



AVALIAÇÃO DE METODOLOGIA DE PROJETO COM ANÁLISE
ACOPLADA PARA PLATAFORMA DO TIPO TLP

Denis Alvin Liang

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Rio de Janeiro
Setembro de 2009

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIA DE PROJETO COM ANÁLISE
ACOPLADA PARA PLATAFORMA DO TIPO TLP

Denis Alvin Liang

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) 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. Paulo Maurício Videiro, D.Sc.

Prof. Fabrício Nogueira Corrêa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2009

Liang, Denis Alvin

Avaliação de Metodologia de Projeto com Análise Acoplada para Plataforma do tipo TLP/ Denis Alvin Liang.- Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

X, 169p.:il.; 29,7 cm

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 166-169.

1. Estruturas *Offshore*. 2. Plataforma TLP. 3. Análise Dinâmica Acoplada. I. Jacob, Breno Pinheiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*À minha esposa Marisa,
à nossa filha Beatriz
e aos meus pais Liang e Terezinha*

AGRADECIMENTOS

À minha família, pela compreensão e incentivo.

Ao orientador Breno Pinheiro Jacob pela oportunidade, compreensão, estímulo constante, dedicação e valiosos ensinamentos durante a realização deste trabalho.

Ao professor Gilberto Bruno Ellwanger pelo entusiasmo com que me recebeu no curso de Mestrado, por ter apoiado e acreditado em mim desde o início.

Ao amigo Fabrício Nogueira Corrêa que de forma tão incrivelmente paciente e alegre sempre me auxiliou nas dificuldades que foram surgindo.

Ao amigo do CENPES Luiz Henrique Moraes Alves que como especialista em unidades TLP transmitiu seus conhecimentos de forma espontânea e entusiasmada, surpreendendo e contagiando-me com o ânimo que demonstrava ao ensinar e contribuir para este trabalho.

Ao engenheiro do CENPES Glauco de Deus Ribeiro pela força e ânimo nos momentos mais difíceis.

Aos engenheiros Celso Ayabe, Paulo Pastore e todos os colegas da Petrobras que contribuíram para a realização deste trabalho, a minha mais sincera gratidão.

Ao consultor Paulo Maurício Videiro e ao gerente Roberto Najar Bazolli pelo suporte, apoio e por criar as condições e recursos necessários para realização deste trabalho.

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

AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE PROJETO COM ANÁLISE ACOPLADA
PARA PLATAFORMA DO TIPO TLP

Denis Alvin Liang

Setembro/2009

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Programa: Engenharia Civil

As atividades de exploração de petróleo *offshore* no Brasil têm avançado em campos situados em águas cada vez mais profundas, tendência confirmada pelas recentes descobertas nas áreas denominadas de Pré-sal. Para o projeto de sistemas de produção nestes cenários são necessárias ferramentas computacionais que têm sido desenvolvidas recentemente, baseadas em análises dinâmicas acopladas, que consideram rigorosamente a interação existente entre o comportamento hidrodinâmico da unidade e o comportamento hidrodinâmico e estrutural das linhas.

As ferramentas numéricas tradicionalmente utilizadas, baseadas em metodologias de análise desacopladas, possuem custos computacionais reduzidos, mas não consideram a interação completa entre comportamento do casco/comportamento das linhas o que leva a resultados que se afastam do comportamento real.

Este trabalho tem como objetivo comparar os resultados de análises realizadas com formulações acopladas face a resultados de análises com formulações desacopladas, em um sistema de produção com unidade tipo *Tension Leg Platform* (TLP). O conhecimento preciso da diferença entre as ferramentas baseadas em análises acopladas e desacopladas fornecerá ao engenheiro maior subsídio para estabelecer a aplicabilidade e uso de cada uma, nas diferentes fases do projeto.

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

EVALUATION OF DESIGN METHODOLOGIES WITH COUPLED ANALYSIS
FOR TLP UNITS

Denis Alvin Liang

September/2009

Advisor: Breno Pinheiro Jacob

Department: Civil Engineering

Offshore oil exploitation activities in Brazil have been advancing towards fields in deeper waters, this tendency was confirmed with the new discoveries in the areas assigned as Pre-salt. For the production systems design at these deep waters it is needed calculation tools recently developed. These tools are based in coupled dynamic analysis, considering rigorously the interaction between hydrodynamic behavior of the hull and hydrodynamic/structural behavior of the lines.

The numerical tools used to be employed in past designs, based at methodologies of uncoupled analysis, have reduced CPU costs. However, they don't consider the complete interaction between the behavior of hull and the behavior of lines, this leads to results that would not be in accordance to the real behavior.

The objective of this work is to compare the results from analysis based on coupled approach with the results from analysis based on uncoupled approach, the production system analyzed was a TLP (Tension Leg Platform) system. An accurate knowledge of differences between the tools based on coupled analysis and the tools based on uncoupled analysis will give the engineer more resources to decide when each one is more applicable than other at the different design phases.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO E CONTEXTO.....	1
1.2	OBJETIVO	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	4
2	UNIDADES ESTACIONÁRIAS DE PRODUÇÃO	5
2.1	INTRODUÇÃO	5
2.2	PLATAFORMAS FIXAS.....	6
2.2.1	Jaqueta	6
2.2.2	Torre complacente.....	7
2.3	PLATAFORMAS FLUTUANTES.....	9
2.3.1	Semi-Submersíveis	9
2.3.2	FPSO	10
2.3.3	Spar.....	11
3	TLP	13
3.1	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS	13
3.2	CASCO	16
3.3	TENDÕES	19
3.4	SISTEMAS DE COMPLETAÇÃO	21
3.5	RISERS	22
3.5.1	Risers Rígidos Verticais (TTR).....	22
3.5.2	Risers em Catenária.....	26
3.5.2.1	<i>Risers Rígidos em Catenária (SCR)</i>	26
3.5.2.2	<i>Risers Flexíveis</i>	27
4	METODOLOGIAS DE PROJETO	28
4.1	INTRODUÇÃO	28
4.2	SITUAÇÕES DE PROJETO E CASOS DE CARREGAMENTO	30
4.3	ANÁLISE GLOBAL	32
4.4	METODOLOGIAS DE ANÁLISE GLOBAL.....	34
4.4.1	Metodologias Desacopladas	34
4.4.2	Metodologias Acopladas	36
4.4.3	Metodologias Híbridas	37
5	FORMULAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE	39
5.1	INTRODUÇÃO	39
5.2	SISTEMAS DE COORDENADAS	39
5.2.1	Sistema Global	39
5.2.2	Sistemas Locais	40
5.3	EQUAÇÕES DE MOVIMENTO	41

5.4	FORMULAÇÃO DAS LINHAS.....	47
5.4.1	Discretização Espacial.....	47
5.4.2	Discretização no Tempo.....	48
5.5	ALGORITMOS DE INTEGRAÇÃO	50
5.5.1	Algoritmo Runge-Kutta.....	50
5.5.2	Algoritmo de Newmark.....	53
5.6	FORMULAÇÕES DE ACOPLAMENTO	55
5.6.1	Introdução.....	55
5.6.2	Formulação Fracamente Acoplada.....	56
5.6.2.1	<i>Implementação Computacional.....</i>	<i>56</i>
5.6.3	Formulação Fortemente Acoplada.....	59
5.6.3.1	<i>Integração Simultânea das Equações de Movimento de todas as linhas</i>	<i>59</i>
5.6.3.2	<i>Implementação Computacional.....</i>	<i>60</i>
5.7	CARREGAMENTO AMBIENTAL.....	63
5.7.1	Ondas.....	63
5.7.1.1	<i>Representação Espectral.....</i>	<i>64</i>
5.7.1.2	<i>Força induzida pelas ondas.....</i>	<i>66</i>
5.7.2	Correnteza.....	72
5.7.3	Vento.....	73
6	DESCRIÇÃO DOS CASOS ESTUDADOS.....	74
6.1	INTRODUÇÃO	74
6.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA.....	74
6.2.1	Casco da TLP.....	74
6.2.2	Tendões.....	77
6.2.3	Risers.....	78
6.3	GERAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS.....	81
6.3.1	Casco.....	81
6.3.2	Tendões.....	82
6.3.2.1	<i>Mola Linear.....</i>	<i>83</i>
6.3.2.2	<i>Tendão Vertical.....</i>	<i>86</i>
6.3.2.3	<i>TautLeg.....</i>	<i>87</i>
6.3.2.4	<i>Elementos Finitos.....</i>	<i>88</i>
6.3.3	Risers.....	89
6.3.3.1	<i>TautLeg.....</i>	<i>89</i>
6.3.3.2	<i>Curva de restauração.....</i>	<i>90</i>
6.3.3.3	<i>Elementos Finitos.....</i>	<i>91</i>
6.4	DADOS AMBIENTAIS	92
6.4.1	Correnteza.....	93
6.4.1.1	<i>Expressão da força F_c para Perfil Linear de Correnteza.....</i>	<i>94</i>
6.4.2	Onda.....	97
6.4.3	Vento.....	98
6.5	SISTEMAS ESTUDADOS	99
7	RESULTADOS DOS ESTUDOS PARAMÉTRICOS.....	100
7.1	INTRODUÇÃO	100
7.2	ESTUDOS PARAMÉTRICOS EM INTERVALOS DE INTEGRAÇÃO.....	101
7.2.1	Resultados: Movimentos.....	102

7.2.2	Resultados: Trações.....	104
7.2.3	Conclusões sobre intervalo de integração	105
7.3	ESTUDOS PARAMÉTRICOS EM REFINAMENTO DE MALHA.....	106
7.3.1	Movimentos.....	106
7.3.2	Trações	108
7.3.3	Conclusões sobre refinamento de malha	109
7.4	ESTUDOS PARAMÉTRICOS EM TIPOS DE MODELAÇÃO	111
7.4.1	Modelos sem Risers.....	111
7.4.1.1	<i>Análise de Vibração Livre</i>	111
7.4.1.2	<i>Análises Dinâmicas Sem Correnteza</i>	113
7.4.1.3	<i>Análises Dinâmicas Com Correnteza</i>	130
7.4.1.4	<i>Conclusões sobre influência da correnteza</i>	142
7.4.2	Estudos Paramétricos em Tipos de Modelos de Risers.....	144
7.4.2.1	<i>Movimentos</i>	145
7.4.2.2	<i>Trações</i>	154
7.5	TEMPOS DE PROCESSAMENTO	158
8	COMENTÁRIOS FINAIS	160
8.1	CONCLUSÕES	160
8.1.1	Modelos sem risers e sem o efeito da correnteza nas linhas	161
8.1.2	Modelos sem risers e com o efeito da correnteza nas linhas.....	161
8.1.3	Modelos com risers	161
8.1.4	Considerações gerais	162
8.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	164
9	REFERÊNCIAS.....	166

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E CONTEXTO

Ao longo das últimas décadas, as práticas de projetos de unidades de produção de petróleo no mar vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de adaptarem as novas concepções e instalações de plataformas em profundidades cada vez maiores.

Quando das primeiras descobertas de petróleo na costa brasileira, houve uma proliferação de unidades fixas, particularmente de jaquetas, em profundidades hoje denominadas de águas rasas. O que possibilitou a consolidação de uma metodologia de projeto neste tipo de unidade.

Ao mesmo tempo, com o objetivo de reduzir o tempo entre a descoberta do campo e o começo da produção de óleo, a Petrobras, de forma pioneira, começou a instalar os denominados “sistemas de produção antecipada”. Estes sistemas consistiam de plataformas semi-submersíveis¹ de perfuração convertidas (adaptadas) para a produção. Desta forma era possível obter uma produção reduzida de petróleo antes da instalação e operação da plataforma fixa definitiva. O sistema de produção antecipada do campo de Enchova foi o primeiro a entrar em operação em 1977 com 120 metros de profundidade.

Com a experiência bem sucedida em “sistemas de produção de antecipada” houve uma evolução natural desta solução em sistemas de produção definitiva, baseados na conversão de semi-submersíveis de perfuração, acomodação ou qualquer outra função. Com as descobertas de grandes campos em águas mais profundas o projeto de plataformas fixas começou a resultar em estruturas economicamente inviáveis o que auxiliou ainda mais a consolidação destes sistemas de produção, baseados em unidades flutuantes.

No projeto destas unidades, empregadas cada vez mais frequentemente com o avanço da exploração em águas mais profundas, foram estabelecidas práticas de projeto nas quais as simulações numéricas seguem uma abordagem “desacoplada”. Nesta

¹ Breve descrição de Semi-submersíveis no item 2.3.1

abordagem são adotadas simplificações de forma a não considerar o casco, as linhas de ancoragem e os risers como um sistema integrado.

Com as perspectivas de recentes descobertas em águas ultra-profundas (com profundidades que superam os 2000 m) estão sendo desenvolvidas ferramentas numéricas mais elaboradas. As ferramentas tradicionalmente utilizadas baseadas numa metodologia “desacoplada” têm sido consideradas imprecisas nestes novos cenários, ou seja, as simplificações e premissas da metodologia “desacoplada” levam a resultados mais distantes dos verificados na prática. A discrepância com resultados experimentais e a evolução dos recursos computacionais motivam o desenvolvimento de ferramentas numéricas com base numa metodologia “acoplada”, que leva em consideração a interação entre casco, linhas de ancoragem e risers, constituindo assim um sistema integrado.

Trabalhos recentes [1] , [2] , [3] , [4] , [5] e [6] têm reconhecido a importância de se caminhar na direção de um projeto integrado. Os resultados destes estudos ainda servem de subsídios ao projetista para a escolha da metodologia e ferramentas associadas mais adequadas para um determinado cenário e/ou fase do projeto.

A maioria dos trabalhos realizados neste sentido consiste de avaliações dos resultados das simulações em cenários específicos, com o uso de ferramentas numéricas conforme cada metodologia, muitas vezes com o auxílio de resultados experimentais.

Devido à grande diversidade de cenários possíveis, considerando, por exemplo, a quantidade de unidades flutuantes diferentes disponíveis, torna-se necessária uma maior realização destas avaliações, de forma a consolidar a importância, o uso da ferramenta e servir de subsídio em projetos cada vez mais desafiadores com o contínuo aumento da profundidade dos sistemas de exploração *offshore*.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho propõe-se a uma avaliação da metodologia de projeto acoplada² em um sistema de produção de petróleo *offshore* específico, um sistema TLP³ (*Tension Leg Platform* ou plataforma de “pernas atirantadas”).

