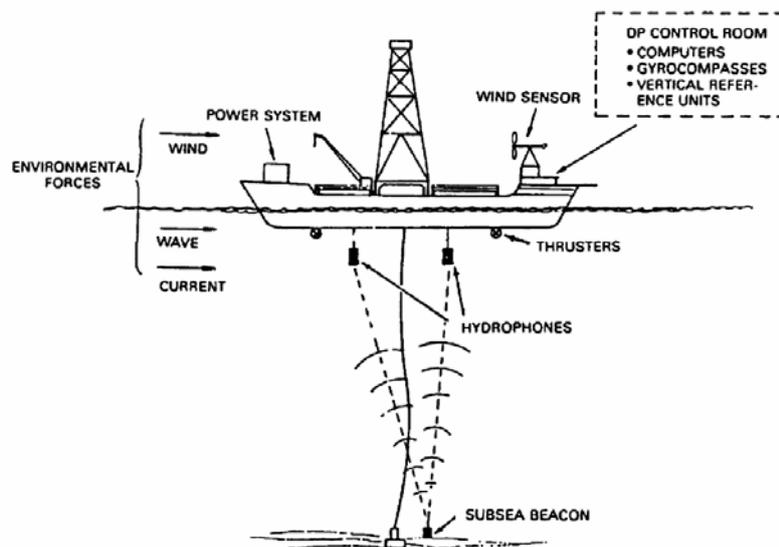


Figura 9 – Sistema DP.

2.2.1 Configurações de Linhas de Ancoragem

Para a ancoragem utilizada em sistemas flutuantes como navios, semi-submersíveis e TLPs são adotados usualmente linhas com as seguintes configurações: ancoragem em catenária, ancoragem vertical e ancoragem *taut-leg*. É por meio destes sistemas de amarração que as unidades flutuantes mantêm-se posicionadas em suas locações, pois seus movimentos são restringidos devido à restauração das linhas, permitindo que se mantenha a embarcação dentro do “passeio” máximo estabelecido em projeto.

Ancoragem em catenária é a técnica convencional utilizada em operações de produção ou perfuração. Este tipo de ancoragem caracteriza-se por possuir um raio de ancoragem relativamente grande, com valores geralmente em torno de três vezes a profundidade da lâmina d’água. Devido ao grande trecho de linha que se apóia no fundo do mar, as âncoras estão submetidas a níveis baixos de trações. Sua grande desvantagem é o possível congestionamento de linhas de unidades próximas.

A Figura 10 ilustra a seguir a plataforma semi-submersível ancorada por meio da ancoragem em catenária.

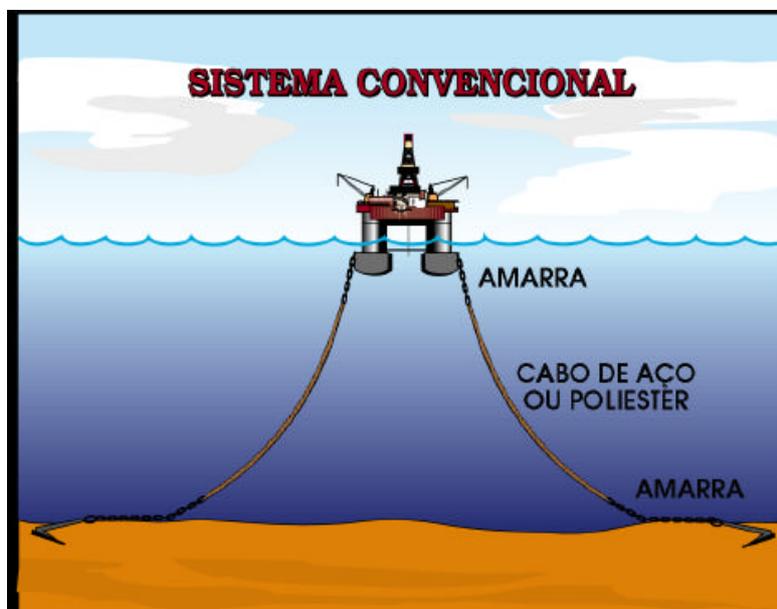


Figura 10 – Ancoragem em Catenária.

Já **ancoragem taut-leg** tem por objetivo reduzir o raio de ancoragem que o sistema convencional necessita para o projeto, sendo aplicada, por exemplo, em plataformas semi-submersíveis e navios FPSOs.

Neste caso, como a ancoragem proporciona uma maior rigidez ao sistema, sendo o “passeio” da embarcação limitado a *offsets* menores (deslocamentos no plano horizontal menores), as âncoras a serem utilizadas precisam resistir a cargas mais elevadas, implicando numa fundação mais robusta. A Figura 11 ilustra o sistema *taut-leg* de amarração.

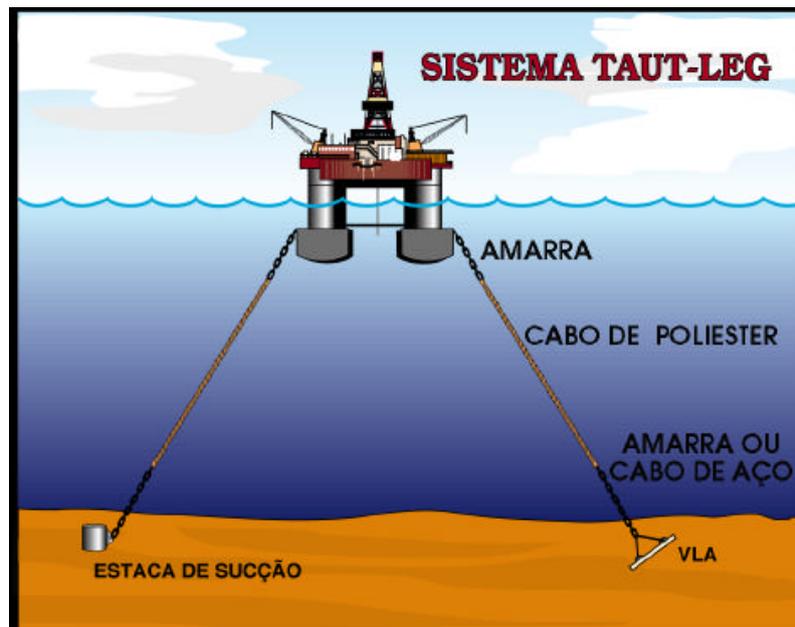


Figura 11 – Sistema de ancoragem Taut-Leg.

A **ancoragem vertical** é constituída por tendões altamente tracionados pela força de empuxo que a plataforma como a TLP, por exemplo, exerce sobre os mesmos. Estes tendões compostos geralmente por tubos de aço proporcionam uma baixa rigidez horizontal e uma elevada rigidez vertical.

A Figura 12 apresenta a referida ancoragem descrita, na qual pode-se perceber uma de suas vantagens em possuir o arranjo de fundo do leito marinho mais “limpo”, evitando assim possíveis congestionamentos entre outros sistemas submarinos.

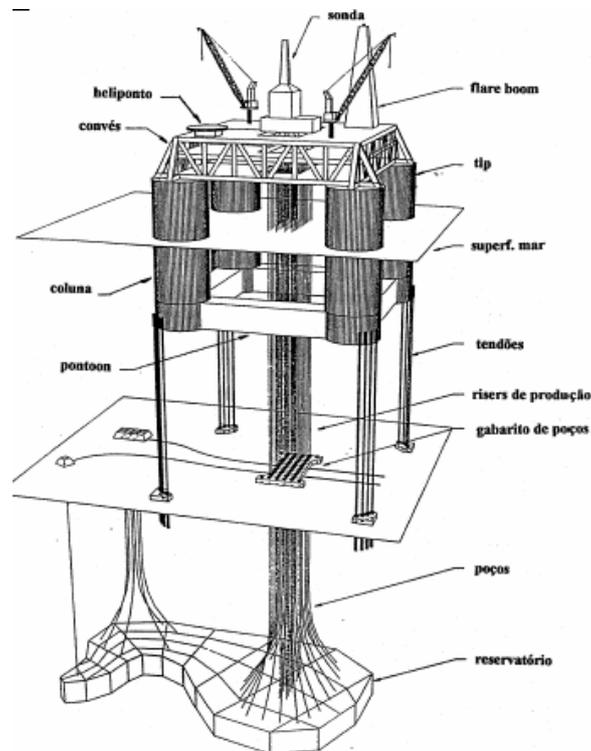


Figura 12– Ancoragem Vertical – TLP.

2.3 Risers

Os *risers* são estruturas tubulares que fazem a ligação entre o poço produtor de petróleo e os diversos tipos de sistemas flutuantes. Estes dutos possuem como função principal exercer o transporte de fluidos (óleo e/ou gás) até a plataforma (no caso de um poço produtor) ou da plataforma até o poço (no caso de um poço injetor). Porém, sua função não se limita somente ao transporte de fluidos. Existem ainda *risers* que são utilizados em operações de perfuração de poços.

Conforme o tipo de material utilizado para a fabricação, o *riser* pode ser caracterizado como rígido ou flexível. Os dutos rígidos são constituídos de aço, formados por uma série de juntas de aproximadamente 12 metros de comprimento unidas por solda. Os *risers* flexíveis são compostos pela superposição de camadas plásticas que fornecem estanqueidade interna e externa, e de camadas metálicas espiraladas responsáveis pela resistência à ação dos diversos carregamentos mecânicos. As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, os *risers* flexível e rígido.



Figura 13 – Riser flexível de produção.



Figura 14 – Riser rígido de perfuração.

A configuração típica e mais simples adotada nos projetos de *risers* é a catenária livre. Porém, são ainda empregadas para os *risers* flexíveis diferentes configurações em catenária. A Figura 15 apresenta algumas das configurações que estes dutos flexíveis podem assumir (podendo-se ainda utilizar de componentes de flutuação para aliviar seu peso submerso) como: *lazy-S*; *lazy-wave*, catenária livre, *steep-S*, *steep-wave* e a dupla catenária livre.

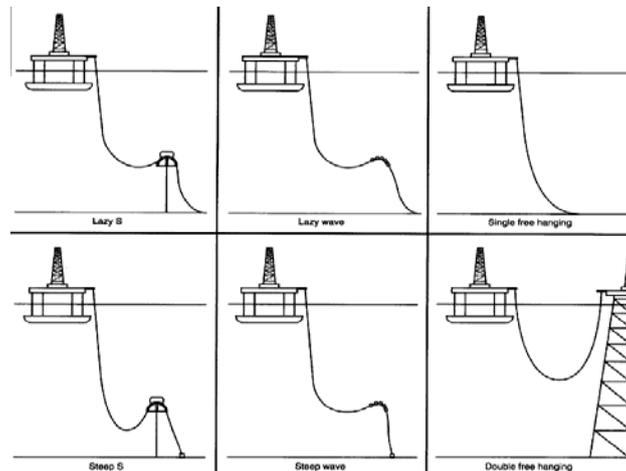


Figura 15 – Configurações de risers flexíveis.

Sistemas híbridos compostos por uma combinação de *riser* rígido e flexível utilizados em atividades de produção também têm sido avaliados. O sistema híbrido objetiva reunir as vantagens que os dois tipos de estruturas apresentam sob as condições operacionais, como a necessidade de maiores diâmetros para linhas flexíveis para águas profundas, o que implica em um elevado custo podendo inviabilizar a implementação do sistema, e vantagens que beneficiam os *risers* rígidos em catenária (SCR), que são mais afetados pela presença de esforços concentrados na região de topo e em contato com o solo.

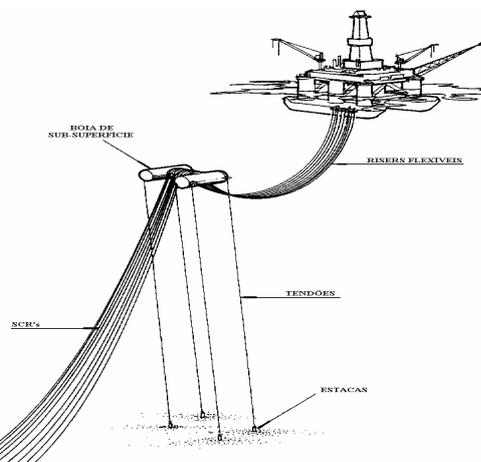


Figura 16– Configuração híbrida de Risers.

3. CARREGAMENTO AMBIENTAL

As forças externas que atuam em sistemas de produção *offshore* são devidas a fenômenos ambientais descritos por variáveis físicas de natureza estatística. Tais fenômenos avaliados para o projeto destas estruturas são os carregamentos de onda, vento e correnteza que incidem sobre o casco da unidade flutuante, e os carregamentos de onda e correnteza que incidem sobre os *risers* e linhas de ancoragem.

Este capítulo visa apresentar resumidamente alguns conceitos e formulações existentes para se estimar as forças induzidas pelos carregamentos ambientais mencionados acima.

3.1 Modelos de Representação de Estados de Mar

Ondas do mar são descritas por sua altura, comprimento e velocidade de propagação, sendo representadas por modelos determinísticos (mar regular) ou por modelos aleatórios (mar irregular).

O estado de mar regular trata de apenas um único trem de ondas incidindo sobre a estrutura, definido por sua altura H e período T . Já o estado de mar irregular, que se apresenta como uma representação mais realista deste carregamento, é composto pela soma de inúmeras componentes de ondas harmônicas com amplitudes, frequência e até direções diferentes, ou seja, é composto por uma superposição de ondas regulares, representados por um modelo espectral.

O modelo espectral visa obter a distribuição de energia para cada uma das frequências (componentes do mar) assumindo que a área sob a curva é equivalente à energia total do mar.

A energia por unidade de superfície de uma onda harmônica é definida como:

$$E = \frac{\rho g}{8} H^2 \quad (3.1)$$

onde: ρ - Densidade da água do mar (1025 kg/m^3)

g - aceleração da gravidade (9.81 m/s^2)

H - altura da onda

Assim, a energia total por unidade de superfície de um mar irregular, composta por n frequências diferentes torna-se:

$$E = \frac{\rho g}{8} \sum_1^n H_i^2 \quad (3.2)$$

O ajuste do modelo espectral é feito em termos de parâmetros estatísticos, tais como fatores de forma espectral, altura significativa de onda e período de pico. Na estatística de curto prazo, estes parâmetros são supostos constantes, e cada conjunto deles caracteriza um dado “estado de mar”. A escolha do espectro de mar e de seus parâmetros característicos é função do fenômeno a ser estudado e dos levantamentos em medições realizadas na posição geográfica a que se queira referir.

Existem na literatura diversos espectros que descrevem um estado de mar, e que podem ser encontrados mais detalhadamente em [23]. Os espectros de mar usualmente adotados aqui no Brasil são conhecidos como espectros de Pierson-Moskowitz e de Jonswap. A definição de tais espectros é descrita a seguir.

Espectro de Pierson-Moskowitz

$$S(w) = \frac{H_s^2}{4} \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 w^{-5} \exp \left[- \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 w^{-4} \right] \quad (3.3)$$

onde: $S(w)$ - função densidade espectral

w - frequência circular da onda

H_s - altura significativa

T_z - Período de onda de cruzamento-zero

Espectro de Jonswap

$$S(w) = \alpha \frac{g^2}{2\pi^4 w^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{w}{w_p} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[\frac{(w-w_p)^2}{2\sigma^2 w_p^2} \right]} \quad (3.4)$$

O parâmetro de forma σ é fixo, sendo determinado em função da relação entre a frequência w e a frequência de pico w_p :

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07, & \text{para } w \leq w_p \\ \sigma_b = 0.09, & \text{para } w > w_p \end{cases} \quad (3.5)$$

Recentemente, a Petrobras propôs empregar uma expressão do espectro de Jonswap ajustada para as condições de onda da Bacia de Campos [22]. Em particular, para projetos de fadiga estocástica, o espectro de onda de Jonswap pode ser usado na faixa de $4,0s \leq T_p \leq 17,7s$ e $0,47m \leq H_s \leq 6,51m$, estabelecendo as seguintes relações para determinar os parâmetros de forma α e γ (este último, também referido como parâmetro de pico) a partir de H_s e T_p (período de pico = $2\pi/w_p$):

$$\gamma = \exp\left(1,0394 - 0,01966 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) \quad (3.6)$$

$$\alpha = 5,0609 \frac{H_s^2}{T_p^4} [1 - 0,287 * \ln(\gamma)] \quad (3.7)$$

Tem-se a equivalência entre o espectro de Pierson-Moscowitz e Jonswap quando toma-se o parâmetro $\gamma=1$.

3.2 Cálculo de Forças Geradas pelas Ondas

Para o cálculo das forças geradas pela onda é preciso que se obtenha para cada instante de tempo, numa análise no domínio do tempo, as velocidades e acelerações das partículas fluidas. Uma das formulações mais comuns utilizadas em projetos de estruturas *offshore* para a obtenção dessas grandezas, e por ser mais adequada à análise aleatória na medida em que permite a superposição de efeitos, é a denominada de Teoria Linear de Airy [23].

Esta teoria não leva em conta a presença do corpo submerso; no entanto, o cálculo das forças geradas pela onda deveria também levar em conta a presença do corpo. Esta análise torna-se bastante complexa, na medida em que é preciso considerar a interação entre onda e estrutura, ou seja, interação fluido-estrutura. Foram desenvolvidas numerosas teorias [23,24] que avaliassem o problema. Dentre elas mencionam-se as baseadas na formulação de Morison e as baseadas no modelo de difração/radiação da Teoria Potencial.

Sabe-se que a aplicação da formulação de Morison, que considera os efeitos viscosos sobre o corpo, é adequada para membros que podem ser representados por elementos esbeltos com diâmetros pequenos em relação ao comprimento das ondas, de forma que a estrutura não venha a perturbar a passagem das ondas incidentes.

O modelo mais geral que representa a interação das partículas do fluido com corpos flutuantes ou imersos de grandes dimensões é o usualmente conhecido como a “teoria da difração”. A Teoria da Difração trata-se de um modelo tridimensional que considera a influência da estrutura no fluxo do fluido, e tem por objetivo determinar as forças no corpo que resultam da movimentação do fluido gerado pelas ondas. Detalhes sobre o desenvolvimento de tais formulações podem ser encontradas nas referências [1,18,19].

Chakrabarti [23] apresenta formulações que se mostram adequadas para se determinar as forças devidas à ação do carregamento de onda sobre sistemas *offshore* (como os sistemas descritos no capítulo 2). Tais formulações, referidas como a Formulação de Morison, Formulação de Froude-Krylov e Teoria da Difração, são apresentadas de maneira sucinta nas seções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3 a seguir.

O programa Prosim [12] emprega um modelo hidrodinâmico híbrido, que combina essas formulações, e permite representar a difração e radiação das ondas que ocorrem em membros cilíndricos de maior diâmetro tais como membros reticulados de plataformas flutuantes. Segue a linha sugerida por Hooft [13] e Pauling [14]. Neste caso, a parcela de força de Froude-Krylov é somada a termos de força de inércia e de arraste semelhantes às parcelas da fórmula de Morison, e a termos de segunda ordem vindos da Teoria da Difração.

Neste modelo híbrido, as forças de deriva média e lenta, bem como o amortecimento dependente da frequência, são incorporados através da leitura de coeficientes gerados por um programa de difração como o Wamit [3]. O uso desta formulação híbrida para o cálculo das forças atuando na plataforma, que combina as características positivas de mais de uma formulação, é adequado para a análise de unidades flutuantes compostas por membros cilíndricos de pequenos ou grandes diâmetros como: semi-submersíveis, FPSOs mono-coluna, TLP's, *SPAR-buoys* e bóias.

3.2.1 Equação de Morison

A fórmula de Morison é baseada no conceito de que a força exercida pelo fluido é composta por uma parcela de arraste e uma parcela de inércia. Tais componentes são dadas por coeficientes empíricos, como o coeficiente de arraste (*drag*) associado a efeitos viscosos, proporcional às velocidades do fluido e do corpo; e o coeficiente de inércia proporcional às acelerações do fluido e do corpo. Geralmente, considera-se que a fórmula de Morison é mais aplicável quando a força de arraste é significativa, e os efeitos viscosos preponderam sobre os inerciais, como é usualmente o caso de corpos esbeltos [23].

A aplicação da fórmula de Morison [25] tem sido amplamente utilizada para estimar as forças exercidas pela movimentação do fluido atuando em corpos esbeltos com dimensão transversal característica D pequena em comparação com o comprimento de onda λ . Um critério usualmente empregado para definir um “corpo esbelto” consiste em verificar se a relação D/λ é menor que 5 (cinco). A seguir, apresenta-se a equação de Morison expressa da seguinte forma:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \rho_w D C_d |\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}| (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{x}}) + \rho_w \frac{\pi D^2}{4} (C_m \ddot{\mathbf{u}} - C_a \ddot{\mathbf{x}}) \quad (3.8)$$

Analisando o lado direito da equação (3.8), tem-se que o primeiro termo, proporcional às velocidades, corresponde à parcela de arraste; o segundo termo, corresponde à parcela de inércia, proporcional às acelerações respectivamente do fluido e da estrutura.

O termo ρ_w representa a massa específica do fluido; D é uma dimensão transversal característica do corpo, neste caso o diâmetro de um elemento cilíndrico; e $\dot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{x}}$, $\ddot{\mathbf{u}}$ e $\ddot{\mathbf{x}}$ são respectivamente as velocidades e acelerações do fluido e do corpo.

Usualmente são associados, na análise de linhas de ancoragem e *risers*, valores para C_d (arrasto) variando entre 0,7 e 1,2, e em torno de 2,0 para C_m (inércia). Já o coeficiente C_a é tomado pela diferença $C_a = C_m - 1$ e está associado a efeitos de “massa adicional”.

Cabe ressaltar que a equação de Morison, além de ser aplicada para membros esbeltos como os de plataformas fixas, linhas de ancoragem e *risers* modelados por elementos finitos, também tem sido considerada, como no caso do programa Prosim, em plataformas flutuantes compostas por membros reticulados cilíndricos de grandes dimensões, tais como as plataformas semi-submersíveis, TLPs ou *SPAR-buoys*.

Em casos onde os membros da plataforma se encontram muito próximos, podem ocorrer situações em que uma porção da massa de fluido fique confinada, agindo como parte da estrutura, e levando ao aumento da força de massa adicional. Assim, a utilização pura e simples da equação de Morison equivaleria a assumir que os membros, além de relativamente esbeltos, são razoavelmente espaçados entre si, de modo que o espaçamento médio entre dois membros é grande quando comparado com as dimensões transversais da seção.

Sendo assim, a presença de outros membros não afetaria no cálculo da força que o fluido exerce em cada membro. Logo, a força total pode ser obtida somando-se as forças calculadas individualmente para cada membro da plataforma. O efeito de “confinamento” do fluido poderia ser modelado empiricamente, aumentando o valor do coeficiente C_a (proporcional à aceleração do corpo), mas sem alterar o valor do coeficiente C_m que afeta apenas a força de inércia proporcional à aceleração do fluido.

Cabe mencionar que é preciso efetuar algumas ressalvas quanto à aplicabilidade deste conceito no cálculo de forças de ondas. Uma delas seria que tal formulação considera que a resposta do *riser* está alinhada com a direção do fluxo incidente. Portanto, omite forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto devidas à vibrações induzidas por vórtices (*VIV*). Outro ponto a ser observado seria de que a equação (3.8), descrita acima, não incorpora o efeito da esteira de interferência entre *risers* muito próximos. Um *riser* na esteira de outro pode receber menos carga. Este efeito também poderia ser modelado empiricamente, variando os valores do coeficiente C_d .

3.2.2 *Formulação de Froude-Krylov*

Segundo Chakrabarti [23], para determinadas estruturas em que as forças inerciais preponderam sobre as forças viscosas, mas ainda, a estrutura é relativamente pequena de modo que a sua presença não afete significativamente o fluxo das partículas fluidas, então a formulação de Froude-Krylov poderia ser aplicada.

Esta formulação se baseia no conceito de que a força que incide sobre o corpo é devido à pressão gerada pela passagem da onda atuante sobre a superfície do corpo. A força total na estrutura numa determinada direção é então obtida pela integração da componente de pressão naquela direção da parte submersa do corpo.

A seguir são apresentadas as expressões para as componentes de força horizontal e vertical nas direções ortogonais \mathbf{x} e \mathbf{y} :

$$F_x = C_H \iint_S p n_x dS \quad (3.9)$$

$$F_y = C_V \iint_S p n_y dS \quad (3.10)$$

As expressões (3.9) e (3.10) representam, respectivamente, as componentes horizontal e vertical da força resultante no corpo. Os termos n_x e n_y estão associados às componentes horizontal e vertical do vetor normal à superfície do corpo.

É importante ressaltar que os termos C_H e C_V , que representam os coeficientes de força horizontal e vertical, também determinados empiricamente, não devem ser confundidos com os coeficientes de inércia da fórmula de Morison.

Poucas aplicações práticas atendem a estas hipóteses, segundo Chakrabarti [23]. Em casos onde os efeitos de difração sejam aplicáveis, mas ainda pequenos, é possível considerá-los na forma de um termo de correção nos coeficientes de força. Em casos mais gerais onde os efeitos de difração são mais importantes, isso não é possível. Adicionalmente, a proximidade do corpo com o fundo ou a superfície livre pode gerar efeitos não facilmente quantificáveis nos coeficientes. Nestes casos, deveria então ser aplicada a formulação completa da teoria da difração.

3.2.3 Teoria da Difração

A formulação baseada no modelo de difração/radiação, para análise hidrodinâmica de estruturas *offshore*, estabelece que a presença do corpo venha a alterar de forma significativa o fluxo do fluido incidente. Esta aplicação se faz necessária para corpos de grandes volumes, quando comparados com o comprimento de onda, os quais a formulação de Morison já não mais se aplica.

Neste caso, para a interação fluido-estrutura são observados efeitos como difração e radiação do campo de ondas geradas no entorno do corpo. Conseqüentemente, a velocidade do fluido deverá considerar além da parcela da velocidade potencial das ondas incidentes, também a parcela da velocidade potencial das ondas devido à difração [13].

O modelo de Difração/Radiação associado à Teoria Potencial, compondo um modelo matemático em termos de um PVC composto pela equação de Laplace tridimensional com as condições de contorno associadas, pressupõe a desconsideração da viscosidade do fluido. Um modelo mais rigoroso que levasse em conta este efeito deveria ser baseado nas equações de Navier-Stokes [13] compondo, portanto, um modelo matemático ainda mais complexo.

O modelo de Difração calcula cargas de primeira e segunda ordem que resultam da movimentação do fluido induzida pelas ondas, assim como o amortecimento do sistema flutuante. As forças de primeira ordem atuam numa mesma faixa de frequência da onda incidente (*wave frequency*), e são resultantes da aplicação da teoria potencial linearizada. Demonstra-se [23] e [13] que em soluções de segunda ordem, parcelas de carga atuando em diferentes faixas de frequência são observadas. Dentre estas,

consideram-se os efeitos de deriva média (*mean drift*) e lenta (*slow drift*) e termos de alta frequência como “*springing*”.

A força de deriva média, proveniente de um estado de mar regular, consiste numa parcela estática obtida numericamente a partir de coeficientes conhecidos como “funções de transferência quadrática” (QTF ou *quadratic transfer functions*). Sua magnitude é dependente da frequência e proporcional ao quadrado da amplitude da onda.

Em estados de mar irregulares, com espectro representado por uma superposição de várias componentes de ondas lineares de Airy com amplitudes a_j e frequências ω_j , além das cargas de deriva média resultante da ação de cada uma das componentes de onda, surgem outras cargas que variam no tempo oscilando em diferentes frequências.

As forças que atuam em frequências mais baixas, correspondentes à diferença das frequências das ondas que representam o espectro, são denominadas de força de “*deriva lenta*” (*slow drift*). Já as frequências mais altas, correspondentes à soma das frequências das ondas, podem excitar movimentos usualmente referidos como de “*springing*” ou “*ringing*”, como no caso de TLPs ancoradas.

O cálculo das forças de segunda ordem associadas a estados de mar irregular pode ser efetuado avaliando e integrando a expressão da pressão do fluido atuando no casco, mantendo os termos de segunda ordem. Também podem ser expressas como funções do quadrado da amplitude de cada componente de onda; com isso é possível deduzir expressões para coeficientes de transferência (QTF) semelhantes aos já mencionados acima no caso das cargas de deriva média.

Tomando-se para expressão da elevação da superfície livre como resultado da soma de componentes de ondas regulares que representam um mar irregular:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (3.11)$$

onde: a_i é amplitude

ω_i é a frequência

t é o tempo

ε_i é a fase randomicamente distribuída no intervalo $[0, 2\pi]$

A parcela da força de deriva média ou estática é dada por:

$$F_0 = \sum_{i=1}^N D_{ii} a_i^2 \quad (3.12)$$

onde: D_{ii} é a função de transferência da força de deriva da onda regular com frequência ω_i .

Recorda-se a expressão geral da parcela de força de deriva lenta ou de baixa frequência:

$$F_s(t) = \sum_{i \neq j}^N \sum_{j \neq i}^N D_{ij} \frac{a_i a_j}{2} \cos[(\omega_i - \omega_j) t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \quad (3.13)$$

Considerando a aproximação de Newman [26], assume-se que $D_{ij} = D_{kk}$, onde D_{kk} é a função de transferência da força de deriva média da onda regular com frequência igual à média entre ω_i e ω_j . Com isto, obtém-se a seguinte expressão:

$$F_s(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N D_{kk} a_i a_j \cos[(\omega_i - \omega_j) t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \quad (3.14)$$

A parcela F_D correspondente às forças de deriva média e lenta é então dada pela soma das equações (3.12) e (3.14):

$$F_D = F_0 + F_s \quad (3.15)$$

Ressalta-se ainda que, devido à oscilação do corpo próximo a superfície livre, são ainda considerados efeitos de amortecimento associados à Teoria Potencial, usualmente denominados de amortecimento potencial.

Observa-se que nenhum efeito de amortecimento é considerado em corpos submersos oscilando longe da superfície livre em um fluido invíscido [13]. Neste caso, para baixas frequências de oscilação, o amortecimento não é significativo. No entanto, para maiores frequências, o movimento do corpo próximo à superfície livre gera perturbações na elevação das ondas, de modo que a força de reação deixa de estar em fase com as acelerações, o que equivale à consideração de efeitos de perda de energia ou

amortecimento. Desta forma, a partir de resultados da teoria potencial é possível determinar coeficientes de amortecimento em função da frequência.

No programa Prosim, para incluir as forças de amortecimento potencial (dependentes da frequência) em uma simulação no domínio do tempo, toma-se a matriz de coeficientes de amortecimento em função da frequência, e então se calcula as respostas impulso ou função de memória no tempo através da transformada de Fourier.

$$L_{ij}(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \lambda_{ij}(\omega) \cos(\omega) \tau d\omega \quad (3.16)$$

Por meio de uma integral de convolução da função de memória sobre a história no tempo dos movimentos [27], obtém-se o valor da força de amortecimento em um dado instante de tempo.

$$F_{PD}(t) = \int_0^{\infty} L_{ij}(\tau) v_b(t-\tau) d\tau \quad (3.17)$$

3.2.4 Modelo Híbrido para Cálculo das Forças na Embarcação

O modelo híbrido combina as formulações apresentadas nos itens 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3, em que seguindo propostas como as apresentadas por Hooft [13] e Pauling [14], vêm a combinar características positivas de mais de uma formulação, numa tentativa de representar o modelo numérico mais realístico quanto possível. Sob este aspecto, a aplicação das diferentes formulações complementa deficiências e reforça as vantagens de cada uma delas.

Pode-se mencionar que somente a utilização da fórmula de Morison para o cálculo das cargas no casco de uma embarcação composta por membros cilíndricos, implicaria em assumir algumas simplificações. O mesmo também ocorre para aplicação somente da Teoria da Difração.

Com isso, no modelo híbrido implementado no programa Prosim, são combinadas: as forças de primeira ordem da Fórmula de Morison, particularmente as forças viscosas de arraste; as forças de Froude-Krylov; e as forças de segunda ordem oriundas da Teoria Potencial, consideradas a partir de coeficientes calculados por programas como o Wamit [3].

Cabe ressaltar que o modelo híbrido apresentado nesta seção descreve apenas as forças geradas pela movimentação do fluido devido às ondas e correnteza. A parcela de força devida ao vento, como descrita no item 3.4, é somada às parcelas de onda e correnteza posteriormente no vetor de cargas ambientais para a solução dos sistemas de equações.

Como mencionado anteriormente na seção 3.2.1, uma das premissas da aplicação da fórmula de Morison é estabelecer que os membros reticulados de uma unidade flutuante não possuem dimensões suficientes para afetar o fluxo do fluido incidente, com isso, ignora a perturbação da onda causada pela presença do corpo.

Outro fato, diz respeito à consideração de que a força em um membro individual não é interferida pela presença de outros membros. Logo, é assumido que o espaçamento médio entre dois membros da plataforma é grande em comparação com as dimensões da seção transversal. Neste caso, a força total no casco pode ser calculada como a soma das forças calculadas para cada um dos membros individuais, o que num modelo mais rigoroso, a interação entre os membros deveria ser estimada. Assim, acarretaria em efeitos de cancelamento ou sobreposição de ondas sobre o sistema.

Sabe-se que a Teoria Potencial é empregada em casos onde os membros da plataforma são considerados relativamente grandes, de modo vir a perturbar a passagem da onda que incide sobre a estrutura, acarretando em efeitos de difração e radiação. Neste caso são consideradas parcelas de segunda ordem como o amortecimento potencial (irradiação de ondas) e forças de deriva (difração e reflexão de ondas), as quais não são avaliadas por Morison.

Avaliando-se as características adotadas por estas formulações, é importante ressaltar que enquanto as forças de primeira e segunda ordem são avaliadas pela Teoria Potencial no domínio da frequência e válidas para pequenas amplitudes de onda e movimento, a fórmula de Morison avalia as forças de primeira ordem no domínio do tempo, sendo válidas para grandes amplitudes de onda e movimentos.

Com isso, a fórmula de Morison considera os efeitos não-lineares levando em conta a superfície livre instantânea, e determinando as cargas exatamente no trecho imerso dos membros em cada instante de tempo.

Já a formulação da Teoria Potencial não incorpora efeitos devidos à viscosidade do fluido. Desta forma, a consideração do amortecimento viscoso do sistema é negligenciado. Casos em que as propriedades inerciais da embarcação são preponderantes sobre as propriedades viscosas, tal fato é de menor relevância. Porém, casos em que a plataforma possua membros cilíndricos, onde o diâmetro pode não ser tão grande quando comparado como comprimento da onda, a aplicação da teoria potencial pode vir a ser insuficiente.

Quanto às forças de segunda ordem, é interessante mencionar que existe um tipo de força de deriva que é fornecido pela equação de Morison. Esta parcela é devida à diferença na força de arrasto da onda em membros cortados pela superfície da água, que resulta da diferença do comprimento molhado do membro, da crista para o cavado, ao longo da passagem da onda pelo membro [14].

Dado o exposto, o programa Prosim adota um modelo híbrido para o cálculo das forças correspondentes à movimentação do fluido, que neste caso são devidas às ações ambientais de onda e correnteza, composta pelas parcelas atribuídas às formulações anteriormente apresentadas.

Assim, a expressão completa para o cálculo de tais forças é apresentada pela equação (3. 18) a seguir:

$$F_{WC} = \mathbf{f}_{FK} + \mathbf{f}_{Mm} + \mathbf{f}_{Md} + \mathbf{f}_D + \mathbf{f}_{PD} \quad (3.18)$$

onde:

\mathbf{f}_{FK} representa a parcela de força de Froude-Krylov;

\mathbf{f}_{Mm} e \mathbf{f}_{Md} , correspondem aos termos de inércia e arraste da fórmula de Morison, normais e axiais ao eixo do membro;

\mathbf{f}_D representa às forças de Deriva Média e Lenta;

\mathbf{f}_{PD} corresponde às forças de Amortecimento Potencial.

É importante ressaltar, para que seja válida a superposição da parcela de inércia contida na expressão de Morison com o termo de Froude-Krylov (que também representa um termo de inércia, porém considerando somente as acelerações do fluido), não se deve fornecer o coeficiente de inércia C_m , mas sim, o coeficiente de massa adicional C_a (que afeta somente as acelerações do corpo) para equação (3.8).

3.3 Correnteza

As forças de correnteza marítima são consideradas por meio de perfis poligonais de velocidades medidas desde o fundo do mar até a superfície. Neste caso, adota-se então uma tabela que consiste da velocidade de corrente, com suas respectivas direções de ataque versus profundidade. Este tipo de carregamento geralmente é aplicado incrementalmente sobre a estrutura, geralmente considerado como uma solicitação constante.

A determinação da força atuante sobre as estruturas marítimas se dá aplicando-se também a formulação de Morison equação (3.8), como apresentada anteriormente na seção 3.2.1.

3.4 Vento

Existem dois métodos para se considerar os efeitos de vento atuantes na parte emersa de unidades flutuantes. O primeiro seria considerar a força de vento como uma parcela estática, constante no tempo; e o segundo como uma parcela dinâmica, variável no tempo, obtida a partir de um espectro de vento.

O cálculo da parcela estática da carga de vento em navios e plataformas é efetuado determinando-se forças e momentos, através de expressões (3.19), que se relacionam diretamente com os coeficientes hidrodinâmicos dados na forma adimensional como:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{1}{2} \rho_{\text{ar}} C_{V_{fx}}(\psi) A_{ts} V_w^2 \\ F_y &= \frac{1}{2} \rho_{\text{ar}} C_{V_{fy}}(\psi) A_{ls} V_w^2 \\ M_z &= \frac{1}{2} \rho_{\text{ar}} C_{V_{mz}}(\psi) A_{ls} L V_w^2 \end{aligned} \quad (3.19)$$

onde: ρ_{ar}	Massa Específica do ar
V_w	Velocidade do vento (função da altura de referência e período de tempo)
A_{ts}	Área exposta frontal da unidade flutuante
A_{ls}	Área exposta lateral da unidade
L	Comprimento da unidade
$Cv_{fx}(\psi), Cv_{fy}(\psi), Cv_{mz}(\psi)$	Coefficientes aerodinâmicos de força e momento

Tendo em vista as expressões (3.19) para o cálculo de F_x , F_y e M_z , observa-se que os coeficientes aerodinâmicos (tabelados para diferentes direções ψ de atuação do vento, e geralmente obtidos através de ensaios em túneis de vento) podem ser fornecidos envolvendo o produto de outros termos que aparecem nas expressões. A partir dos coeficientes $Dv_{fx}(\psi)$, $Dv_{fy}(\psi)$, $Dv_{fmz}(\psi)$ já dimensionalizados ($[Força]/[Velocidade]^2$), a força resultante devido ao vento pode ser obtida por meio da equação (3.20) a seguir:

$$\begin{aligned}
 F_x &= Dv_{fx}(\psi) V_w^2 \\
 F_y &= Dv_{fy}(\psi) V_w^2 \\
 M_z &= Dv_{fmz}(\psi) V_w^2
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

O cálculo da força de vento depende também da determinação da parcela dinâmica (denominada também como força de vento de baixa frequência), que de modo similar às ondas geram forças variáveis no tempo. Um espectro, que representa a parcela dinâmica do carregamento de vento atuante em plataformas, bastante aplicado em projetos é o proposto pela norma API RP 2A [28].

4. EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

4.1 Introdução

O presente capítulo visa apresentar as formulações matemáticas que descrevem as equações de movimentos do modelo das linhas de ancoragem e *risers*, e do modelo do corpo flutuante.

Em linhas gerais, a equação que rege o movimento de sistemas flutuantes é representada pelos 6 graus de liberdade de corpo rígido. Para o caso das linhas, uma abordagem sucinta será discutida para a análise não-linear de estruturas modeladas por elementos finitos, bem como, o desenvolvimento das estratégias de solução comumente empregadas em problemas dinâmicos.

Vale ressaltar que, para este capítulo 4, a formulação para a análise de movimento de grandes amplitudes do casco será discutida seguindo o enfoque desacoplado tradicional. Entretanto, mais adiante no capítulo 5, a extensão desta formulação para a consideração do modelo acoplado será apresentada, como também, a detalhada distinção entre as duas estratégias para a definição do acoplamento do sistema referidas no capítulo 1 (Fracamente Acoplada e Fortemente Acoplada).

Inicialmente, serão apresentados os sistemas de coordenadas em que são referenciados os modelos das linhas e do casco. Em seguida, as equações de movimento das linhas. E por fim, as equações de movimento do casco.

Um estudo mais aprofundado sobre as formulações estruturais das linhas e hidrodinâmica do casco pode ser encontrado na literatura correlacionadas à dinâmica e elementos finitos [29,30,31] e sistemas *offshore* [13,23].

4.2 Sistemas de Coordenadas

4.2.1 Sistema Global de Coordenadas

O sistema de coordenadas global geral (x, y, z) é o sistema de coordenadas principal e único, onde todos os demais sistemas estão referenciados. Os eixos coordenados x e y do sistema global estão contidos em um plano horizontal, e o eixo z corresponde à direção vertical, orientado de baixo para cima.

Pode-se definir, através de uma variável h , a localização da profundidade da origem deste sistema de referência. Entretanto, é comum adotar tal origem no plano médio da superfície da água. Portanto, tomando-se $h = 0$, este sistema de eixos passa a coincidir com a linha d'água.

As coordenadas dos nós da malha de elementos finitos, que representam as linhas no modelo acoplado, são expressas neste sistema global geral.

4.2.2 Sistemas Locais da Plataforma

Inicialmente, é considerado um sistema de eixo local (sistema estrutural) cuja origem é localizada na “quilha à meia nau” no caso de navios, ou um ponto contido no plano horizontal que passa pela base dos *pontoons*, no caso de uma plataforma semi-submersível. É neste sistema que são fornecidos os dados que definem a geometria de cada unidade flutuante, como as coordenadas dos elementos cilíndricos e suas conexões.

Para que os movimentos da embarcação sejam obtidos, são definidos mais três sistemas de referência com suas respectivas origens posicionadas no centro de gravidade (CG) da plataforma. Um deles pode ser denominado como sistema inicial – **SI** (fixo, considerando o aproamento), o outro denominado como sistema móvel angular – **SMA** para componentes de movimentos angulares, e por fim, o sistema móvel para componentes translacionais – **SMT**.

Os eixos coordenados do sistema inicial têm orientação semelhante à do sistema global geral (x, y, z) , ou seja, o plano $X_{SI}Y_{SI}$ está contido em um plano horizontal e o eixo Z_{SI} é vertical, orientado de baixo para cima. A relação entre este sistema estrutural inicial SI e o sistema global geral (x, y, z) é feita através de três coordenadas que

definem a distância de sua origem (o CG) até a origem do sistema de global geral, e ainda de um quarto valor que representa o ângulo de aproamento da unidade flutuante, o qual é medido no plano horizontal entre o eixo x -global geral e o eixo X_{SI} da unidade. Para o caso de navios, considera-se que o eixo X_{SI} coincide com a direção popa-proa.

Já o sistema móvel SMA, que inicialmente é coincidente com o sistema inicial, acompanha os movimentos de translação e rotação do centro de gravidade da unidade. As direções dos eixos do SMA, que também se alteram, acompanham as rotações do corpo. Desse modo, as componentes angulares das equações de movimento da embarcação apresentam-se neste sistema.

O sistema SMT acompanha todos os movimentos de translação da unidade, e somente o movimento de giro de yaw . Com isso, a variação do aproamento ao longo do tempo é considerada, mantendo-se o plano $X_{SMT}Y_{SMT}$ em um plano horizontal, e o eixo Z_{SMT} na vertical. Assim, as componentes translacionais das equações de movimento da embarcação são apresentadas neste sistema.

4.2.3 Sistema Local dos Elementos Finitos das Linhas e dos Membros da Plataforma

Um sistema local de coordenadas (x', y', z') é fornecido para cada elemento da malha de elementos finitos das linhas e para cada membro reticulado da plataforma.

A origem deste sistema está localizada no nó 1 do membro. A direção local x' coincide com o eixo do membro, e é orientada do nó 1 para o nó 2; as direções locais y' e z' , ortogonais a x' , estão contidas na seção transversal do membro.

No caso de um membro com orientação geral no espaço, a direção local y' é horizontal, e a direção local z' é perpendicular às direções x' e y' . Para um elemento horizontal, a direção local z' é vertical, paralela ao eixo global z . Para um membro vertical, a direção local horizontal y' é paralela ao eixo global y . Por sua vez, a direção local z' , também horizontal, é paralela ao eixo global x com sentido oposto.

4.3 Equação de Movimento das Linhas

Sabe-se que a descrição matemática para a representação do comportamento dinâmico estrutural é estabelecida por um problema de valor inicial e de contorno (**PVI/C**). O **PVI/C** é constituído por um sistema de equações diferenciais parciais (**EDP**), que descrevem as equações de movimento, e um sistema de condições iniciais e de contorno.

Um procedimento usual para se obter a resposta estrutural dinâmica consiste em empregar uma técnica de “semi-discretização” independente, em que as equações de movimento são primeiro discretizadas no espaço pelo “Método dos Elementos Finitos” – **MEF** [32] e em seguida discretizadas no tempo por um algoritmo de integração como *Newmark* [31], por exemplo.

Aspectos particulares de tais procedimentos de discretização do modelo matemático, assim como, a solução do comportamento estrutural das linhas de ancoragens *risers* são descritos nas seções 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 a seguir.

4.3.1 Discretização Espacial

A discretização espacial visa reduzir as Equações Diferenciais Parciais **EDP** a um sistema de equações diferenciais ordinárias *semi-discretas*. O método numérico largamente empregado para a discretização espacial de estruturas reticuladas, tais como linhas de ancoragem e *risers*, para que se obtenha a solução numérica de problemas dinâmicos não-lineares, é o “Método dos Elementos Finitos” – **MEF**.

O MEF consiste em subdividir o domínio do modelo em subdomínios discretos, buscando a determinação das incógnitas em um número finito de pontos, ou seja, a estrutura passa a ser dividida em um número finito de elementos.

Para a discretização espacial dos *risers* e linhas de ancoragem, o programa Prosim emprega elementos reticulados de treliça e pórtico. A seleção do tipo de elemento apropriado irá depender da capacidade de resistência à flexão da linha, geralmente muito menor do que a resistência aos esforços axiais. Em linhas de amarração e *risers* flexíveis, a rigidez à flexão é usualmente desconsiderada, o que justifica o uso de

elementos de treliça ou de cabo. Em *risers* rígidos e tendões, a rigidez à flexão deve ser considerada, o que leva ao emprego de elementos de pórtico espacial.

Os elementos de treliça possuem três graus de liberdade por nó, considerando-se somente os graus de liberdade relativos aos movimentos de translação. Devido a sua menor quantidade de graus de liberdade para a montagem das matrizes dos elementos, tal fato acarreta em uma matriz global reduzida. Neste caso, os elementos de treliça requerem um menor esforço computacional para a realização das análises quando comparados com os elementos de pórtico.

Os graus de liberdade (U , V , W) representam movimentos lineares nas direções x' , y' e z' , como ilustra a Figura 17.

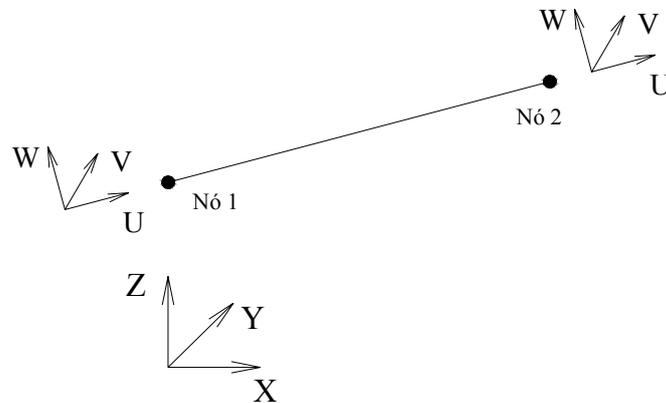


Figura 17 - Elemento de treliça.

O programa Prosim emprega um elemento finito de pórtico espacial baseado em uma formulação co-rotacional [33,34,35]. Esta formulação vem se impondo como alternativa às formulações Lagrangeanas total e atualizada [31], tradicionalmente empregadas na mecânica dos sólidos para a descrição do movimento em problemas com não-linearidade geométrica acentuada. O objetivo principal da formulação co-rotacional é separar os movimentos de corpo rígido dos movimentos que geram deformações. Com isso, obtém-se um elemento mais preciso, robusto e menos sensível à magnitude das rotações incrementais.

O elemento de pórtico espacial possui seis graus de liberdade por nó. Os graus de liberdade (U, V, W, RU, RV, RW) representam movimentos lineares nas direções x', y' e z' , e movimentos angulares em torno destes mesmos eixos, como ilustra a Figura 18.

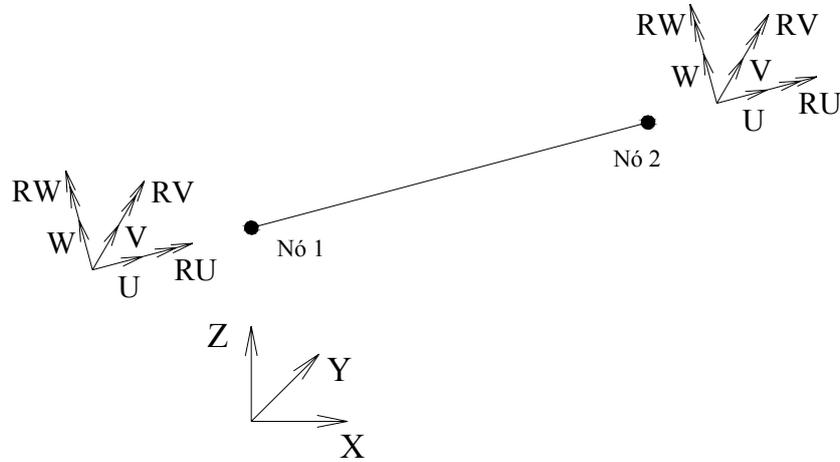


Figura 18 - Elemento de Pórtico Espacial.

4.3.2 Discretização no Tempo

Após a discretização espacial, o passo seguinte consiste na discretização das equações diferenciais ordinárias ao longo do tempo. Integrar no tempo significa discretizar as equações de movimento, supondo que o equilíbrio é satisfeito apenas em um determinado número de instantes t_{n+1} separados por intervalos discretos, obtendo-se assim, a resposta em termos de deslocamentos, velocidades e acelerações ao longo de cada um destes intervalos. As equações gerais dos movimentos podem ser escritas da seguinte forma:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (4.1)$$

Os vetores $\mathbf{u}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ e $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ representam as componentes de deslocamentos, velocidades e acelerações, $\mathbf{F}(t)$ é o vetor de cargas externas, \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, simétricas e constantes no tempo. As matrizes de massa e rigidez podem ser deduzidas diretamente a partir da formulação de elementos finitos. A matriz de amortecimento \mathbf{C} , por sua vez, é usualmente representada pela expressão de amortecimento de Rayleigh como uma combinação linear das matrizes de massa e rigidez [31]. O problema de valor inicial é composto por estas equações de movimentos, associadas às seguintes condições iniciais:

$$\mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \quad ; \quad \dot{\mathbf{u}}(0) = \mathbf{v}_0 \quad (4.2)$$

Assim, a resposta do sistema estrutural ao longo do tempo é obtida empregando-se um algoritmo de integração apropriado, como a família de algoritmos de *Newmark*, apresentados a seguir:

$$\mathbf{d}_{n+1} = \mathbf{d}_n + \Delta t \mathbf{v}_n + \frac{\Delta t^2}{2} [(1-2\beta)\mathbf{a}_n + 2\beta\mathbf{a}_{n+1}] \quad (4.3)$$

$$\mathbf{v}_{n+1} = \mathbf{v}_n + \Delta t [(1-\gamma)\mathbf{a}_n + \gamma\mathbf{a}_{n+1}] \quad (4.4)$$

Os termos \mathbf{a}_{n+1} , \mathbf{v}_{n+1} e \mathbf{d}_{n+1} são as aproximações para os valores “exatos” desconhecidos de $\mathbf{u}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ e $\ddot{\mathbf{u}}(t)$; Δt é o passo de tempo; e γ e β são os parâmetros que caracterizam a família de algoritmos de *Newmark*.

Diversos algoritmos implícitos e explícitos são baseados nos parâmetros desta família de algoritmos. Algoritmos implícitos como a *Regra Trapezoidal* ($\gamma=1/2$, $\beta=1/4$) são mais adequados para a resolução de problemas inerciais [31], como por exemplo, sistemas flutuantes de produção sujeitos aos carregamentos ambientais para a condição de operação e extrema. Por outro lado, algoritmos explícitos, como o método da *Diferença Central* ($\gamma=1/2$, $\beta=0$), são mais adequados para problemas de transientes, por exemplo, aplicados imediatamente após a ruptura de uma linha de ancoragem.

Observa-se em [31] que a aplicação dos operadores de integração no tempo de *Newmark* para a resolução da forma discretizada no tempo, como apresentada pela equação 4.1, se dá pela substituição das aproximações \mathbf{a}_{n+1} , \mathbf{v}_{n+1} e \mathbf{d}_{n+1} , que conduzem a um sistema efetivo de equações algébricas a ser solucionado a cada passo de tempo. A forma geral do respectivo sistema efetivo pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\mathbf{A}_{n+1} \mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{b}_{n+1} \quad (4.5)$$

A matriz \mathbf{A} é definida pela combinação das matrizes de massa, amortecimento e rigidez, e o vetor de “cargas efetivas” \mathbf{b} é calculado em termos das cargas externas, forças elásticas, inércia e amortecimento do passo anterior. A forma particular desse sistema dependerá não somente da escolha do operador de integração, mas também do esquema de implementação adotado, o qual definirá o vetor \mathbf{x} das incógnitas como os vetores deslocamentos, velocidades e acelerações.

4.3.3 Extensão para Problemas Não-Lineares

No caso de problemas não-lineares, as equações de movimento discretizadas no tempo podem ser escritas da seguinte forma:

$$\mathbf{M} \mathbf{a}_{n+1} + \mathbf{R}(\mathbf{d}_{n+1}) = \mathbf{F}_{n+1} \quad (4.6)$$

O termo $\mathbf{R}(\mathbf{d}_{n+1})$ é o vetor de forças internas (funções não-lineares das incógnitas dos deslocamentos \mathbf{d}_{n+1}), incluindo também as contribuições não-lineares das forças elásticas e de amortecimento.

Uma das possíveis estratégias para o tratamento dos efeitos não-lineares, utilizando algoritmos implícitos de integração no tempo, consiste em assumir a linearização no entorno da configuração deformada correspondente ao instante t_{n+1} , expressando o termo não-linear $\mathbf{R}(\mathbf{d}_{n+1})$ como uma série de Taylor truncada que inclui \mathbf{K}_T , a matriz de rigidez tangente. Como consequência dessa linearização assumida, o equilíbrio fim do intervalo de tempo t_{n+1} não é mais garantido. O uso de técnicas iterativas para a solução de sistemas de equações não-lineares é então requerido, com o propósito de se obter respostas dinâmicas mais confiáveis.

O método de Newton-Raphson (N-R) tem sido tradicionalmente empregado para a resolução de análises não-lineares. Uma forma incremental-iterativa para descrever as equações de movimento é dada pela seguinte expressão:

$$\mathbf{M} \mathbf{a}_{n+1}^{(k)} + \mathbf{C} \mathbf{v}_{n+1}^{(k)} + \mathbf{K}_T \Delta \mathbf{d}^{(k)} = \mathbf{F}_{n+1} - \mathbf{R}(\mathbf{d}_{n+1}^{(k-1)}) \quad (4.7)$$

$$\mathbf{d}_{n+1}^{(k)} = \mathbf{d}_{n+1}^{(k-1)} + \Delta \mathbf{d}^{(k)} \quad (4.8)$$

A aplicação dos operadores implícitos de integração no tempo nas equações (4.7) e (4.8), definem também sistemas efetivos de equações algébricas similares à (4.5), agora sendo os deslocamentos incrementais as incógnitas básicas para serem resolvidos a cada iteração da técnica de N-R.

Expressões predictoras e corretoras para os operadores de *Newmark* podem ser escritas como [36] a seguir:

$$\mathbf{a}^* = -\frac{1}{\beta\Delta t} \mathbf{v}_n + \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \mathbf{a}_n, \quad \mathbf{v}^* = \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \mathbf{v}_n + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \Delta t \mathbf{a}_n \quad (4.9)$$

$$\mathbf{a}_{n+1}^{(k)} = \mathbf{a}^* + \frac{1}{\beta\Delta t^2} \Delta \mathbf{d}^{(k)}, \quad \mathbf{v}_{n+1}^{(k)} = \mathbf{v}^* + \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \Delta \mathbf{d}^{(k)} \quad (4.10)$$

Uma formulação detalhada de implementação dos algoritmos implícitos para integração no tempo, associados com a técnica de Newton-Raphson, incluindo a forma particular da matriz efetiva \mathbf{A} e o vetor de carga efetivo \mathbf{b} (agora referido como “vetor de resíduos efetivos”) podem ser encontrados em [36].

4.4 Equação de Movimento do Casco

Como mencionado anteriormente, a formulação da equação de movimento da unidade flutuante será apresentada nesta seção seguindo o enfoque desacoplado tradicional. Sua extensão para a representação do modelo acoplado será descrita no capítulo 5 mais adiante.

Para a análise da equação de movimento de plataformas flutuantes, representa-se o corpo rígido pelos seus 6 graus de liberdade, referenciando seus movimentos num sistema coordenado que tem como origem o centro de gravidade (CG). A seguir são definidas algumas terminologias usuais para definição dos movimentos de uma plataforma, e sua ilustração é apresentada na Figura 19.

- Surge* – Movimento na direção do eixo longitudinal da embarcação;
- Sway* – Movimento na direção do eixo transversal da embarcação;
- Heave* – Movimento vertical da embarcação;
- Roll* – Movimento de rotação em torno do eixo longitudinal da embarcação;
- Pitch* – Movimento de rotação em torno do eixo transversal da embarcação;
- Yaw* – Movimento de rotação no plano horizontal.

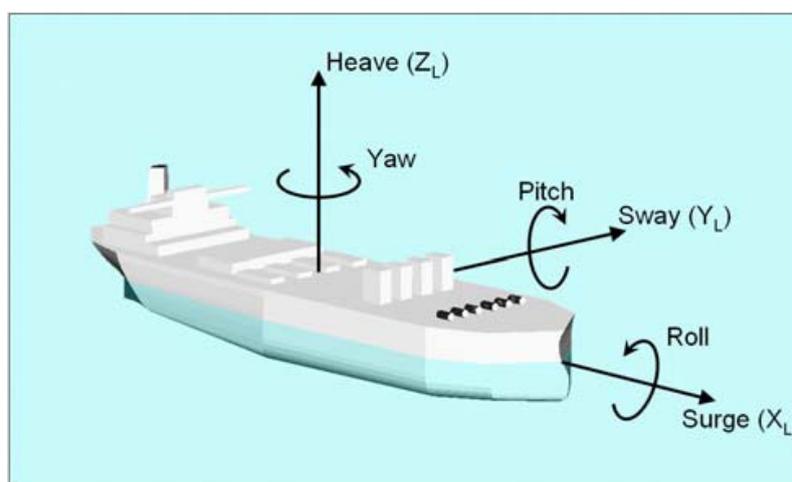


Figura 19 – Graus de liberdade da embarcação.

O procedimento de solução do comportamento hidrodinâmico da embarcação é baseado na integração numérica das equações de movimento de corpo rígido. Essas equações incluem diversos efeitos não-lineares como: forças de arrasto (funções quadráticas da velocidade relativa fluido-estrutura); movimentos de grandes amplitudes; e iteração não-linear das linhas de ancoragem e *risers*.

Tais equações podem ser descritas considerando dois sistemas de coordenadas, os sistemas global e local ($oxyz$ e $OXYZ$), inicialmente coincidentes, e com origens localizadas no centro de gravidade (CG) da plataforma.

O sistema global $oxyz$ permanece fixo no espaço e o sistema local $OXYZ$ é fixo no corpo, deslocando-se segundo os movimentos de corpo rígido do casco. O movimento pode ser expresso como o somatório da translação da origem do sistema de coordenadas estrutural da plataforma, e da rotação em torno de um eixo passando pela origem do sistema estrutural:

- O movimento de translação $\mathbf{x}_l = (x_{l1}, x_{l2}, x_{l3})$ é expressa pela coordenada no tempo da origem do sistema local $OXYZ$, medida na direção global $oxyz$.
- A posição relativa rotacional desses dois sistemas de referência é expressa, empregando-se os *ângulos de Euler*, denominados α , β e γ como a seguir. O corpo primeiramente rotaciona em torno do eixo- Z através de um *yaw* (ângulo γ), então a partir da nova posição resultante gira em torno do eixo- Y através de um *pitch* (ângulo β), e finalmente, a partir da última posição resultante gira em torno do eixo- X através de um *roll* (ângulo α).

Desse modo, a equação que define a transformação de coordenadas relacionando o sistema de eixos local (fixo no corpo) com o sistema global, é dada pela equação (4.11) a seguir:

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c\beta c\alpha & s\beta c\alpha & -s\alpha \\ -s\beta c\gamma + c\beta s\alpha s\gamma & c\beta c\gamma + s\beta s\alpha s\gamma & c\alpha s\gamma \\ s\beta s\gamma + c\beta s\alpha c\gamma & -c\beta s\gamma + s\beta s\alpha c\gamma & c\alpha c\gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x - x_{l1} \\ y - x_{l2} \\ z - x_{l3} \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

ou ainda,

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_l) \quad (4.12)$$

Neste casco, a matriz 3x3 \mathbf{A} é a matriz de rotação (onde $s\beta = \text{sen } \beta$, $c\beta = \text{cos } \beta$, e assim por diante); \mathbf{X} é o vetor com componentes (X, Y, Z) no sistema local; \mathbf{x} é o vetor posição com componentes no sistema global de coordenadas; e \mathbf{x}_l é o vetor com as translações da origem da coordena local. A transformação inversa é expressa por:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_l + \mathbf{A}^T \mathbf{X} \quad (4.13)$$

Outra expressão pode ser derivada do vetor de velocidade angular do corpo: $\boldsymbol{\omega}$, expresso em termos das componentes ω_1 , ω_2 , ω_3 no sistema global (x, y, z). A relação entre $\boldsymbol{\omega}$ e as derivadas no tempo dos ângulos de Euler é:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{B} \frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{sen } \alpha \\ 0 & \text{cos } \gamma & \text{sen } \gamma \cdot \text{cos } \alpha \\ 0 & -\text{sen } \gamma & \text{cos } \gamma \cdot \text{cos } \alpha \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Em geral, \mathbf{B} é uma matriz quadrada e não singular, portanto a sua inversa existe e a transformação inversa de (4.14) pode ser escrita como:

$$\frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt} = \mathbf{B}^{-1} \boldsymbol{\omega} \quad (4.15)$$

Considerando os movimentos de translação e rotação, a Segunda Lei de Newton pode ser escrita em termos de \mathbf{f} e \mathbf{m} (vetores de forças e momentos externos) como:

$$\mathbf{f} = \frac{d}{dt}(\mathbf{M} \mathbf{v}), \quad \mathbf{m} = \frac{d}{dt}(\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) \quad (4.16)$$

O termo \mathbf{M} é uma matriz diagonal 3x3 em que os termos da diagonal são a massa do corpo; \mathbf{I} é uma matriz 3x3 contendo os momentos e produtos de inércia.

Considerando que a velocidade translacional \mathbf{v} do centro de gravidade do corpo, e o vetor de forças \mathbf{f} são expressos no sistema global (x, y, z), e que a matriz de massa é constante, a equação (4.16) torna-se:

$$\mathbf{f} = \mathbf{M} \frac{d\mathbf{v}}{dt}, \quad \mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt}, \quad (4.17)$$

Torna-se mais conveniente avaliar a equação de momento angular no sistema local de coordenadas $OXYZ$, uma vez que a matriz de inércia \mathbf{I} é constante nesse sistema. A derivada no tempo da quantidade de movimento angular é, portanto, avaliada num sistema de coordenadas que está rotacionando, de modo que esta equação torna-se:

$$\mathbf{m} = \mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) \quad (4.18)$$

Agora, as equações (4.15), (4.17) e (4.18) podem ser rearranjadas na forma de um sistema de doze equações diferenciais de primeira ordem, onde as incógnitas do problema são \mathbf{v} , \mathbf{x} , $\boldsymbol{\omega}$ e $\boldsymbol{\theta}$ (componentes translacionais e rotacionais da velocidade e da posição do corpo em função do tempo).

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}, \quad \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v} \quad (4.19a)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{I}^{-1} [\mathbf{m} - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})], \quad \frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt} = \mathbf{B}^{-1} \boldsymbol{\omega} \quad (4.19b)$$

Dois tipos de não-linearidades são caracterizadas neste caso: a primeira deve-se ao produto vetorial $\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\omega})$ e a matriz de transformação \mathbf{B}^{-1} que contém termos não-lineares envolvendo, respectivamente, produtos e potências das velocidades angulares, e funções trigonométricas dos *ângulos de Euler*; a segunda refere-se aos vetores de força e momento, \mathbf{f} e \mathbf{m} , que são funções não-lineares da posição do corpo e do estado de movimento.

Formulações simplificadas poderiam assumir pequenas amplitudes de movimento, e desprezar termos de ordem superior contendo produtos ou potências de quantidades de menor ordem de grandeza. No entanto, como mencionado anteriormente, a presente formulação mantém todos os termos não-lineares e, portanto, é válida para grandes amplitudes de movimento, isto será possível já que a integração das equações será feita no domínio do tempo.

5. FORMULAÇÃO DOS MODELOS ACOPLADOS

5.1 Introdução

Nas seções 4.3 e 4.4 discutiu-se, respectivamente, sobre as formulações das equações de movimento das linhas e do casco da plataforma de forma separada, seguindo o enfoque desacoplado.

Assim, efetuando-se a extensão das formulações descritas nas seções anteriores, este capítulo será voltado para a apresentação da formulação dos modelos acoplados que considera implicitamente, e automaticamente, a interação dinâmica não-linear do comportamento hidrodinâmico do casco com o comportamento estrutural/hidrodinâmico das linhas de ancoragem e *risers*.

O programa Prosim contempla em seu módulo de análise, para consideração do acoplamento entre o casco e as linhas, duas metodologias denominadas como: metodologia Fracamente Acoplada - (**FrA**) e metodologia Fortemente Acoplada - (**FoA**).

Na metodologia Fracamente Acoplada (**FrA**), a cada instante de tempo do processo de integração das equações de movimento da plataforma, efetua-se uma análise não-linear dinâmica de um modelo de elementos finitos de cada uma das linhas sob a ação do peso próprio, do carregamento ambiental e das componentes de movimento transmitidas pela embarcação. Como resultado, as forças de topo, que representam a resposta estrutural de cada uma das linhas, são então consideradas no lado direito das equações de movimentos do casco, somando-se ainda aos carregamentos devidos à onda, vento e correnteza.

Já a metodologia Fortemente Acoplada (**FoA**), incorporada durante o desenvolvimento dos trabalhos desta dissertação de mestrado, se baseia num esquema de integração implícito para a solução da equação de movimento dinâmico que rege o sistema, onde o modelo hidrodinâmico do casco passa a ser introduzido (através da criação de nós/elementos adicionais) na mesma malha do modelo de elementos finitos de todas as linhas. Assim, as matrizes de massa, amortecimento e rigidez dos *risers* e das linhas de ancoragem são agrupadas com as matrizes dos elementos rígidos (criados

internamente no programa para representar a interação com o corpo flutuante), numa única matriz global totalmente acoplada, onde o tempo de integração da equação de movimento do casco e das linhas é agora realizado simultaneamente.

Em ambas as implementações, o comportamento estrutural/hidrodinâmico das linhas é representado por modelos de elementos finitos acoplados com os seis graus de liberdade do modelo hidrodinâmico do casco da plataforma. A diferença entre os aspectos de cada formulação é dada pela estratégia de implementação computacional que define o acoplamento do sistema.

Vale ressaltar que o modelo Fracamente Acoplado, por ter sido incorporado no Prosim desde sua criação, e ser considerado já como um modelo consagrado e confiável, também serviu como base comparativa dos resultados obtidos para o modelo Fortemente Acoplado.

A seguir são apresentadas as características de tais estratégias de análise (inicialmente pelo acoplamento “fraco” seguido do acoplamento “forte”), para realização do acoplamento unidade flutuante/linhas.

5.2 Modelo Fracamente Acoplado

Na metodologia **FrA** o esquema de integração no domínio do tempo das equações de movimento da unidade flutuante – equações (4.19) – é adaptado para, a cada instante de tempo, efetuar análises não-lineares dinâmicas com modelos de elementos finitos das linhas. Nestas análises, as componentes de movimento transmitidas pelo casco são aplicadas diretamente no topo de cada linha. Como resultado do processo integração da equação de movimento das linhas – equação (4.1) – obtêm-se as forças no topo de cada linha, que são acumuladas e aplicadas no lado direito das equações de movimento do casco, juntamente com o carregamento externo de onda, correnteza e vento.

A partir destas informações, identifica-se o ponto chave da referida estratégia de implementação, onde os movimentos do flutuante são prescritos no topo das linhas, e as forças de topo de cada linha são aplicadas no lado direito da equação de movimento do casco.

Tal implementação mostra-se naturalmente adequada para computadores com arquitetura paralela, e sua eficiência computacional é garantida, para modelos com grande número de linhas, pelo fato de que são gerados modelos de elementos finitos para cada linha individualmente e, portanto, a matriz de rigidez correspondente a cada modelo tem banda relativamente reduzida.

Dado o exposto, no item a seguir são discutidos aspectos relativos à solução do sistema de equação do corpo flutuante a partir das equações (4.19) anteriormente apresentadas.

5.2.1 Integração da Equação de Movimento do Casco (esquema explícito)

O procedimento de solução da equação de movimento (4.19) é realizada aplicando-se o método de integração de *Runge-Kutta* de quarta ordem. O método de solução *Runge-Kutta* é baseado em extrapolações polinomiais da variável principal no intervalo de tempo seguinte, e na determinação dos coeficientes do polinômio a partir de valores estimados das derivadas em instantes ao longo do intervalo de tempo.

Entretanto, antes da aplicação do método, algumas adequações da equação (4.19) devem ser realizadas, de modo a levar em consideração o fato de que os vetores de força e momento, \mathbf{f} e \mathbf{m} , possuem componentes que são proporcionais às acelerações do corpo (as parcelas de inércia da fórmula de Morison), como os termos de massa adicional, que variam ao longo do tempo. Nota-se que essa variação da massa adicional não é considerada em modelos hidrodinâmicos analisados no domínio da frequência.