Trabalhos já mencionados, como [1], [4] e [5] também contam com algumas formas de avaliação da metodologia acoplada, seu enfoque, porém, é para sistemas do tipo FPSO³ e Semi-submersíveis³. Um sistema com uma unidade tipo TLP, contudo, possui um comportamento distinto, com características relativamente pouco exploradas. O que torna a avaliação para este sistema importante.

Os trabalhos citados efetuam avaliações para novos cenários das bacias petrolíferas da costa brasileira, utilizam ferramentas numéricas e formulações iguais ou semelhantes às utilizadas neste trabalho, e enfatizam a necessidade do uso de ferramentas baseadas em metodologias acopladas, para FPSOs e Semi-submersíveis. Para TLPs existem escassos trabalhos na literatura, por exemplo, pode-se citar SIRCAR[7] que em 1993 realiza uma avaliação de metodologia acoplada utilizando um código próprio, para um cenário típico do golfo do México, indicando que a metodologia desacoplada, em seu caso, produz resultados razoáveis.

A avaliação proposta neste trabalho compreende em essência do estudo comparativo de simulações numéricas de um cenário típico na Bacia de Campos, com as diferentes metodologias praticadas atualmente no projeto de unidades/sistemas *offshore*, as metodologias “desacopladas” tradicionalmente empregadas e uma metodologia “acoplada”, cada vez mais utilizada frente aos novos desafios. A comparação focou essencialmente em dois resultados provenientes das simulações: os movimentos do casco da unidade e a tração no topo das linhas.

As análises efetuadas neste trabalho utilizam o programa Prosim [8], desenvolvido pelo LAMCSO/PEC/COPPE/UFRJ em parceria com a Petrobras. Este programa incorpora uma formulação acoplada que considera numa única estrutura de dados um modelo hidrodinâmico para a representação do casco e um modelo de elementos finitos para a rigorosa representação das linhas de ancoragem e risers.

² Descrição no capítulo 4

³ Descrição no capítulo 2

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto foi estruturado em capítulos cuja breve descrição é apresentada a seguir.

O capítulo 2 apresenta as principais características dos diferentes tipos de sistemas de produção *offshore*. O intuito é se familiarizar com os conceitos e nomenclatura de cada sistema além das diferenças entre eles. Estão descritas as características mais importantes dos diferentes sistemas e plataformas.

O capítulo 3 aprofunda em detalhes o tipo de sistema de produção foco desta dissertação, sistema TLP (*Tension Leg Platform*).

O capítulo 4 apresenta as principais características das metodologias desacopladas e das metodologias acopladas, procurando estabelecer as diferenças mais importantes.

O capítulo 5 procura realizar uma rápida revisão teórica, descrevendo as formulações e equações utilizadas para a determinação dos movimentos da unidade e das linhas de ancoragem e risers, e dos esforços atuantes nestas linhas. Também são apresentadas as equações utilizadas para a determinação das forças geradas pelos agentes ambientais sobre a unidade, além das premissas, hipóteses e conceitos por trás de toda a formulação empregada no programa.

No capítulo 6 está descrito o cenário escolhido, o tipo da plataforma (TLP) e as características desta unidade, as linhas e o carregamento ambiental considerado, além dos modelos numéricos utilizados para a comparação das metodologias.

No capítulo 7 estão apresentados os resultados das simulações numéricas, procurando sempre comparar as diferentes metodologias, acoplada e desacoplada, representadas pelos diferentes modelos numéricos. Além dos efeitos da metodologia no resultado também são verificados os efeitos da variação de alguns parâmetros de simulação, e é realizada uma investigação do papel da correnteza e dos risers na diferença encontrada entre as metodologias.

O capítulo 8 apresenta as conclusões do estudo comparativo realizado neste trabalho além de propor sugestões para trabalhos futuros.

2 UNIDADES ESTACIONÁRIAS DE PRODUÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar as principais características dos diferentes tipos de sistemas de produção *offshore*.

O conjunto da estrutura principal, geralmente metálica com o objetivo de suportar todos os equipamentos, e acessórios em condições adequadas para a produção de óleo e gás, também pode ser denominado de unidade estacionária de produção (UEP).

Assim é possível classificar os sistemas de produção de acordo com as seguintes UEPs:

- Plataformas Fixas (jaqueta, torre complacente)
- Plataforma Semi-submersível
- FPSO (*Floating, Production, Storage, and Offloading*)
- Spar
- Mono coluna
- TLP (*Tension Leg Platform*)

No restante do capítulo serão descritos resumidamente alguns destes sistemas. A TLP, que é foco da presente dissertação, será descrita mais detalhadamente no capítulo 3

2.2 PLATAFORMAS FIXAS

Conforme a própria denominação, este tipo de unidade possui sua imobilidade devido à fixação no fundo do mar. É possível agrupar este tipo de unidades em alguns subgrupos.

2.2.1 Jaqueta

Unidade construída em uma estrutura metálica reticulada formada normalmente por membros tubulares. A estrutura é presa ao solo marinho na extremidade inferior através de cravação de estacas. No topo possui uma seção menor e suporta a instalação de produção, que consiste basicamente dos equipamentos de produção e estrutura associada. Estas UEPs possuem rigidez suficientemente alta para que o período natural de vibração se situe abaixo do período de excitação dos agentes ambientais. A Figura seguinte, Figura 2.1, apresenta uma jaqueta.

Estas plataformas fixas foram as primeiras utilizadas para extração de petróleo no mar. Ao longo da história, conforme novas descobertas levavam a campos mais distantes e profundos, maiores lâminas d'água, este tipo de plataforma se mostrava cada vez mais onerosa. Os altos custos de construção e instalação em grandes lâminas d'água deram espaço a novos tipos de UEPs.



Figura 2.1 Desenho artístico de uma jaqueta. Ref. [9]

2.2.2 Torre complacente

A estrutura da torre complacente possui uma seção relativamente constante quando comparada a uma jaqueta, embora em termos construtivos não haja diferenças significativas.

É presa ao solo marinho como as plataformas convencionais (jaquetas), porém, ao contrário destas é flexível, resultando em período natural de oscilação maior do que o período de excitação de agentes ambientais. Esta diferença de comportamento dinâmico está ilustrada no gráfico seguinte, Figura 2.2 – mostrando a região da resposta de jaquetas (períodos baixos) e região de respostas das torres complacentes (períodos altos) em um gráfico de fator de amplificação dinâmica.



Figura 2.2 Comparação de comportamento dinâmico jaqueta x torre complacente

A estrutura da torre reage aos agentes ambientais através de significativas deformações elásticas (complacência), o que torna a inércia (massa) da plataforma como principal responsável pela oposição ao movimento, fenômeno inverso do que ocorre em jaquetas. A flexibilidade das torres complacentes resulta em menor quantidade de aço, que por sua vez implica na possibilidade de utilização destas unidades em lâminas d'águas superiores àquelas alcançadas pelas jaquetas.

Assim como as jaquetas as torres possuem a vantagem de serem unidades de completação seca, isto é, o controle dos poços é feito por árvores de natal situadas no convés da unidade, diferentemente de UEPs com completação molhada (árvores de natal submersas) cujo controle é mais complexo e oneroso. Também é possível fazer a

perfuração e intervenção de poços através de sonda instalada no convés, economizando no fretamento de unidades de perfuração especificamente para estes serviços.

A ilustração seguinte traz um levantamento das principais torres complacentes já instaladas, Figura 2.3.

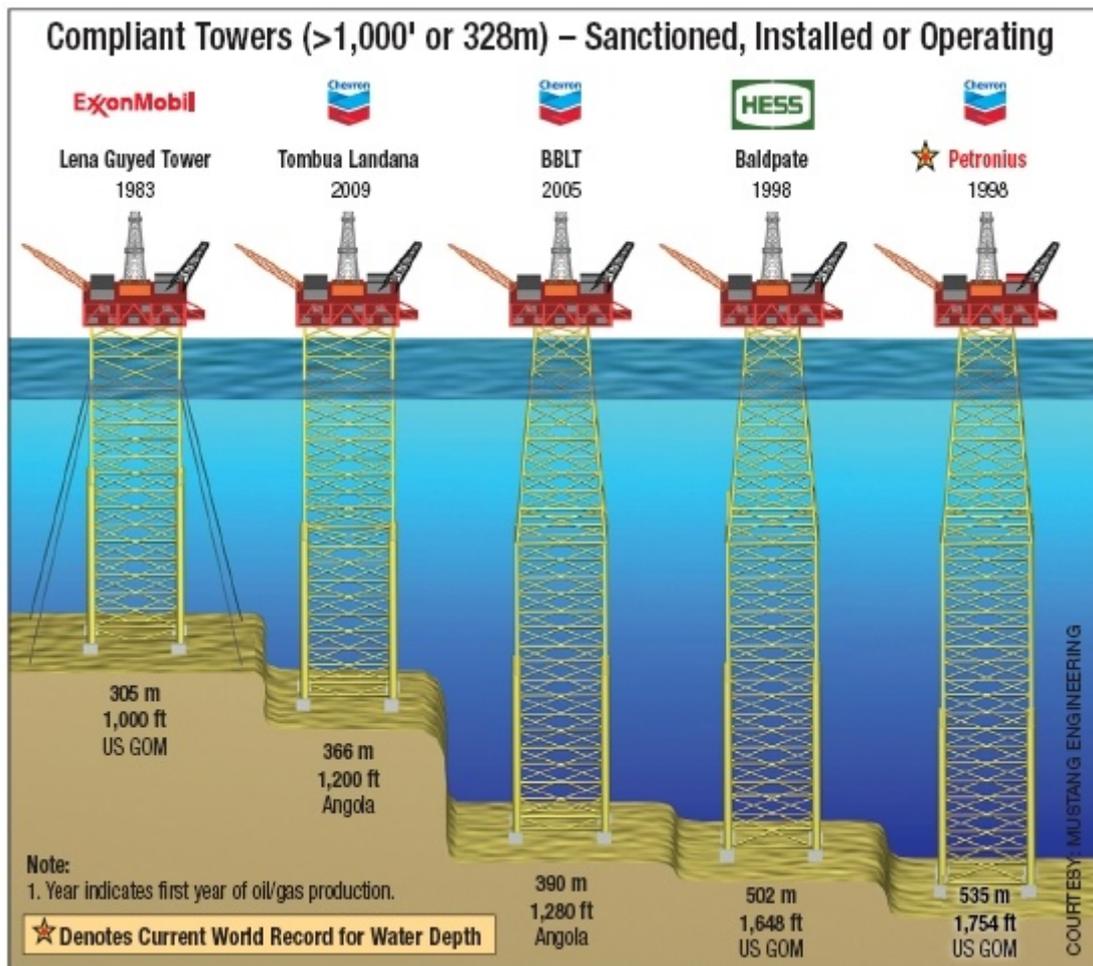


Figura 2.3 Torres complacentes. Ref. [10]

2.3 PLATAFORMAS FLUTUANTES

2.3.1 Semi-Submersíveis

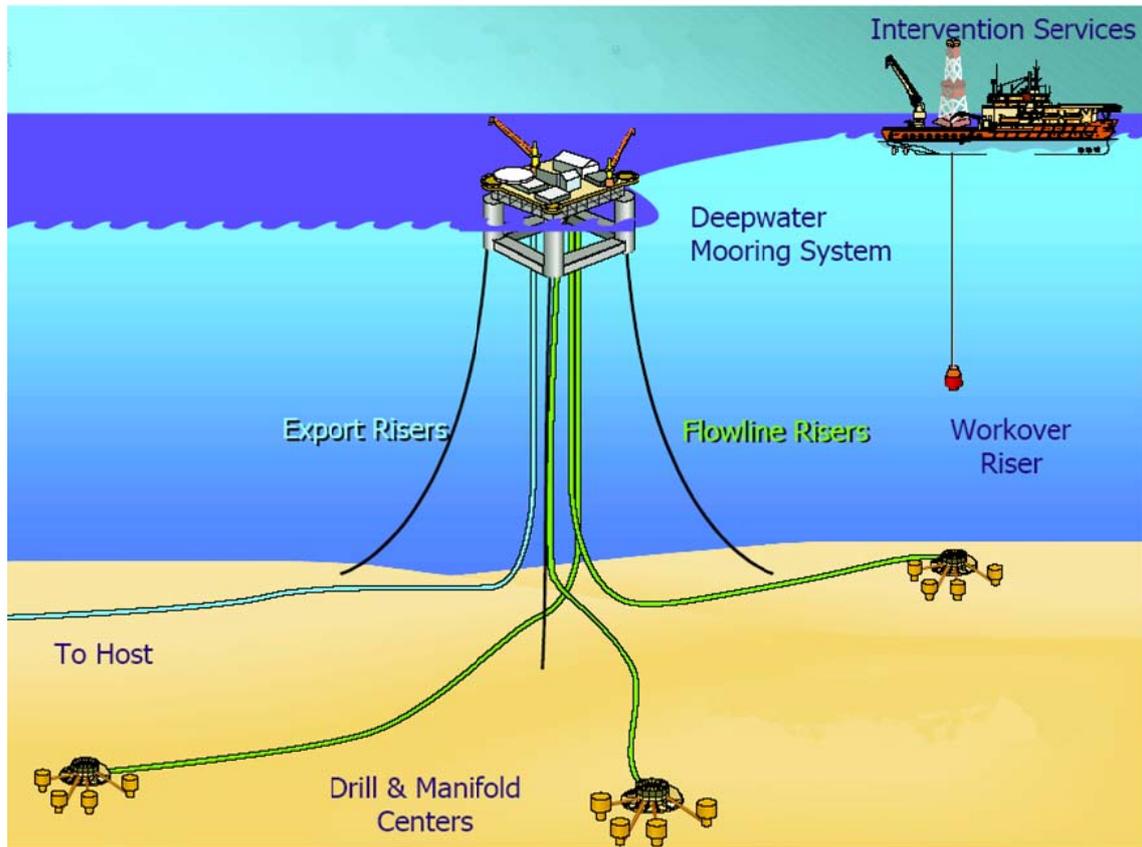


Figura 2.4 Sistema semi-submersível típico

A Figura 2.4 apresenta uma unidade do tipo semi-submersível. O casco é formado basicamente por membros verticais – as colunas – e por membros horizontais – os “*pontoons*”, sendo estes últimos responsáveis por maior parte do empuxo.