Pode-se descrever sucintamente que tais manipulações consistem em separar os termos \mathbf{f} e \mathbf{m} que dependem das acelerações do corpo e que são afetados pelos termos de massa adicional, transferindo-os para o lado esquerdo da equação de movimento, permitindo com isso a aplicação do referido método de integração. Pode-se rearranjar as equações (4.19a) e (4.19b) da seguinte forma:

$$\mathbf{M} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\mathbf{A} \frac{d\mathbf{v}}{dt} - \mathbf{B} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \mathbf{f}_I \quad (5.1a)$$

$$\mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = -\mathbf{C} \frac{d\mathbf{v}}{dt} - \mathbf{D} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \mathbf{m}_I - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) \quad (5.1b)$$

Neste caso, podem-se ainda transferir os termos com derivadas das incógnitas básicas para o lado esquerdo. As equações (5.1) são então novamente re-arranjadas transformando-se em:

$$(\mathbf{M}+\mathbf{A}) \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{B} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{f}_I \quad (5.2a)$$

$$\mathbf{C} \frac{d\mathbf{v}}{dt} + (\mathbf{I}+\mathbf{D}) \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{m}_I - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) \quad (5.2b)$$

Os termos \mathbf{A} e \mathbf{D} representam as matrizes de massa adicionada obtidas para cada instante de tempo; \mathbf{B} e \mathbf{C} são os termos cruzados de massa adicionada; \mathbf{f}_I e \mathbf{m}_I são as parcelas dos termos de força e momento que dependem da posição, velocidade e tempo, que são independentes da aceleração. Tomando-se uma representação matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} + \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{I} + \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\mathbf{v}}{dt} \\ \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_I \\ \mathbf{m}_I - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) \end{Bmatrix} \quad (5.3)$$

Sabe-se que a matriz de massa global da equação (5.3) é simétrica e, em geral, não singular. Desta forma, pode ser ainda definida como a seguir:

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} + \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{I} + \mathbf{D} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{A}}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{11} & \bar{\mathbf{A}}_{12} \\ \bar{\mathbf{A}}_{21} & \bar{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Finalmente, após as manipulações descritas, pode-se agora pré-multiplicar os dois lados de (5.3) por $\bar{\mathbf{A}}^{-1}$, chegando a expressões em sua forma final apropriada para aplicação do algoritmo de integração no tempo de *Runge-Kutta* apresentado mais adiante.

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \bar{\mathbf{A}}_{11} \mathbf{f}_I + \bar{\mathbf{A}}_{12} [\mathbf{m}_I - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})] \quad (5.5a)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \bar{\mathbf{A}}_{21} \mathbf{f}_I + \bar{\mathbf{A}}_{22} [\mathbf{m}_I - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})] \quad (5.5b)$$

Método de Integração Runge-Kutta de Quarta Ordem

A seguir apresenta-se a descrição do algoritmo de *Runge-Kutta* de quarta ordem, que é um dos métodos empregados no Prosim para a integração no tempo e solução das equações de movimento de grande amplitude do casco.

Este método é baseado nos conceitos da série de Taylor, sendo sua ordem definida pela ordem da série da Taylor requerida. O método de *Runge-Kutta* emprega uma função de extrapolação polinomial para expressões de primeira ordem do tipo $dy/dx = f(y,t)$, caracterizando os termos do polinômio a partir da estimativa das derivadas em pontos intermediários e no contorno do intervalo de integração.

Assim, o ponto final escolhido será a média ponderada entre esses pontos intermediários. A expressão final que define o método de *Runge-Kutta* de quarta ordem é apresentada como a seguir:

$$x(t+h) = x(t) + \frac{h}{6} [\dot{x}_1 + 2\dot{x}_2 + 2\dot{x}_3 + \dot{x}_4] \quad (5.6)$$

Nota-se a partir de (5.6) que são realizadas, para o procedimento de integração do referido método, quatro estimativas: uma no início, duas no meio e outra final do intervalo de tempo.

Para se obter a forma final da expressão (5.6), inicialmente é considerada uma extrapolação polinomial da função $dy/dx = f(y,t)$ até o termo de quarta ordem, tomando-se um intervalo de tempo t e $t+h$, como definido nas expressões a seguir:

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 \quad (5.7)$$

As derivadas deste polinômio em $t = 0$, $t = h$, e no ponto médio, $t = h/2$, do intervalo de integração são dadas por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(0) &= a_1 \\ \dot{x}\left(\frac{h}{2}\right) &= a_1 + a_2 h + \frac{3}{4} a_3 h^2 + \frac{1}{2} a_4 h^3 \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\dot{x}(h) = a_1 + 2 a_2 h + 3 a_3 h^2 + 4 a_4 h^3$$

Deste modo, define-se que o incremento em x dentro do intervalo h é fornecido por substituição em (5.7) como:

$$x(h) - x(0) = h (a_1 + a_2 h + a_3 h^2 + a_4 h^3) \quad (5.9)$$

Uma simples manipulação pode-se obter a seguinte equação:

$$\frac{1}{6} [\dot{x}(0) + 4 \dot{x}\left(\frac{h}{2}\right) + \dot{x}(h)] = a_1 + a_2 h + a_3 h^2 + a_4 h^3. \quad (5.10)$$

Substituindo (5.10) em (5.9), a extrapolação transforma-se em:

$$x(h) = x(0) + \left(\frac{h}{6}\right) \left[\dot{x}(0) + 4 \dot{x}\left(\frac{h}{2}\right) + \dot{x}(h) \right] \quad (5.11)$$

Expandindo para uma forma generalizada, obtém-se:

$$x(t+h) = x(t) + \left(\frac{h}{6}\right) \left[\dot{x}(t) + 4 \dot{x}\left(t + \frac{h}{2}\right) + \dot{x}(t+h) \right] \quad (5.12)$$

Sabe-se que a função não é conhecida para as derivadas de $x(t)$ avaliadas nos três pontos dentro do intervalo de extrapolação – termos dentro dos colchetes na equação (5.12) – e, deste modo, é preciso efetuar sua estimativa com base em uma média ponderada da estimativa da derivada no intervalo seguinte.

Comparando-se a equação (5.12) com as equações de estado (4.19), verifica-se que a avaliação das derivadas pode ser feita calculando-se o lado direito destas equações de estado no intervalo h . Como algumas das forças que aparecem no lado direito das equações (4.19) dependem das próprias variáveis de movimentos, é necessário que se estimem estes valores. Uma estimativa aprimorada pode ser feita modificando-se a equação (5.12) obtendo-se a forma final para a equação conforme a equação (5.6) apresentada anteriormente.

Na equação (5.6), a derivada no início do presente intervalo de integração é avaliada utilizando valores das variáveis obtidos do intervalo anterior. Em seguida, são efetuadas duas estimativas sucessivas da derivada no ponto médio do intervalo de integração, e finalmente é feita uma estimativa da derivada no fim do intervalo de integração.

Vale ressaltar que ainda é preciso efetuar a inicialização do procedimento de integração, especificando valores para as variáveis de estado em $t = 0$. As expressões para estes termos são:

$$x_I = x(t) \text{ no início do intervalo;}$$

$$\dot{x}_I = f(x_I, t);$$

$$x_2 = x_1 + \frac{h}{2} f(x_1, t) = x_1 + \frac{h}{2} \dot{x}_1;$$

$$\dot{x}_2 = f(x_2, t + \frac{h}{2}); \text{ (Primeira estimativa de derivada em } \frac{h}{2} \text{);} \quad (5.13)$$

$$x_3 = x_1 + \frac{h}{2} \dot{x}_2;$$

$$\dot{x}_3 = f(x_3, t + \frac{h}{2}); \text{ (Segunda estimativa de derivada em } \frac{h}{2} \text{);}$$

$$x_4 = x_1 + h \dot{x}_3;$$

$$\dot{x}_4 = f(x_4, t + h).$$

5.2.2 Implementação Computacional

Dado o exposto, as Figuras 20 e 21 têm por objetivo ilustrar a estratégia computacional adotada para o modelo Fracamente Acoplado, como descrito anteriormente. Desta forma, apresenta-se inicialmente (Figura 20) os aspectos gerais dos módulos de solução para as análises estáticas e dinâmicas no Prosim. Uma visão mais detalhada do procedimento de solução dinâmico é apresentada na Figura 21, destacando-se como se define as características deste tipo de acoplamento para o comportamento de sistemas de produção *offshore*.

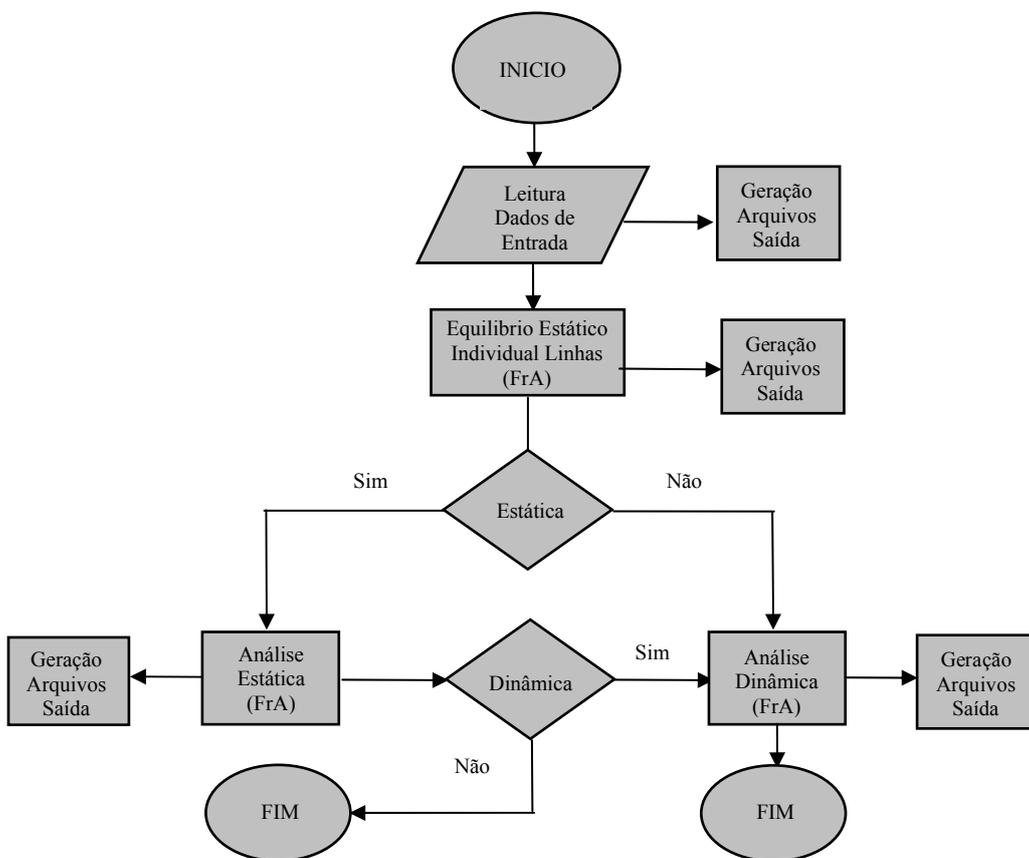


Figura 20 – Esquema Geral para análise Fracamente Acoplada.

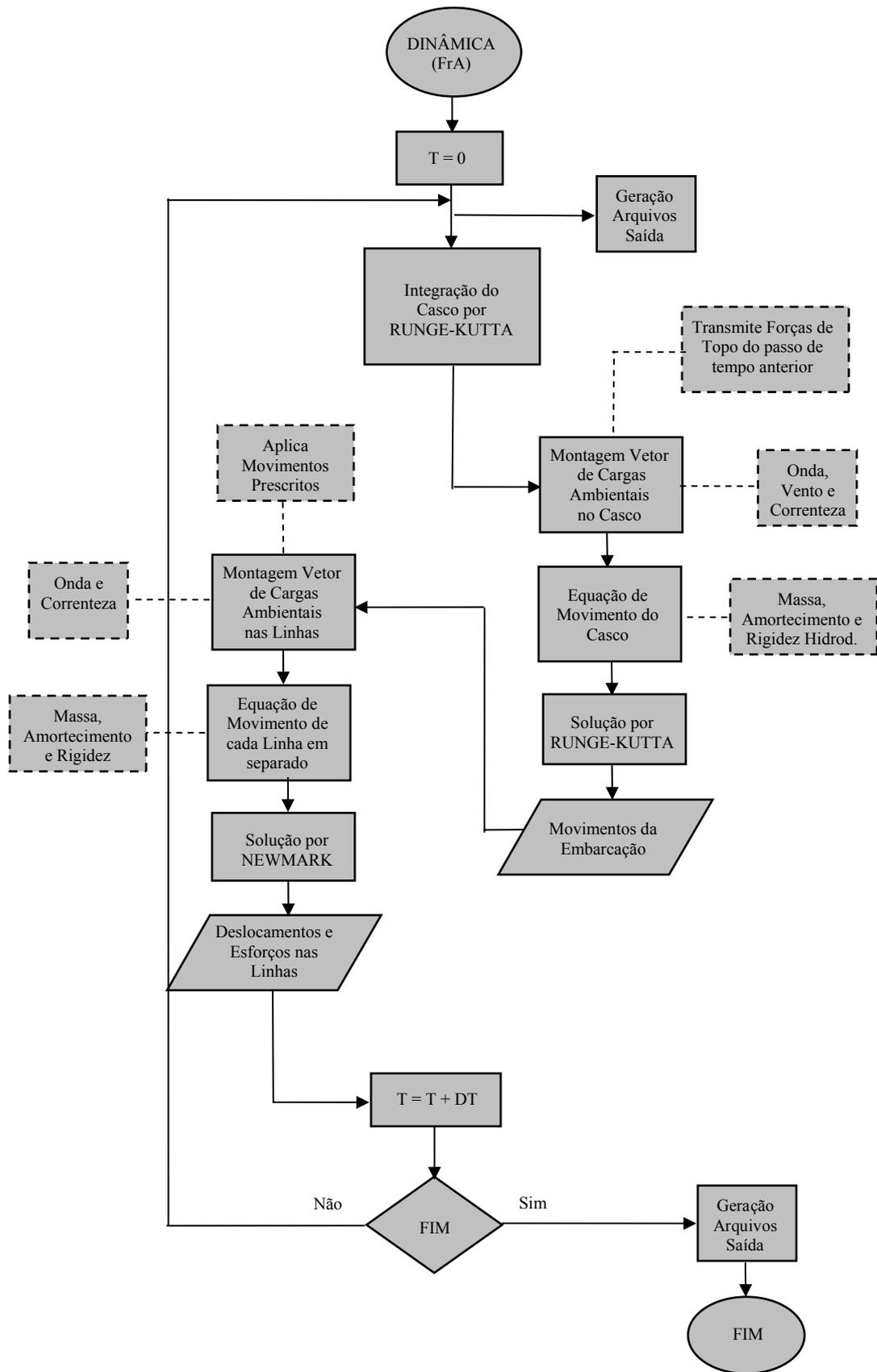


Figura 21 – Esquema para realização da análise dinâmica FrA.

5.3 Modelo Fortemente Acoplado

A segunda estratégia de implementação, referida como metodologia Fortemente Acoplada (**FoA**), considera a unidade flutuante representada por um componente nodal com 6 (seis) graus de liberdade – e seus elementos rígidos que conectam o CG da plataforma aos nós de conexão – junto ao modelo de elementos finitos das linhas. Desta forma, o acoplamento “forte” se dá pelo agrupamento em uma única matriz global as matrizes de elementos finitos de massa, amortecimento e rigidez. Rotinas tiveram então de ser criadas no programa Prosim, para a consideração deste modelo de análise.

As forças atuantes no casco, provenientes do carregamento ambiental (onda, vento e corrente), são computadas separadamente em rotinas de cálculo de força atuando nos elementos cilíndricos no final de cada passo de tempo, sendo incluídas no vetor de carga externa correspondente aos graus de liberdade da unidade flutuante. O mesmo critério se dá para o carregamento (onda e correnteza) atuante nos *risers* e linhas de ancoragem.

Para o referido procedimento de análise, tanto a resposta da embarcação como das linhas do sistema, são obtidas simultaneamente no mesmo instante de tempo da simulação. A solução numérica é então baseada num processo incremental de integração no domínio do tempo por meio de algoritmos implícitos como o método de *Newmark* [31]. O equilíbrio não-linear dinâmico é obtido por meio do esquema iterativo de Newton-Raphson entre forças internas e externas.

Neste sentido, a equação de movimento se caracteriza da mesma forma que aquelas apresentadas na seção 4.3 para as linhas – equação (4.1). Pois, como discutido anteriormente, o modelo hidrodinâmico do casco agora passa a ser representado no modelo de elementos finitos de todas as linhas.

Vale ressaltar que a equação (4.1) apresentada na seção 4.3, quando avaliada no modelo Fracamente Acoplado, considera a montagem das matrizes de massa, amortecimento e rigidez separadamente para cada linha do modelo.

Maiores detalhes sobre o aspecto computacional implementado para o modelo Fortemente Acoplado será descrito mais adiante na seção 5.3.2.

5.3.1 Integração da Equação de Movimento Casco-Linha (esquema implícito)

Como mencionado no item anterior, a equação geral de movimentos que rege o sistema para o modelo **FoA** se encontra da mesma forma que a equação (4.1). Sendo assim, o sistema efetivo (4.5) é solucionado da mesma maneira como já apresentado.

Para as análises numéricas de sistemas de produção *offshore*, o modelo Fortemente Acoplado é considerado por meio de uma chave acionada na própria interface gráfica do programa SITUA (Figura 22). Neste caso, o arquivo de entrada de dados (somente no que se diz respeito às linhas) é então pré-processado adequando-se de forma que todas as linhas, antes estruturadas em blocos de linhas individuais, passem a ser estruturadas como uma linha única.

Com isso, internamente no programa de análise Prosim, são criados elementos de pórtico espacial com elevada rigidez e massa desprezível, conectando o centro de gravidade (CG) da embarcação às conexões de cada linha. Desta maneira, serão criados tantos elementos quanto forem o número de linhas do modelo, de modo a considerar uma única malha que represente a unidade, linhas de ancoragens e *risers*.

Esses elementos especiais têm como finalidade principal efetuar a “ligação” entre o componente nodal que representa o casco da plataforma com as linhas, para que assim, o CG da unidade flutuante passe a ser incorporado na matriz de elementos finitos das linhas do sistema. Ressalta-se com isso, que tais elementos não possuem a função de representar as características hidrodinâmicas da embarcação, visto que tais propriedades são dadas pelos elementos cilíndricos (modelo de cilindros) que representam a plataforma, previamente fornecidos pelo projetista (usuário) na geração do modelo numérico do casco.

É importante mencionar alguns aspectos a serem considerados sobre as formulações acopladas aqui apresentadas. Nota-se para a realização da integração da equação de movimento do casco (modelo “fraco”) mencionada na seção 5.2.1, o método de *Runge-Kutta* de quarta ordem emprega uma função de extrapolação do tipo polinomial, expressando os coeficientes do polinômio em termos dos valores estimados das derivadas em pontos intermediários no interior e no contorno do intervalo de integração.

Desta forma, avaliando-se o procedimento de integração das equações de movimento consideradas no modelo Fortemente Acoplado, e ainda, sabendo-se que a solução por *Runge-Kutta* se faz assumindo estimativas no meio ($dt/2$) e no fim do intervalo de tempo (integrando-se também para estes pontos, o modelo estrutural das linhas), foi considerado para as análises **FoA** o intervalo de tempo para a discretização temporal como a metade do intervalo de tempo adotado para o modelo **FrA**.

Outro aspecto relevante se deve a consideração da variação ao longo do tempo da parcela da massa adicionada do casco. No modelo Fracamente Acoplado, esta parcela é atualizada em cada instante de tempo da resolução da equação de movimento do casco. Para que seja considerada tal atualização no modelo “forte”, faz-se necessário acionar a chave que ativa o cálculo da massa adicional das linhas do modelo (e neste caso, implicitamente também o casco). Deste modo, considerando esta chave acionada em ambos os casos, obtém-se a compatibilização entre a modelação das duas metodologias acopladas avaliadas.

5.3.2 Estratégia da Implementação Computacional no Programa Prosim

Como mencionado, a estratégia computacional adotada para a análise de sistemas flutuantes, foi considerar o CG do casco como um nó com seis graus de liberdade representado no modelo de elementos finitos das linhas, formando assim um sistema global único.

A partir da geração do modelo numérico completo (incluindo plataforma flutuante, linhas de ancoragens e risers), para a consideração de uma análise **FoA**, basta somente o usuário ativar a chave *fully coupled*, contida na interface gráfica do programa SITUA. Caso contrário, a análise será efetuada para o **FrA**. A Figura 22 apresenta a tela para a ativação do modelo Fortemente Acoplado dada pela interface gráfica do SITUA.

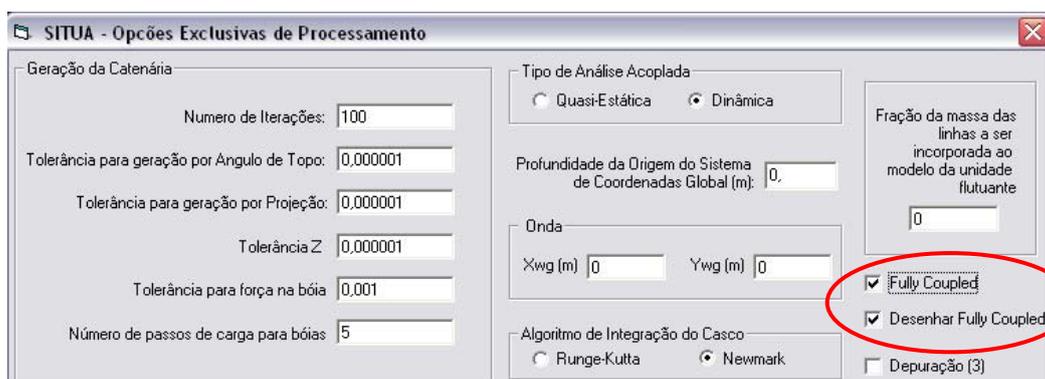


Figura 22 – Tela para ativação do modelo FoA.

Considerando a opção *fully coupled* ativa, todos os dados de malha das linhas, que antes estavam dispostos de forma separada no arquivo de entrada de dados, serão agrupados de maneira a se obter uma única malha de elementos, ou seja, o modelo de todas as linhas passa a ser representado por uma única linha somente.

Assim, ao se executar a análise nesta configuração, as rotinas do programa Prosim (programa de análise numérica), geradas especialmente para adequação desse esquema de implementação, passa a criar internamente um nó adicional na malha de elementos finitos das linhas, representando o nó do CG da unidade. Elementos rígidos de pórtico espacial, conectando o nó do CG do corpo flutuante aos pontos de conexão de cada linha, também serão criados para efetuar o acoplamento casco-linhas.

Isto quer dizer que o próprio programa de análise gera um nó adicional ao sistema e cria tantos elementos quantos forem o número de linhas do modelo. Atribui-se a cada elemento gerado algumas propriedades físicas e hidrodinâmica desprezíveis como massa, arrasto e empuxo, tomando-se como propriedade fundamental sua elevada rigidez axial e flexional. A Figura 23 ilustra a representação dos elementos rígidos conectando o CG da unidade aos nós de topo de cada linha.

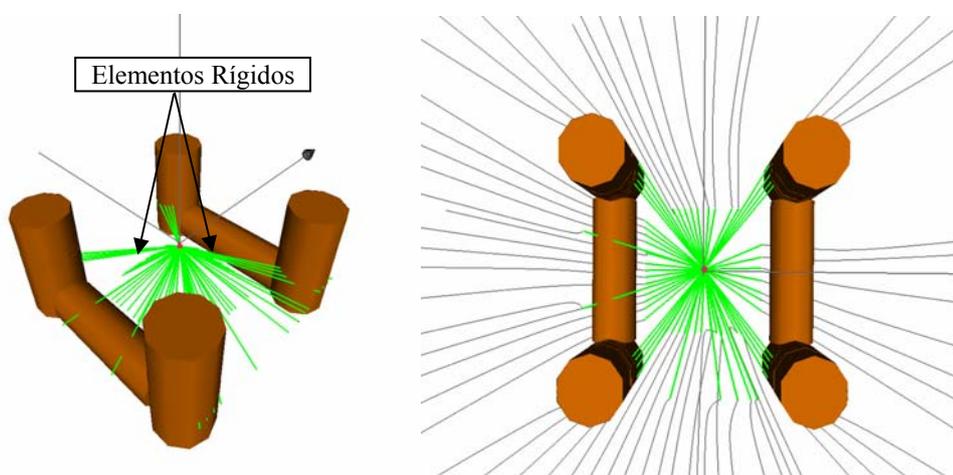


Figura 23 – Elementos conectando o CG da UF às conexões das Linhas.

Os carregamentos ambientais de vento, onda e correnteza atuantes na plataforma continuam sendo calculados pelas mesmas expressões adotadas para o modelo Fracamente Acoplado, onde se efetua o cálculo de tais forças atuantes sobre o modelo de cilindros que a unidade é representada. Só que, agora no modelo “forte”, o carregamento resultante aplicado no nó do CG da embarcação, que antes era resolvido

Portanto, como no modelo **FoA** os resultados dos movimentos da embarcação são obtidos considerando o mesmo sistema dado para fornecer os deslocamentos dos nós das linhas (impressão dos resultados), somente foi possível se comparar, entre as duas formulações, os movimentos translacionais do corpo flutuante.

Como apresentado anteriormente para o modelo Fracamente Acoplado, a seguir apresentam-se os conceitos gerais adotados para as análises de sistemas de produção *offshore*, baseados na metodologia Fortemente Acoplada.

Inicialmente, apresenta-se na Figura 24 a estrutura geral do código do programa Prosim. Mais adiante uma apresentação detalhada da análise dinâmica ilustrando os aspectos da estratégia adotada para o modelo **FoA** será apresentada pela Figura 25.

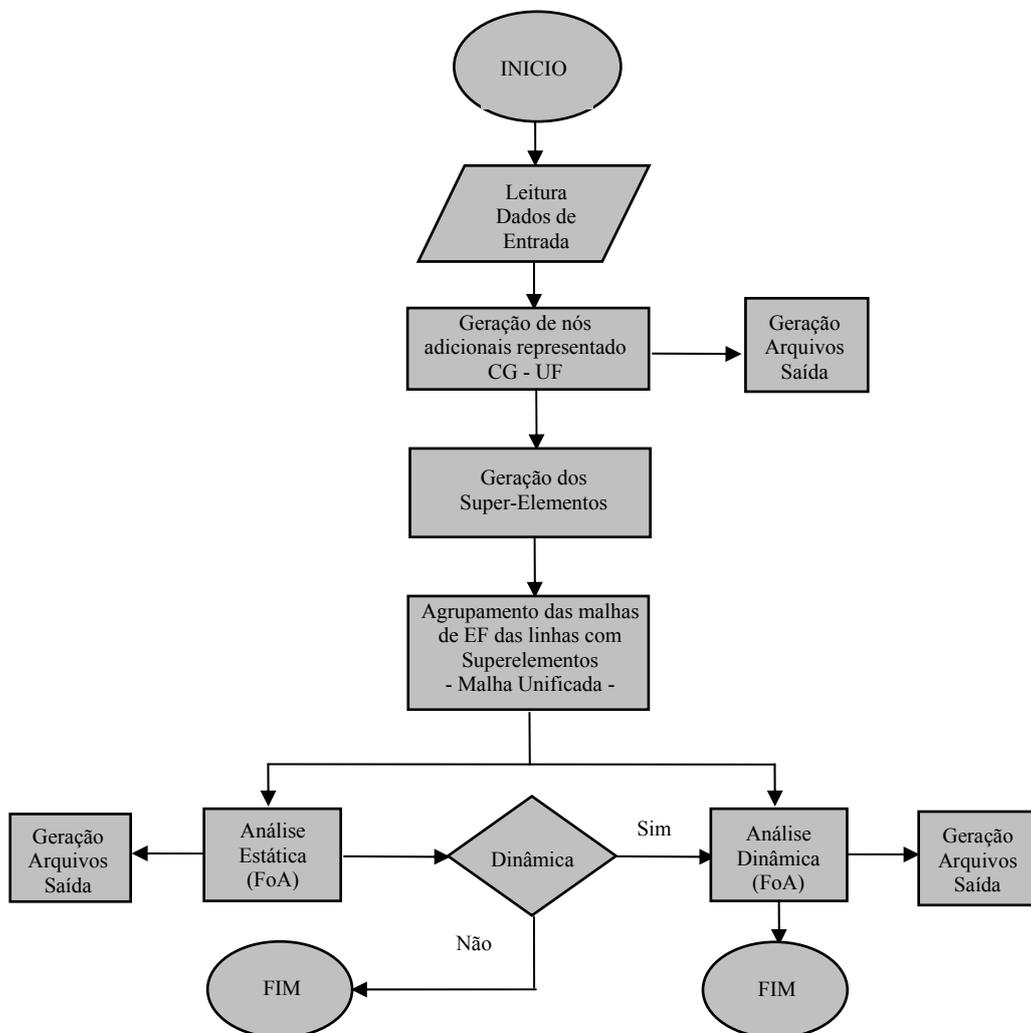


Figura 24 – Esquema Geral para análise Fortemente Acoplada.

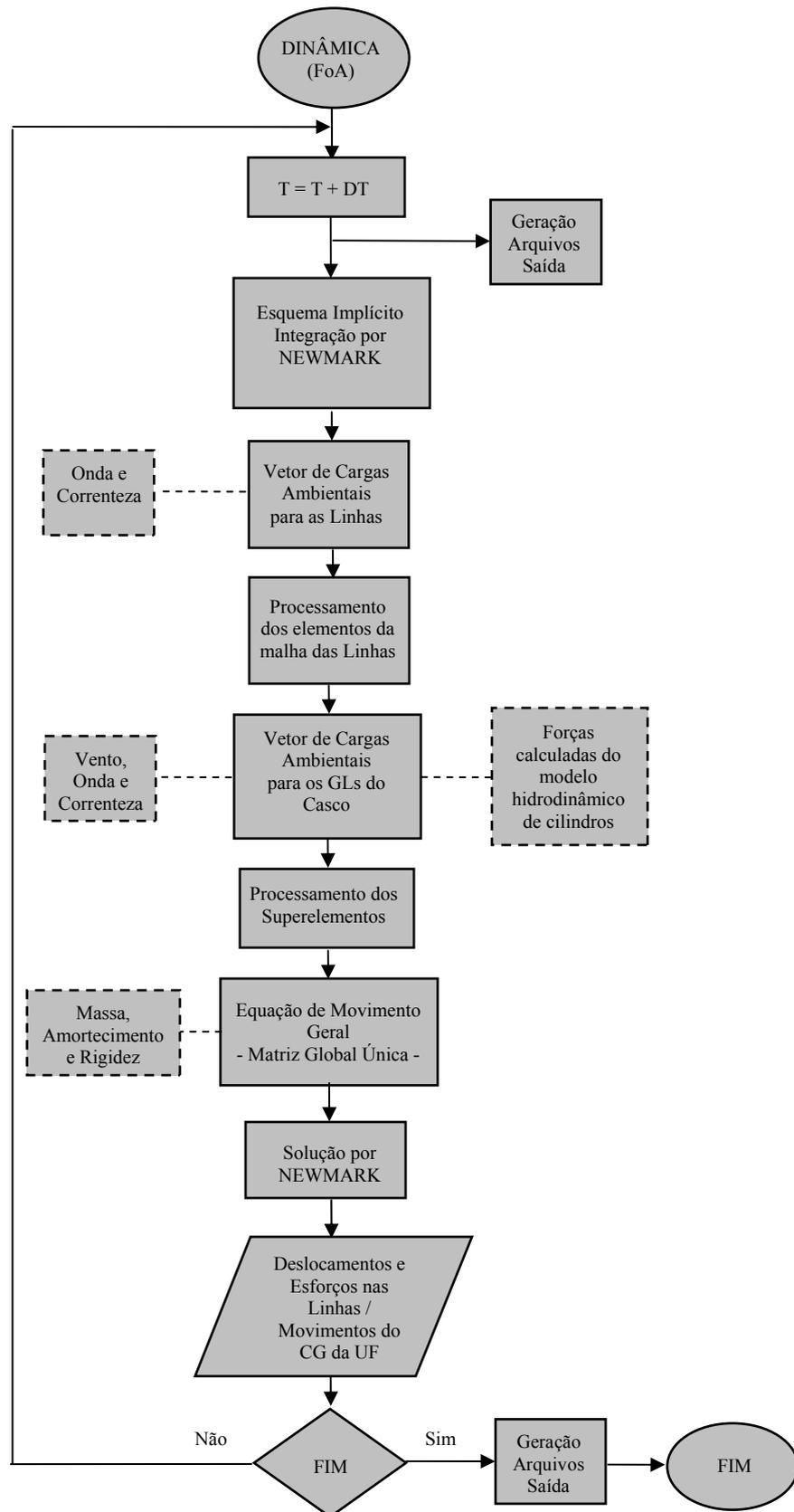


Figura 25 – Esquema para realização da análise dinâmica FoA.

6. AVALIAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

6.1 Introdução

No presente capítulo, são apresentadas as aplicações numéricas utilizadas para comparação entre as metodologias Fortemente e Fracamente Acopladas.

Três modelos típicos de sistemas *offshore* foram avaliados utilizando-se os modelos **FrA** e **FoA**. Com base nos resultados obtidos para a metodologia “fraca” (extensamente avaliada e, portanto, já consagrada no programa Prosim), efetuaram-se comparações com a metodologia Fortemente Acoplada, para os principais resultados de interesse neste trabalho, que são os movimentos da unidade flutuante e a eficiência computacional.

De modo agregar maior valor para as comparações entre as metodologias, avaliações adicionais incluindo respostas de tração de topo nas linhas também foram comparadas. Vale notar que, tal verificação também se torna relevante, uma vez que este tipo de resultado apresenta maior sensibilidade em sua resposta em comparação aos resultados de movimentos da unidade flutuante.

Inicialmente, realizou-se a avaliação de um sistema composto por uma bóia submersa, ancorada a um único tendão vertical de 100m de comprimento, situada numa lâmina d’água de 120m. Este modelo numérico foi gerado na fase preliminar de testes, de maneira a facilitar a depuração do programa, já que possui uma estrutura simplificada (única linha). Mesmo assim, apesar de não se configurar como um modelo estruturalmente complexo, sua avaliação é extremamente importante, pois sistemas de pequenas dimensões, tal como bóias, apresentam maior sensibilidade aos carregamentos ambientais atuantes.

Como segundo modelo, analisou-se a plataforma semi-submersível estudada no 17º Comitê de Engenharia Oceânica ITTC. Tal unidade foi modelada para uma lâmina d’água de 1050m, ancorada pelo sistema de amarração composto por quatro linhas de ancoragem.

Apesar do referido modelo possuir resultados de ensaio em tanque de prova, nenhum deles foi utilizado para as comparações. Compararam-se apenas aqueles resultados obtidos para as metodologias Fracamente e Fortemente Acopladas. Análises comparativas de resultados entre o modelo de acoplamento “fraco” e os ensaios experimentais avaliados para a plataforma ITTC podem ser encontrados em [18].

O terceiro modelo avaliado também é de uma plataforma do tipo semi-submersível, referida como plataforma P-001, na qual um grande número de linhas estão conectadas. Tal unidade está localizada numa lâmina d’água de 1800m, sendo seu sistema de amarração composto por 16 linhas de ancoragem, e seu sistema de produção composto por 47 linhas flexíveis (*risers* e umbilicais).

Mais uma vez vale ressaltar que a implementação atual da metodologia Fortemente Acoplada considera somente os termos da diagonal da matriz de massa do casco, pois como mencionado na seção 5.3.2, para a montagem das matrizes de massa das linhas, as rotinas atualmente existentes no programa Prosim levam em consideração somente os termos da diagonal. Como para todos os modelos avaliados foram fornecidos as matrizes de massa do corpo flutuante somente com os termos da diagonal principal, os sistemas avaliados foram então modelados de forma idêntica.

A consideração da atualização da parcela de massa adicionada do casco, em cada instante tempo, que é obtida implicitamente na metodologia “fraca”, também foi avaliada na metodologia “forte”. Com isso, em ambas as formulações foram consideradas a avaliação da massa adicionada instantânea para casco e linhas, de modo a manter a similaridade nas análises.

Para os três modelos avaliados somente a parcela de forças viscosas obtidas a partir da aplicação da fórmula de Morison foi considerada. Neste caso, as forças de segunda ordem (deriva de onda) e amortecimento potencial, dependentes da frequência e que são provenientes de um programa baseado na teoria da difração, não foram consideradas nas análises.

Como mencionado anteriormente na seção 5.3.1, o procedimento de integração das equações de movimentos do casco e das linhas se difere entre as formulações Fracamente (*Runge-Kutta*) e Fortemente (*Newmark*) Acopladas. Assim, considerou-se o intervalo de tempo do modelo **FoA** igual à metade do intervalo de tempo de integração do casco do modelo **FrA**, ou seja, $dt_{\text{FoA}} = 1/2 dt_{\text{FrA}}$, numa tentativa de se efetuar a integração das linhas de forma equivalente, já que *Runge-Kutta* efetua integrações no meio e no fim do intervalo de tempo admitido na análise.

6.2 Bóia Ancorada por Tendão Vertical

O primeiro caso de estudo considerou uma bóia de 15m de diâmetro, totalmente submersa, situada numa lâmina d'água de 120m e ancorada por um tendão de 100m de comprimento.

Sabe-se que sistemas marítimos de pequeno porte tais como bóias, apresentam grande sensibilidade em seu comportamento sob carregamentos ambientais atuantes, e por isto sua avaliação se torna relevante para a comparação entre as metodologias.

As Figuras 26 e 27 a seguir apresentam duas vistas tomadas para o modelo em questão. Como se pode perceber, a bóia encontra-se abaixo da linha d'água, mas ainda submetida aos efeitos de onda, devido à pequena distância entre esta e a superfície livre.

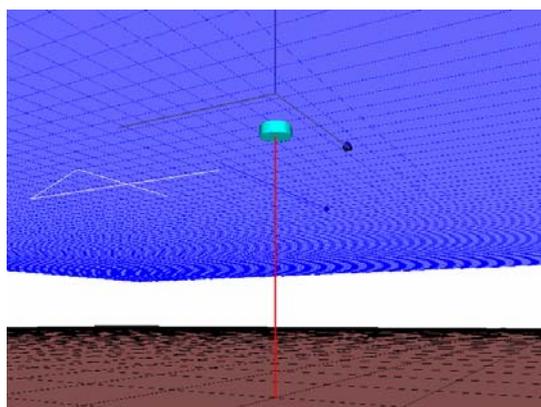


Figura 26 – Modelo numérico da bóia (vista 1).

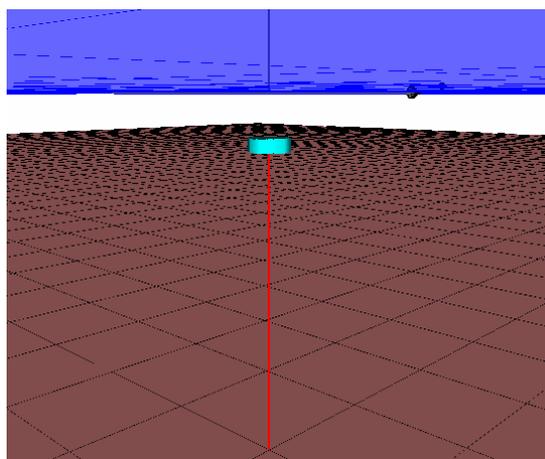


Figura 27 – Modelo numérico da bóia (vista 2).

6.2.1 Características do Casco

O modelo para a representação do casco da bóia (Figura 28) foi gerado a partir de um cilindro único contendo as propriedades geométricas apresentadas na Tabela 1. Os dados necessários para compor o modelo são as coordenadas dos nós iniciais e finais do elemento cilíndrico, seu diâmetro e os respectivos coeficientes hidrodinâmicos. O cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos de inércia e arrasto é baseado nas recomendações da norma DNV [37] e calculados pela própria interface do programa SITUA.

Tabela 1 – Dados do casco da bóia.

Parâmetros	Valores
Diâmetro da bóia (m)	15,00
Altura total (m)	4,60
Posição vertical CG acima da base (m)	2,50
Peso total (kN)	2.400,00
Raio de Giração de <i>roll</i> e <i>pitch</i> (m)	4,00
Raio de Giração de <i>yaw</i> (m)	5,30

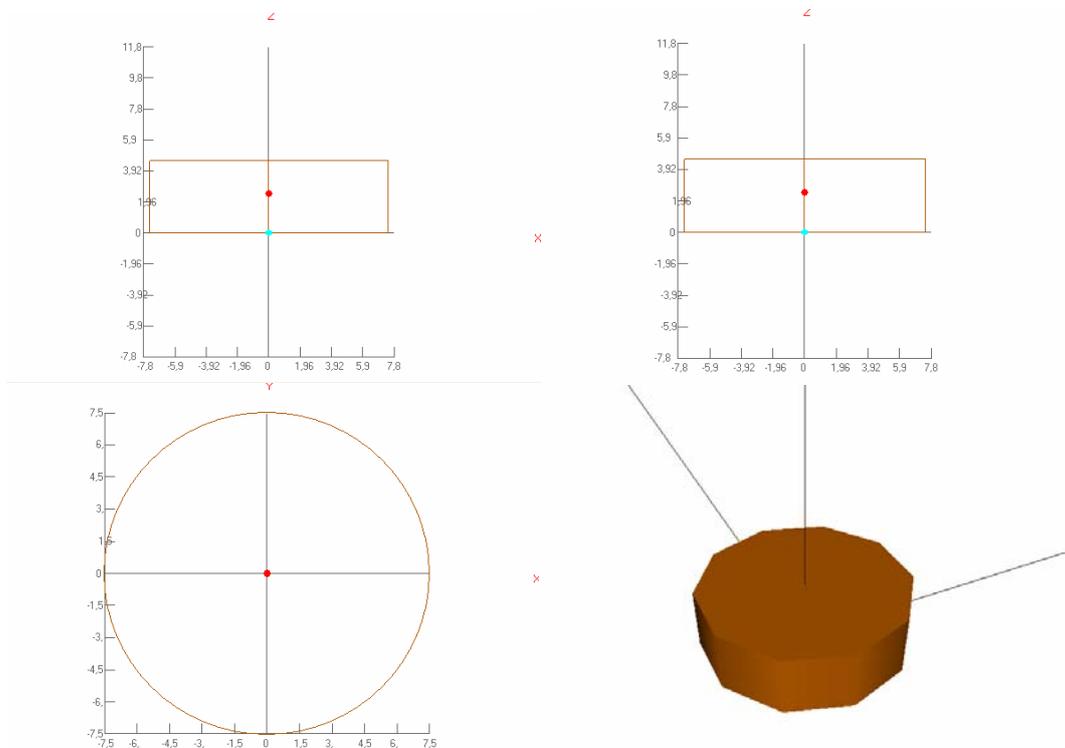


Figura 28 – Modelo da Geometria da bóia.

A Figura 29 ilustra um detalhe do modelo do numérico da bóia utilizado na metodologia Fortemente Acoplada, destacando o elemento que faz a conexão do CG do casco ao nó de topo do tendão.

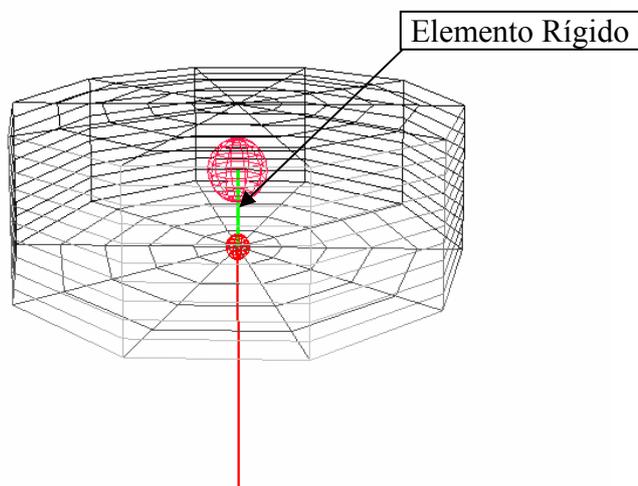


Figura 29 – Detalhe do Super-Elemento.

6.2.2 Características da Linha

A Tabela 2 apresenta os dados que compõem as propriedades do tendão que ancora a bóia. Tal tendão foi discretizado pelo gerador automático de malhas do pré-processador, dado por uma progressão aritmética. Neste caso, o tendão foi constituído por 20 elementos de treliça espacial, cujo comprimento de cada elemento variou de 1m (elemento próximo à conexão) a 10m (elemento próximo ao fundo).

Tabela 2 - Dados da linha.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores</i>
Comprimento (m)	100,00
Diâmetro nominal (m)	0,1596
Peso no ar vazio (kN/m)	0,21
Peso na água vazio (kN/m)	0,20
EA (kN)	832.000,00
EI (kN.m ²)	1,00
Tendão Vertical (ang. topo graus)	0,00

A Figura 30 a seguir ilustra o modelo gerado para o tendão vertical da bóia, apresentado pela gradação da tração ao longo da profundidade.

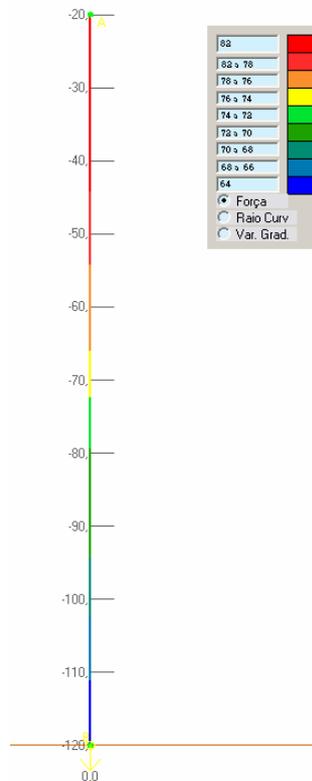


Figura 30 – Tendão Vertical.

6.2.3 Casos de Carregamento

Para o modelo estudado foram considerados três casos de carregamento, avaliando-se as respostas de movimentos da bóia, submetida às ações ambientais de onda e correnteza.

O carregamento de onda foi definido para um estado de mar regular, e a correnteza foi considerada adotando-se um perfil triangular a partir de sua respectiva velocidade de superfície. Para todos os modelos de análise, os carregamentos foram considerados atuando tanto no casco como na linha.

Os azimutes são fornecidos com relação ao Norte Verdadeiro no sentido horário. A convenção dada para o sentido de ataque das ondas é “Vindo De”, já para a correnteza é “Indo Para”.

A Tabela 3 apresenta a seguir os casos de carregamentos utilizados nas análises comparativas entre os modelos Fortemente e Fracamente Acoplados.

Tabela 3 – Casos de Carregamento.

<i>Casos</i>	<i>Onda</i>			<i>Correnteza</i>	
	<i>Hw (m)</i>	<i>Tw(s)</i>	<i>Azim.(°)</i>	<i>Vel.(m/s)</i>	<i>Azim.(°)</i>
C1	-	-	-	1,0	90
C2	3,0	10,0	270	-	-
C3	3,0	10,0	270	1,0	90

6.2.4 Resultados Comparativos

Nesta seção, são discutidos os resultados obtidos das análises numéricas realizadas para o modelo da bóia. Com isso, para cada caso de carregamento avaliado (C1, C2 e C3) são apresentados resultados gráficos dos movimentos da bóia comparando-se as duas metodologias. Adicionalmente, de modo a avaliar também resultados de tração de topo no tendão da bóia, tais comparações foram realizadas para o caso de carregamento C2.

Um resultado comparativo do tempo de processamento requerido em cada metodologia também é apresentado. A seguir apresentam-se as características das análises adotadas nas simulações numéricas:

- Tempo de Simulação: 400s
- Rampa de Carregamento: 50s
- Intervalo integração dinâmica: $dt_{FrA} = 0.02s$ e $dt_{FoA} = 0.01s$

A Tabela 4 abaixo apresenta o tempo de processamento obtido para o caso de carregamento C3. Como a relação entre o tempo requerido para as simulações em cada caso de carregamento se mantém praticamente constante, somente um deles está sendo apresentado.

Tabela 4 – Tempo de Processamento.

<i>Metodologias de Análise</i>	<i>T. Processamento (s)</i>	<i>Relação (%)</i>
Fracamente Acoplada	28,80	154,50
Fortemente Acoplada	18,64	-

* $dt_{FoA} = 1/2 dt_{FrA}$

A partir da Tabela 4 pode-se perceber uma grande diferença no tempo de processamento para a realização das análises. Neste caso, a metodologia Fracamente Acoplada consome um tempo de análise de aproximadamente 60% a mais que aquele requerido na análise utilizando-se a metodologia Fortemente Acoplada.

Vale ressaltar ainda que os resultados apresentados acima foram obtidos considerando-se o intervalo de integração do modelo Fortemente Acoplado como a metade daquele considerado para o modelo Fracamente Acoplado. Assim, como pôde

ser verificado numa avaliação comparativa, considerando intervalos de integração iguais, o tempo de processamento gasto numa análise Fracamente Acoplada foi 3 (três) vezes maior.

A eficiência computacional do acoplamento “forte” é garantida, para este caso de estudo, devido ao modelo possuir um pequeno número de graus de liberdade para resolução do sistema de equação totalmente acoplado. Verificou-se ainda que para cada intervalo de tempo das análises numéricas, o número de iterações requeridas na obtenção da convergência não-linear para a solução do sistema de equações (método de N-R associado ao algoritmo de integração no tempo de *Newmark*), foi sempre maior para o modelo **FrA**. Ou seja, verificou-se que as análises para o modelo **FoA** requerem um menor número de iterações em cada passo de tempo que o modelo **FrA**, acarretando desse modo num menor custo computacional.

Mais adiante são apresentados os resultados de cada caso de carregamento. Inicialmente, apresenta-se o caso C1 onde somente os efeitos devido à ação da correnteza são considerados atuando no casco e no tendão. Em seguida, apresenta-se o caso C2 onde atua somente o carregamento de onda. E por fim, o caso C3 em que são combinados os carregamentos de onda e correnteza atuando na estrutura numa mesma direção (carregamento colinear).

Todas as simulações numéricas se iniciaram diretamente da análise dinâmica. Deste modo, o equilíbrio dinâmico que é estabelecido sem considerar, *a priori*, um equilíbrio estático do modelo, permite verificar desde o início das análises o comportamento da estrutura para ambas as metodologias acopladas.

Caso C1: Correnteza

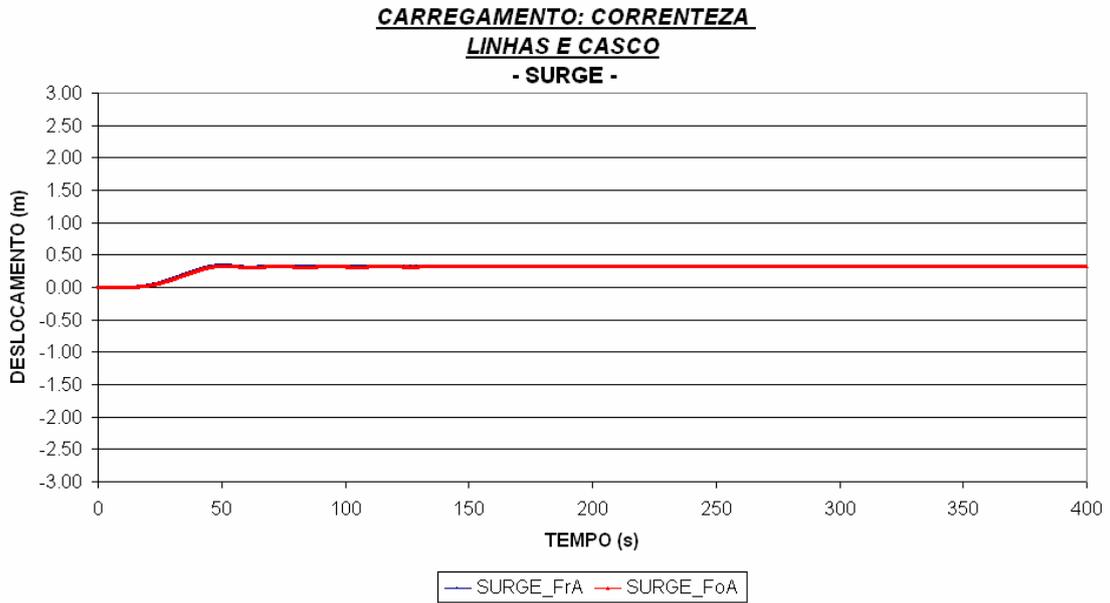


Figura 31 – Movimento de Surge.

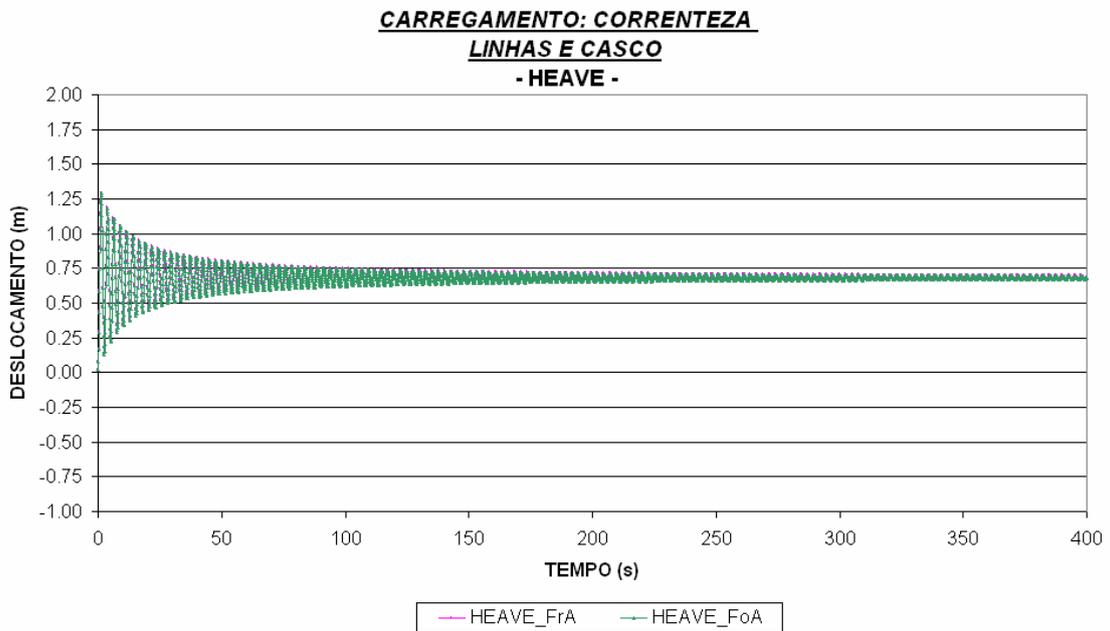


Figura 32 – Movimento de Heave.

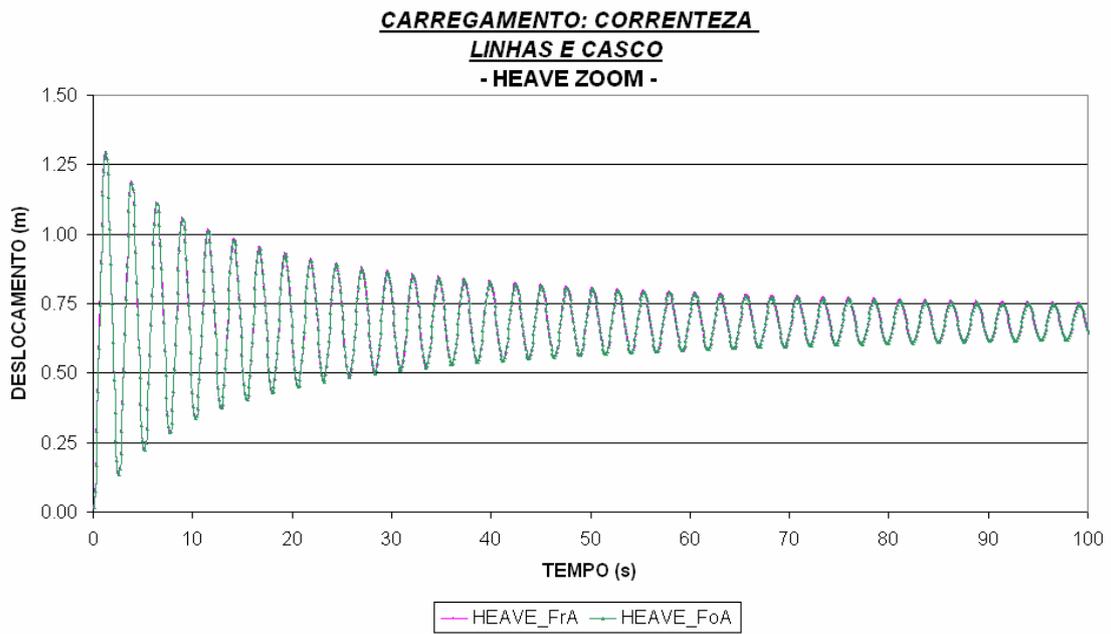


Figura 33 – Movimento de Heave (zoom).

Caso C2: Onda

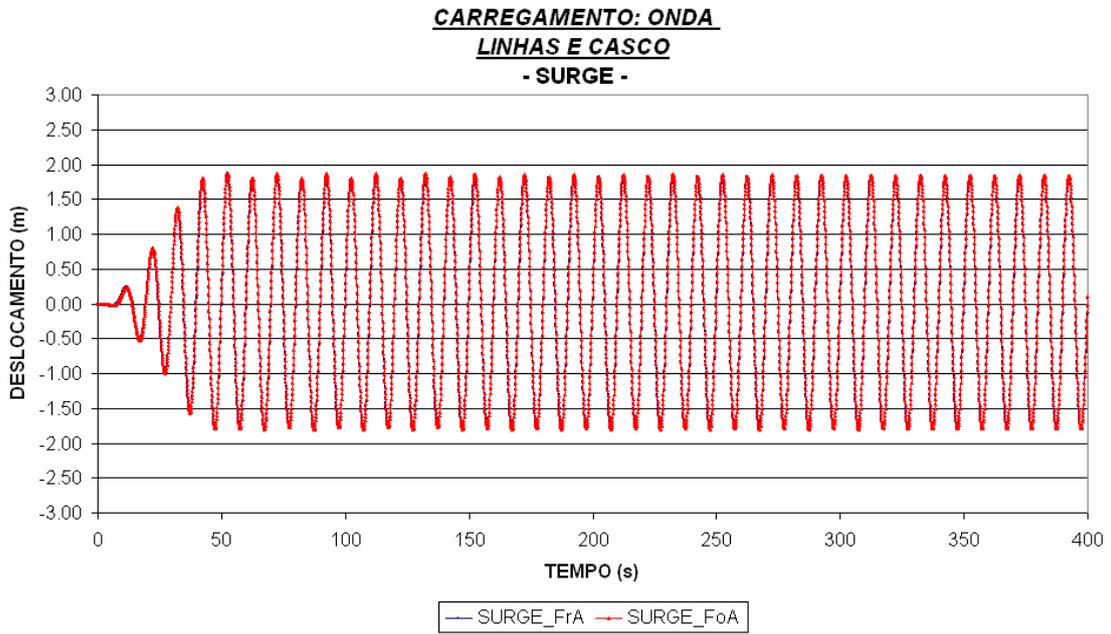


Figura 34 – Movimento de Surge.

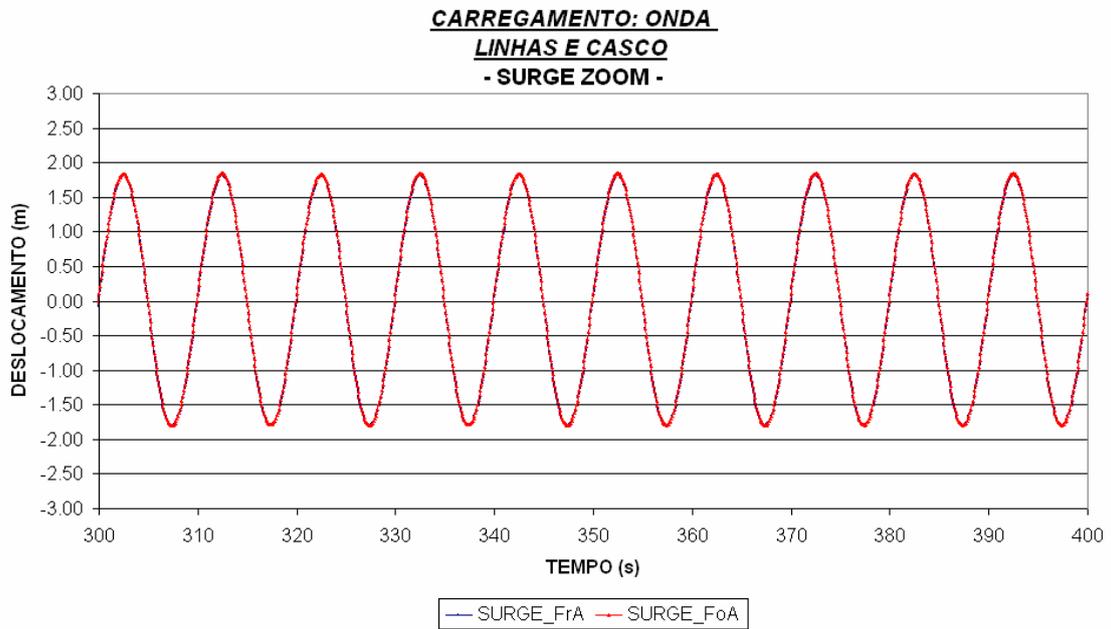


Figura 35 – Movimento de Surge (zoom).

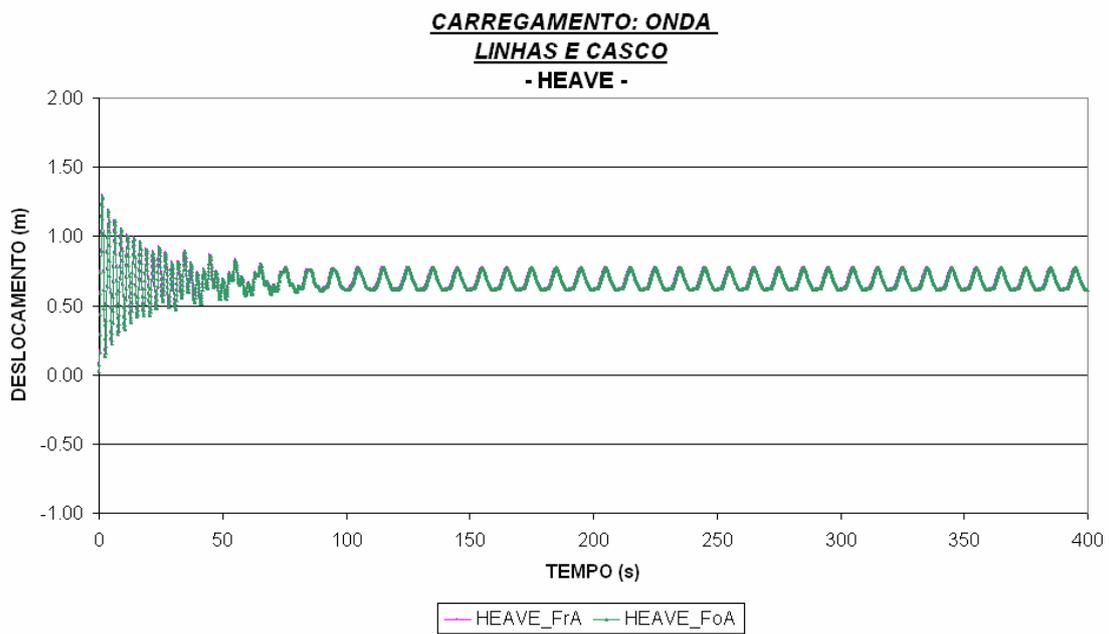


Figura 36 – Movimento de Heave.

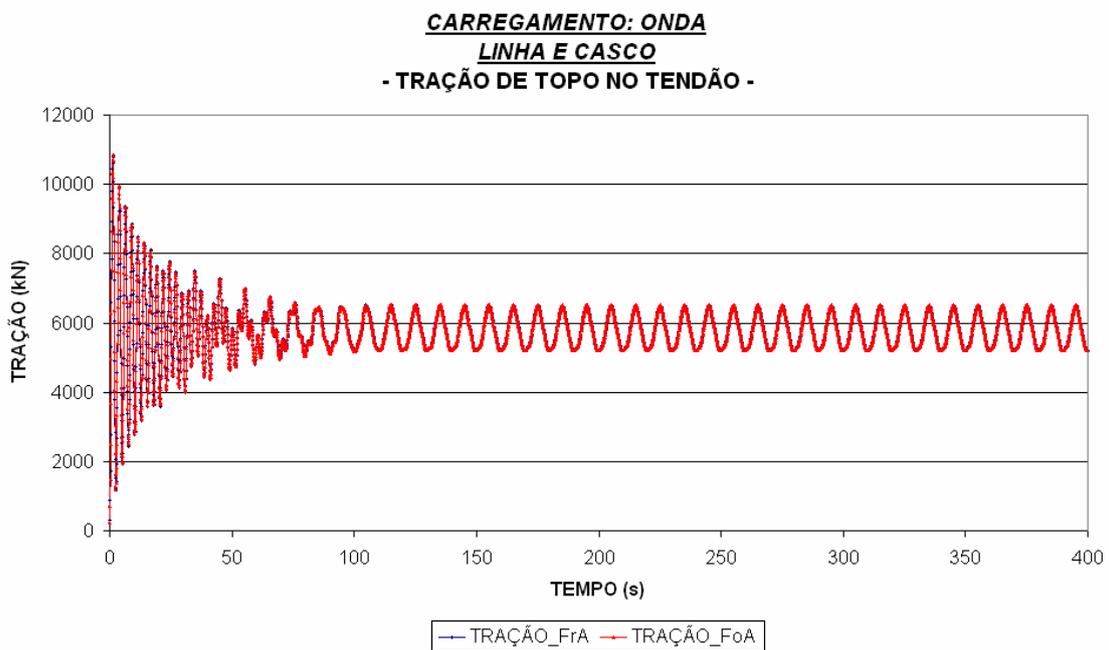


Figura 37 – Tração de topo no tendão.

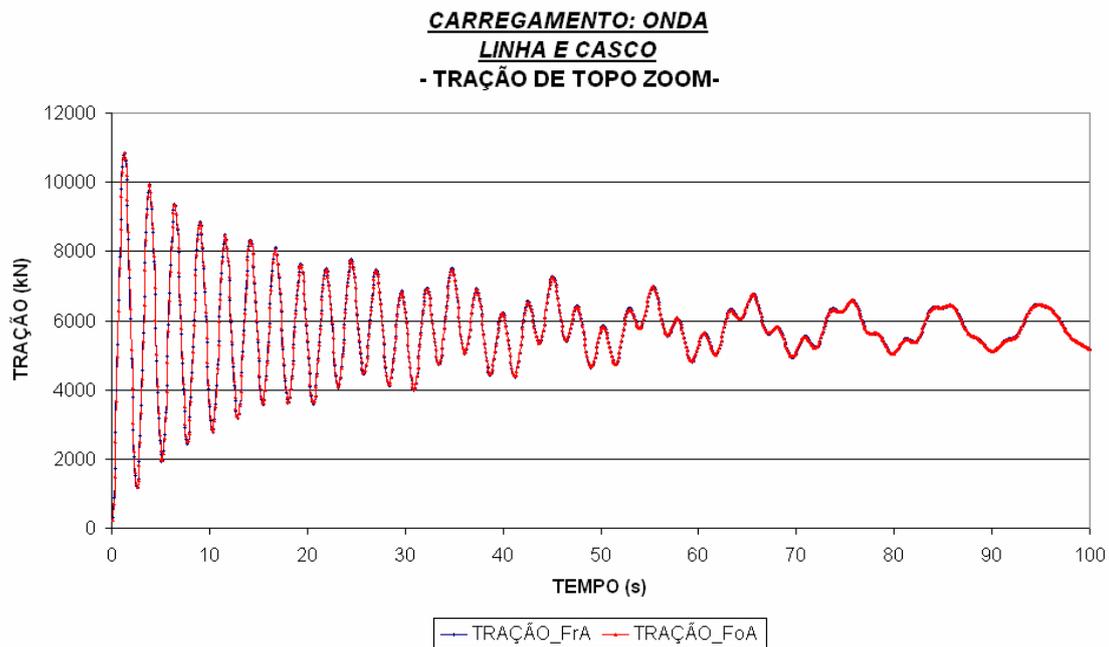


Figura 38 – Tração de topo no tendão (zoom).

A seguir, são apresentados na Tabela 5 os valores estatísticos de média e desvio padrão obtidos durante a simulação numérica para a avaliação da tração de topo no tendão.

Tabela 5 – Resultados comparativos de tração de topo.

Metodologias de Análise	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)
Fracamente Acoplada	5774,26	461,54
Fortemente Acoplada	5770,82	461,31

Caso C3: Onda e Correnteza

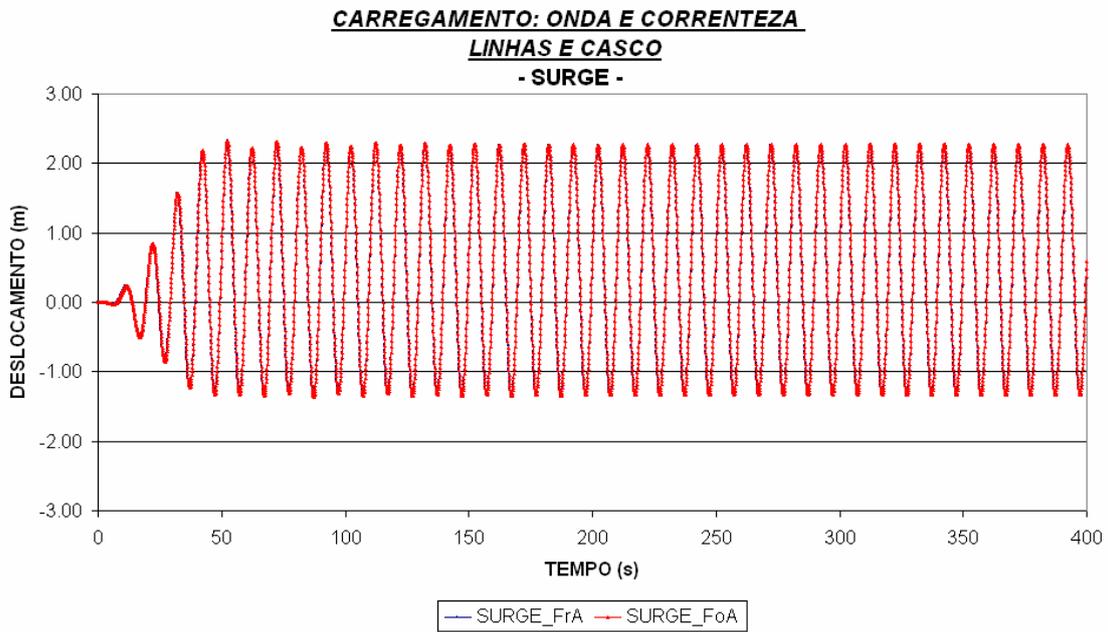


Figura 39 – Movimento de Surge.