Visto que se busca a máxima restrição possível de movimentos da unidade, a maior parte do empuxo permanece submersa para minimizar o efeito das ondas. As colunas também são dimensionadas para que o período natural dos movimentos permaneça afastado do período natural dos agentes ambientais.

Como este tipo de unidade não armazena óleo toda a produção é exportada para a terra através de oleodutos, esquematicamente representado na Figura 2.4 por “*Export risers*”.

2.3.2 FPSO

Os FPSOs surgiram essencialmente do aproveitamento dos cascos de navios petroleiros que gradualmente iriam passar a operar em situação irregular, de acordo com o estabelecido em normas marítimas internacionais.

Após grandes acidentes ambientais envolvendo petroleiros, normas internacionais passaram a exigir novas características nas estruturas de navios em construção e um período máximo de operação para navios já existentes. Assim, com a proximidade do fim das atividades de transporte de óleo muitos petroleiros foram “convertidos”, isto é, sofreram as modificações necessárias para que atuassem como unidades de produção.

Normalmente um FPSO convertido utiliza os tanques existentes do petroleiro original (sem modificações consideráveis) para o armazenamento do óleo – daí o S (*Storage*). As modificações mais notáveis em uma conversão são as necessárias para capacitar a unidade a produzir óleo – daí o P (*Production*). Uma grande quantidade de equipamentos, tubulação, cabos, e outros sistemas fazem parte de uma planta de processamento de óleo que ocupa a maior parte da área do convés principal. Muitos equipamentos e sistemas também são instalados no interior do navio. Quando a quantidade de óleo armazenado chega a níveis pré-determinados efetua-se a transferência de óleo para um petroleiro, operação também denominada de “alívio” – daí o O (*Offloading*). O petroleiro que faz o alívio – ou simplesmente “aliviador” – leva o óleo até algum terminal na costa para, enfim, seguir até as refinarias. A Figura 2.5 apresenta uma unidade FPSO.



Figura 2.5 Unidade tipo FPSO

2.3.3 Spar

Este tipo de unidade flutuante é constituído por um casco de forma cilíndrica que permanece vertical suportando todas as instalações de produção na extremidade superior, conforme Figura 2.6. A ancoragem é realizada por linhas em catenária.

Devido ao grande calado, a parte inferior do casco fica distante da superfície do mar o que diminui o efeito da onda nos movimentos da unidade. Como resultado final este tipo de unidade tem os movimentos reduzidos quando comparados à semi-submersíveis e FPSOs.

Ao longo do tempo foram concebidas diferentes estruturas para o casco mantendo o mesmo princípio básico, Figura 2.6. O casco da primeira geração é constituído basicamente por uma seção circular. O casco de segunda geração apresenta a parte inferior composta por vários conveses planos suportados por uma estrutura em treliça, busca-se dessa maneira maior redução de movimentos. A terceira geração composta por vários tubos de menor diâmetro buscando maior facilidade construtiva. A Figura 2.7, apresenta as principais unidades Spar instaladas no mundo.

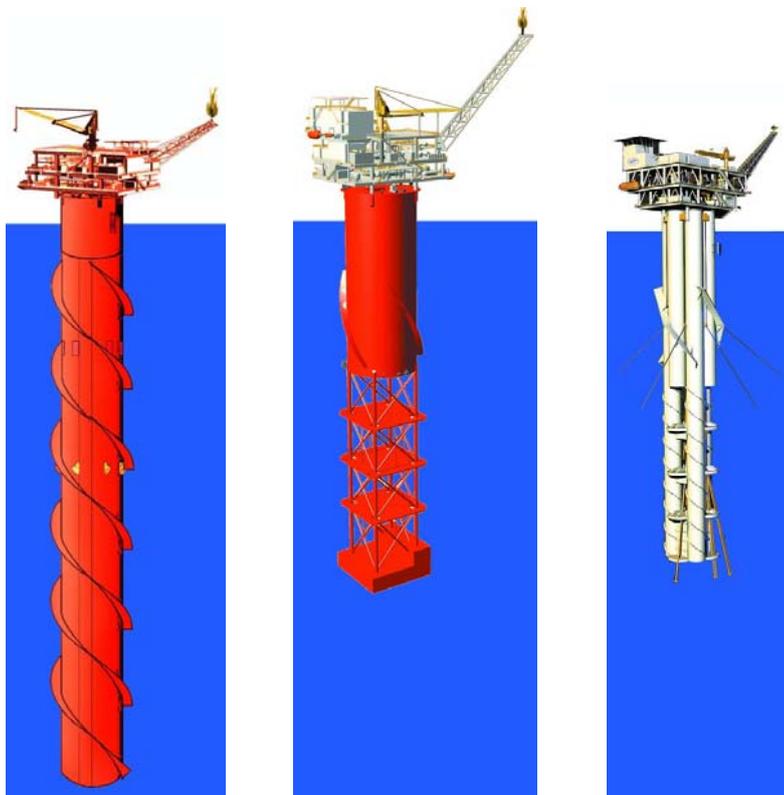


Figura 2.6 Diferentes concepções de plataformas tipo Spar

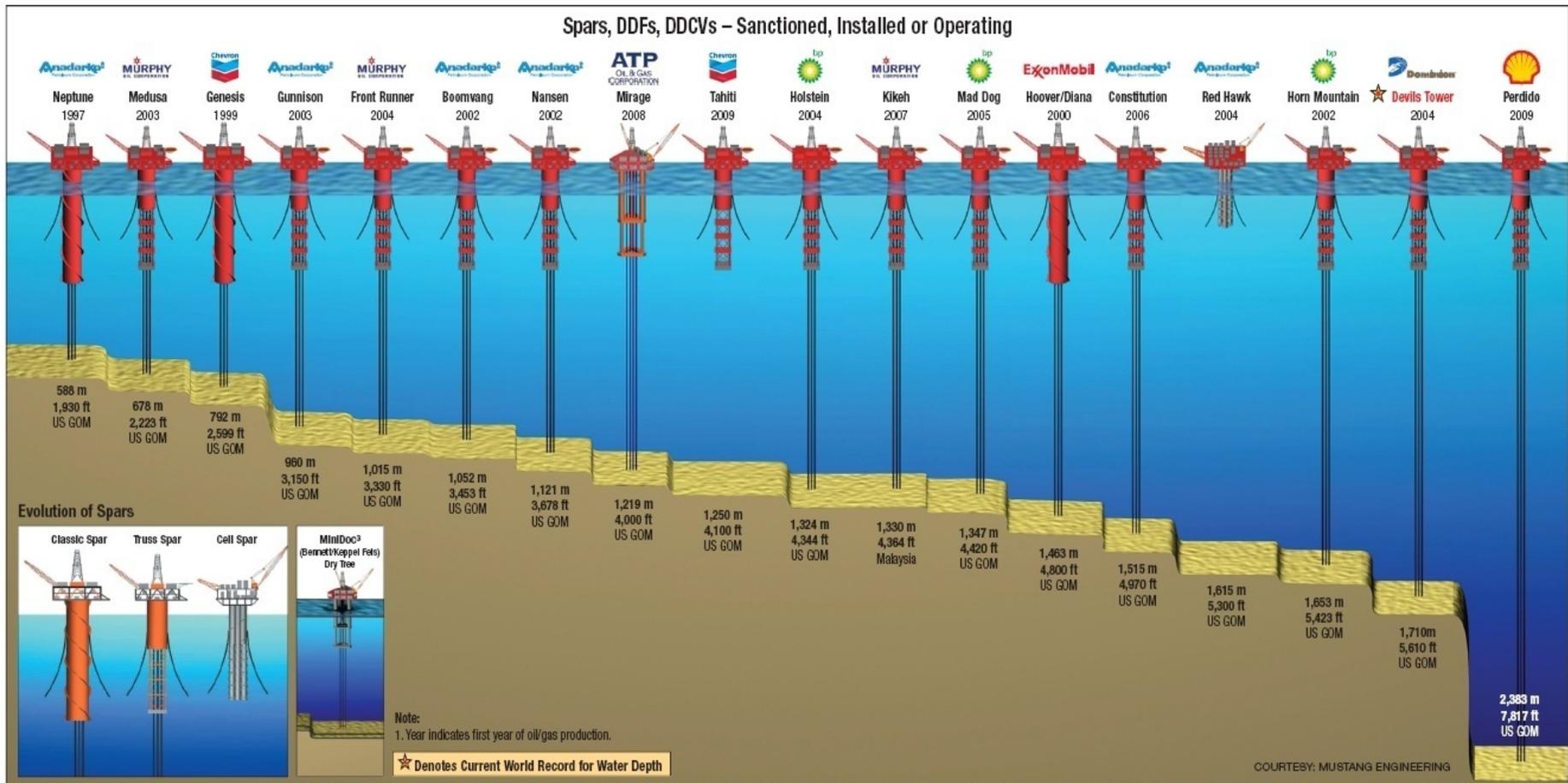


Figura 2.7 Exemplos de unidades Spar instaladas. Ref. [10]

3 TLP

3.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

A sigla refere-se a *Tension Leg Platform*, ou como é comumente encontrada na literatura em português “Plataforma de Pernas Atirantadas”. Esta unidade geralmente possui o casco semelhante a uma semi-submersível, com colunas e *pontoons*, com uma diferença notável no sistema de ancoragem – constituído por tendões ao invés das linhas de ancoragem em catenária utilizadas nos outros tipos de sistemas. Cada tendão representa uma “perna atirantada” da plataforma.

A figura seguinte, Figura 3.1, ilustra o tendão (*Tendon*) com as demais principais partes de uma TLP típica.

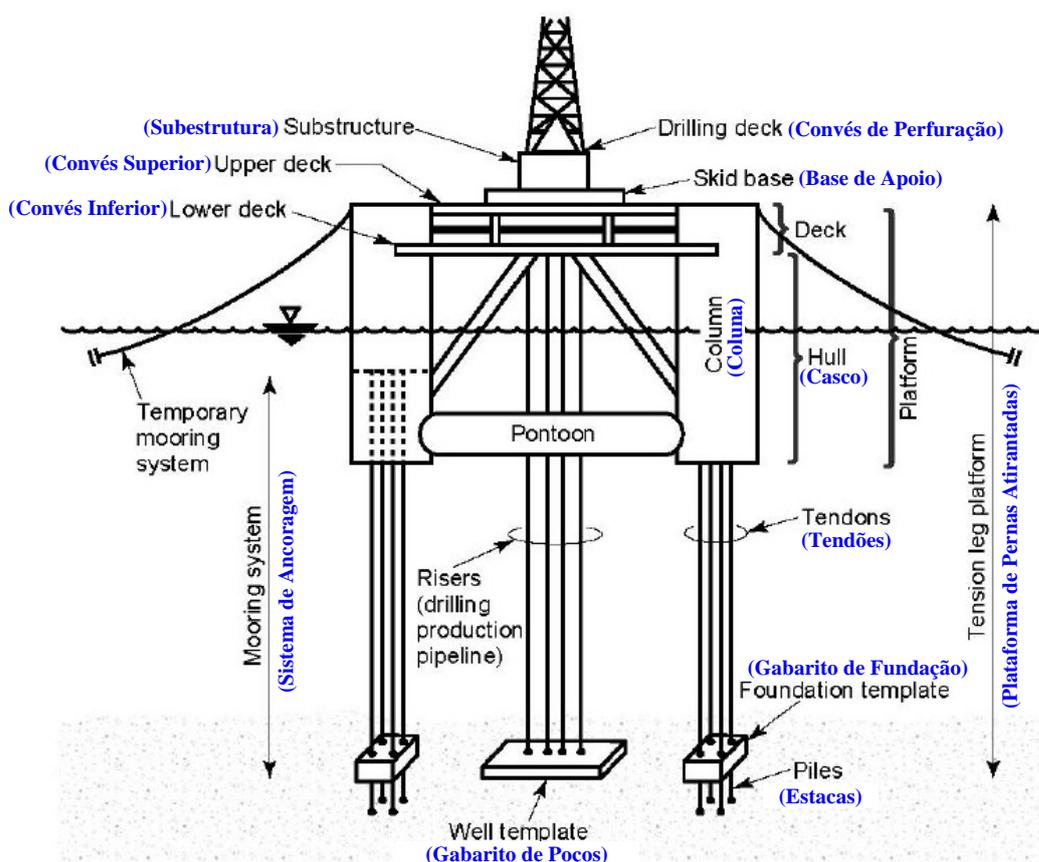


Figura 3.1 TLP com sonda de perfuração. Baseada na Ref. [11]

Apesar da semelhança do casco com um semi-submersível, o comportamento estático e dinâmico é bem distinto. Em uma semi-submersível o sistema de ancoragem provê alguma rigidez no plano horizontal e pequena rigidez na direção vertical. Como resultado, uma semi-submersível apresenta frequências naturais abaixo das frequências dominantes do mar.

Já uma TLP apresenta uma rigidez bem elevada na direção vertical, resultando em frequência natural (*heave*, *pitch* e *roll*) acima da frequência dominante, e baixa rigidez no plano horizontal implicando em frequência natural (*surge*, *sway* e *yaw*) abaixo da dominante¹. Esta diferença de resposta dinâmica entre uma semi e uma TLP pode ser notada na figura seguinte, Figura 3.2.

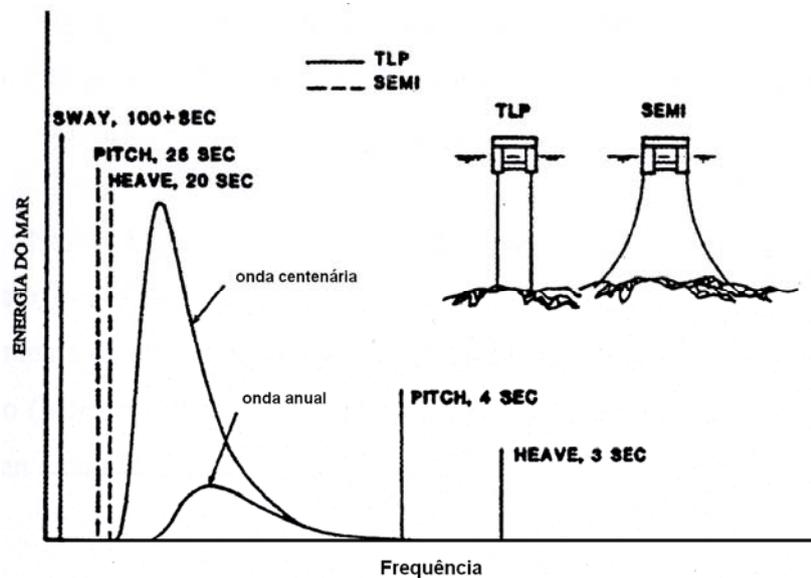


Figura 3.2 Resposta dinâmica : TLP x semi-submersível.