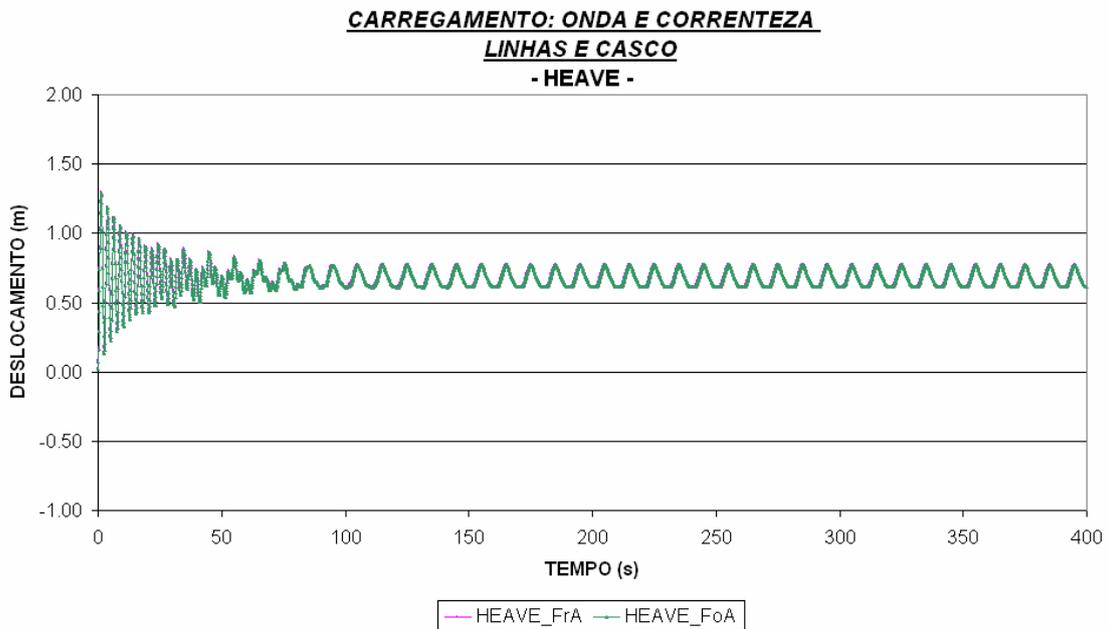


Figura 40 – Movimento de Heave.

A partir dos resultados apresentados anteriormente, onde foram comparados casos aplicando-se onda, correnteza e a combinação dos dois carregamentos, percebe-se que em todos os modelos analisados existe uma excelente concordância para a resposta de movimento da bóia entre as duas metodologias avaliadas. Nota-se ainda, que desde o início das análises, onde se efetuaram as análises dinâmicas sem antes ter efetuado o equilíbrio estático, os resultados foram praticamente os mesmos.

A mesma conclusão pode ser dada para os resultados de tração, que mesmo sendo caracterizados por possuírem respostas mais sensíveis com relação a comparação das respostas de movimentos, foram encontradas diferenças mínimas nos valores apresentados para este esforço (Tabela 5).

Como foi verificado pelos resultados apresentados na Tabela 4, para o modelo da bóia, a diferença no desempenho computacional entre as metodologias Fortemente e Fracamente Acopladas foi marcante. Neste caso, o desempenho do modelo “forte” foi garantido pelo fato de que o sistema avaliado não compõe um grande número de linhas. Além disso, o número de iterações requeridas para se obter a convergência numérica da solução do sistema de equações, em cada intervalo de tempo, caracterizou-se por ser menor no modelo Fortemente Acoplado.

6.3 Semi-submersível ITTC

O segundo modelo, apresentado na Figura 41, trata-se de uma plataforma semi-submersível constituída de 8 (oito) colunas apoiadas sobre 2 (dois) *pontoons*, e aproada à 90° com o Norte. Tal unidade foi modelada para a lâmina d'água de 1050m e está mantida em posição por 4 (quatro) linhas de ancoragem.

Esta plataforma também foi caso de estudo do 17º Comitê de Engenharia Oceânica ITTC, que conduziu comparações para os métodos de cálculos de movimentos em diversos programas, como também, comparações com resultados obtidos em ensaios de modelos reduzidos. Informações mais detalhadas sobre análises envolvendo resultados de movimentos para esta semi-submersível podem ser encontrados em [38] e [39]. Além disso, em [18] são encontradas análises comparativas entre resultados experimentais e os obtidos por análises numéricas no programa Prosim, relacionados aos períodos naturais e RAOs da referida unidade flutuante.

Como mencionado no início do capítulo, para as análises numéricas realizadas neste trabalho, foram utilizadas somente aquelas informações relativas ao modelo estrutural apresentado pelo ITTC. Isto quer dizer que a partir das características estruturais que compõem o modelo, encontradas em [38] e [39], foram efetuadas análises com intuito de se avaliar os resultados de movimentos obtidos entre as metodologias **FrA** e **FoA** para diferentes casos de carregamento. Desta forma, nenhum resultado experimental foi utilizado para qualquer tipo de comparação.

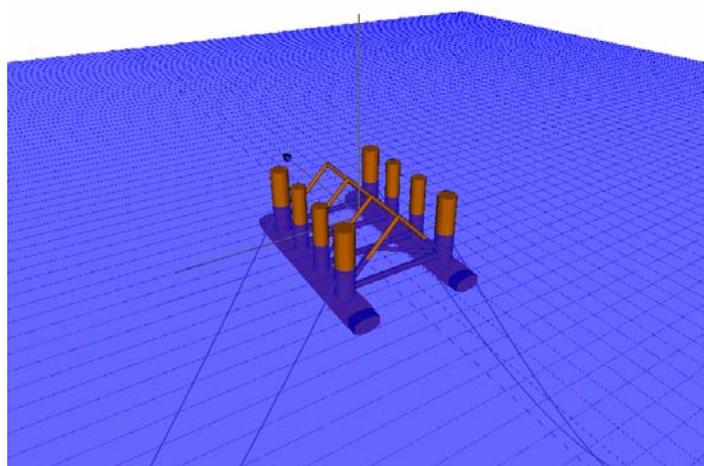


Figura 41 – Modelo numérico da semi-submersível.

6.3.1 Características do Casco

O casco da unidade semi-submersível, estudada nesta seção, é composto por dois pontoons principais, sob os quais estão apoiadas oito colunas. A estrutura é ainda constituída por barras cilíndricas fornecendo o contra-ventamento estrutural requerido.

A Figura 42, apresentada mais adiante, ilustra o modelo numérico adotado para representar o casco da plataforma. Como se pode notar no modelo em 3D, os pontoons foram modelados em forma de elipse, enquanto as colunas foram representadas por membros cilíndricos dimensionados de forma a representar as dimensões reais da estrutura da plataforma, garantindo o mesmo volume dos membros estruturais originais.

Os pontoons da unidade, os quais (para a estrutura real) não eram formados por membros elípticos, foram dimensionados a partir da área equivalente adotada para uma elipse. Neste caso, considerou-se a área da seção transversal da elipse igual à área da seção transversal original, para que se fosse obtido um mesmo volume estrutural, tendo em vista que o mesmo comprimento foi mantido para os dois casos.

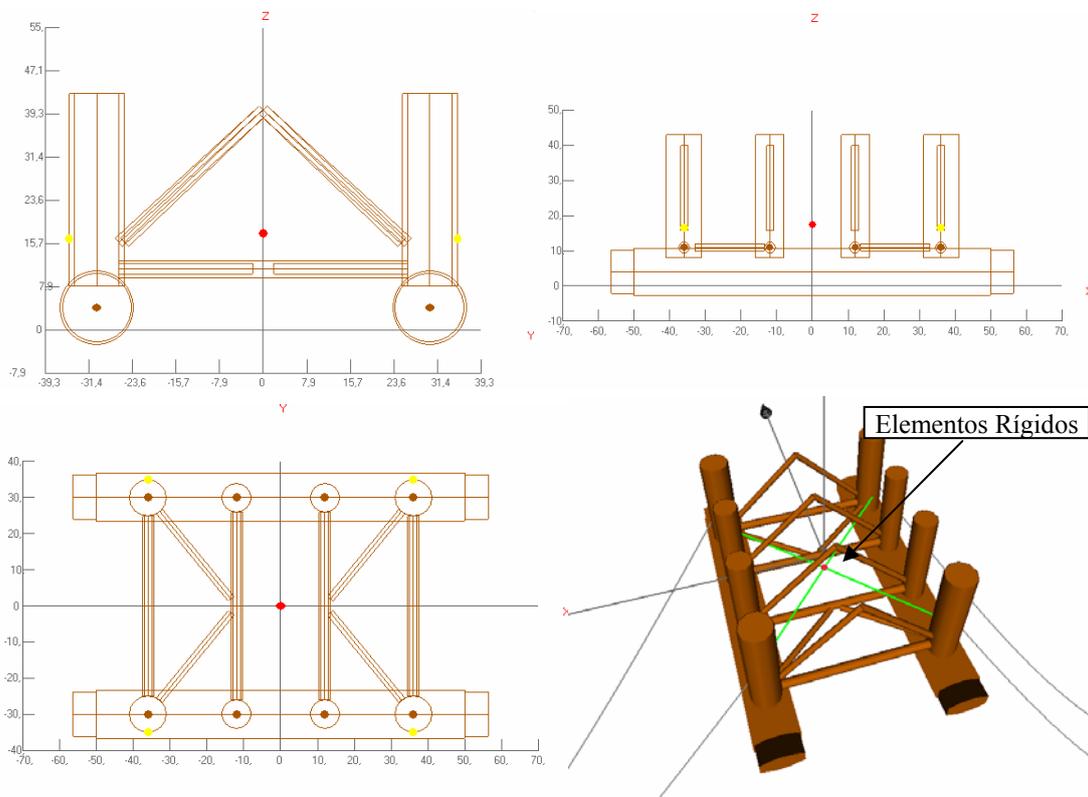


Figura 42 – Características do casco.

Devido a uma particularidade da interface do programa, a visualização em 2D da seção transversal da unidade (Figura 42) apresenta os pontoons por membros cilíndricos. Sabe-se na verdade, como descrito acima, que o programa de análise faz a consideração destes membros como sendo de forma elíptica, como é ilustrado no esquema gráfico em 3D.

Ainda na Figura 42 é possível observar os elementos rígidos que fazem a ligação do CG da unidade aos nós de topo das linhas de ancoragem. Como se sabe, tais elementos são criados internamente pelo programa Prosim quando a análise Fortemente Acoplada é considerada.

A seguir são apresentadas na Tabela 6 as propriedades referentes ao casco da semi-submersível. Vale ressaltar que o calado apresentado não leva em consideração o peso das linhas de ancoragem. Desta forma, como verificado em [39], quando as linhas são conectadas à embarcação, o calado de operação do sistema passa para 23,56m.

Tabela 6 – Dados do casco da plataforma ITTC.

Parâmetros	Valores (escala real)
Comprimento (m)	115,00
Largura (m)	60,00
Altura (m)	43,00
Calado (m)*	20,00
Largura do <i>Pontoon</i> (m)	15,00
Altura do <i>Pontoon</i> (m)	8,00
Raio de adoçamento <i>Pontoon</i> – longitudinal. (m)	7,50
Raio de adoçamento <i>Pontoon</i> – seção transv. (m)	2,00
CG X (m)	0,00
CG Y (m)	0,00
CG Z (m)	17,50
Raio de Giração <i>roll</i> (m)	34,30
Raio de Giração <i>pitch</i> (m)	35,58
Raio de Giração <i>yaw</i> (m)	40,58
Empuxo (t)	34.157,00

*Sem considerar a massa das linhas de ancoragem.

Os coeficientes hidrodinâmicos de inércia e arrasto adotados para os membros da plataforma foram baseados nas recomendações da norma DNV [37], calculados pela própria interface do programa SITUA, exceto para os pontoons e as colunas externas, que tiveram seus coeficientes de massa adicionada adotados conforme recomendado e apresentado em [18].

6.3.2 Características das Linhas

A Figura [43] a seguir apresenta as características do sistema de ancoragem que compõe o modelo da plataforma semi-submersível estudada.

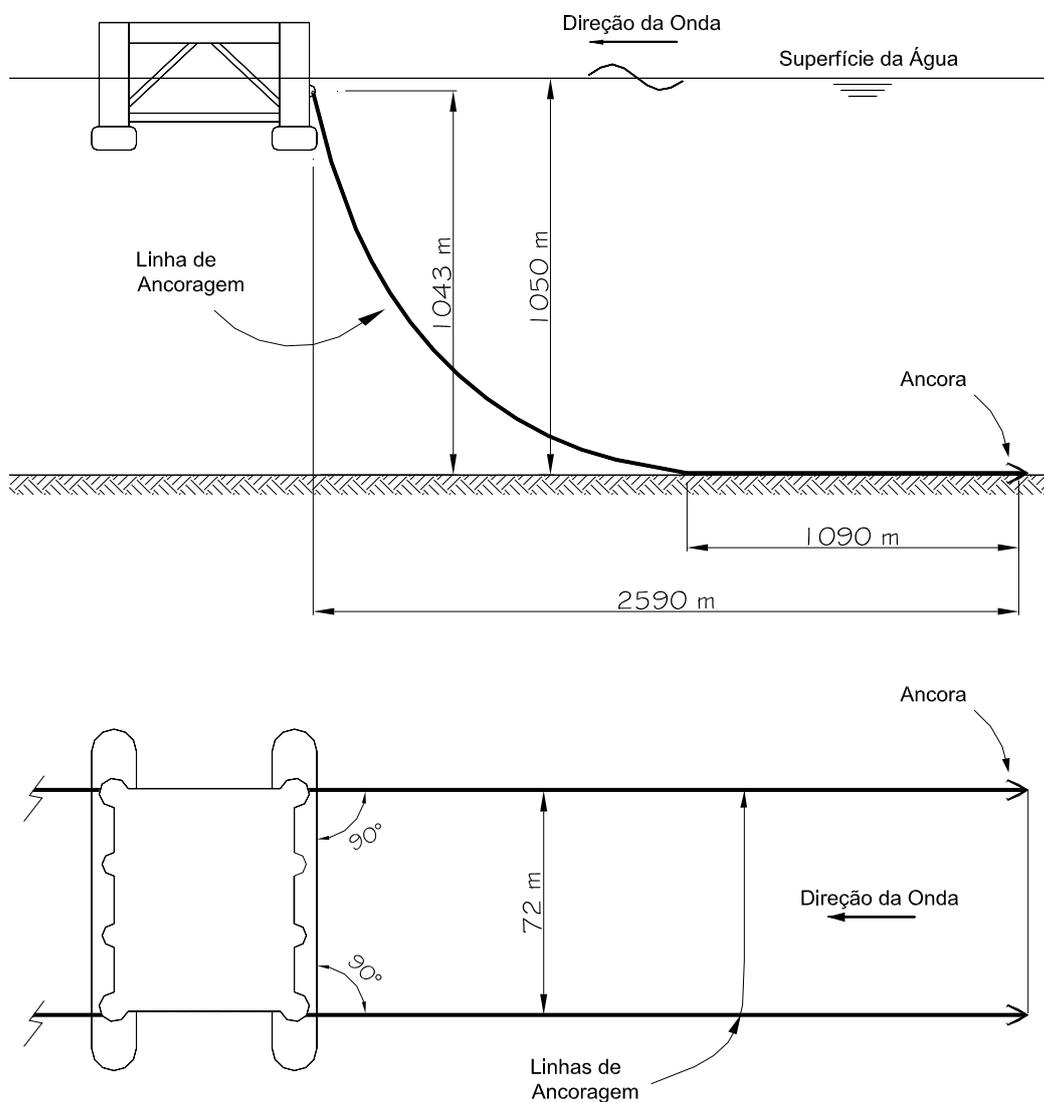


Figura 43 – Características do sistema de ancoragem.

As linhas que compõem o sistema de ancoragem em catenária livre são todas idênticas, constituídas por um único segmento de amarra, contendo as mesmas propriedades físicas e geométricas como descritas a seguir na Tabela 7.

Tabela 7 – Características das linhas de ancoragem.

Parâmetros	Valores
Tipo	Amarra
Comprimento (m)	3000,00
Diâmetro Nominal (m)	0,117
Diâmetro Hidrodinâmico (m)	0,205
EA (t)	96952,3
Peso Seco (t/m)	0,274
Peso Molhado (t/m)	0,238
Pré-Tração (t)	540,00

Todas as linhas foram modeladas por elementos de treliça espacial composta por 104 elementos discretizados por diferentes comprimentos. Neste caso, para as seções de topo e TDP (*Touch Down Point*) foram adotadas malhas mais refinadas de comprimento gradativo, variando de 5 a 50m. Para o trecho intermediário se adotou elementos com 50m de comprimento.

A Figura 44 ilustra uma das linhas de ancoragem da unidade modelada, destacando a gradação de tração ao longo da profundidade da lâmina d'água.

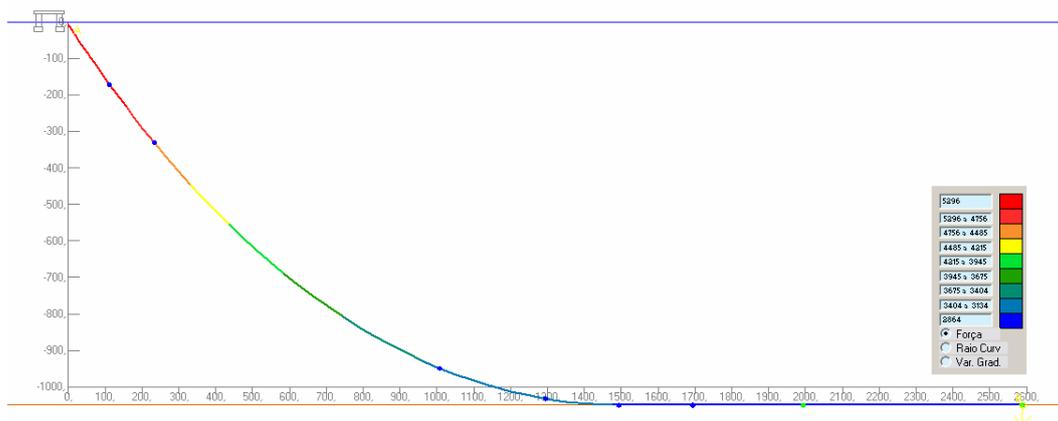


Figura 44 – Linha de ancoragem.

6.3.3 Casos de Carregamento

Para a comparação entre as respostas de movimentos da plataforma ITTC foram avaliados cinco casos de carregamento, considerando as cargas ambientais de vento, onda e correnteza. O carregamento de vento considerou somente a parcela constante ao longo do tempo; para a onda foram definidos estados de mar regular e irregular; e para a velocidade de superfície do carregamento de correnteza adotou-se um perfil triangular.

Especificamente para o caso de mar irregular, foi adotado o espectro de Jonswap (definido na seção 3.1), caracterizado pela altura de onda significativa (H_s) e pelo período de pico (T_p). No caso do vento, tomou-se sua velocidade média para uma duração de 10 minutos. Neste momento, para todos os modelos de análise, os carregamentos foram considerados atuando somente no casco. E no caso de uma combinação de carregamentos, a direção entre os mesmos foi considerada colinear.

Os azimutes de cada tipo de carregamento são fornecidos com relação ao Norte Verdadeiro no sentido horário. A convenção dada para o sentido de ataque do vento e das ondas é “Vindo De”, e para a correnteza é “Indo Para”.

Os dados ambientais, adotados para a avaliação dos modelos numéricos, são valores tipicamente encontrados na Bacia de Campos, denominados usualmente como carregamento extremo e de fadiga.

A Tabela 8 a seguir apresenta os casos de carregamentos utilizados nas análises comparativas entre os modelos Fortemente e Fracamente Acoplados. Vale ressaltar que para os casos C3 e C5 foi considerado o estado de mar regular, portanto, deve-se entender H_w e T_w .

Tabela 8 – Casos de Carregamento.

<i>Casos</i>	<i>Vento</i>		<i>Onda</i>			<i>Correnteza</i>	
	<i>Vel.(m/s)</i>	<i>Azim.(°)</i>	<i>Hs (m)</i>	<i>Tp(s)</i>	<i>Azim.(°)</i>	<i>Vel.(m/s)</i>	<i>Azim.(°)</i>
C1	29,791	0	-	-	-	-	-
C2	-	-	7,16	14,78	0	1,23	180
C3*	-	-	7,16	14,78	0	1,23	180
C4	-	-	2,25	17,10	0	0,60	180
C5*	-	-	2,25	17,10	0	0,60	180

* C3 e C5 – Mar Regular: considerar H_w e T_w

6.3.4 Resultados Comparativos

Nesta seção, são apresentados os resultados das análises de movimentos da plataforma ITTC para os casos de carregamentos considerados no item anterior.

E ainda, com intuito de se avaliar a tração de topo entre as metodologias, comparou-se para o caso de carregamento C4, as respostas deste esforço para uma das linhas mais tracionadas do modelo. Tais resultados são dados por meio de gráficos e de uma tabela resumo contendo a média e desvio padrão dos valores obtidos.

A seguir apresentam-se as características das análises adotadas nas simulações numéricas realizadas:

- Tempo de Simulação: 2400s
- Rampa de Carregamento: 1000s
- Intervalo integração dinâmica: $dt_{FrA} = 0.02s$ e $dt_{FoA} = 0.01s$

Mais uma vez adotou-se uma rampa de tempo longa para as análises numéricas, com intuito de se aplicar os carregamentos ambientais lentamente, para que assim se pudesse otimizar o equilíbrio do sistema flutuante.

A Tabela 9 a seguir apresenta o tempo de processamento obtido para o caso de carregamento C2. Como a relação entre o tempo requerido para as simulações em cada caso de carregamento se mantém praticamente constante para as duas metodologias, somente um deles está sendo apresentado.

Tabela 9 – Tempo de Processamento.

<i>Metodologias de Análise</i>	<i>T. Processamento (min)</i>	<i>Relação (%)</i>
Fracamente Acoplada	125,47	181,87
Fortemente Acoplada	69,37	-

* $dt_{FoA} = 1/2 dt_{FrA}$

A partir da Tabela 9, percebe-se mais uma vez a diferença no tempo de processamento para a realização das análises. Neste caso, a metodologia Fracamente Acoplada requer um tempo de análise de aproximadamente 82% a mais que aquele requerido na análise utilizando-se a metodologia Fortemente Acoplada.

É importante notar que foi adotado o intervalo de integração para modelo Fortemente Acoplado como a metade do intervalo de tempo para o modelo Fracamente Acoplado. Pode-se verificar, a partir de avaliações comparativas, que caso fosse considerado intervalos de integração iguais, o tempo de processamento gasto numa análise Fracamente Acoplada seria de 3.64 vezes maior.

O desempenho do acoplamento “forte” é garantido, também para este modelo numérico, devido ao mesmo possuir um número de graus de liberdade (poucas linhas) relativamente pequeno para resolução do sistema de equação totalmente acoplado. Outro fato também se deve em relação ao número de iterações requeridas para a convergência da solução (baseado no procedimento de N-R) no modelo **FoA**, que é menor quando comparado com o modelo **FrA**, como também verificado para o caso da bóia anteriormente avaliada.

Mais adiante são apresentados os resultados de cada caso de carregamento avaliados para o modelo da semi-submersível em questão. Primeiramente, apresenta-se o caso C1 onde somente os efeitos devido à ação do vento são considerados atuando no casco. Depois, o caso C2 em que atuam um carregamento extremo combinado de onda e correnteza para um estado de mar irregular. Em seguida, o caso C3 com carregamento de mesma magnitude que o caso anterior C2, porém caracterizado por um estado de mar regular. Em seguida, o caso C4 considerando um carregamento de fadiga combinando onda e correnteza para um estado de mar irregular. E por fim, o caso C5 com carregamento atuando com a mesma magnitude que o caso anterior C4, porém caracterizado por um estado de mar regular.

Exceto para o caso C2, onde são apresentados resultados em que se efetuou previamente o equilíbrio estático (análise estática) para se realizar as análises dinâmicas, todas as demais simulações numéricas se iniciaram partindo diretamente da análise dinâmica.

Deste modo, as respostas dinâmicas que são estabelecidas sem considerar anteriormente um equilíbrio estático do modelo permitem verificar, desde o início, para ambas as metodologias acopladas, o equilíbrio obtido dinamicamente das parcelas de peso próprio, empuxo e cargas ambientais consideradas constantes durante a análise (correnteza e vento).

Para as análises aplicando-se o carregamento C2, objetivou-se comparar os resultados dinâmicos realizando-se inicialmente o equilíbrio estático do modelo, a fim de adicionar mais um critério comparativo entre as metodologias acopladas.

É importante ressaltar que os carregamentos de correnteza e a parcela média do vento são considerados no programa Prosim na análise estática, juntamente com peso próprio e empuxo das linhas e do casco do sistema flutuante para a condição inicial de projeto.

Caso C1: Vento

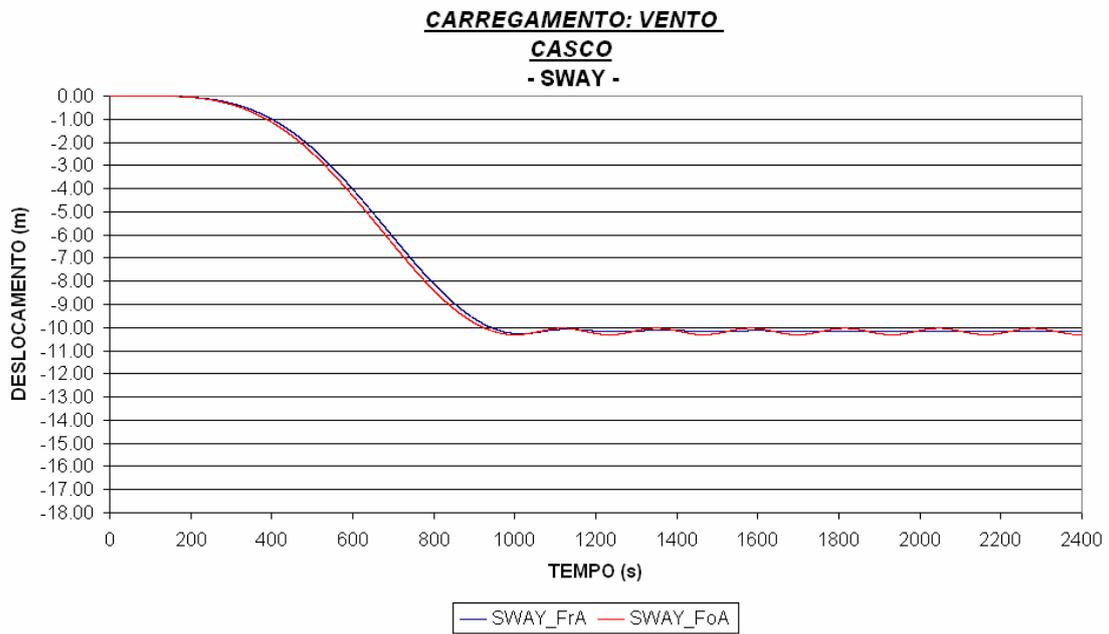


Figura 45 – Movimento de Sway.

Caso C2: Onda e Correnteza Extrema – Mar Irregular (com análise estática prévia)

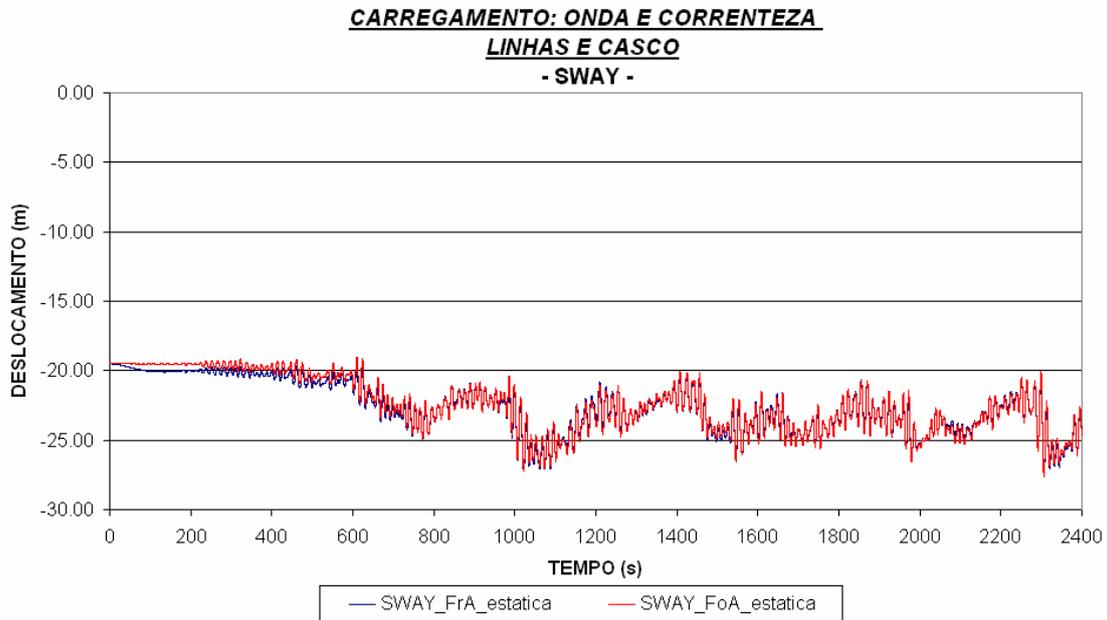


Figura 46 – Movimento de Sway.

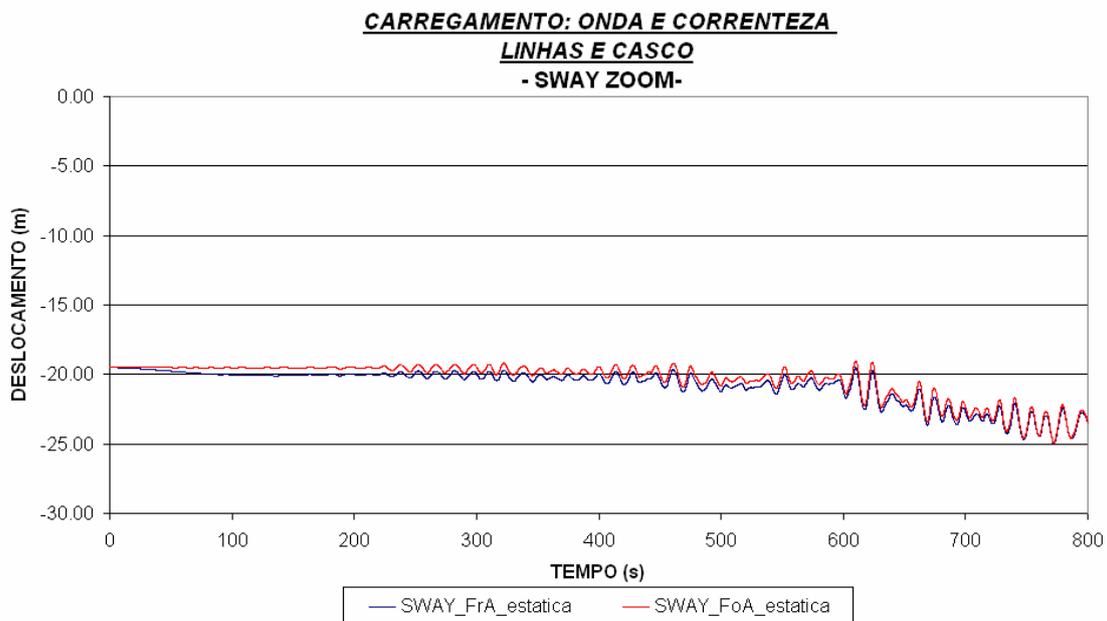


Figura 47 – Movimento de Sway (zoom).

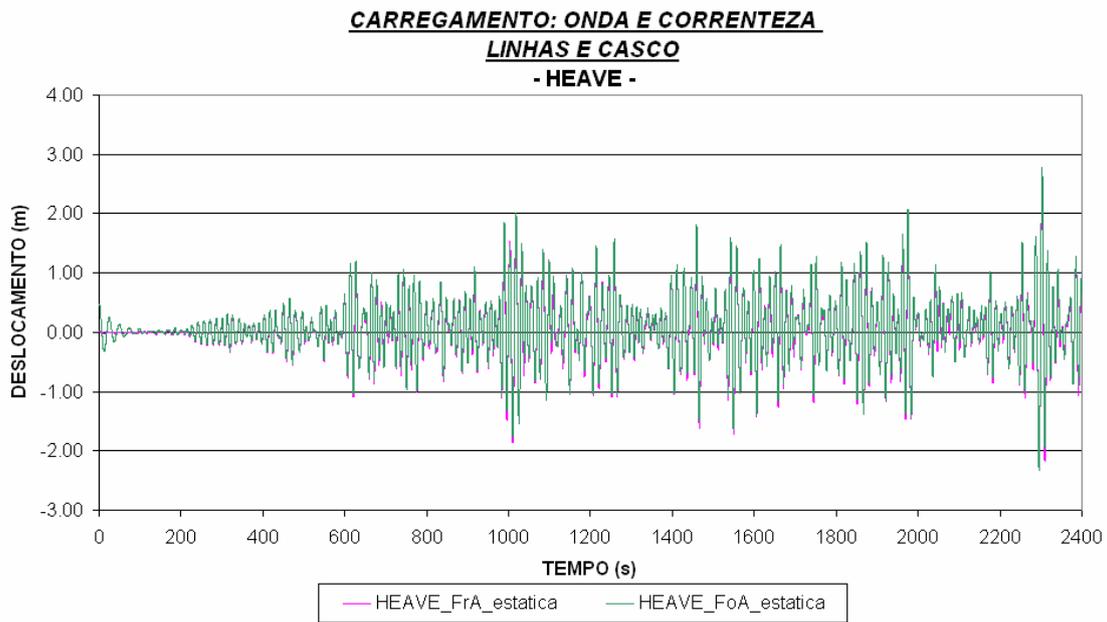


Figura 48 – Movimento de Heave.

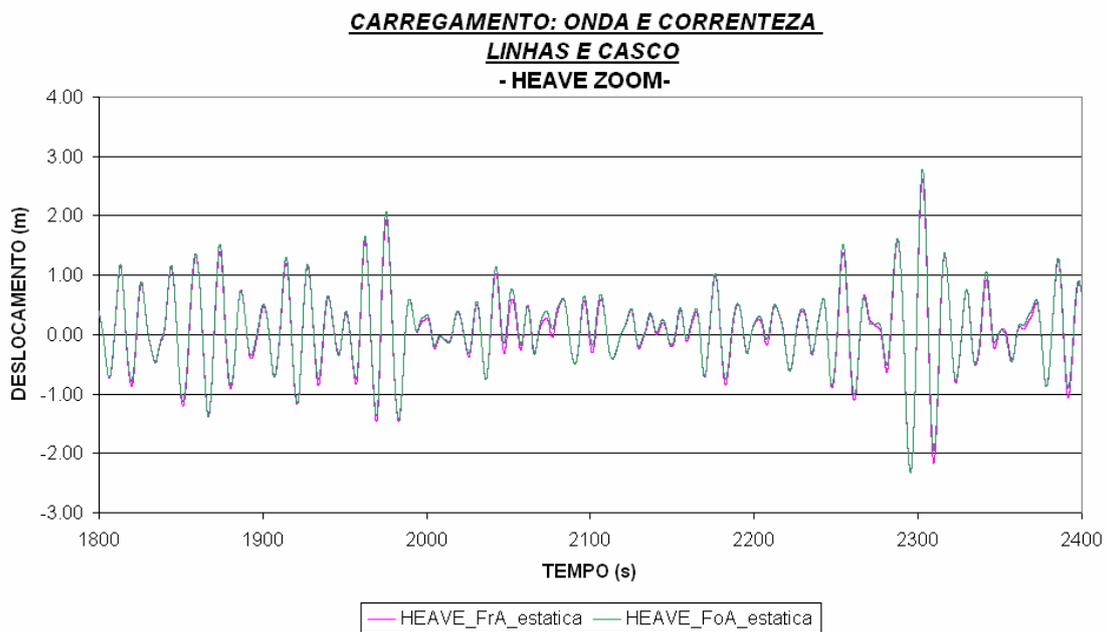


Figura 49 – Movimento de Heave (zoom).

Caso C3: Onda e Correnteza Extrema – Mar Regular

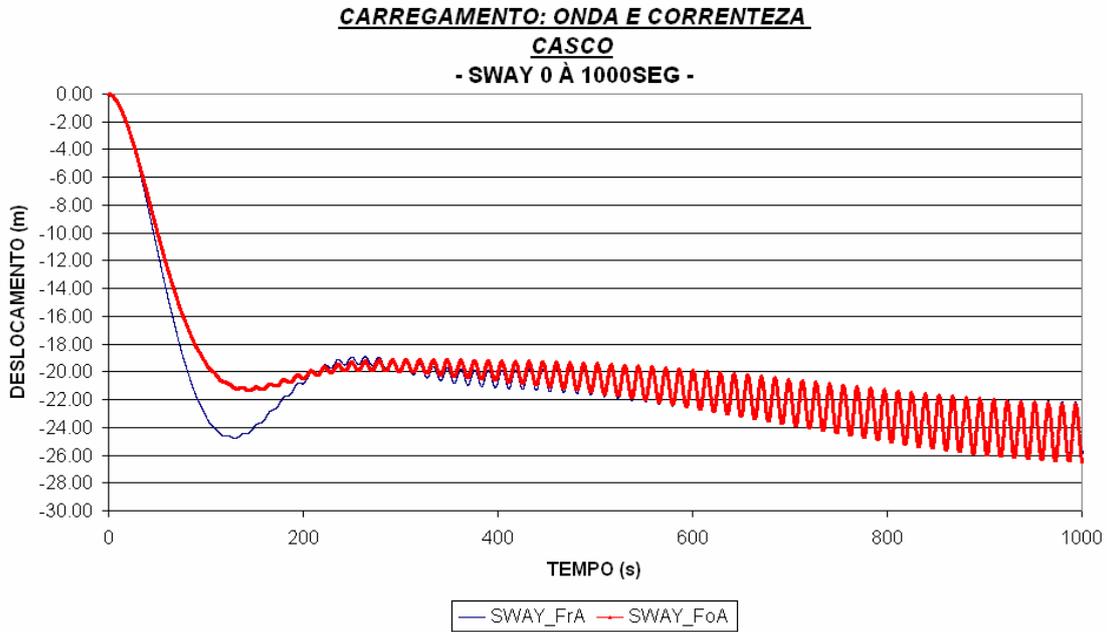


Figura 50 – Movimento de Sway (até 1000seg).

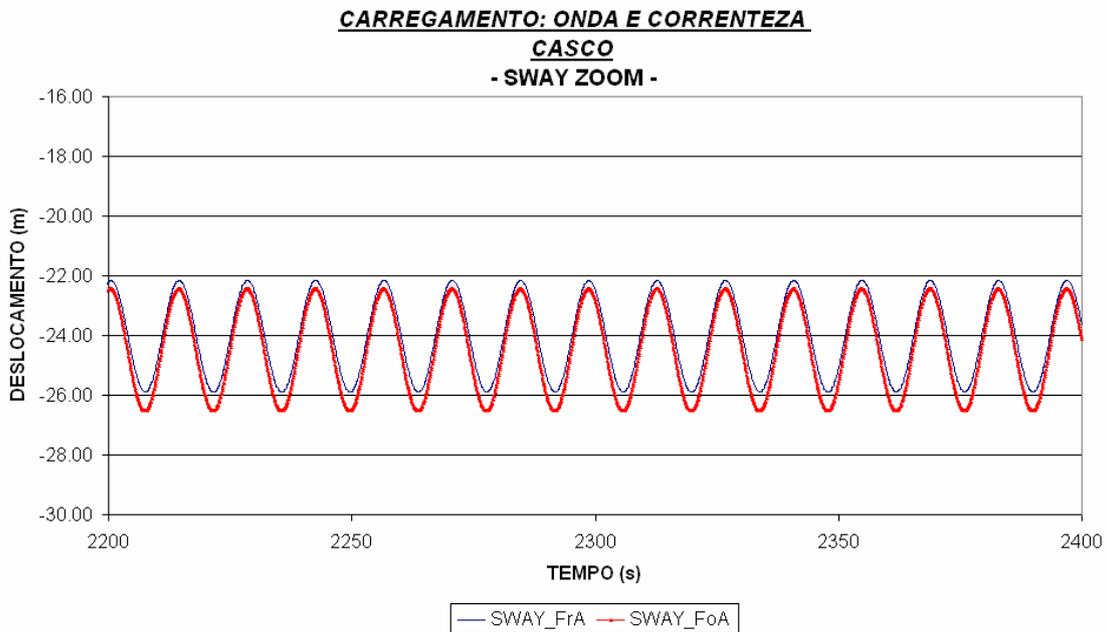


Figura 51 – Movimento de Sway (zoom).

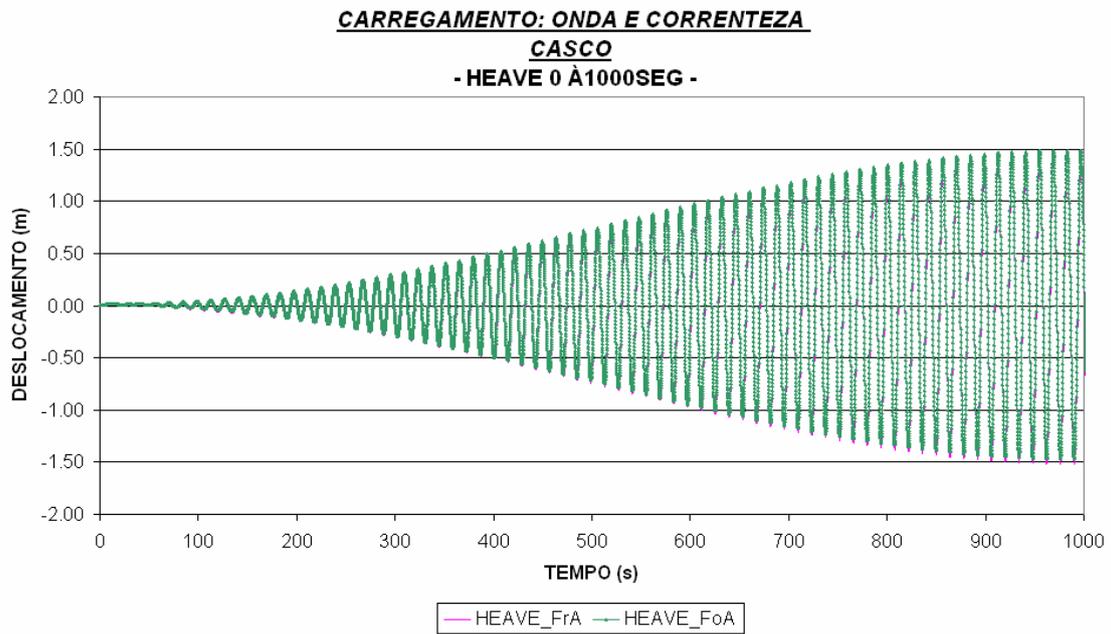


Figura 52 – Movimento de Heave (até 1000seg).

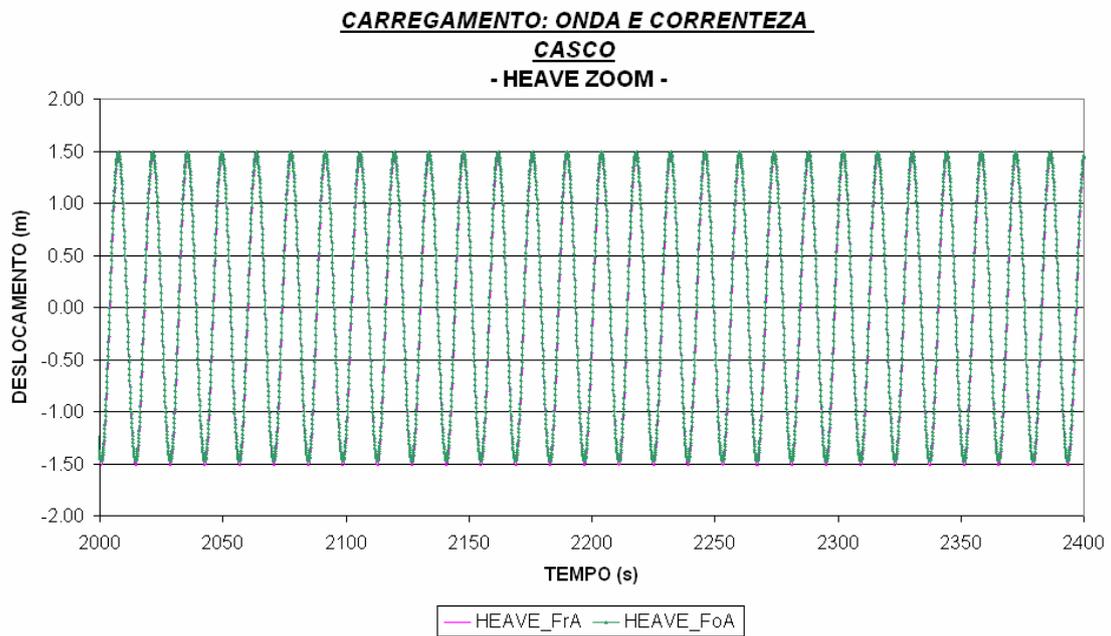


Figura 53 – Movimento de Heave (zoom).

Caso C4: Onda e Correnteza Fadiga – Mar Irregular

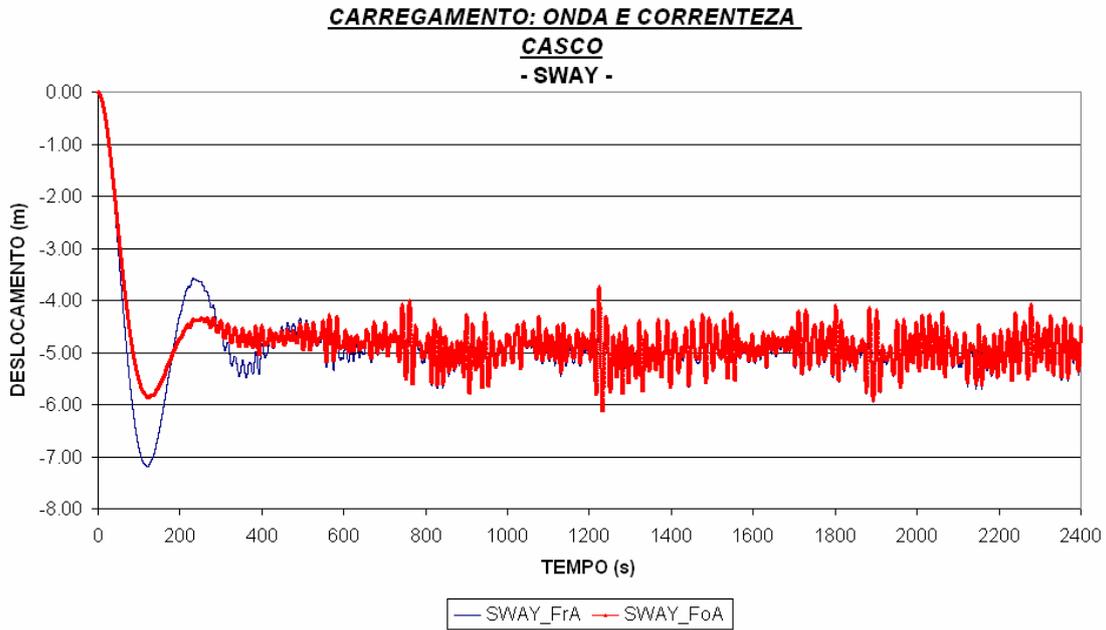


Figura 54 – Movimento de Sway.

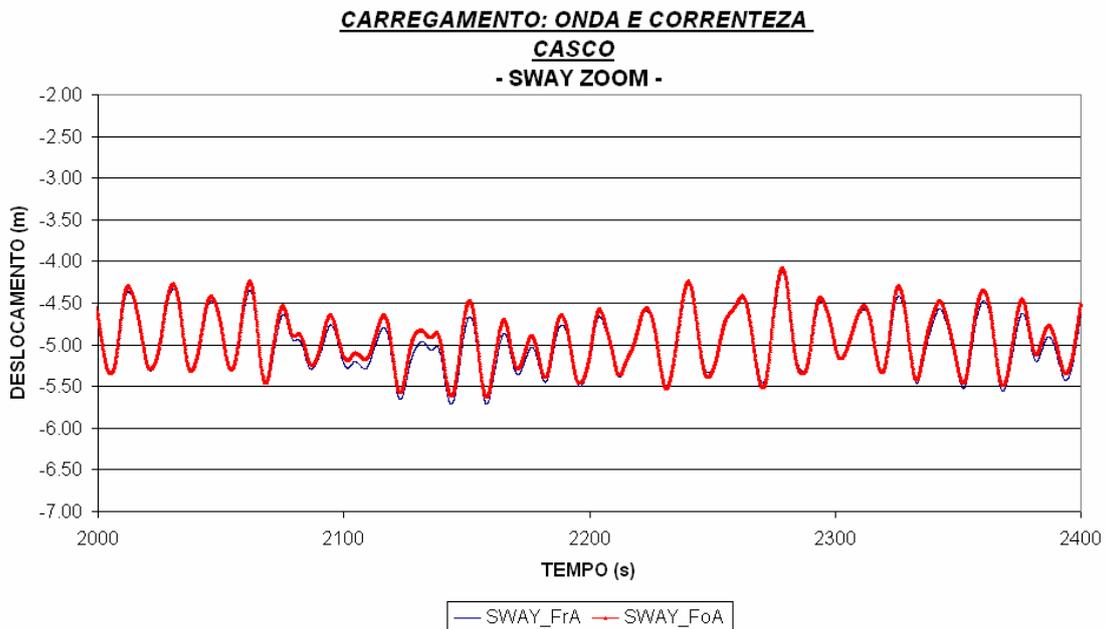


Figura 55 – Movimento de Sway (zoom).

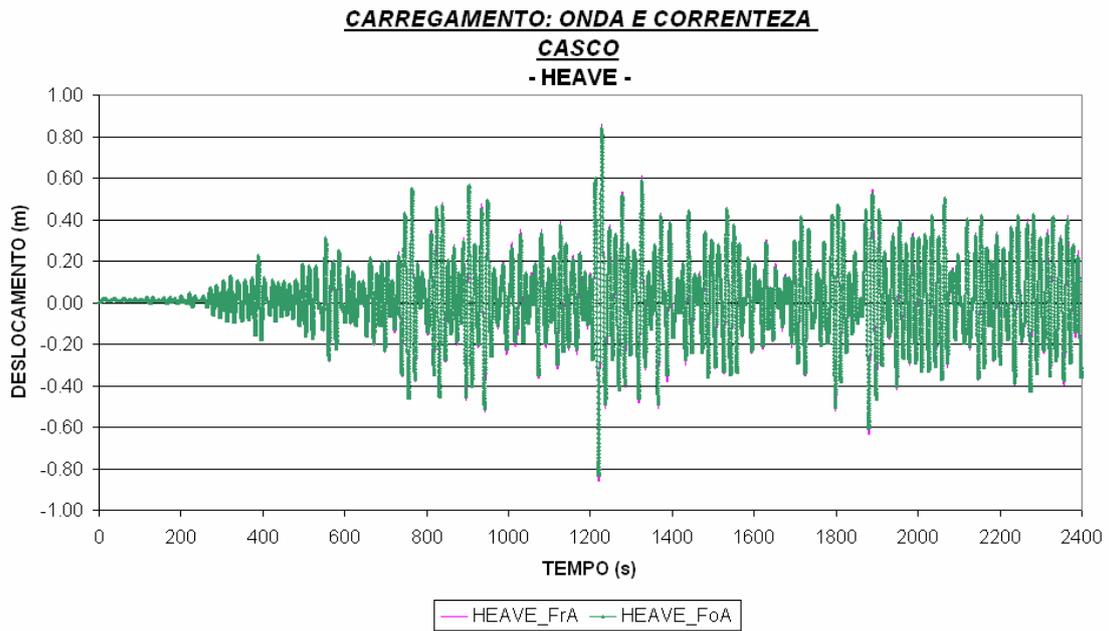


Figura 56 – Movimento de Heave.

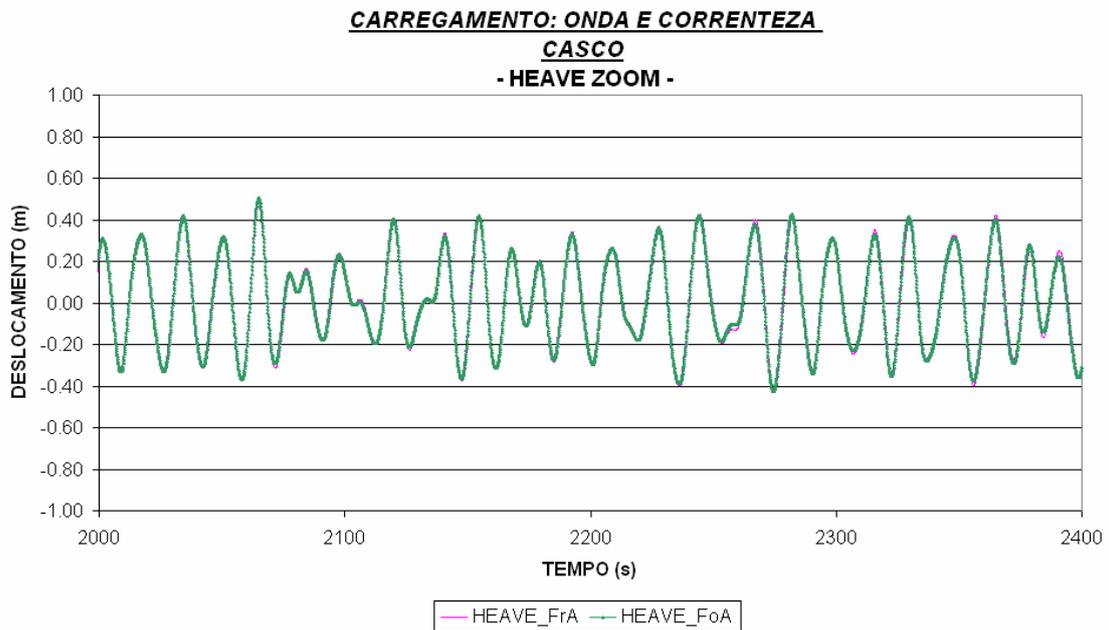


Figura 57 – Movimento de Heave (zoom).

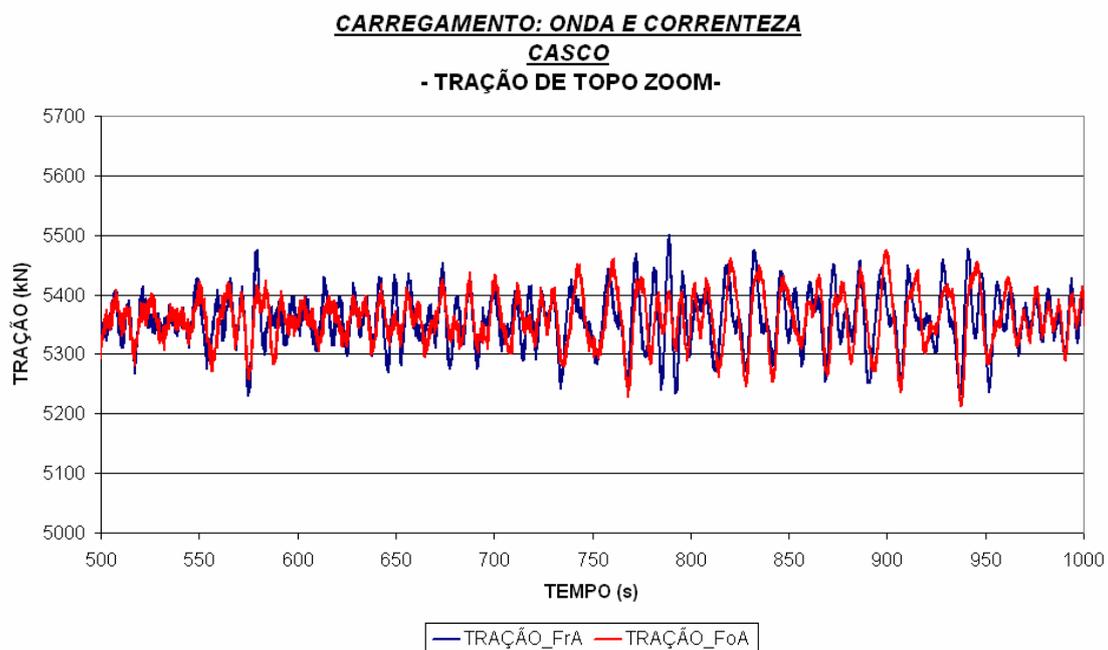


Figura 58 – Tração de topo na linha de ancoragem (zoom).

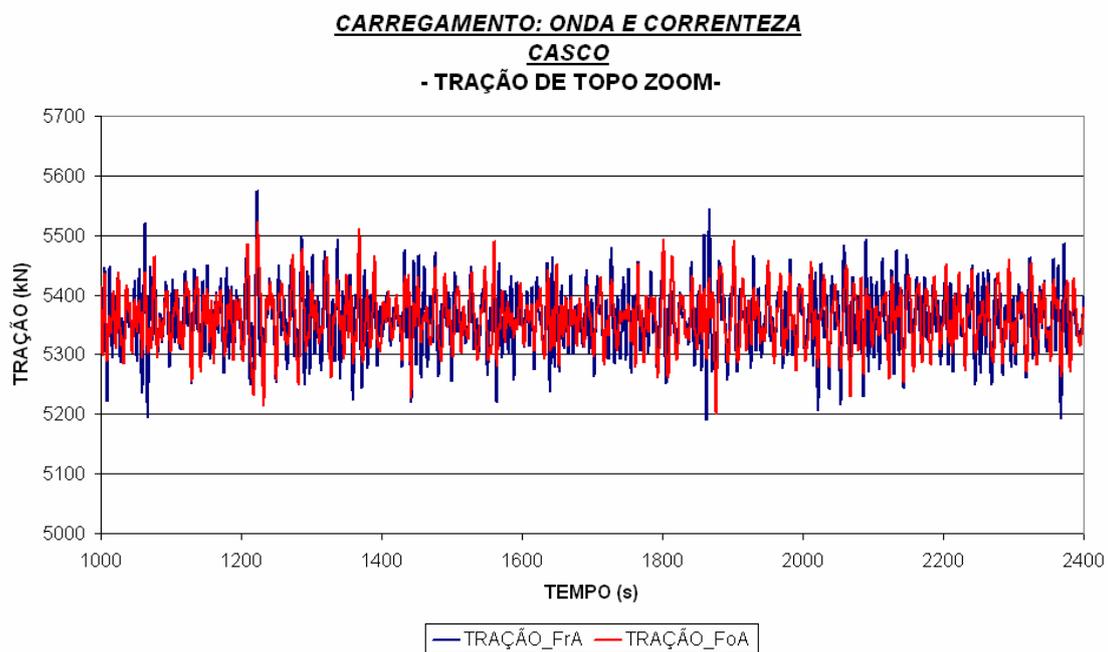


Figura 59 – Tração de topo na linha de ancoragem (zoom).

Tabela 10 – Resultados comparativos de tração de topo.

Metodologias de Análise	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)
Fracamente Acoplada	5359,14	52,56
Fortemente Acoplada	5360,11	45,44

Caso C5: Onda e Correnteza Fadiga – Mar Regular

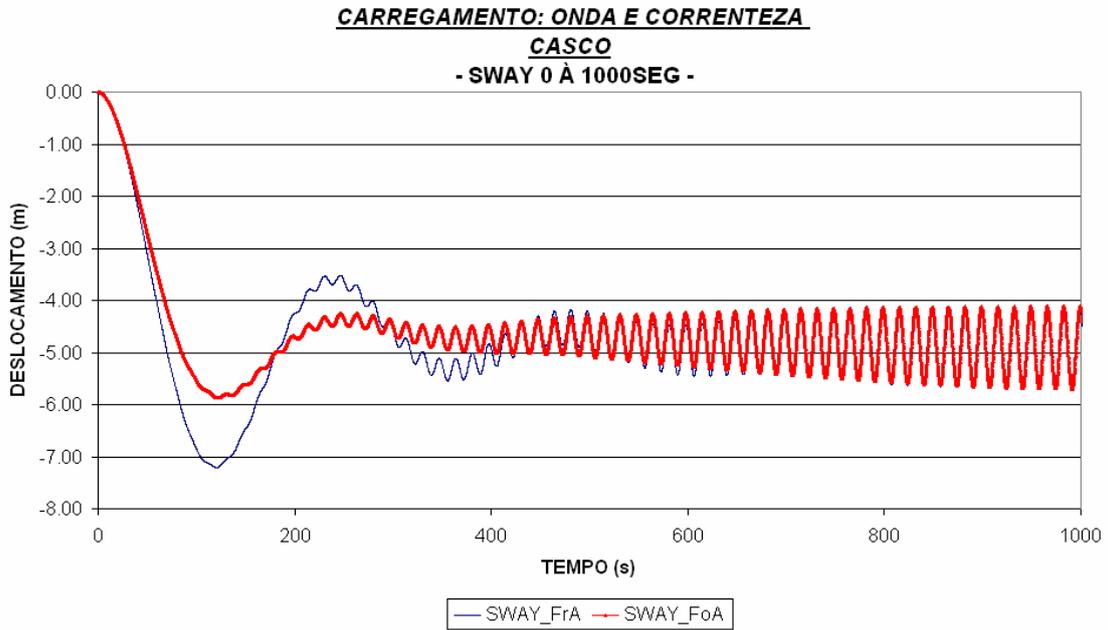


Figura 60 – Movimento de Sway (até 1000seg).

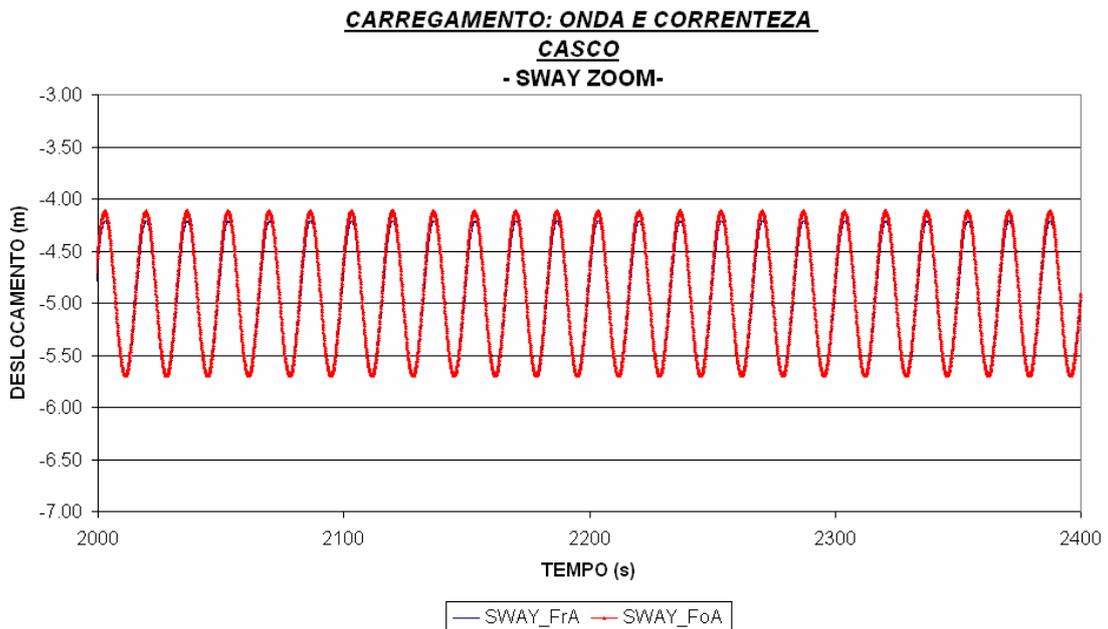


Figura 61 – Movimento de Sway (zoom).

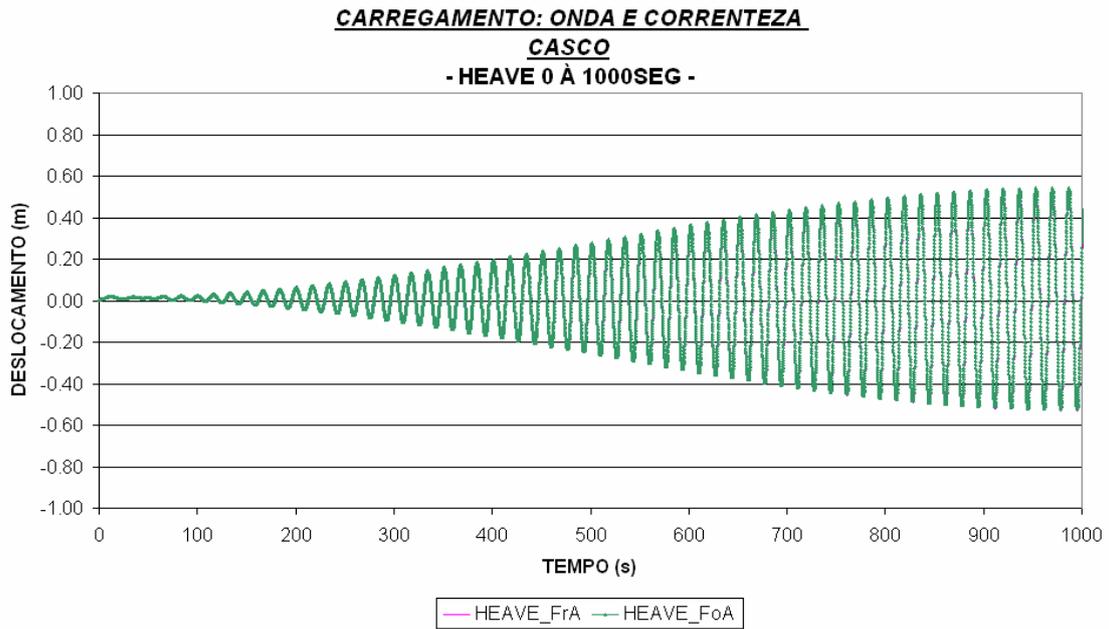


Figura 62 – Movimento de Heave (até 1000seg).

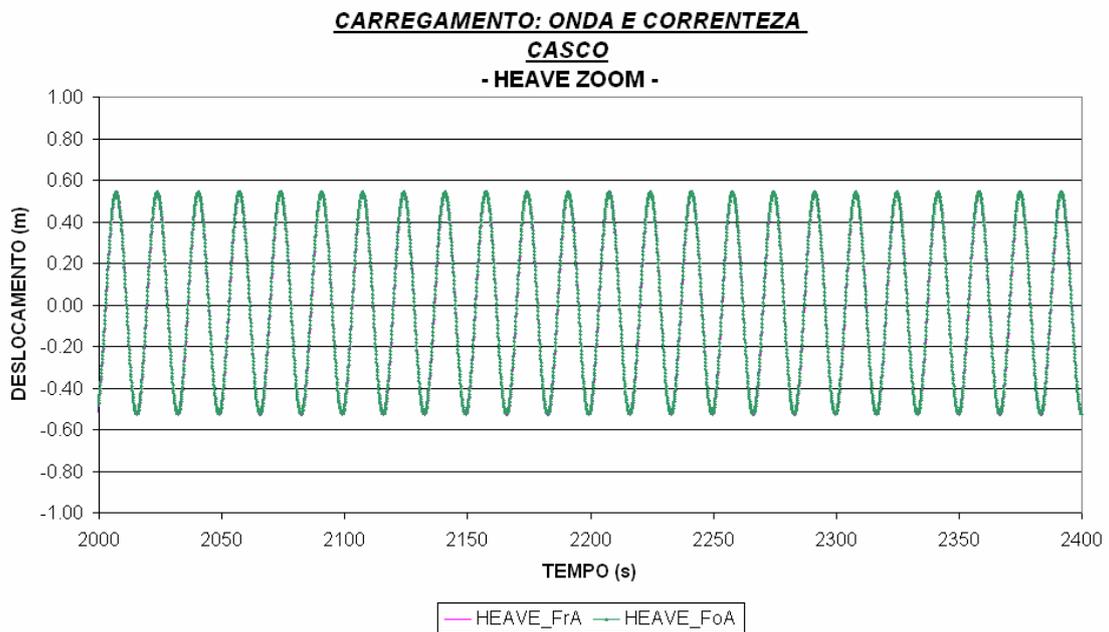


Figura 63 – Movimento de Heave (zoom).

Os casos de carregamentos atribuídos para as análises dos modelos numéricos da plataforma ITTC tiveram por objetivo abranger os carregamentos ambientais usualmente empregados na avaliação de sistemas flutuantes *offshore*, e com isso, certificar a confiabilidade dos resultados obtidos nas comparações das duas metodologias acopladas.

Para isso, como se verifica na Tabela 8 apresentada anteriormente, foram analisados casos devido ao carregamento de vento atuando no casco da plataforma, estados de mar regular e irregular com ondas de maior e menor amplitude, e carregamentos de correnteza.

Novamente percebe-se, por meio das curvas apresentadas nesta seção, a concordância nos resultados de movimentos e de tração de topo para ambas as metodologias de análise acopladas, o que além de validar as implementações desenvolvidas neste trabalho, também comprovam a confiabilidade dos resultados para o modelo Fracamente Acoplado.

Como ocorreu para a bóia, também é verificado para este modelo analisado, que o desempenho computacional para soluções baseadas na metodologia Fortemente Acoplada é bem maior quando comparado com a metodologia Fracamente Acoplada (Tabela 9), conforme discussões anteriormente descritas.

6.4 Semi-submersível P-001

O terceiro modelo avaliado corresponde a uma plataforma semi-submersível mais robusta (na qual estão conectadas 63 linhas) com sistema similar às existentes na Bacia de Campos para exploração de grandes volumes de petróleo.

Tal unidade, composta por 4 colunas e 2 *pontoons*, está aproada à 90° em relação ao Norte e instalada numa lâmina d'água de 1800 metros. Seu sistema de ancoragem é composto por 16 linhas de amarração em configuração “*taut-leg*”, distribuídas em grupos de 4 linhas por córner. Já o sistema de produção é composto por 47 linhas flexíveis, dentre essas *risers* e umbilicais.