Com a frequência natural *heave* e *pitch* consideravelmente mais afastadas das frequências do mar em questão, as TLPs apresentam movimentos reduzidos em relação à semi-submersíveis e FPSOs, e esta redução é suficiente para permitir a utilização de completação seca neste tipo de unidade.

¹ As frequências referenciadas como dominantes nesta comparação são as frequências de primeira ordem, nestas o mar apresenta a maior parte da energia de excitação. Entretanto, não se deve esquecer das excitações que ocorrem em frequências diferentes das frequências que representam o estado de mar, a exemplo das forças de deriva lenta. Ver item 5.7.1.2

A rigidez bem elevada na direção vertical provém da rigidez elástica dos tendões; o deslocamento da unidade provoca deformação nos tendões que resulta na variação das trações e por fim numa resultante que tende a restaurar o sistema.

Como será visto adiante os tendões devem trabalhar constantemente tracionados. E para que isto ocorra o empuxo (ou flutuação) da unidade deve ser sempre maior que o peso, diferentemente do que ocorre com outros sistemas onde peso e empuxo se anulam. Na verdade, em uma TLP, ocorre o equilíbrio entre a resultante da tração nos tendões com o peso, empuxo e agentes ambientais.

A força de restauração no plano horizontal é a projeção no plano horizontal da “tração” que os tendões aplicam na unidade.

A figura seguinte, Figura 3.3, mostra a configuração típica de uma TLP sob a ação de carregamentos ambientais estáticos (constantes).

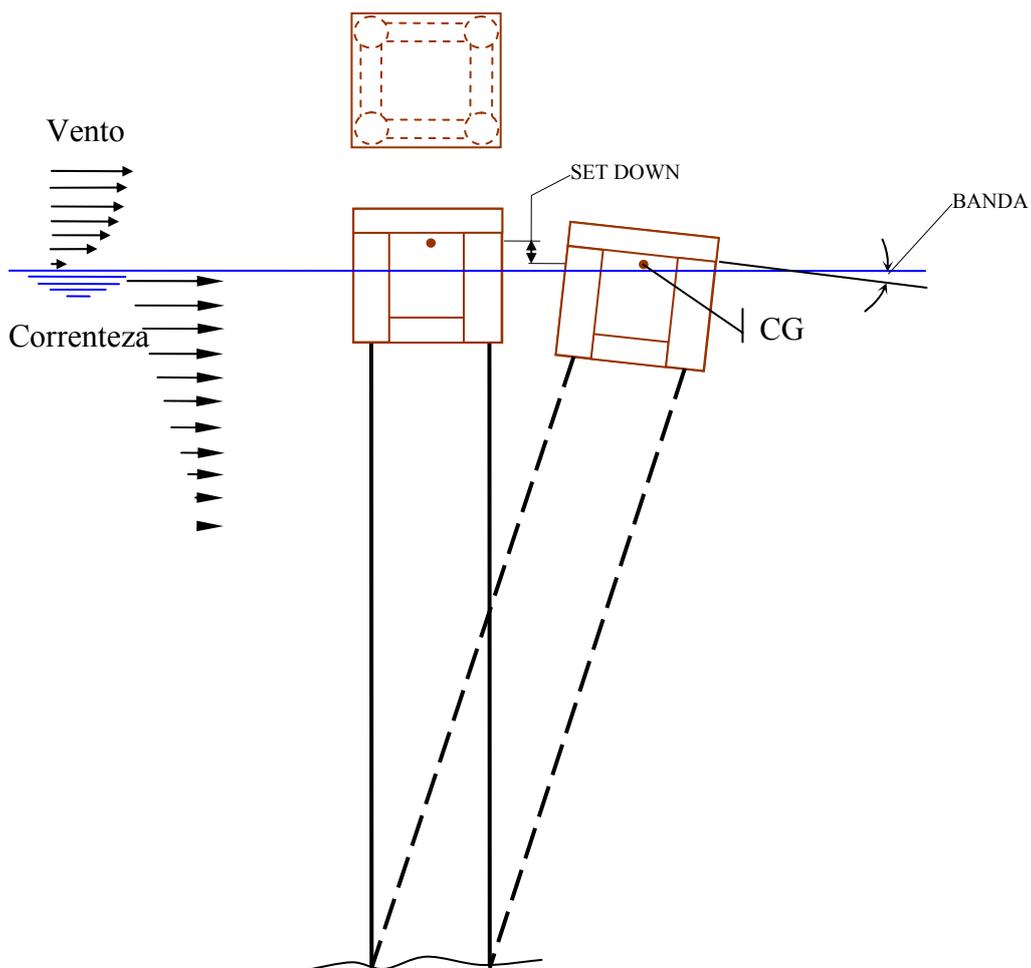


Figura 3.3 Configuração de equilíbrio de uma TLP sob agentes ambientais

A Figura 3.3 tem o propósito de ressaltar três movimentos importantes da unidade:

- deslocamento no plano horizontal, designado como *offset* ou passeio, por efeito da resultante ambiental
- inclinação da unidade, podendo ser chamada de banda, devido a momento provocado pelo desalinhamento entre resultante ambiental e CG.
- afundamento da unidade ou abaixamento do CG, denominado *setdown*, devido à tendência de rotação em torno do ponto de ancoragem. A unidade se comporta como um pêndulo invertido.

3.2 CASCO

Como afirmado anteriormente a forma de um casco típico de uma TLP se assemelha ao de uma semi-submersível, por isso é também comumente classificado, em um contexto de TLPs, de casco convencional. Exemplo na figura seguinte, Figura 3.4.



Figura 3.4 Casco convencional. Reboque a seco do casco da TLP.

Esta classificação começou a ser utilizada devido ao desenvolvimento de outras formas de casco, mantendo porém, os mesmos princípios básicos quanto ao comportamento dinâmico.

Como exemplo pode-se destacar a concepção SeaStar da Atlantia ref. [12] . Ilustrado na figura seguinte, Figura 3.5, o casco é composto por apenas uma coluna com ‘pontooms’ ou extensões irradiando desta coluna.



Figura 3.5 Casco mono-coluna SeaStar. Ref. [12]

A motivação principal para este tipo de casco é a redução de custos pelo tamanho e simplicidade do casco, assim o desenvolvimento de pequenos campos em águas profundas se tornam economicamente viáveis.

A Figura 3.6 a seguir ilustra um levantamento extensivo das unidades TLPs já instaladas.

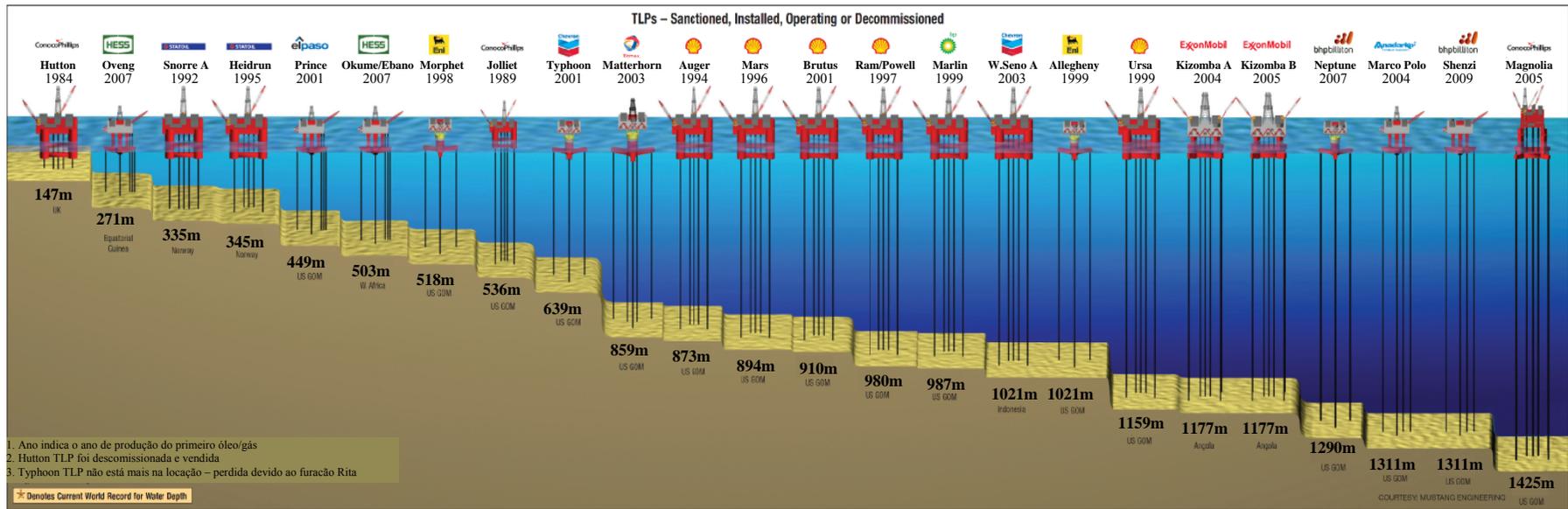


Figura 3.6 Unidades TLP instaladas no mundo por lâmina d'água. Adaptada da Ref. [10]

3.3 TENDÕES

Os tendões são compostos por tubos de aço estanques, isto é, possuem empuxo (o que implica em peso submerso menor que peso ao ar livre).

A fim de evitar problemas de instabilidade estrutural e de desconexão os tendões são projetados para que em nenhum instante de tempo ocorra uma tensão negativa, isto é, devem permanecer sempre sob tração ao longo do tempo em todos os pontos ao longo do comprimento.

Podem ser construídos em tramo único, concepção limitada a lâminas d'água da ordem de 500 metros. Ou em tramos de, por exemplo, 70 metros que são conectados entre si durante a instalação.

Existem projetos que consideram os tendões conectados internamente às colunas da plataforma e, mais recentemente, tendões conectados externamente. A Figura 3.7 e a Figura 3.9 ilustram as principais partes de dois projetos distintos de tendões, a Figura 3.8 ilustra um exemplo de fundação para o tendão.

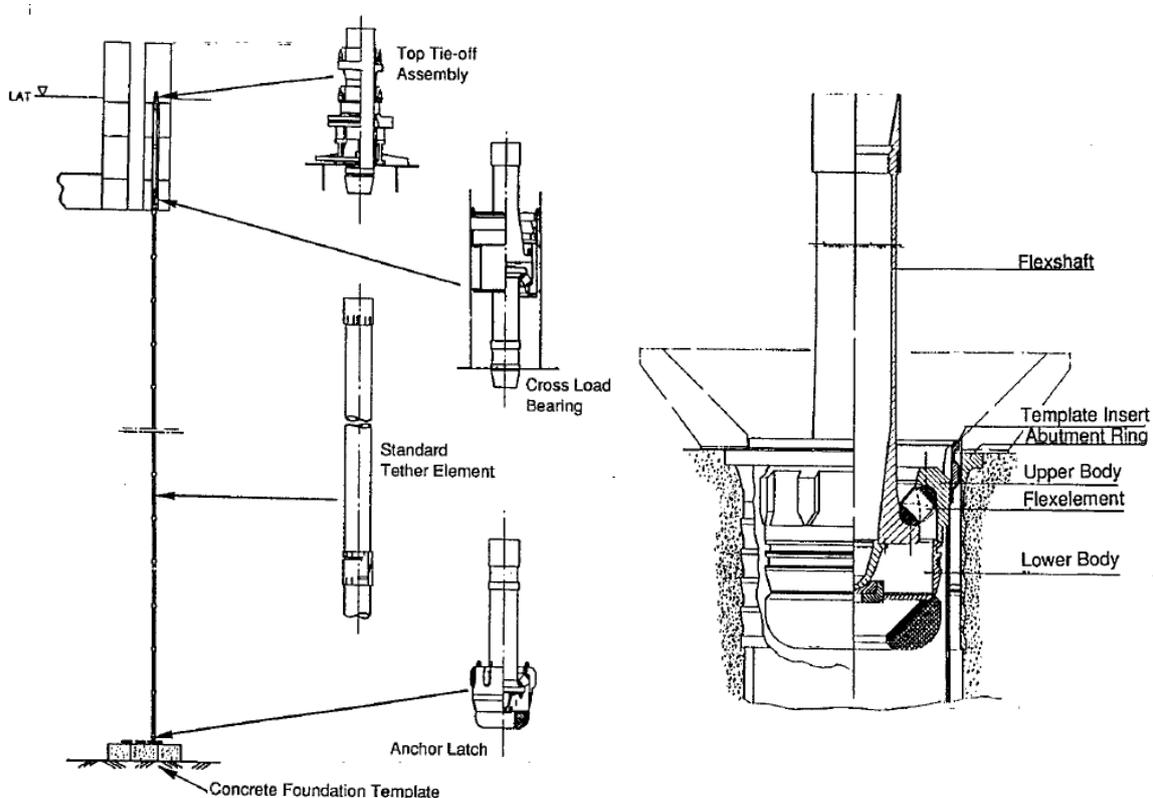


Figura 3.7 Exemplo de tendão conectado internamente à coluna da plataforma com os principais componentes. Em detalhe o conector do tendão à fundação. Ref. [13]

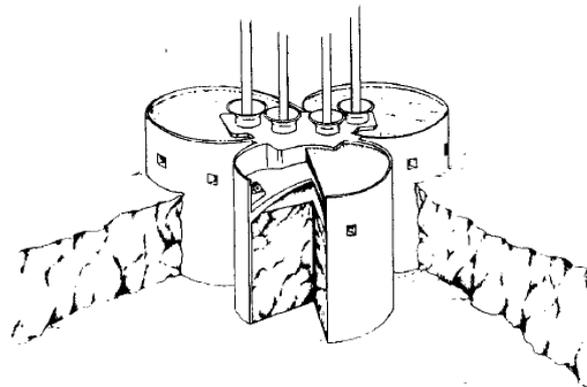


Figura 3.8 Exemplo da fundação. Extraído ref. [13]

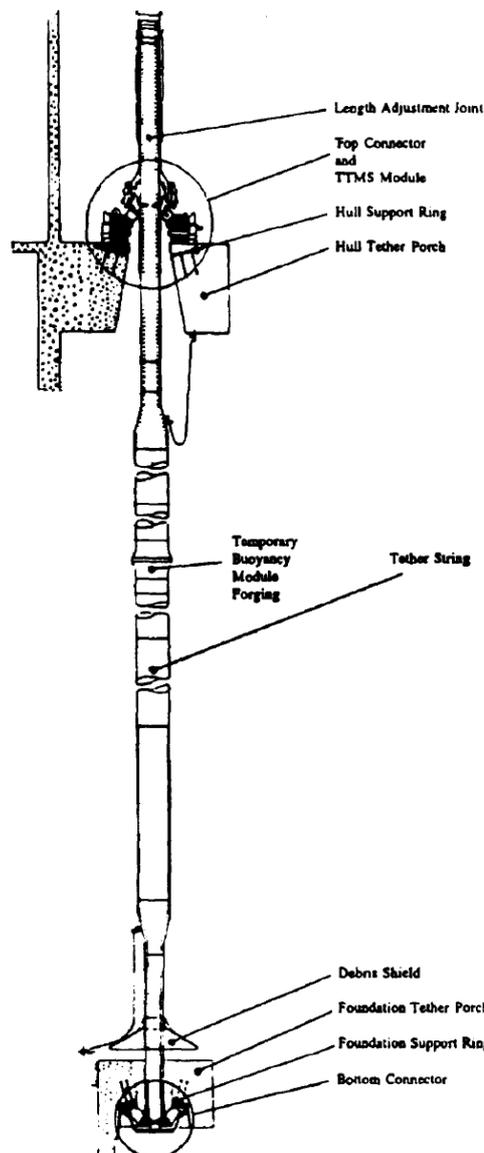


Figura 3.9 Exemplo de tendão conectado externamente. Ref. [14]

Mais detalhes sobre tendões podem ser encontradas na ref. [15]

3.4 SISTEMAS DE COMPLETAÇÃO

A Tabela 1, apresenta algumas informações de várias TLPs.

Tabela 1 Características de TLPs instaladas.

<i>Projeto</i>	<i>Hutton¹</i>	<i>Snorre A</i>	<i>Mars</i>	<i>Ursa</i>	<i>West Seno A</i>	<i>Kizomba A</i>	<i>Kizomba B</i>
Ano do primeiro óleo	1984	1992	1996	1999	2003	2004	2005
Lâmina d'água (m)	147	335	894	1159	1021	1178	1178
Deslocamento (ton)	61500	106000	49099	88451	23059	58480	58480
Poços completação seca	28	36	10	9	20	36	34
Poços completação molhada	-	10	4	6	-	-	-

Através da tabela é possível notar que existem unidades com alguns poços de completação molhada, embora sejam em menor número. A tendência decorre diretamente dos movimentos reduzidos da TLP frente a outros tipos de unidades (como Semi-subst ou FPSOs) – possibilitando utilizar a completação seca. E esta característica afeta diretamente os tipos de risers tipicamente encontrados em uma TLP conforme será visto no item seguinte.

Em muitos casos, os poços de completação molhada são conectados à TLP oriundos de campos vizinhos, em situações, por exemplo, cujo número inviabilize uma unidade exclusivamente para explorá-los.

Conforme já mencionado em capítulos anteriores a principal característica da completação seca é a utilização de uma árvore de natal localizada na unidade. O que torna a instalação e controle do poço economicamente mais competitivo do que a solução com completação molhada. Além disso, esta configuração permite o uso de uma sonda instalada no convés para intervenção nos poços diretamente da TLP. Esta concepção é muito utilizada pois dispensa a necessidade do fretamento de embarcação exclusivamente para esse fim, o que se traduz em ganhos econômicos operacionais.

¹ Primeira TLP instalado no mundo. Não opera mais, foi desmobilizada.

3.5 RISERS

A escolha do tipo de *riser* está muito associada ao sistema de completção utilizado. Para a completção seca são utilizados risers rígidos verticais; para a completção molhada utilizam-se as configurações com risers em catenária, tanto com risers rígidos (SCRs) quanto com risers flexíveis.

3.5.1 Risers Rígidos Verticais (TTR)

Os Risers Rígidos Verticais aqui mencionados referem-se aos *Top Tensioned Risers (TTR)*, que em tradução livre poderia ser “Risers tracionados no topo”.

Os TTR são normalmente verticais e compostos por tubos em aço, concêntricos ou paralelos, sustentados no convés da TLP por um sistema de tracionamento. Construtivamente mais simples que os risers flexíveis em catenária, também permitem o acesso direto ao poço no caso de intervenções. Os dispositivos de segurança e controle como a árvore de natal se localizam nas instalações da unidade, permitindo uma completção seca.

O sistema de tracionamento (*tensioner system*) não só dá sustentação ao *riser* como também tem o objetivo principal de manter a tensão (ou tração) no *riser* relativamente constante, através da menor transmissão possível de movimentos da unidade ao *riser*.

Alguns sistemas de tracionamento também podem ser classificados de acordo com a linha na qual atuam, por exemplo, o PRT (*Production Riser Tensioner*) referencia-se ao sistema de tracionamento dos risers de produção.

A Figura 3.10 e Figura 3.11 seguintes buscam ilustrar um TTR (*riser* e componentes associados) com o PRT e a árvore de natal de completção seca.

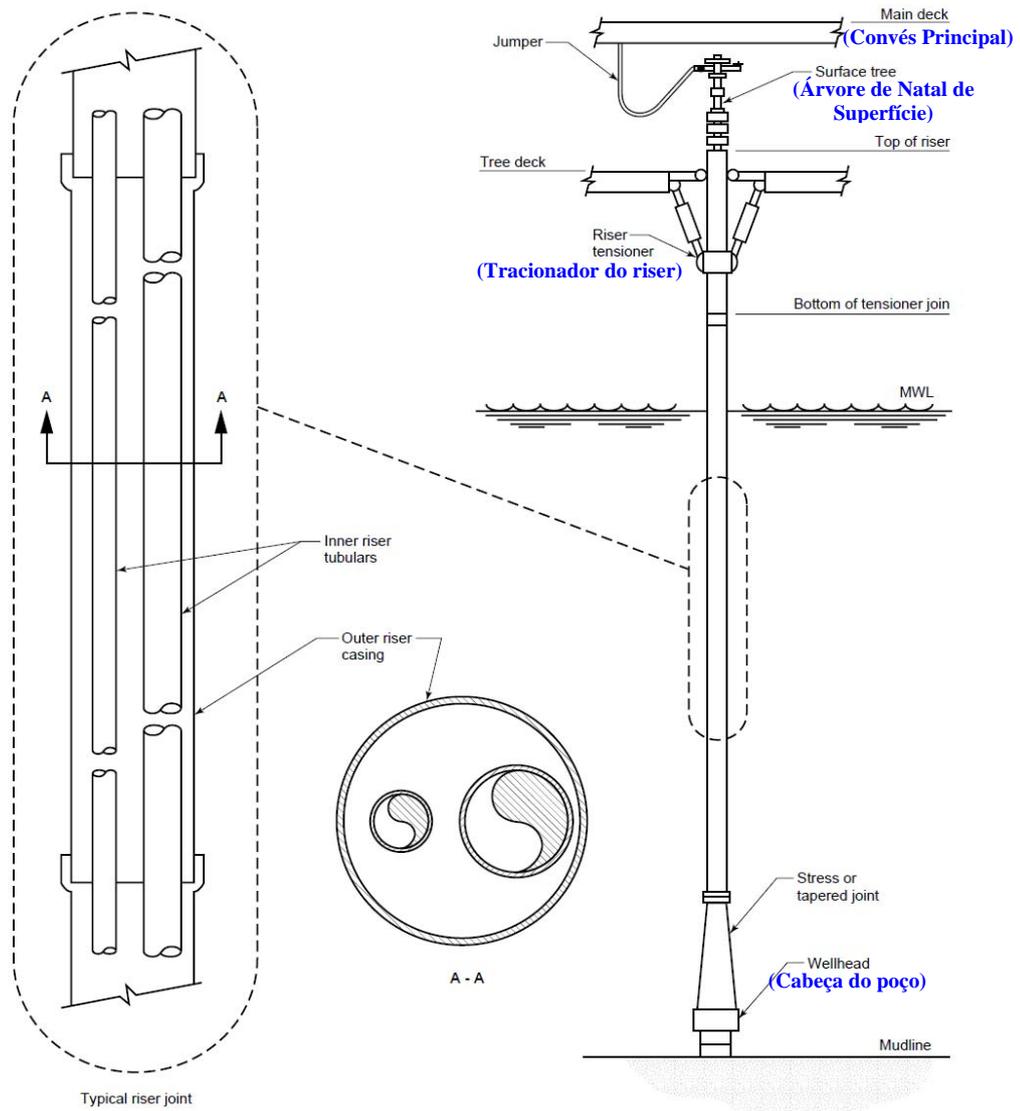


Figura 3.10 Principais partes de um TTR. Ref. [16]

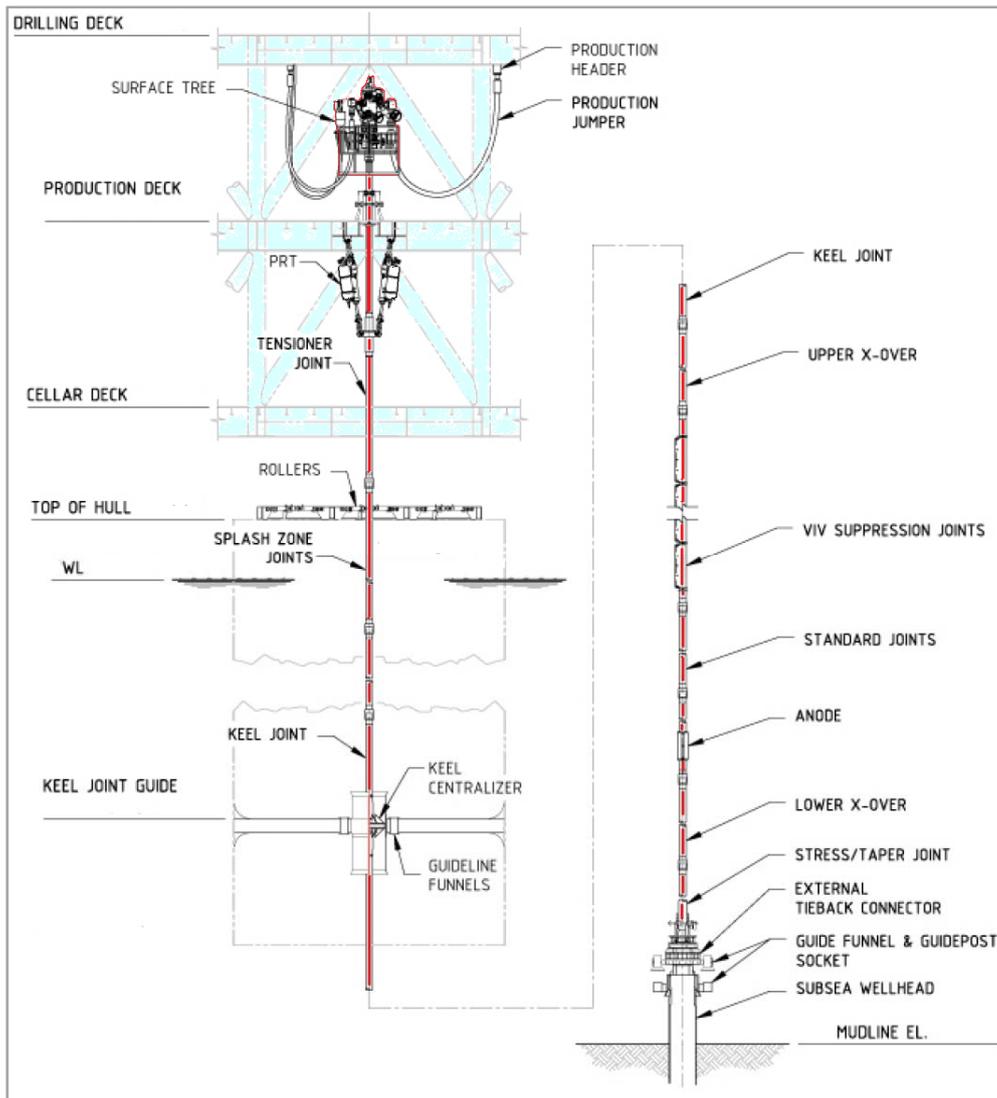


Figura 3.11 Exemplo de TTR para uma unidade de completação seca com sonda. Ref. [17]

A coluna de produção da Figura 3.11 apresenta as diversas partes típicas em um arranjo vertical.

A região destacada em azul representa a estrutura da unidade na região onde estão conectados os risers. Os movimentos desta região estão diretamente correlacionados com os deslocamentos do CG da unidade.

Em vermelho está realçada a coluna de produção.

Nota-se que no topo da linha está a árvore de natal, solidária aos deslocamentos da coluna. A árvore de natal (*Surface tree*) transfere a produção para a plataforma através de mangotes (*Production jumper*) que são flexíveis, e portanto não transmitem movimentos da unidade para a coluna e vice-versa.

São fixas na unidade e em permanente contato com a coluna as guias (*keel centralizer*) e polias, de tal modo que os deslocamentos verticais da unidade, no sentido axial do *riser*, não são transmitidos à coluna. Contudo, nestes pontos, os deslocamentos horizontais da unidade são transmitidos para a coluna, o que faz do passeio (ou offset) um parâmetro importante para dimensionamento dos *risers*.

Entre o *Production deck* e o *Cellar deck* está o PRT. É projetado para não transmitir os movimentos no plano horizontal nem os movimentos na direção vertical dentro de determinada faixa de amplitude. Mantém, entretanto, a tração na coluna dentro de uma faixa delimitada em torno de uma tração média. O objetivo é diminuir a variação de tração no *riser* evitando problemas de integridade estrutural.

Existe uma grande diversidade de tipos diferentes de sistemas tracionadores. A seleção de um determinado tipo depende de fatores como tamanho, desempenho ou eficiência e limites de atuação. Algumas informações sobre sistemas tracionadores podem ser encontradas em [18] e [19]

O PRT da Figura 3.11 representa um sistema hidráulico/pneumático composto por vasos, cilindros e pistões. Uma extremidade de cada cilindro é fixa no convés de produção (*Production deck*). A outra extremidade, que é parte do pistão que se desloca dentro do cilindro contendo um fluido é presa no *riser*. O deslocamento relativo entre a unidade e o topo coluna aproxima ou afasta as duas extremidades.