Primeiramente, para o modelo completo da plataforma contendo 63 linhas, foram avaliados seus respectivos movimentos de translação de *Surge*, *Sway* e *Heave* para dois casos de carregamentos atuantes. O primeiro caracterizado por um estado de mar irregular e o outro por um estado de mar regular. Comparou-se também, para o caso correspondente ao estado de mar irregular, os resultados de tração de topo de uma das linhas de ancoragem mais tracionadas do modelo.

Para o caso do referido modelo objetivou-se, principalmente, efetuar comparações relativas à eficiência computacional caracterizada por cada uma das metodologias acopladas estudadas neste trabalho.

Até o momento foram realizadas análises para sistemas *offshore* com um pequeno número de linhas conectadas à plataforma. Um estudo mais amplo foi então considerado, onde foram avaliadas variações do número de linhas que compõem o modelo da plataforma P-001 originalmente adotada.

Como mencionado acima, este item foi focado nas avaliações referentes ao tempo de processamento requerido em cada análise. A partir do modelo completo que contempla um total de 63 linhas, avaliaram-se ainda três modelos que derivaram desse sistema de produção. Neste caso, os sistemas analisados foram compostos por 30, 16 e 8 linhas, mantendo-se sempre constante a mesma discretização da malha de elementos finitos do modelo original.

As Figuras 64 e 65 ilustram o modelo numérico da referida unidade flutuante analisada nesta seção. A Figura 64 apresenta uma vista global do modelo, onde são identificadas pela cor verde as linhas de ancoragem e pela cor azul os *risers* e umbilicais. Já a Figura 65 ilustra uma vista geral do casco do flutuante, caracterizado pela altura de seu calado de operação.

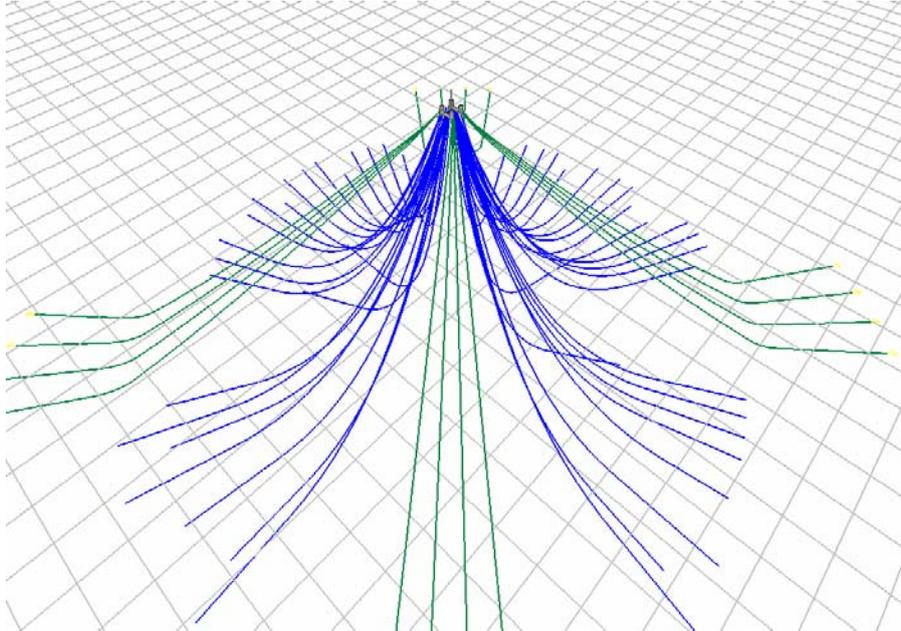


Figura 64 – Modelo numérico da plataforma (modelo completo).

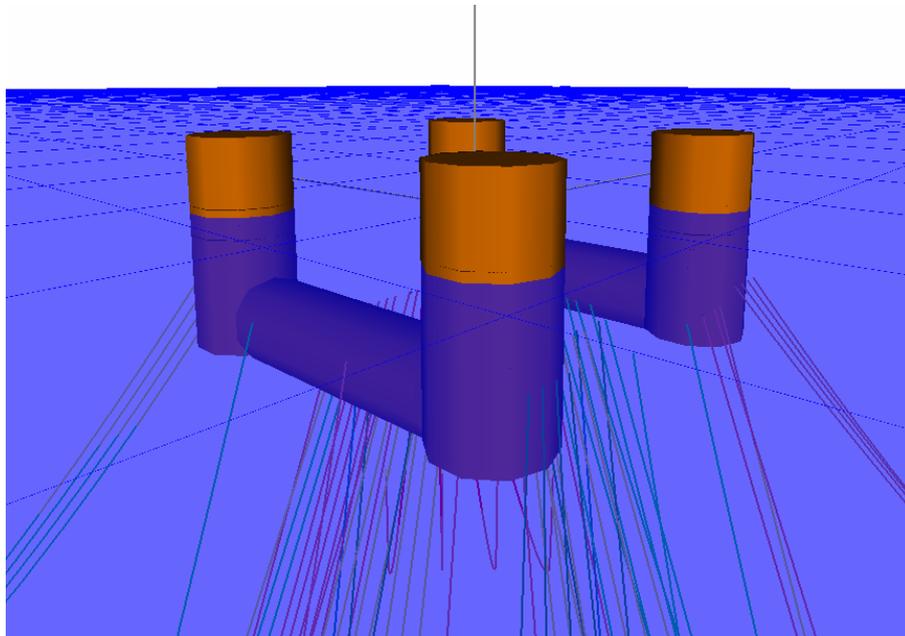


Figura 65 – Modelo numérico da plataforma (detalhe do casco).

6.4.1 Características do Casco

Como relatado no início desta seção, o casco da plataforma semi-submersível é caracterizado por possuir membros cilíndricos de grandes diâmetros compostos por dois *pontoons* e quatro colunas.

Para a modelagem do casco de unidades flutuantes no programa SITUA-Prosim, a partir da geometria real do casco, efetua-se uma discretização composta por membros cilíndricos do modelo numérico, de modo a representar adequadamente o volume deslocado e as propriedades hidrodinâmicas da estrutura real.

Assim, gerou-se o modelo do casco da embarcação fornecendo-se as coordenadas dos nós iniciais e finais de cada elemento cilíndrico, seus diâmetros e seus respectivos coeficientes hidrodinâmicos de inércia e arrasto. Para estes últimos, novamente, foram adotadas as recomendações da norma DNV [37].

A seguir é ilustrado pela Figura 66 o modelo numérico da plataforma semi-submersível P-001 adotado para os testes comparativos de interesse.

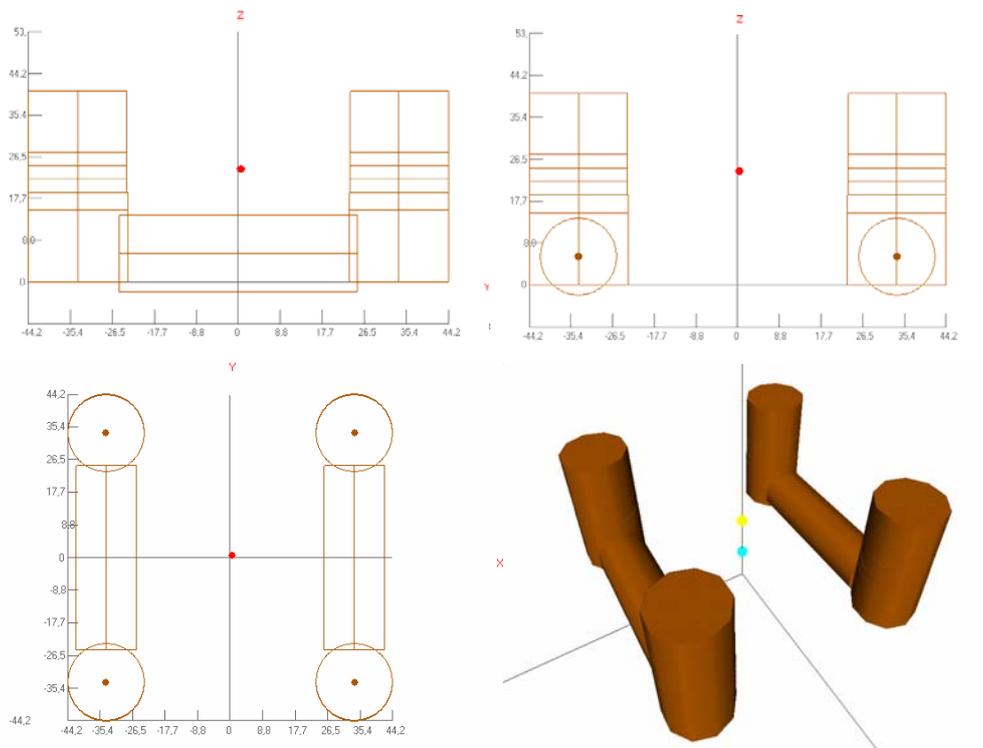


Figura 66 – Características do casco.

A Figura 67 a seguir ilustra claramente todos os elementos rígidos que fazem parte da malha de elementos finitos das linhas de ancoragem e risers, considerados na metodologia Fortemente Acoplada. Tais elementos (de elevada rigidez) fazem a ligação do nó de conexão de cada linha existente na plataforma com o centro de gravidade do casco.

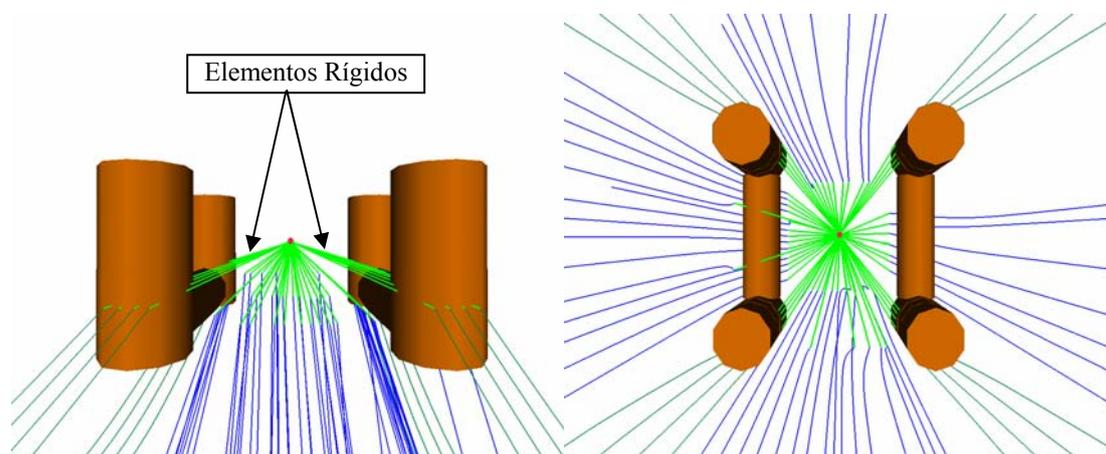


Figura 67 – Detalhe dos elementos rígidos.

Tanto a geometria do casco como as demais propriedades da plataforma de produção são descritas na Tabela 11 a seguir. Vale ressaltar que devido à assimetria do posicionamento das linhas, a posição do CG é deslocada referindo-se, portanto, somente ao casco do flutuante. A posição do CG do sistema no (0,0) é então encontrado quando o modelo completo (composto pelo o casco e as linhas) for configurado.

Tabela 11 – Dados do casco da plataforma.

Parâmetros	Valores
Comprimento (m)	88,40
Largura (m)	88,40
Altura (m)	40,50
Calado Operação (m)	26,00
Diâmetro dos <i>Pontoons</i> (m)	16,31
Diâmetro das Colunas (m)	20,74
CG X (m)	0,4034
CG Y (m)	0,5575
CG Z (m)	24,00
Raio de Giração <i>roll</i> e <i>pitch</i> (m)	35,00
Raio de Giração <i>yaw</i> (m)	37,00
Empuxo (t)	57.818,00

6.4.2 Características das Linhas

Nesta seção, são apresentadas as propriedades das linhas de ancoragem modeladas para a plataforma P-001.

Como o foco de estudo foi avaliar o desempenho computacional entre as metodologias, bem como obter os movimentos da embarcação, não se faz necessário descrever e apresentar as propriedades de todas as linhas flexíveis (*risers* e umbilicais) modeladas no programa.

Com isso, a Tabela 12 apresenta a seguir as características dos segmentos que compõem as linhas do sistema de ancoragem da plataforma P-001 em configuração “*taut-leg*”. Ressalta-se que cada uma das linhas dos modelos possui um comprimento diferente umas das outras, variando em torno de um valor médio igual a 3700m; e ainda, quando se considera a mudança nos modelos (63, 30, 16 e 8 linhas) o comprimento também se altera para manter o sistema em equilíbrio.

Nesta direção, o comprimento de cada segmento das linhas de ancoragem, correspondente ao trecho de topo (amarra), intermediário (cabo de poliéster) e fundo (amarra), é respectivamente de 200m, 2500m, 1000m.

Tabela 12 - Características dos Segmentos das linhas de ancoragem.

Parâmetros	Amarra	Cabo Poliéster
Diâmetro Nominal (m)	0,21	0,222
Diâmetro Hidrodinâmico (m)	0,21	0,222
EA (kN)	1100000,00	480712,00
Peso Seco (kN/m)	2,8253	0,3169
Peso Molhado (kN/m)	2,4580	0,0833

As linhas de ancoragem e as linhas flexíveis foram ambas modeladas por elementos de treliça espacial discretizados em diferentes comprimentos. Neste caso, para as seções de topo e TDP (*Touch Down Point*) foram adotadas malhas mais refinadas de comprimento gradativo, variando de 5 a 50m, e para o trecho intermediário adotou-se elementos com 50m de comprimento.

As Figuras 68, 69 e 70 ilustram respectivamente: o modelo da unidade flutuante com 63 linhas; a configuração típica de umas de suas linhas de ancoragem; e a configuração de um de seus *risers*. Destaca-se em tais ilustrações a gradação de tração ao longo da profundidade da lâmina d'água.

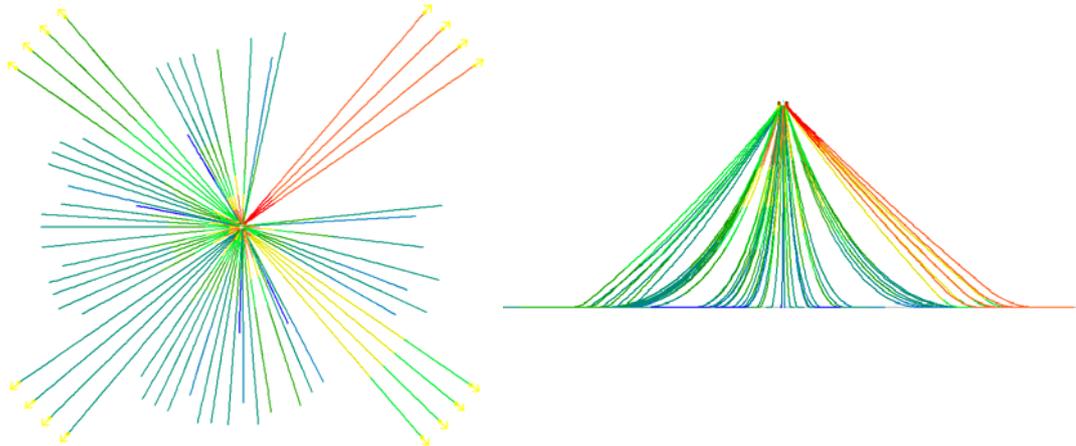


Figura 68 – Vista superior e lateral do modelo das linhas.

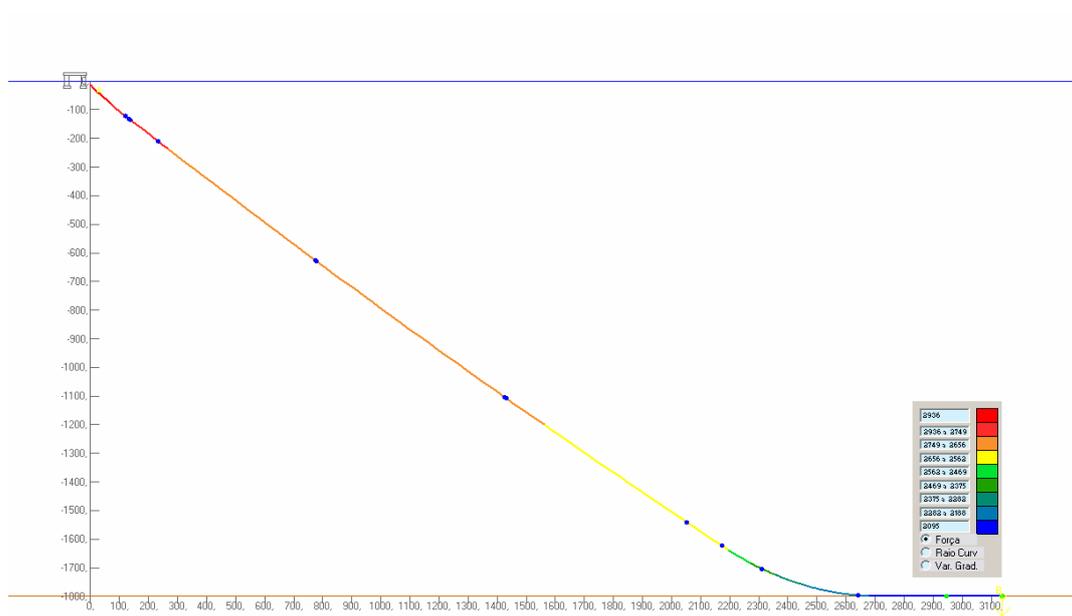


Figura 69 – Linha de ancoragem configuração “taut-leg”.

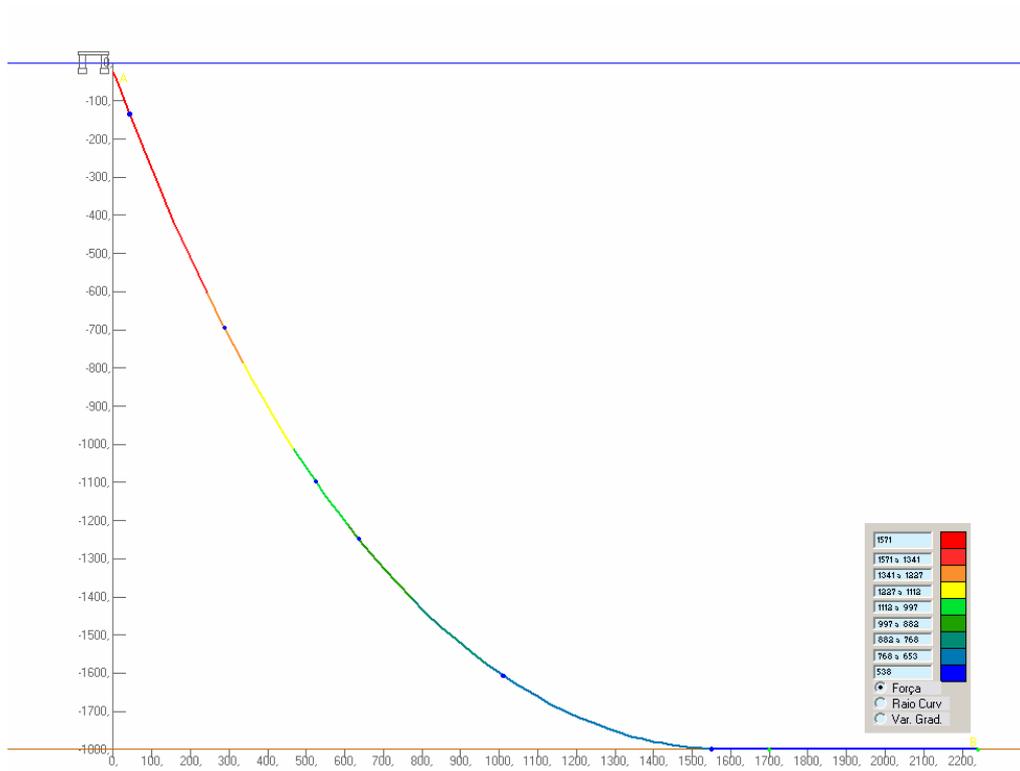


Figura 70 – Configuração de um dos risers da unidade.

6.4.3 Casos de Carregamento

Para a comparação entre as respostas de movimentos da plataforma P-001 foram avaliados somente dois casos de carregamento, considerando os carregamentos ambientais de onda e correnteza. Para a onda foram definidos estados de mar regular e irregular. E para a velocidade de superfície do carregamento de correnteza adotou-se um perfil triangular.

Para o estado de mar irregular, o espectro de Jonswap (definido na seção 3.1) caracterizado pela altura de onda significativa (H_s) e pelo período de pico (T_p) foi adotado.

Novamente, para todos os modelos de análise, os carregamentos foram considerados atuando alinhados numa mesma direção e aplicados somente no casco da embarcação.

Os azimutes de cada tipo de carregamento são fornecidos com relação ao Norte Verdadeiro no sentido horário. A convenção dada para o sentido de ataque das ondas é “Vindo De”, já para a correnteza é “Indo Para”.

Os dados ambientais de carregamento extremo e de fadiga são valores tipicamente encontrados na Bacia de Campos. A Tabela 13 a seguir apresenta os casos de carregamentos utilizados nas análises comparativas entre os modelos Fortemente e Fracamente Acoplados.

Tabela 13 – Casos de Carregamento.

<i>Casos</i>	<i>Onda</i>			<i>Correnteza</i>	
	<i>H_s (m)</i>	<i>T_p(s)</i>	<i>Azim.(°)</i>	<i>Vel.(m/s)</i>	<i>Azim.(°)</i>
C1	7,16	14,78	270	1,23	90
C2*	2,25	17,10	270	0,60	90

* C2 – Mar Regular: considerar H_w e T_w

6.4.4 Resultados Comparativos

Além da avaliação dos resultados obtidos para os movimentos da plataforma, submetida aos carregamentos extremo e fadiga (item 6.4.3), um estudo visando analisar a eficiência computacional entre as metodologias acopladas foi conduzido como nas demais aplicações anteriormente avaliadas. Novamente, de modo a avaliar também resultados de tração de topo em uma das linhas mais tracionadas do modelo, comparações foram realizadas para o caso de carregamento extremo C1.

Assim, a partir de um modelo contemplando um número total de 63 linhas, analisaram-se também mais outros três, os quais foram obtidos eliminando-se parte das linhas do modelo original. Com isso, pôde-se verificar o tempo de processamento consumido nas análises numéricas, avaliando-se além do modelo completo, os modelos com 30, 16 e 8 linhas.

Inicialmente, as análises realizadas (cujo enfoque foi obter comparações para os movimentos da embarcação e de tração de topo para o modelo de 63 linhas) foram caracterizadas como a seguir:

- Tempo de Simulação: 1200s
- Rampa de Carregamento: 700s
- Intervalo integração dinâmica: $dt_{FrA} = 0.02s$ e $dt_{FoA} = 0.01s$

Novamente, adotou-se uma longa rampa de tempo para a aplicação lenta dos carregamentos ambientais de modo a otimizar o equilíbrio hidrodinâmico do sistema flutuante, visto que, as análises iniciaram-se diretamente do processo de integração dinâmico. Vale ressaltar que não foram observados problemas de convergência numérica na realização das análises, mesmo adotando-se rampas de carregamento menores.

Com relação ao desempenho computacional entre as metodologias, adotou-se neste caso, que tais comparações seriam dadas para um mesmo passo de tempo com intuito de reduzir o tempo requerido nas análises dos modelos. Isto quer dizer que, o intervalo de integração utilizado no processo de solução dinâmica foi assumido igual para ambos os modelos acoplados, tal como se apresenta a seguir:

- Tempo de Simulação: 1200s
- Rampa de Carregamento: 700s
- Intervalo integração dinâmica: $dt_{FrA} = 0.1s$ e $dt_{FoA} = 0.1s$

A Tabela 14 apresenta para cada modelo numérico a metodologia empregada na análise, o tempo de processamento requerido, assim como, a relação entre o maior e o menor tempo de processamento obtido em cada análise.

Tabela 14 – Tempo de Processamento.

Modelos	Metodologia	T. Proces.(min)	Relação (%)
P-001 – 63 linhas	FoA	1207,28	812,27
P-001 – 63 linhas	FrA	148,63	-
P-001 – 30 linhas	FoA	181,35	250,90
P-001 – 30 linhas	FrA	72,28	-
P-001 – 16 linhas	FoA	55,20	121,10
P-001 – 16 linhas	FrA	45,58	-
<i>P-001 – 08 linhas</i>	<i>FoA</i>	<i>13,85</i>	<i>-</i>
<i>P-001 – 08 linhas</i>	<i>FrA</i>	<i>23,27</i>	<i>168,01</i>

* $dt_{FoA} = dt_{FrA}$

A partir da Tabela 14 percebe-se agora a inversão dos resultados obtidos com relação aos modelos da bóia e ITTC. Nota-se que a metodologia Fortemente Acoplada passa a requerer um tempo de processamento maior que aquele requerido pela metodologia Fracamente Acoplada.

Como se pode avaliar, a relação entre os valores do tempo de análise aumenta de modo não-linear quando se aumenta o número de linhas do sistema. Verifica-se na Tabela 14, e pelas aplicações anteriores, que para sistemas com um número pequeno de linhas (graus de liberdade) o modelo Fortemente Acoplado mostra-se computacionalmente mais eficiente.

Porém, para casos onde se tem um número de linhas mais elevado, tal modelo torna-se computacionalmente penalizado (tendo em vista que nenhum artifício especial de solução das equações tem sido implementado para este caso). Pois, como mencionado na seção 5.3, devido à estratégia adotada, o sistema de equações a ser resolvido conduz a uma solução computacional mais “cara”. Assim, o tamanho da matriz passa a ser mais relevante que as iterações (método de N-R associado ao algoritmo de integração no tempo de *Newmark*) para a convergência da solução.

As Figuras 71, 72, 73 e 74 ilustram respectivamente os modelos gerados com 63, 30, 16 e 8 linhas para a avaliação comparativa do custo computacional entre as metodologias acopladas.



Figura 71 – Modelo 63 linhas.

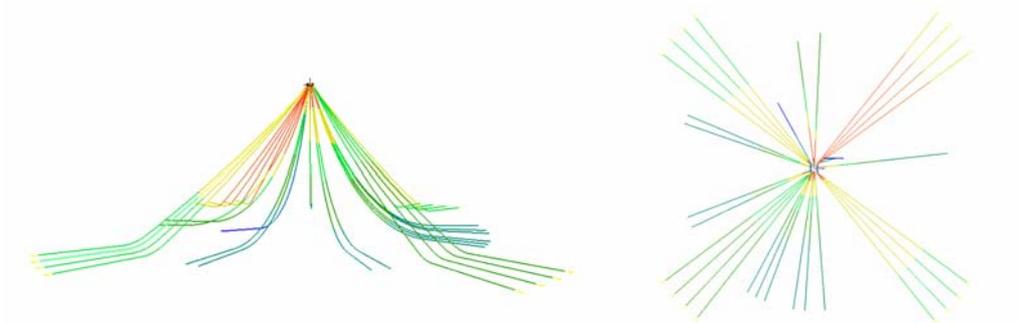


Figura 72 – Modelo 30 linhas.

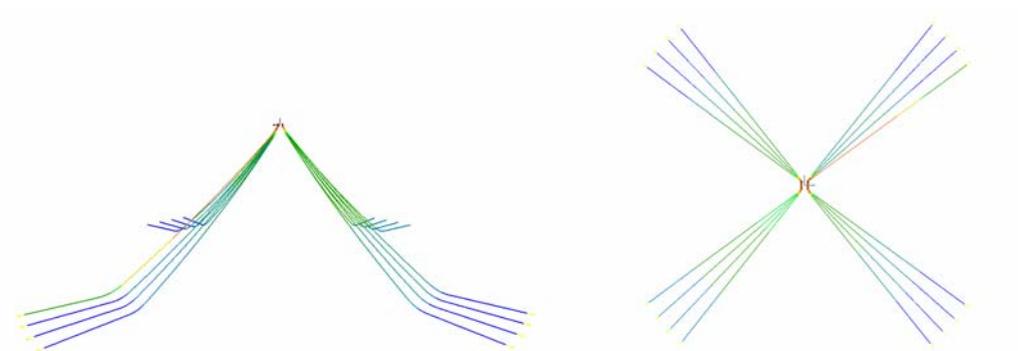


Figura 73 – Modelo 16 linhas.

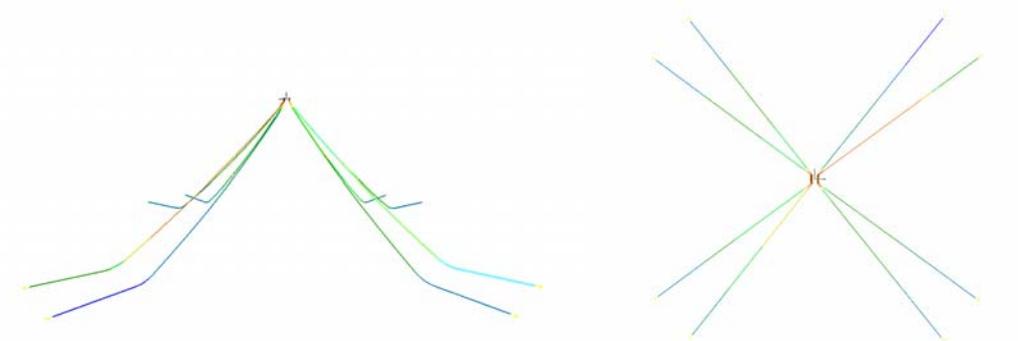


Figura 74 – Modelo 8 linhas.

Mais adiante são apresentados os resultados dos casos de carregamento avaliados para o modelo da semi-submersível. O caso C1 corresponde ao carregamento extremo combinado por onda e correnteza para um estado de mar irregular. Em seguida, o caso C2 considerando um carregamento de fadiga, combinando onda e correnteza para um estado de mar regular. Vale ressaltar que o equilíbrio dinâmico é estabelecido sem considerar anteriormente o equilíbrio estático do modelo.

Caso 1: Onda e Correnteza Extrema – Mar Irregular

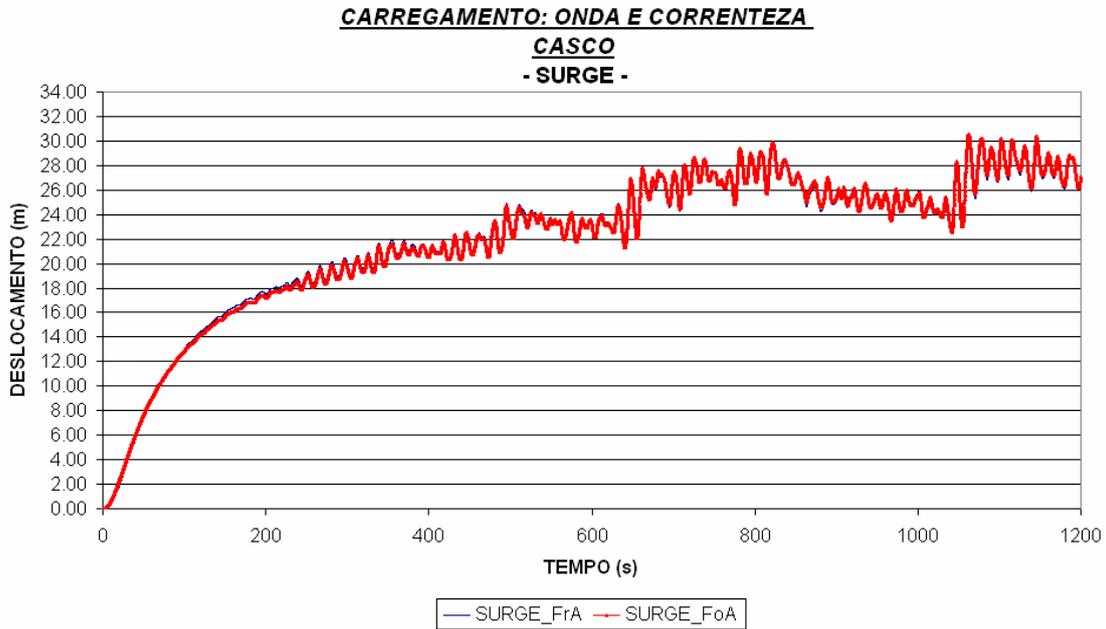


Figura 75 – Movimento de Surge.

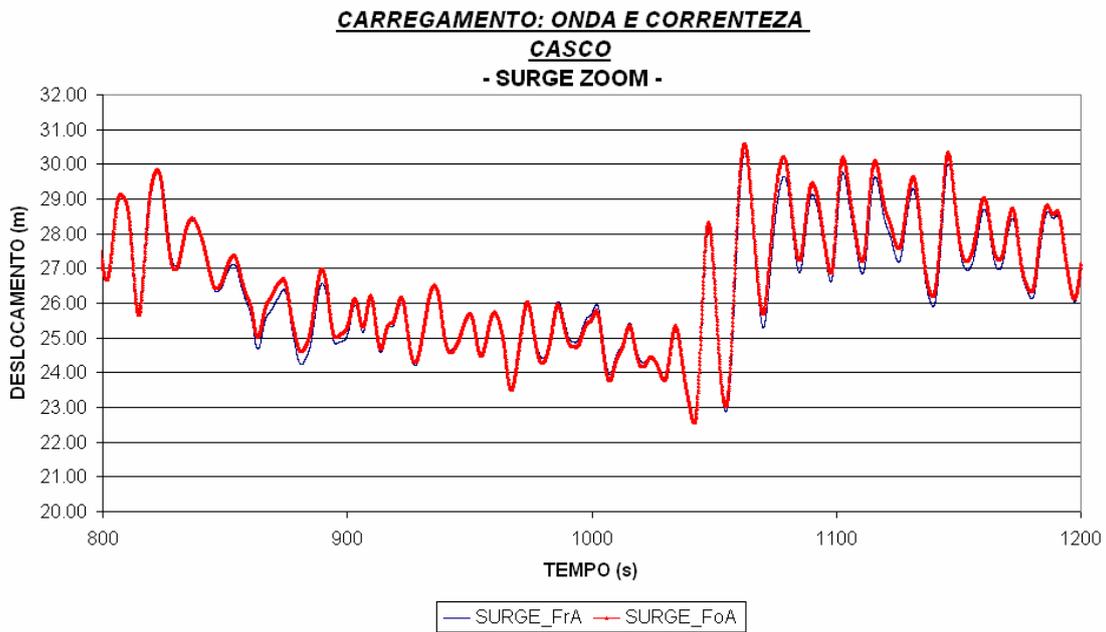


Figura 76 – Movimento de Surge (zoom).