O movimento vertical relativo entre o topo do *riser* e a unidade é denominado de *stroke*, e ainda observando a figura é possível concluir que existe um limite físico para o *stroke* máximo – parâmetro importante no projeto de uma TLP. O espaço entre o *Drilling deck* e o *Production deck* limita os movimentos da árvore de natal, e o espaço entre o *Production deck* e o *Cellar deck* limita os movimentos da extremidade inferior do PRT. O arranjo físico e as características construtivas do PRT selecionado determinam o *stroke* máximo de um projeto.

Deste modo, após uma análise de movimentos da unidade torna-se necessário o cálculo do *stroke* da TLP e compará-lo com o *stroke* máximo permitido para o projeto.

A Figura 3.12 seguinte apresenta efeitos a serem considerados no cálculo do *stroke*.

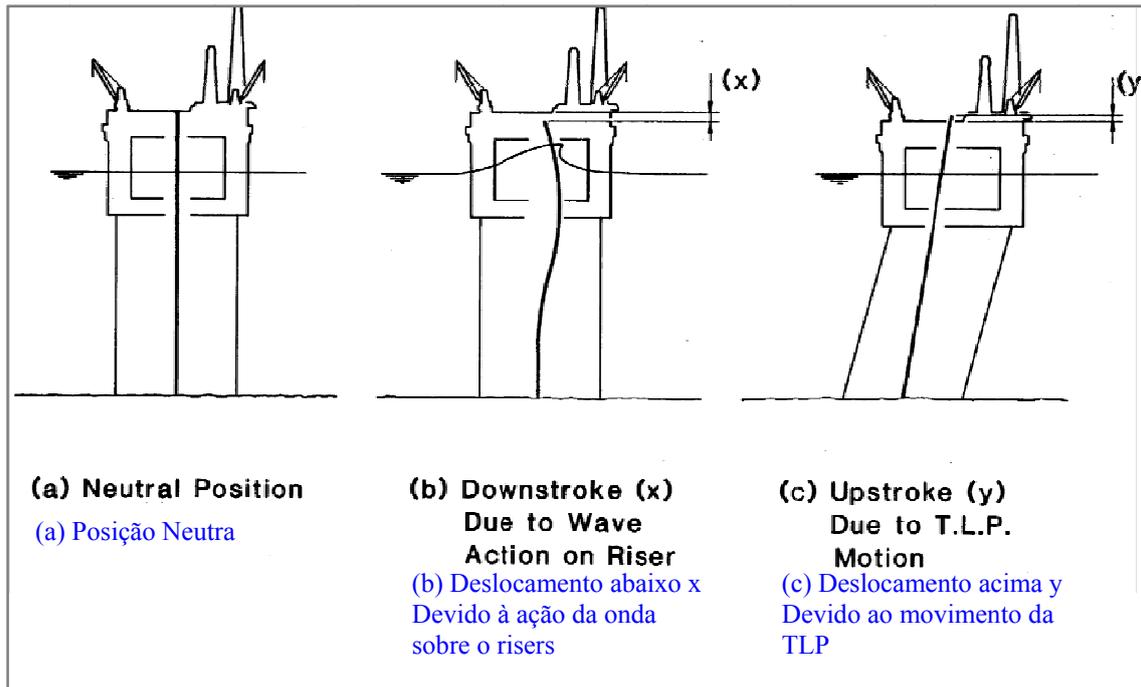


Figura 3.12 Movimento relativo entre o topo do *riser* e a TLP. Baseado na ref.[19]

Nesta avaliação deve-se ainda levar em conta o *setdown* máximo da unidade e o efeito da maré.

3.5.2 Risers em Catenária

Enquanto o emprego de TTRs concentra-se em TLPs os risers em catenária descritos nos itens seguintes também são empregados nos outros tipos de unidades.

3.5.2.1 Risers Rígidos em Catenária (SCR)

Os SCRs (*Steel Catenary Risers*) são feitos de tubos de aço rígidos sustentados pelo topo na unidade, assumem pelo peso próprio a curvatura de uma catenária.

Os movimentos da unidade são transmitidos aos SCRs pelo topo através de uma *flex joint* ou *stress joint*.

A *flex joint* (junta flexível) “alivia”, ou melhor, reduz as tensões de flexão no topo da linha ao permitir neste ponto rotações. Esta capacidade é alcançada através da sobreposição alternada de camadas de aço e camadas com elastômero [11].

A *stress joint* reduz as tensões no topo através de mudanças na geometria e/ou material do *riser* neste ponto.

Os SCRs são bastante utilizados como risers exportadores, isto é, para a exportação da produção da plataforma. Sua utilização para produção é mais incomum, geralmente partindo de um *manifold* – equipamento submarino que concentra a produção de vários poços - para então elevar a produção resultante até a plataforma pelo SCR.

3.5.2.2 *Risers Flexíveis*

Os risers flexíveis são presos no topo à unidade, e como os SCRs também assumem a forma de uma catenária pelo peso próprio.

Diferentemente dos SCRs e TTRs, os risers flexíveis possuem uma forma construtiva única, baseada na “sobreposição” de inúmeras camadas conforme pode ser visto na Figura 3.13.

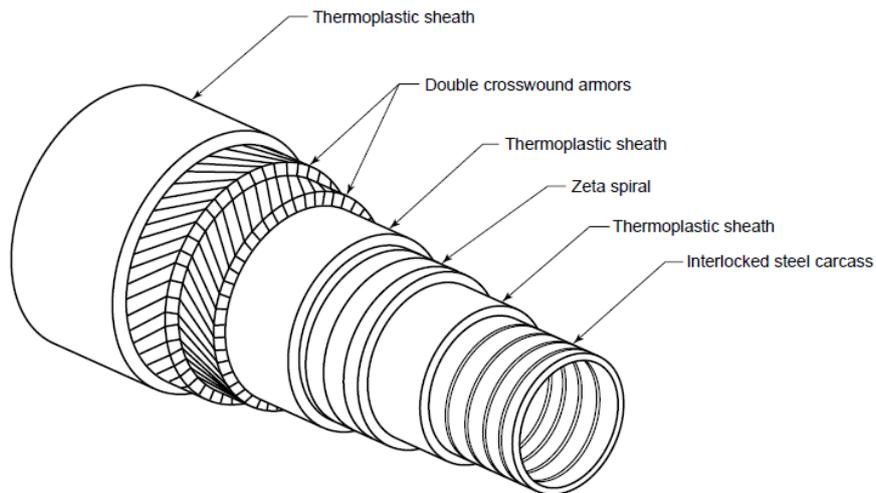


Figura 3.13 – Composição típica de um riser flexível. Ref. [16]

Percebe-se que o riser flexível possui uma complexidade maior que outros já mencionados, com uma seção composta por vários materiais e camadas com características mecânicas e construtivas próprias. Tal configuração permite que este tipo de riser apresente uma maior flexão sem introduzir tensões significativas.

Apesar de construtivamente mais complexo normalmente com os risers flexíveis é possível conexões com a unidade mais simples do que as utilizadas com os SCRs (*Flex joint* ou *Stress joint*) [11] .

4 METODOLOGIAS DE PROJETO

4.1 INTRODUÇÃO

Os capítulos anteriores, 2 e 3, demonstraram que há uma quantidade significativa de alternativas para o desenvolvimento de um campo de petróleo. A definição do sistema a ser desenvolvido é um processo complexo e envolve um número de fatores do cenário e objetivo: lâmina d'água, número de poços, características do reservatório, arranjo submarino, infra-estrutura disponível para o escoamento da produção, capacidade de armazenamento da produção, agentes ambientais na locação, instalações disponíveis para a construção – apenas para exemplificar alguns.

Nesta fase de definição do sistema é comum a elaboração de projetos “conceituais”, estudos que procuram estimar as principais características para diversas alternativas (com diferentes unidades – FPSOs, Semi-submersíveis, Fixas), e assim auxiliar na seleção do tipo de sistema a ser desenvolvido.

Com a determinação da alternativa a ser utilizada, o desenvolvimento desta em especificações, desenhos, cronogramas, manuais com todo descritivo da construção, instalação, operação do sistema, também pode ser entendido como um desenvolvimento do projeto “conceitual” até um projeto “detalhado”. Isto é, normalmente é possível dividir um projeto em diferentes fases ou níveis. Uma possível divisão segundo a API[11] em um contexto de projeto de sistemas TLPs, consiste em:

- Projeto conceitual. Esta fase incorpora estudos de viabilidade técnica e busca determinar elementos fundamentais como dimensões principais (comprimento, boca, calado...), forma do casco, sistema de ancoragem, poços e sistema de *risers*, de tal forma que atendam a requisitos funcionais e critérios ambientais e de viabilidade construtiva. Usualmente, nesta fase se faz um levantamento aproximado de custos que definirá ou não o prosseguimento para o projeto preliminar.

- Projeto preliminar. Nesta etapa procura-se “refinar” as características que afetam o custo e desempenho. Portanto, algumas variáveis como geometria da unidade, número e tipo de poços, pré-tração da amarração e peso das instalações não devem variar significativamente nesta fase.

- Projeto final (ou Projeto Básico). A documentação produzida ao final desta fase faz parte do contrato de fabricação. Descreve precisamente características como forma da unidade, resposta dinâmica, detalhes estruturais, arranjo final, pesos e centro de gravidade.

- Projeto de detalhamento. Por último são elaborados desenhos e especificações de fabricação e construção utilizados pelos estaleiros/canteiros de obra. Também são entregues os documentos de operação e inspeção da unidade.

O desenvolvimento de um projeto em todas estas fases necessita de uma grande quantidade de estudos e análises, realizados ainda de forma iterativa e cíclica conforme o avanço através das diferentes fases.

Para ilustrar é possível citar o estudo de viabilidade econômica, revisado e atualizado significativamente nas primeiras fases do projeto (projeto conceitual e preliminar) de acordo com a variação nos custos que considera, entre outros, a operação da unidade, os equipamentos e material estrutural da unidade, métodos construtivos, o transporte e a instalação da unidade na locação de produção, tipos de poços e risers e sua quantidade, instalação do sistema submarino. Por sua vez o estudo de transporte e instalação da unidade que contribui para o custo total do projeto considera o peso total da unidade, sua forma geométrica, dimensões e métodos construtivos empregados. E o estudo sobre a forma e dimensões principais deve levar em conta o peso, quantidade e volume dos equipamentos e componentes, método de transporte e instalação, sistema submarino e sistema de risers, métodos construtivos, e também contribui para os custos globais.

Enfim, os diferentes estudos realizados em um projeto são interdependentes entre si. Em maior ou menor grau cada um dispõe de dados de entrada e restrições para os outros (por isso são realizados de maneira iterativa e cíclica).

Um importante estudo dentre estes mencionados, também com forte inter-relação com os outros aspectos do projeto, é o descrito detalhadamente no capítulo adiante denominado de análise global.

Antes, porém, para uma melhor compreensão de uma análise global será descrito as situações de projeto e casos de carregamento que devem ser consideradas nesta análise.

4.2 SITUAÇÕES DE PROJETO E CASOS DE CARREGAMENTO

Os critérios utilizados em um projeto estão relacionados à definição das situações ou condições da plataforma a serem considerados. Estes critérios são definidos a partir de uma combinação de diversos parâmetros: carregamento ambiental, configuração do sistema, fator de segurança.

A Tabela 2 seguinte foi extraída da API[11] e apresenta combinações típicas, frequentemente encontradas em um projeto de TLP típico.

Tabela 2 Exemplo de tabela com os casos de carregamento a serem considerados. Baseado na Ref.[11]

<i>Caso de Carregamento de Projeto</i>	<i>Categoria de Segurança</i>	<i>Fase do Projeto</i>	<i>Configuração da Plataforma</i>	<i>Condição Ambiental de Projeto</i>	<i>Probabilidade de Excedência Anual</i>
1	A	Construção	Diversas		
2	A	Load out	Intacta	Calmo	
3	B	Casco/Deck Mating	Intacta	Locação	Específico
4	B	Tow/Transporte	Intacta/Avaria	Rota	Variável
5	A	Instalação	Intacta	Instalação	Variável
6	A	Na Locação	Intacta	1-ano Normal	≤ 1
7	B	Na Locação	Intacta	100-anos Extremo	0.01
8	S	Na Locação	Intacta	1000-anos Extremo	0.001
9	B	Na Locação	Avaria - Sem Compensação	1-ano Normal	$\leq 0.01(a)^*$
10	S	Na Locação	Avaria - Sem Compensação	10-anos Extremo Reduzido	≤ 0.001
11	B	Na Locação	Avaria - Com Compensação	10-anos Extremo Reduzido	≤ 0.01
12	S	Na Locação	Avaria - Com Compensação	100-anos Extremo	≤ 0.001
13	B	Na Locação	Tendão Removido	10-anos Extremo Reduzido	≤ 0.01
14	S	Na Locação	Tendão Removido	100-anos Extremo	≤ 0.001
15	C	Na Locação	Intacta	Diagrama de Distribuição Anual	1
16	SLE	Na Locação	Intacta	SLE Seismic	Variável
17	DLE	Na Locação	Intacta	DLE Seismic	Variável

A principal característica a ser destacada é a classificação de cada carregamento em “categorias de segurança”. A cada categoria ou classe de segurança está associada especificações de condições ambientais e de coeficientes de segurança. Nota-se também que cada condição ambiental está associada uma probabilidade ocorrência. Por último vale ressaltar que os casos de carregamento cobrem as diversas fases da vida da unidade: construção, transporte, instalação, operação na locação definitiva.

A API[11] define 4 categorias ou classes de segurança descritas sucintamente como:

- Classe A - condições operacionais. Usada para garantir que a estrutura é capaz de atender os requisitos operacionais.
- Classe B – condições extremas. Utilizada para verificar a resistência de uma estrutura. São aplicadas condições que ocorrem raramente na vida da unidade, a estrutura deve ser capaz de suportar tais condições com apenas pequena probabilidade de ter sua utilidade (capacidade operacional) comprometida.
- Classe S – condições de sobrevivência. Utilizada para verificar a reserva de resistência de uma estrutura. A unidade deve ser projetada para suportar tais condições sem a perda de vidas, dano ao meio ambiente ou perda total da unidade. Assim o colapso local da estrutura pode se aceitável desde que não ocorra o colapso progressivo até a perda da unidade.
- Classe C – condições de fadiga. Esta classe tem como objetivo a verificação de falha por fadiga. Aplica-se a componentes estruturais cuja vida limita a capacidade operacional da unidade. Os componentes são projetados com uma vida à fadiga maior que a vida útil da unidade, considerando fatores de segurança adequados.

4.3 ANÁLISE GLOBAL

No projeto de diferentes tipos de sistemas *offshore* uma etapa importante é a referenciada como “análise global”, indicada, por exemplo, na API RP 2T[11] (“*Global Response*”). Em outros códigos, para sistemas FPSOs e Semi-Submersíveis, é frequentemente denominada “*Global Analysis*”.

No caso de uma unidade TLP a análise global determinar a “resposta” do sistema, sob as condições de projeto, com base nas características principais: dimensões principais (comprimento, boca, calado, pontal), forma do casco, sistema de tendões (número, tipo, pré-tração), sistemas de risers (número, tipo, configuração), peso total, centro de gravidade.

As *respostas* tipicamente mais importantes numa análise global são: movimentos da unidade, carregamento no sistema de risers e tendões, e carregamento no casco. No contexto da metodologia de projeto, essas respostas são comparadas com as limitantes definidas nos critérios de projeto.

Para a realização de uma análise global têm sido empregadas ferramentas numéricas de análise baseadas em várias formulações e métodos, de diferentes graus de complexidade, desenvolvidas a partir das práticas de projetos de navios e semi-submersíveis. As soluções dinâmicas podem ser classificadas por diferentes características: linear ou não-linear, domínio da frequência ou domínio do tempo, determinística ou probabilística.

Assim, neste trabalho, uma metodologia de análise global faz referência à metodologia de cálculo e simulação: formulações adotadas, algoritmos utilizados para resolução de equações, modelo matemático utilizado para representar o sistema, premissas e simplificações adotadas, forma de implementação computacional e de simulação.

Podemos agrupar as metodologias conforme suas características mais importantes, conforme já mencionado. Uma classificação destacada na API RP 2T[11] e muito utilizada divide as metodologias em:

- Domínio da frequência. Análises no domínio da frequência utilizam técnicas de solução das equações com o uso de transformadas de Fourier ou Laplace. A principal desvantagem ou limitação desta abordagem é que as não-linearidades

devem ser ignoradas ou substituídas por aproximações lineares. Em situações em que é possível aplicar também análises no domínio do tempo, a análise no domínio da frequência tem a vantagem de ser computacionalmente mais eficiente. Análises no domínio da frequência são frequentemente empregadas nas fases preliminares do projeto.

- Domínio do tempo. Análises no domínio do tempo utilizam técnicas de integração no tempo, o que permitem a consideração das não-linearidades presentes nas equações. Os modelos tornam-se portanto mais realísticos e complexos, implicando também em aumento de custo computacional.

Trabalhos foram realizados no sentido de aperfeiçoar as técnicas no domínio da frequência comparando com as técnicas no domínio do tempo com a apresentação de diversas propostas.

Não faz parte do objetivo deste trabalho aprofundar em comparações ou recomendações neste sentido, entretanto, devido à grande importância, destacam-se os seguintes pontos segundo recomendação da API RP 2T[11] :

- cargas hidrodinâmicas devido à radiação e difração das ondas são normalmente calculadas no domínio da frequência, independentemente se posteriormente é feita uma simulação no domínio da frequência ou no tempo. Assim, efeitos hidrodinâmicos de ordem superior são ignorados de certa forma em todas as metodologias.
- tanto modelos no domínio da frequência quanto no domínio do tempo têm sido validados segundo testes em campo ou ensaios experimentais (testes em modelos físicos em escala reduzida). Apesar das formulações no domínio do tempo serem normalmente consideradas mais rigorosas, qualquer modelo numérico inclui diversas aproximações, isto é, nenhum é exato. Por isso são necessários esforços no sentido de validar e determinar a adequabilidade de qualquer metodologia de cálculo adotada.
- relacionado com o ponto destacado acima, a utilização de ensaios com modelos é altamente recomendável. Os ensaios experimentais e ferramentas numéricas devem ser vistos como ferramentas complementares, ao invés de mutuamente exclusivas.

- Ênfase é dada na importância de se efetuar uma análise “estática” (*Static and Mean Response*) precedendo uma análise dinâmica. Primeiro determinando a posição de equilíbrio sem considerar nenhum agente ambiental (Ondas, Ventos e Correntezas) e em seguida determinando uma posição “média”, posição de equilíbrio considerando apenas a parcela constante do carregamento ambiental.

4.4 METODOLOGIAS DE ANÁLISE GLOBAL

Uma classificação cada vez mais utilizada, e também presente de certa forma na API[11] , separa as metodologias de análise conforme os modelos empregados nas simulações: modelos desacoplados e modelos acoplados.

Os itens seguintes buscam descrever detalhadamente as características e diferenças entre as metodologias acopladas e desacopladas.

4.4.1 Metodologias Desacopladas

Para o dimensionamento de diversos sistemas, a análise global das plataformas vem adotando, tradicionalmente, procedimentos com a premissa primordial de que há pouca ou nenhuma integração entre os modelos numéricos do casco da plataforma, e o modelo das linhas de ancoragem e dos risers. Estes procedimentos, as análises envolvidas e a metodologia associada são qualificados, portanto, como “desacoplados”.

Conforme descrito também em trabalhos como SENRA[1] [2] [3] e CORREA[5] , em uma metodologia desacoplada podem ser identificadas duas etapas distintas:

- A primeira etapa consiste na análise do modelo hidrodinâmico com objetivo principal de obter os movimentos do casco. Nesta análise as linhas (de ancoragem e risers) são representadas através de modelos simplificados compostos por coeficientes escalares, como rigidez, massa, amortecimento e força. Estes coeficientes são introduzidos nas equações de movimentos da unidade, podem ser obtidos através de modelos analíticos simplificados,

como a equação da catenária, ou a partir de ensaios experimentais. Nesta etapa empregam-se programas como DYNASIM [20] .

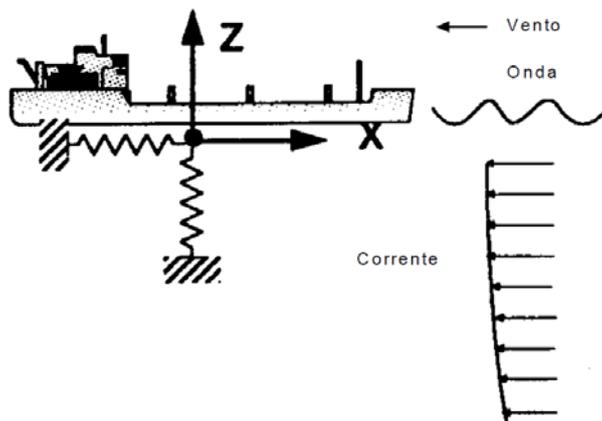


Figura 4.1 Primeira Etapa: Análise de movimentos. Modelo hidrodinâmico da unidade e modelo simplificado das linhas

- A segunda etapa consiste numa análise estrutural das linhas. Os movimentos obtidos na etapa anterior são aplicados como deslocamentos no topo das linhas. Os movimentos, portanto, são dados de entrada para programas como ANFLEX [21] , ORCAFLEX [22] e RIFLEX [23] . As linhas são representadas por modelos de elementos finitos que também consideram os efeitos dos carregamentos ambientais sobre as linhas.

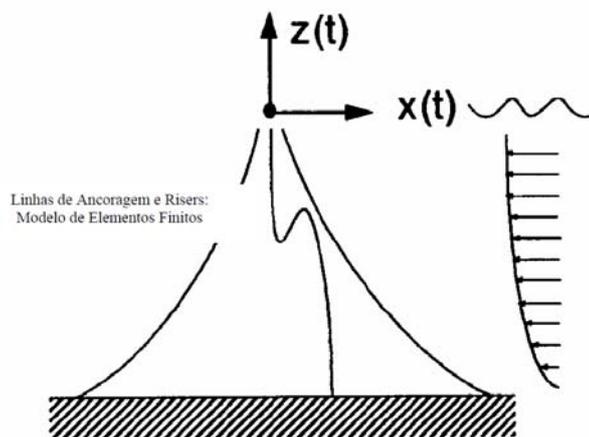


Figura 4.2 Segunda etapa: Análise estrutural dos risers com modelo de elementos finitos

A metodologia desacoplada, como se acabou de ver, não considera de forma rigorosa a interação entre o comportamento do casco da unidade e o comportamento das linhas conectadas a ela. No entanto, as simplificações neste tipo de abordagem reduzem os custos computacionais e produz, em alguns cenários (em águas rasas e número de risers relativamente pequeno), resultados com qualidade e confiabilidade aceitáveis quando confrontados com resultados experimentais.

4.4.2 Metodologias Acopladas

Com o avanço da produção de petróleo no mar em lâminas d'água cada vez mais profundas, e concepções de unidades com grande número de risers, as Metodologias Desacopladas apresentavam resultados que se afastavam cada vez mais dos experimentais e observados na prática.

Para estes cenários têm sido empregados, cada vez mais frequentemente, procedimentos “acoplados”, que consideram os dois comportamentos de forma integrada, e não em etapas distintas. Por exemplo, a não-linearidade da interação entre o comportamento hidrodinâmico do casco e a resposta estrutural e hidrodinâmica das linhas é considerada. Para descrições detalhadas desta metodologia recomenda-se a leitura de trabalhos como SENRA[1] [2] [3] , CORREA[5] , LIMA[4] , BAHIENSE[24] .

A Metodologia Acoplada consiste no emprego de programas como o Prosim, que incorporam em uma única estrutura de código e de dados um modelo hidrodinâmico para a representação do casco da unidade, integrado com um modelo de elementos finitos para uma representação rigorosa das linhas de ancoragem e risers. Mais adiante, no item 5.6 capítulo 5, serão apresentadas diferentes formulações que podem ser consideradas para a implementação de modelos acoplados.

Como mencionado, nesta metodologia menos simplificações são utilizadas e os dois problemas são tratados de forma integrada, com a interação entre eles considerada de forma rigorosa, o que produz portanto resultados mais precisos e confiáveis – dependem menos da experiência do engenheiro para a calibração dos coeficientes. A contrapartida é o alto custo computacional devido principalmente a análises não-lineares de malhas de elementos finitos refinadas.

Ao longo do tempo este alto custo computacional tem sido contornado pelo aumento natural da “potência” computacional e pela implementação de algoritmos mais eficientes (e/ou otimizados), possibilitando a utilização da metodologia acoplada nos projetos atuais.

4.4.3 Metodologias Híbridas

Os elevados tempos de processamento inviabilizam o uso intensivo de análises acopladas. Para diminuir os requisitos computacionais destas análises e com o objetivo de caminhar gradualmente para um procedimento totalmente acoplado (Metodologia acoplada) foram elaboradas as metodologias híbridas, conforme abordado por CORRÊA [5] , SENRA [1] , CONNAIRE [6] , CHAUDHURY[25] .

Estas metodologias buscam combinar o uso de programas acoplados e com o uso de programas desacoplados. Uma descrição resumida de algumas destas metodologias é apresentada nos subtópicos seguintes.

Ensaio de decaimento numérico

Esta metodologia consiste de duas etapas:

Na primeira etapa efetua-se o ensaio decaimento numérico propriamente dito, uma análise acoplada do sistema submetido apenas a condições iniciais. Para evitar o elevado custo computacional, as linhas de ancoragem e risers são representadas por uma malha de elementos relativamente pobre, mas suficiente para representar seu comportamento global. O tempo de simulação é curto, o objetivo é obter boas estimativas para os coeficientes escalares representativos das linhas (massa, rigidez, amortecimento).

Na segunda etapa dá-se prosseguimento a uma análise desacoplada tradicional como já descrito no item 4.4.1, exceto que desta vez, quando da representação das linhas por coeficientes escalares, utilizam-se os coeficientes obtidos do ensaio de decaimento numérico. Esta análise desacoplada com coeficientes calibrados (obtidos na primeira etapa) produz resultados melhores que a análise desacoplada tradicional, porém conta com o mesmo custo computacional.

Esta metodologia possui, portanto, custo computacional ligeiramente maior que a análise desacoplada tradicional (pelo acréscimo do ensaio de decaimento numérico), mas ainda menor que o de uma análise acoplada, com resultados mais próximos da análise acoplada.

“Análise de movimentos acoplada”

Nesta alternativa, primeiramente, efetua-se uma análise acoplada, porém com malha de elementos finitos pobre para representar as linhas. O tempo de simulação é relativamente longo. O objetivo é obter uma boa representação dos movimentos do casco, melhor do que a que seria obtida na primeira etapa da metodologia desacoplada tradicional.

Em seguida prossegue-se com a segunda etapa de uma análise desacoplada tradicional – transferência dos movimentos do casco para o topo das linhas e análise estrutural destas linhas com uma malha de elementos finitos adequada. Ou seja, esta metodologia pode ser vista como uma análise desacoplada “aprimorada” onde a primeira etapa da análise desacoplada tradicional é substituída por uma “análise de movimentos acoplada”.

Novamente, com uma melhor representação dos movimentos esperam-se melhores resultados com esta metodologia, em relação à análise desacoplada tradicional, e com custo computacional ainda menor do que na metodologia acoplada.

5 FORMULAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE

5.1 INTRODUÇÃO

O procedimento de análise implementado em um programa de análise acoplada como o Prosim [8] é baseado na integração numérica no domínio do tempo das equações de movimento do corpo rígido da unidade associadas à representação estrutural e hidrodinâmica do comportamento das linhas através de modelos de elementos finitos.

Este capítulo descreve de forma resumida os modelos e métodos de análise empregados no Prosim. Apresentam-se inicialmente os vários sistemas de coordenadas utilizados nas formulações. É feita então uma breve revisão das equações de movimentos da plataforma no domínio do tempo, segundo um enfoque desacoplado tradicional. Em seguida também é apresentada resumidamente a formulação empregada para linhas, representando tanto o problema estrutural quanto hidrodinâmico. Logo após, são apresentados os procedimentos de integração no tempo para a solução das equações. São apresentadas, então, duas diferentes maneiras de considerar o acoplamento na solução das equações (do casco e das linhas) implementadas no programa Prosim. Por último é apresentada a formulação utilizada no cálculo das forças ambientais, que atuam no casco e também nas linhas.

5.2 SISTEMAS DE COORDENADAS

Nesta seção são apresentados os principais sistemas de coordenadas considerados na formulação utilizada e na construção dos modelos computacionais.