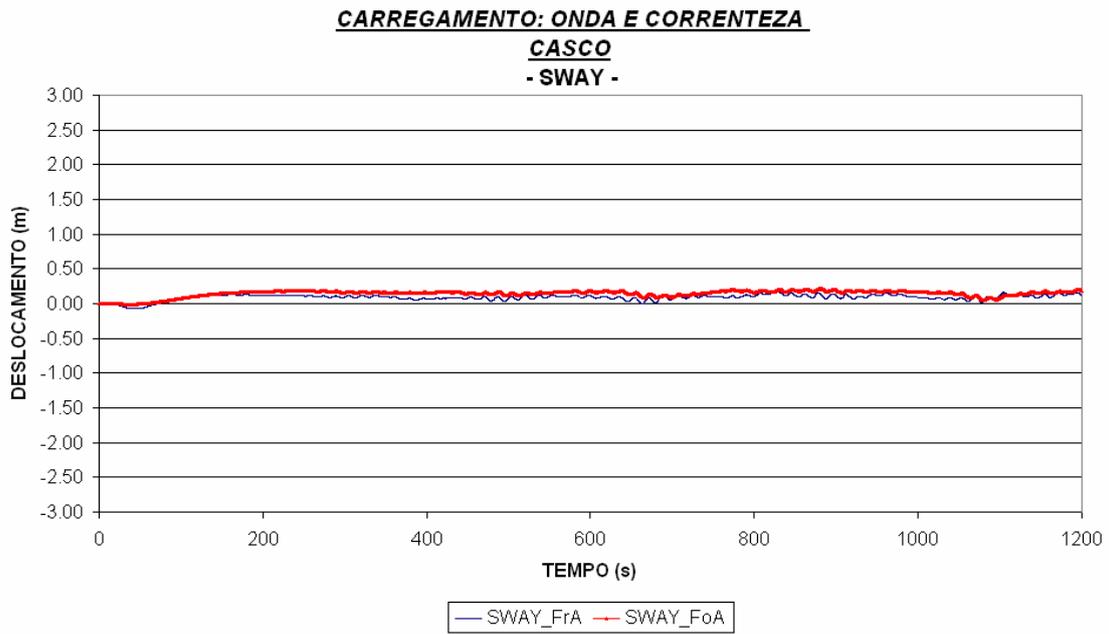


Figura 77 – Movimento de Sway.

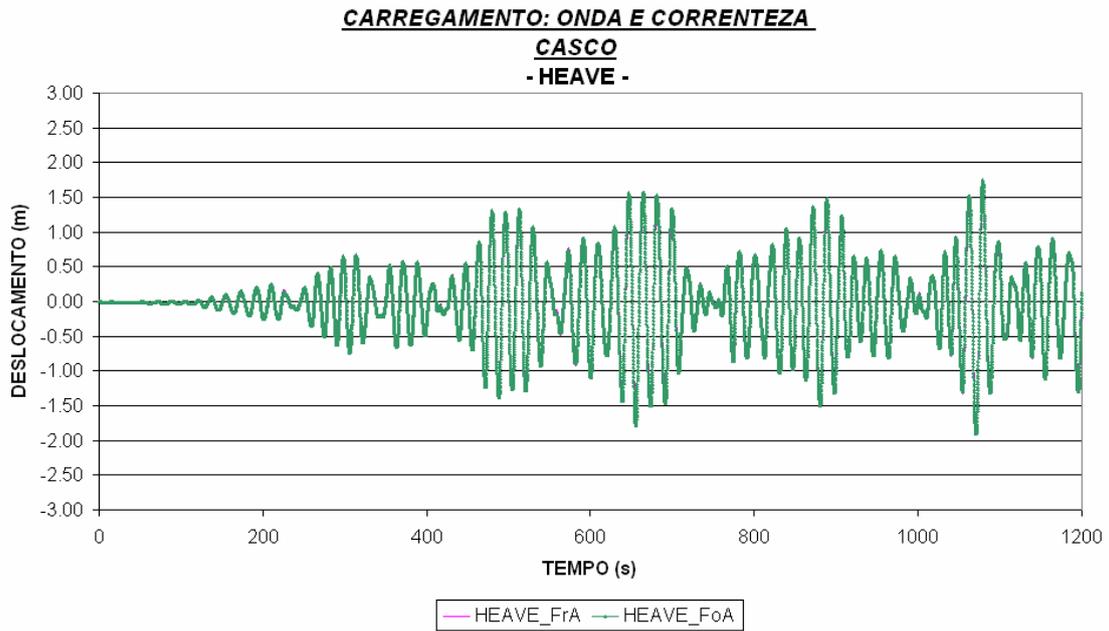


Figura 78 – Movimento de Heave .

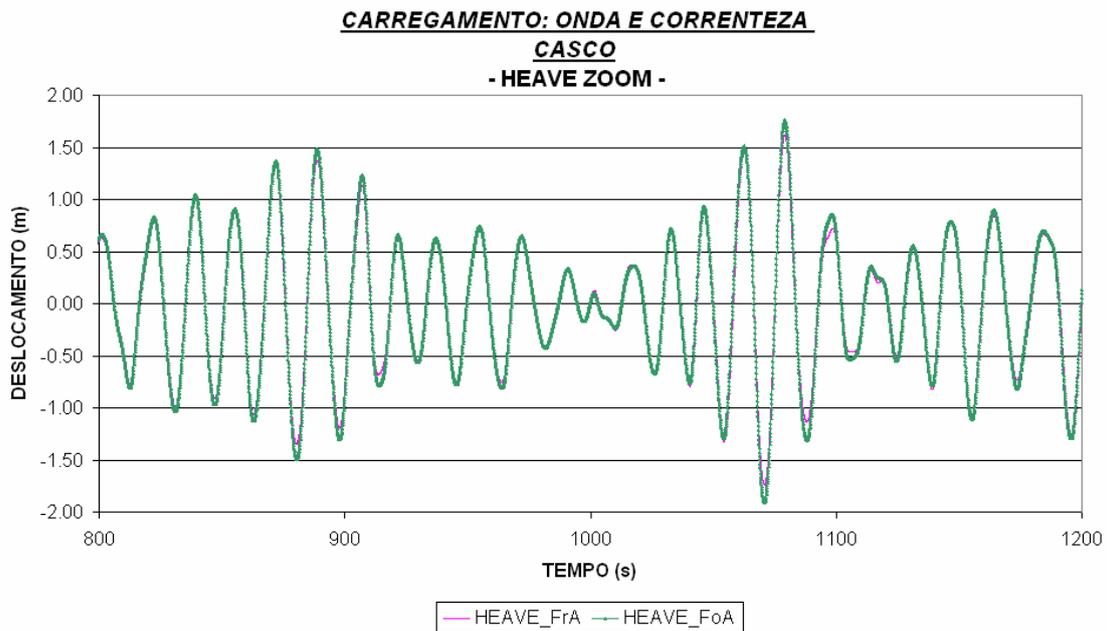


Figura 79 – Movimento de Heave (zoom).

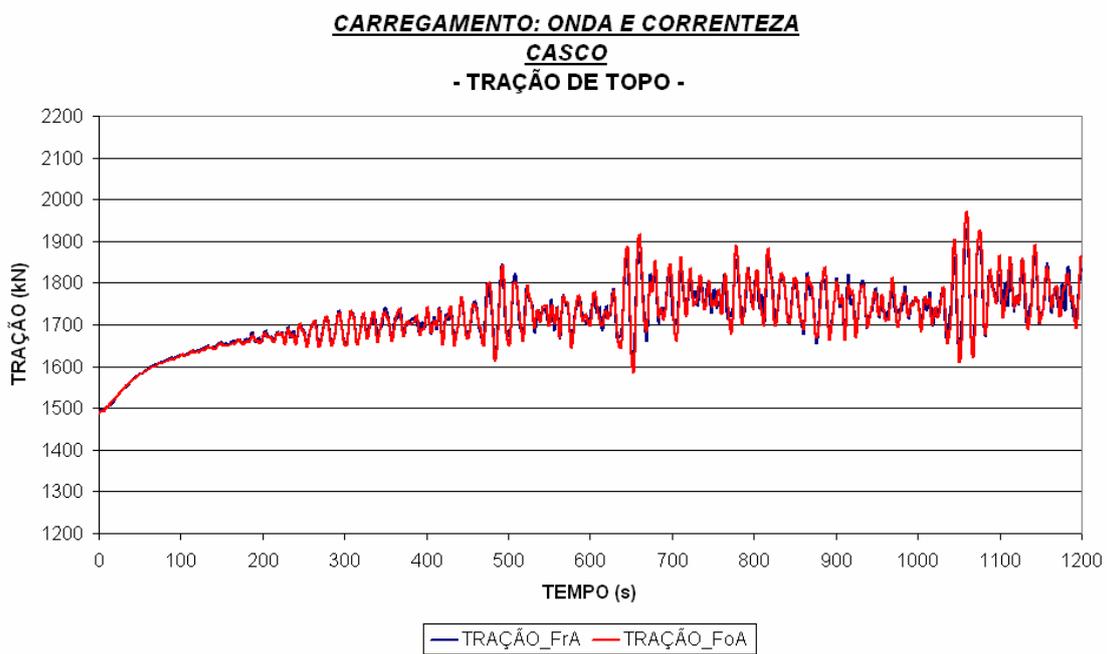


Figura 80 – Tração de topo na linha de ancoragem.

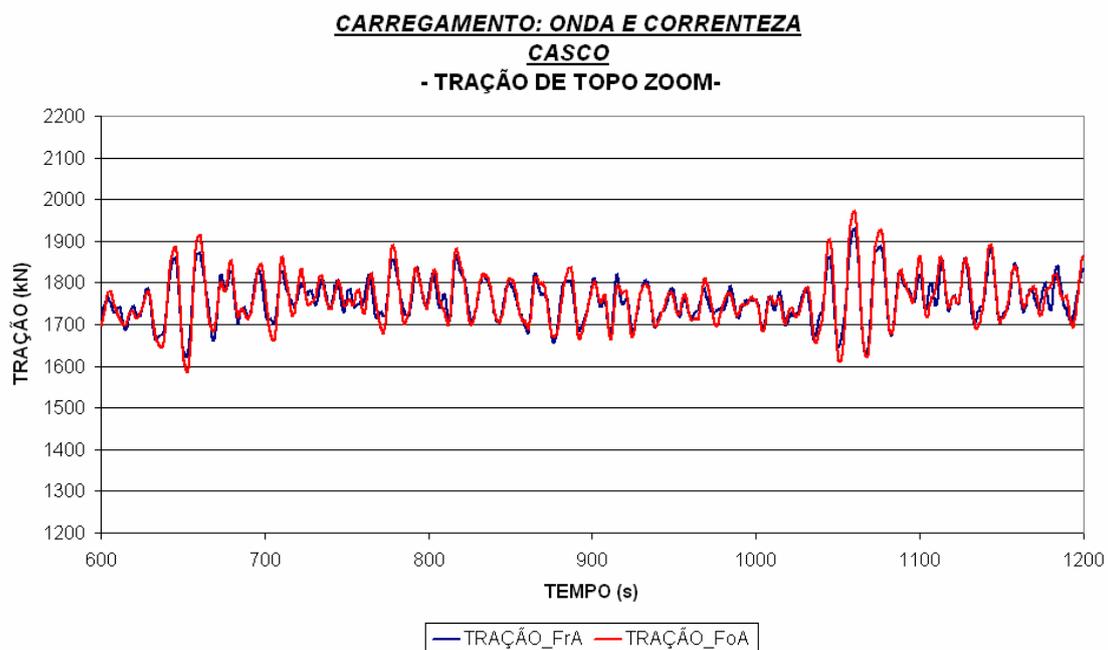


Figura 81 – Tração de topo na linha de ancoragem (zoom).

A seguir, são apresentados na Tabela 15 os valores estatísticos de média e desvio padrão obtidos durante a simulação numérica para a avaliação da tração de topo em uma das linhas de ancoragem mais tracionadas do sistema de produção.

Tabela 15 – Resultados comparativos de tração de topo.

Metodologias de Análise	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)
Fracamente Acoplada	1761,63	47,76
Fortemente Acoplada	1763,62	57,08

Caso 2: Onda e Correnteza de Fadiga – Mar Regular

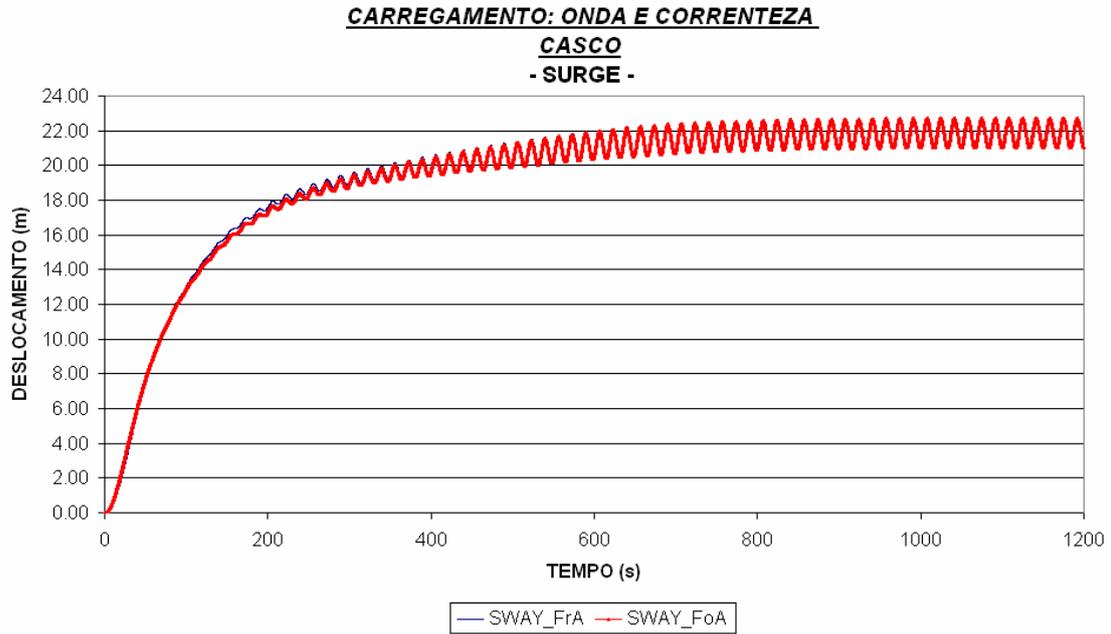


Figura 82 – Movimento de Surge.

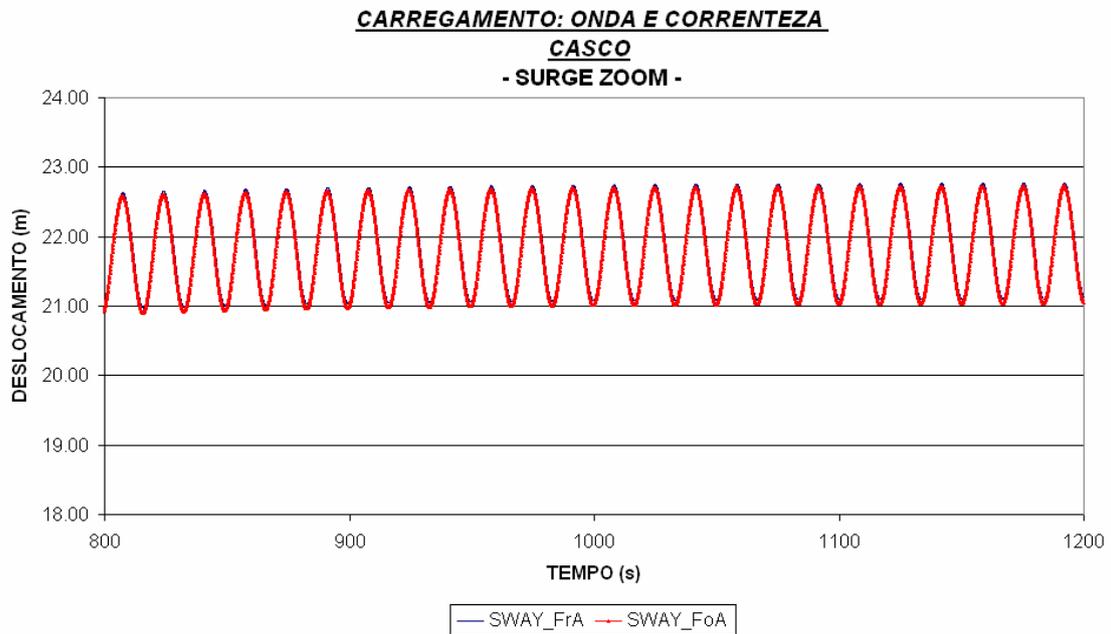


Figura 83 – Movimento de Surge (zoom).

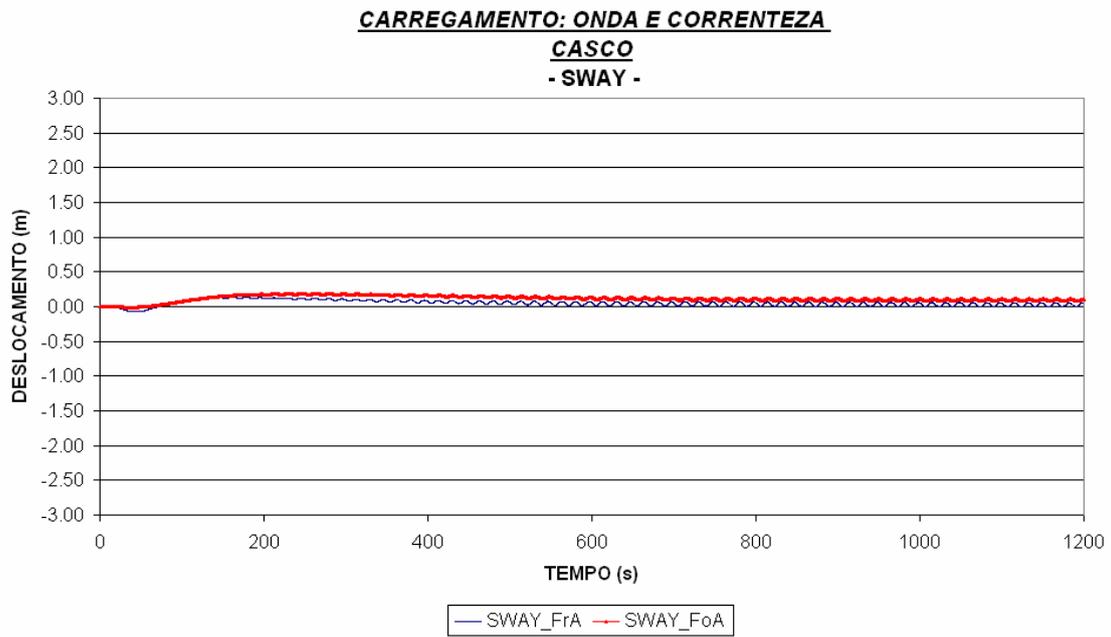


Figura 84 – Movimento de Sway.

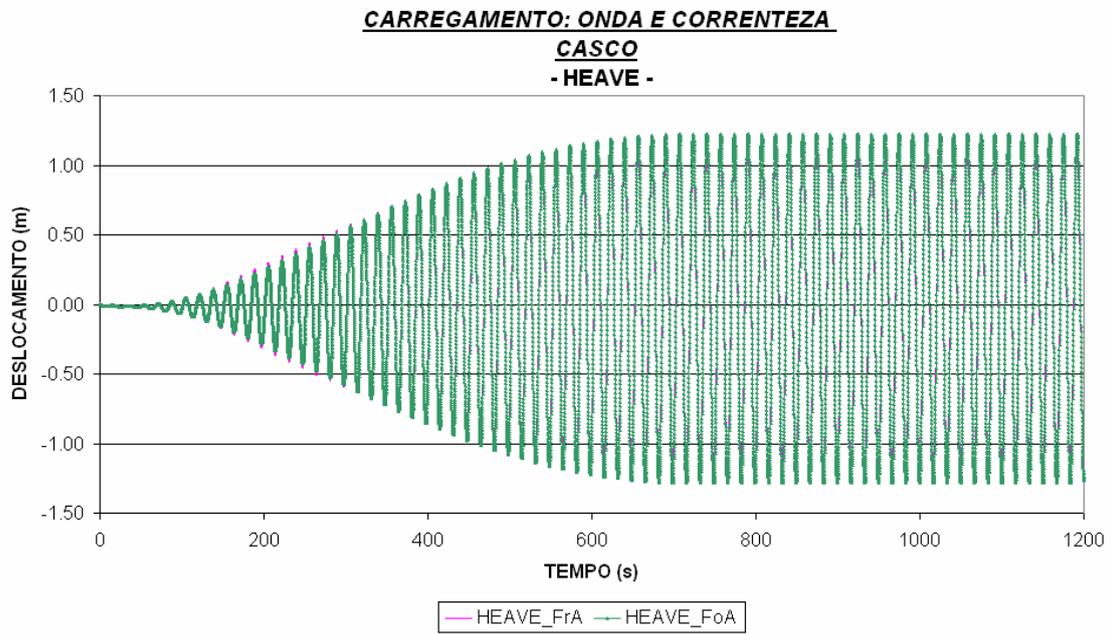


Figura 85 – Movimento de Heave.

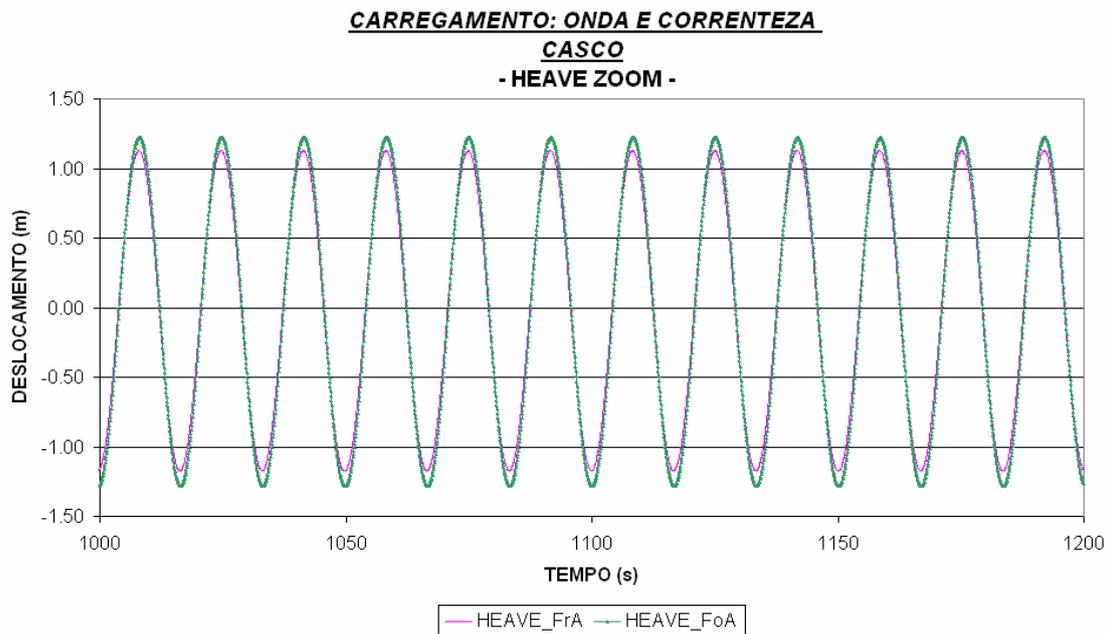


Figura 86 – Movimento de Heave (zoom).

Mais uma vez verificou-se para um modelo mais robusto e complexo, por meio das curvas apresentadas acima, a excelente concordância nos resultados de movimentos de *Surge*, *Sway* e *Heave*, assim como, para a avaliação de resultados de tração de topo em ambas as metodologias acopladas. Deste modo, validando a metodologia **FoA** implementada, e atestando a confiabilidade dos resultados apresentados para os modelos **FrA**.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo implementar junto ao programa Prosim, desenvolvido de forma cooperativa por pesquisadores do LAMCSO/COPPE (Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas *Offshore*) e do CENPES/Petrobras, a metodologia de análise denominada Fortemente Acoplada. Adicionalmente, visou-se a avaliação do referido modelo acoplado com a metodologia Fracamente Acoplada já existente no programa computacional.

O desenvolvimento da metodologia Fortemente Acoplada além de ter sido incorporada no Prosim como mais uma opção de análise, permitiu verificar e confirmar (uma vez que a metodologia **FoA** se configura como uma estratégia mais realista) a eficácia modelo Fracamente Acoplado, o qual é extensivamente empregado no programa Prosim.

Para a verificação da metodologia desenvolvida neste trabalho e sua comparação com a forma de acoplamento “fraco”, três modelos numéricos de diferentes características foram utilizados. Desde um sistema mais simples, como foi o caso da bóia, passando pela análise da semi-submersível ITTC simplesmente ancorada, até chegar a um sistema de grande porte e mais complexo, como foi o caso da semi-submersível P-001, com 63 linhas, situada numa lâmina d’água de 1800 metros.

Diferentes tipos de carregamentos foram adotados de modo a verificar a confiabilidade dos resultados. Para tal finalidade foram aplicados carregamentos de vento, correnteza e onda, sendo esta última, definida para estados de mar regular e irregular, e ainda para ondas de maior e de menor amplitude (onda extrema e de fadiga).

Para todos os casos avaliados, tanto os resultados de movimentos quanto os de trações de topo das linhas mostram-se excelentes, onde a equivalência entre as respostas foi obtida em todas as análises. Devido aos modelos da bóia e ITTC possuírem um baixo número de graus de liberdade (comparados com os complexos sistemas de produção como a P-001, por exemplo), ou seja, possuírem uma matriz global relativamente pequena, o desempenho computacional para o modelo Fortemente Acoplado foi garantido. Além disso, pôde-se observar ainda que o modelo **FoA** requer um menor número de iterações para atingir o equilíbrio não-linear do sistema (pelo

método de N-R associado ao algoritmo de integração no tempo de *Newmark*). Assim, apresentando-se computacionalmente mais eficiente se comparado com o modelo Fracamente Acoplado.

A partir dos quatro sistemas avaliados para a plataforma P-001 (63, 30, 16 e 8 linhas), onde foi avaliada a eficiência computacional entre cada metodologia, notou-se que sistemas com um número maior de linhas exigem um esforço computacional muito grande por parte do modelo Fortemente Acoplado, devido ao seu esquema de solução da equação de movimento, dado pela matriz global única. Por esta razão, seu desempenho computacional é penalizado, conduzindo o modelo Fracamente Acoplado a possuir um custo computacional bem menor. Neste caso, o tamanho da matriz passa a “comandar” no tempo de processamento, sendo mais relevante que as iterações necessárias para a convergência do sistema.

Desta maneira, o objetivo do trabalho foi atingido com sucesso, onde rotinas especiais foram desenvolvidas e adicionadas junto ao código computacional do programa Prosim, estabelecendo com isso mais uma opção de análise. Além disso, tal metodologia caracterizou-se como uma importante estrutura computacional para o desenvolvimento dos próximos trabalhos, como estudos relativos à aplicação de métodos de redução de base [40], mencionados mais adiante.

7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como descrito ao longo do trabalho, a metodologia implementada apresenta ainda algumas particularidades a serem aprimoradas.

É o caso, por exemplo, da consideração da matriz de massa que caracteriza o corpo flutuante. Tal matriz é adotada no modelo Fortemente Acoplado considerando somente os termos de massa relativos à diagonal principal. Tal fato deve-se a própria estrutura dos algoritmos do programa, que considera as matrizes de massa dos elementos finitos que representam as linhas somente para os termos da diagonal. Como no modelo “forte” o modelo hidrodinâmico do casco está representado na malha de elementos das linhas, por meio de nós/elementos adicionais, tal consideração foi assumida de modo a não ter que se alterar o código computacional do programa para adequar esta característica. Para tanto poderia ser sugerida a readequação de algoritmos

do programa para que uma representação mais precisa da matriz de massa do casco seja considerada.

Sabe-se que o programa Prosim tem passado por uma constante otimização em suas rotinas já implementadas, sempre com intuito de minimizar o custo computacional voltado para análises acopladas. Podem ser citadas, estratégias de particionamento da matriz global para a solução do sistema de equações, equivalentes por exemplo, à técnica de decomposição de domínio apresentada em [19]. Neste sentido, deve-se também continuar trabalhando no aperfeiçoamento da nova metodologia desenvolvida, buscando-se obter um programa de análise cada vez mais eficiente.

Além disso, o uso da metodologia Fortemente Acoplada pode se mostrar promissora quando associada a novos estudos sobre novos métodos de solução de problemas dinâmicos não-lineares, com as particularidades encontradas em modelos acoplados de plataformas, como os que vêm sendo efetuados em [41]. Por exemplo, sabe-se que métodos de redução de base são altamente promissores no sentido de fornecer soluções eficientes e com menor custo computacional [30], e poderiam ser empregados, por exemplo, no contexto de uma metodologia híbrida, na análise acoplada de movimentos [1], onde o foco principal é nos movimentos do casco da plataforma. No entanto, o uso de métodos de redução em modelos acoplados só é viável com a metodologia Fortemente Acoplada, já que o procedimento de prescrever deslocamentos no topo de cada linha, que é empregado na metodologia Fracamente Acoplada, prejudica o uso da técnica de redução.

Portanto, a combinação da metodologia Fortemente Acoplada apresentada neste trabalho poderia ser combinada com um método de redução de base, de modo a fornecer uma ferramenta robusta e eficiente para o projeto de sistemas flutuantes de produção.

8. REFERÊNCIAS

- [1] SENRA, S.F., *Metodologias de Análise e Projeto Integrado de Sistemas Flutuantes para Exploração de Petróleo Offshore*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [2] CORRÊA, F.N., *Aplicação de Metodologias Híbridas em Estudos Paramétricos sobre o Comportamento de Sistemas Offshore*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [3] WAMIT, *A Radiation-Diffraction Panel Program for Wave-Body Interactions*. Version 5.3, User Manual, Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [4] WADAM, *Wave Analysis by Diffraction and Morison theory*. Version 8.1, User Manual, Det Norske Veritas, 2005.
- [5] SIMO, *Theory Manual*. Version 3.4, Marintek, 2004.
- [6] FUCATU, C.H., *Desenvolvimento de um Simulador Dinâmico para Análise de Navios Amarrados*. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, Brasil, 1998.
- [7] ANFLEX – *Análise Não-Linear de Risers e Linhas de Ancoragem*. Versão 3.0 - Manual de Entrada de Dados, DIPREX/SEDEM/CENPES/PETROBRAS, 1996.
- [8] RIFLEX, *Theory Manual*. Version 3.4, Marintek, 2005.
- [9] ORMBERG, H, LARSEN, K., “Coupled Analysis of Floater and Mooring Dynamics for a Turret-Moored ship”. *Applied Ocean Research* 20, pp. 55-67, 1998.
- [10] ORMBERG, H., FYLLING, I. J., LARSEN, K., et al., “Coupled Analysis of Vessel Motions and Mooring and Riser System Dynamics”. *OMAE*, v I-A, Offshore Technology, pp. 91-100, 1997.
- [11] JACOB, B.P., Masetti, I.Q., *Prosim – Coupled Numerical Simulation of the Behavior Of Moored Semisubmersible Units*. COPPETEC-Petrobras Internal Report, Rio de Janeiro, 1997.
- [12] JACOB, B.P., *Programa Prosim: Simulação Numérica do Comportamento de Unidades Flutuantes Ancoradas*. Versão 3.0, Manual Teórico, COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2006.

- [13] HOOFT, J.P., *Advanced Dynamics of Marine Structures*. John Wiley & Sons, USA, 1982.
- [14] PAULING, J.R., *TDSIM6 – Time Domain Platform Motion Simulation with Six Degrees of Freedom*. Theory and User Guide, 1992.
- [15] FUCATU, C., NISHIMOTO, K., “*Implementação de Modelos Hidrodinâmicos de Navios no sistema Prosim*”. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, 2003.
- [16] DEEPC – *Deep Water Coupled Floater Motion Analysis*. Version 3.0 – User Manual, Det Norske Veritas, 2005.
- [17] JACOB, B.P., SILVEIRA, E.S.S., CORRÊA, F.N., et al., “TPN: Coupled Methodologies for Analysis of Mooring Systems and Risers”, *Anais do 19º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore – SOBENA*, CD-ROM, pp. 1-11, 2002.
- [18] LIMA, A.L., *Avaliação de Metodologias de Análise de Unidades Estacionárias de Produção de Petróleo Offshore*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [19] RODRIGUES, M.V., *Algoritmos Otimizados para análise acoplada de Sistemas Flutuantes na Exploração de Petróleo Offshore*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [20] RODRIGUES, M.V., CORRÊA, F.N., JACOB, B.P., “Implicit Domain Decomposition Methods for Coupled Analysis of Offshore Platforms”. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, v. 23 no 6 pp. 599-621, DOI: 10.1002/cnm.945, John Wiley & Sons, UK/USA, 2007.
- [21] API RP 2SK, *Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. American Petroleum Institute, Second Edition, 1997.
- [22] ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA, *Metoccean Data*. I-ET-3000.00-1000-941-PPC-001, Petrobras/Cenpes/PDP, 1999.
- [23] CHAKRABARTI, S.K., *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Computational Mechanics Publications / Springer-Verlag, 1987.
- [24] NEWMAN, J.N., *Marine Hydrodynamics*. MIT Press, Cambridge, 1977.
- [25] MORISON, J.R., O’BRIEN, M.P., JOHNSON, J.W., et al, “The Force Exerted by Surfaces Waves on Piles”. *Petrol. Trans.*, AIME, no 189, 1950.

- [26] FALTINSEN, O.M., *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.
- [27] LEVY, L.A.P., *Análise de Movimentos de Corpos Flutuantes no Domínio do Tempo*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1989.
- [28] API RP 2A, *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*. Working Stress Design, RP 2A, Twentieth Edition, American Petroleum Institute, July 1, 1993.
- [29] COOK, R. D.; MALKUS, D. S., PLESHA, M.E, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. Third Edition, John Wiley & Sons, 1989.
- [30] JACOB, B.P., *Estratégias Computacionais Para Análise Não-Linear Dinâmica de Estruturas Complacentes para Águas Profundas*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1990.
- [31] BATHE, K.J., *Finite Element Procedures*. New Jersey, Prentice-Hall, 1996.
- [32] BELYTSCHKO, T., An Overview of Semidiscretization and Time Integration Procedures, *Computational Methods for Transient Analysis*. eds. Belytschko T, Hughes TJR, 1-65, 1983, Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- [33] CRISFIELD, M.A., “A Consistent Co-Rotational Formulation for Non-Linear, Three-Dimensional, Beam-Elements”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 81, pp. 131-150, 1990.
- [34] MATHISEN, K.M., *Large Displacement Analysis of Flexible and Rigid Systems Considering Displacement-Dependent Loads and Nonlinear Constraints*. Division of Structural Engineering/ The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, 1990.
- [35] MOURELLE, M.M., *Análise Dinâmica de Sistemas Estruturais Constituídos por Linhas Marítimas*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1993.
- [36] JACOB, B.P. e EBECKEN, N.F.F., “An Optimized Implementation of the Newmark/Newton-Raphson Algorithm for the Time Integration of Nonlinear Problems”. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 10 pp. 983-992, John Wiley & Sons, UK/USA, 1994.
- [37] DNV/POS MOOR, *Rules for Classification of Mobile Offshore Units*. Part 6 chapter 2, Position Mooring (POS MOOR), Det Norske Veritas, 1989.

- [38] TAKAGI M., TAKEZAWA S., TANAKA K., et al., “A Comparison of Methods for Calculating the Motion of a Semi-Submersible”. *Ocean Engineering*, v. 12, No. 1. pp. 45-97, 1985.
- [39] TAKEZAWA S., HIRAYAMA T., MOROOKA C.K. – “A Practical Calculation Method of a Moored Semi-Submersible Rig Motion in Waves (On the Effects of Moored Water Depth and Mooring Systems)”. *The Journal Of The Society Of Naval Architects And Ocean Engineering Of Japan*, Tokyo, Japão, pp. 67-82, 1984.
- [41] CORRÊA, F.N., *Análise Modal Acoplada de Sistemas Flutuantes de Produção de Petróleo*. Seminário de Qualificação D.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

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](#)