5.2.1 Sistema Global

O primeiro sistema de coordenadas definido para a utilização da formulação descrita na seção seguinte é o sistema Global Geral (x,y,z) . É o sistema principal facilitando a organização e servindo de base para a definição de outros sistemas de coordenadas.

Este sistema cartesiano possui os eixos coordenados x e y em um plano horizontal e tem origem no plano médio da superfície do mar. O eixo z corresponde à direção vertical, orientado de baixo para cima. É considerado um sistema “fixo”- permanece em repouso em relação à superfície do mar e ao fundo do mar – ou em outras palavras, a direção e orientação dos eixos permanecem constantes ao longo do tempo.

5.2.2 Sistemas Locais

A partir do Sistema Global podem ser definidos os seguintes sistemas locais:

- ❖ Sistema Estrutural (X_{est} , Y_{est} , Z_{est}). Sistema conveniente para a determinação/modelagem da geometria da unidade com o programa SITUA. É um sistema “fixo” e os eixos X_{est} e Y_{est} estão contidos em um plano horizontal que passa pela “quilha” no caso de navios ou extremo inferior da unidade para outros casos. O eixo Z_{est} permanece vertical orientado de baixo para cima.
- ❖ Sistema Inicial **SI** (X_{SI} , Y_{SI} , Z_{SI}). Sistema “fixo” em que os eixos X_{SI} e Y_{SI} estão contidos no plano horizontal que passa pelo CG da unidade. O eixo Z_{SI} permanece vertical orientado de baixo para cima. A relação entre este sistema inicial e o sistema global é feita através de três coordenadas, definindo a distância de sua origem (CG) até a origem do sistema global, e também por um “ângulo de aproamento”, ângulo medido no plano horizontal entre x (global) e X_{SI} (inicial)
- ❖ Sistema Móvel **SM** (X_M , Y_M , Z_M). Sistema que inicialmente coincide com o sistema inicial – mesma orientação de eixos e origem no CG – porém acompanha os movimentos da unidade
- ❖ Sistema local dos elementos finitos e dos membros da plataforma. Cada elemento de uma malha de elementos finitos de uma linha, e cada membro reticulado da plataforma possui um sistema de coordenadas (x' , y' , z'). A origem deste sistema está no nó 1 do elemento/membro. O eixo x' coincide com o eixo do membro e é orientado do nó 1 para o nó 2. Considerando que os eixos y' e z' devem ser ortogonais a x' é adotada a seguinte convenção: y' horizontal e o z' perpendicular às direções x' e y' . A figura seguinte, Figura 5.1, ilustra este sistema.

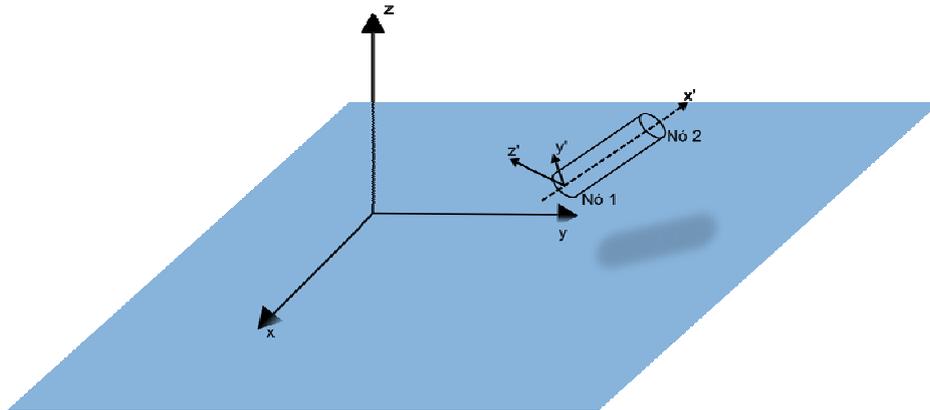


Figura 5.1 Exemplo dos Sistemas Global e local de um membro ou elemento

5.3 EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

Para facilitar a apresentação das equações de movimentos considerou-se que o sistema inicial possui aproamento zero, isto é o sistema inicial é paralelo ao global. A extensão para casos mais gerais com aproamento diferente de zero é trivial.

O deslocamento do corpo pode ser entendido também como um “deslocamento” do sistema de coordenadas móvel, que está preso ao corpo acompanhando seus movimentos e tem origem no CG. Com isso torna-se conveniente expressar o movimento como o somatório de uma translação da origem do sistema móvel (CG), e uma rotação deste sistema em torno de um dos eixos do sistema inicial.

Deslocamentos de translação e rotação

A translação será denominada de $x_i(t) = \{ x_{i1}(t), x_{i2}(t), x_{i3}(t) \}$ e indica a posição da origem do sistema móvel (e também do CG) em relação ao sistema inicial.

O movimento de rotação pode ser considerado como uma variação angular dos eixos do sistema móvel em relação ao sistema inicial. Para expressar a posição relativa (em termos angulares) desses dois sistemas podem ser empregados os *ângulos de Euler* denominados γ, β, α . A sequência de rotações que definem estes ângulos é ilustrada na figura seguinte, Figura 5.2, representando o seguinte procedimento:

- Inicialmente o corpo gira em torno de seu eixo Z através do ângulo de *yaw* γ .

- Em seguida, a partir da posição resultante gira em torno do eixo Y através do ângulo de *pitch* β .
- Finalmente, a partir desta última posição, gira em torno do eixo X através do ângulo de *roll* α .

Terminologia

Com base nos deslocamentos já mencionados adotou-se a seguinte terminologia tradicionalmente utilizada para os seis graus de liberdade de uma plataforma:

Surge – Movimento na direção do eixo x, neste caso $x_{11}(t)$

Sway – Movimento na direção do eixo y, neste caso $x_{12}(t)$

Heave – Movimento na direção do eixo z, neste caso $x_{13}(t)$

Yaw – Movimento de rotação em torno do eixo z, neste caso γ

Pitch – Movimento de rotação em torno do eixo y, neste caso β

Roll – Movimento de rotação em torno do eixo x, neste caso α

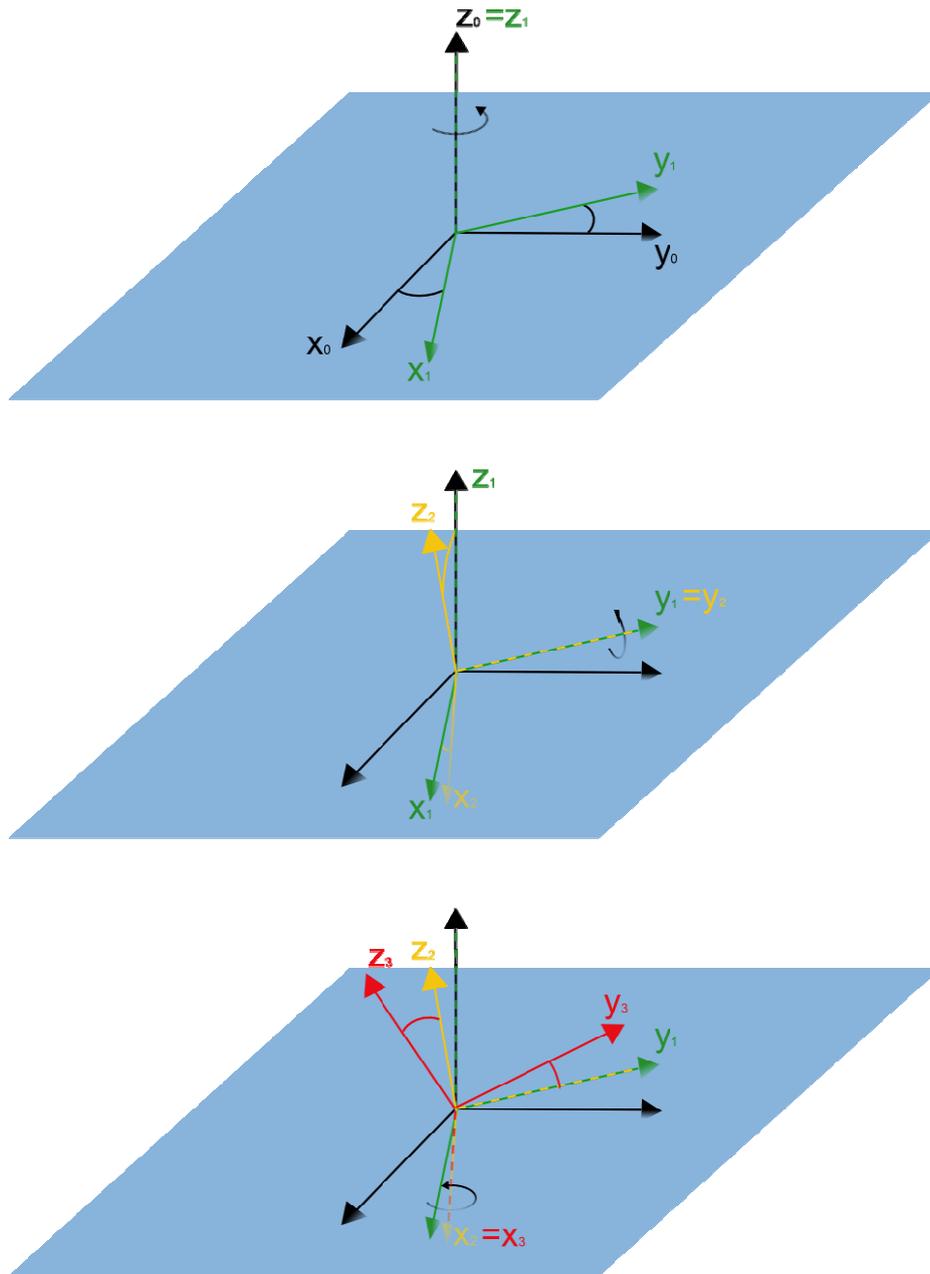


Figura 5.2 Ângulos de euler

Transformação de coordenadas

Após o movimento do corpo, em um determinado instante, considere as coordenadas de um ponto expressas no sistema móvel como $\mathbf{X}=(X,Y,Z)$ e as coordenadas do mesmo ponto expressas no sistema inicial como $\mathbf{x}=(x,y,z)$. Se o movimento de translação for $\mathbf{x}_1 = (x_{11}, x_{12}, x_{13})$ e o de rotação definido pelos ângulos de Euler, então a função que correlaciona as coordenadas nos dois sistemas é:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_1) \quad (5.1)$$

ou

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c\beta c\alpha & s\beta c\alpha & -s\alpha \\ -s\beta c\gamma + c\beta s\alpha s\gamma & c\beta c\gamma + s\beta s\alpha s\gamma & c\alpha s\gamma \\ s\beta s\gamma + c\beta s\alpha c\gamma & -c\beta s\gamma + s\beta s\alpha c\gamma & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x - x_{11} \\ y - x_{12} \\ z - x_{13} \end{Bmatrix} \quad (5.2)$$

, onde $s\beta = \text{sen}\beta$, $c\beta = \text{cos}\beta$, e assim por diante.

A matriz 3x3 \mathbf{A} é denominada *matriz de rotação*.

A transformação inversa é :

$$\mathbf{X} = \mathbf{x}_1 + \mathbf{A}^T \mathbf{X} \quad (5.3)$$

Transformação de velocidades

Também importante é a transformação que relaciona as velocidades angulares do corpo no sistema inicial $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ com as derivadas no tempo dos ângulos de Euler $\theta = (\gamma, \beta, \alpha)$ dada por

$$\omega = \mathbf{B} \frac{d\theta}{dt}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{sen}\alpha \\ 0 & \text{cos}\gamma & \text{sen}\gamma \cdot \text{cos}\alpha \\ 0 & -\text{sen}\gamma & \text{cos}\gamma \cdot \text{cos}\alpha \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

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

$$\frac{d\theta}{dt} = B^{-1}\omega \quad (5.5)$$

Equações de movimentos

Frente ao exposto até aqui a segunda lei de Newton pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= \frac{d}{dt}(\mathbf{M} \cdot \mathbf{v}) & \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \\ \mathbf{m} &= \frac{d}{dt}(\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega}) & \mathbf{I} &= \begin{bmatrix} I_{11} & -J_{12} & -J_{13} \\ -J_{21} & I_{22} & -J_{23} \\ -J_{31} & -J_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Onde \mathbf{f} é o vetor representando a resultante, \mathbf{m} o vetor representando os momentos resultantes em cada eixo, I_{jk} os momentos de inércia e J_{jk} os produtos de inércia.

Considerando que a velocidade translacional \mathbf{v} do CG (ou sistema móvel) e a resultante \mathbf{f} são expressas em relação ao sistema inicial, e que a matriz de massa seja constante, é possível reescrever \mathbf{f} como:

$$\mathbf{f} = \mathbf{M} \cdot \frac{d\mathbf{v}}{dt}, \quad \text{onde } \mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} \quad (5.7)$$

Quanto à equação de momentos também é possível escrevê-la numa forma mais conveniente se avaliada no sistema móvel, ao invés do sistema inicial. No sistema móvel a matriz de inércia \mathbf{I} torna-se constante. Assim, reescrevendo a equação de momentos em relação ao sistema móvel tem-se,

$$\mathbf{m} = \mathbf{I} \cdot \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega}) \quad (5.8)$$

O \mathbf{I} daqui por diante será a mesma matriz de inércia \mathbf{I} citada anteriormente, porém avaliada no sistema móvel e, portanto constante ao longo do tempo.

Agora as equações de movimento podem ser apresentadas na seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{f} & \frac{d\mathbf{x}}{dt} &= \mathbf{v} \\ \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} &= \mathbf{I}^{-1} \cdot [\mathbf{m} - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega})] & \frac{d\theta}{dt} &= \mathbf{B}^{-1} \cdot \boldsymbol{\omega} \end{aligned} \quad (5.9)$$

O conjunto de equações (5.9) representam um sistema de 12 equações de primeira ordem nas variáveis \mathbf{v} , \mathbf{x} , $\boldsymbol{\omega}$, $\boldsymbol{\theta}$ (posição e velocidade, linear e angular, do corpo em função do tempo).

Duas fontes de não-linearidades merecem ser destacadas neste sistema de equações: os vetores da força \mathbf{f} e momento \mathbf{m} são funções não lineares, tal constatação pode ser feita no item 5.7 que apresenta as parcelas ambientais (um dos fatores que tornam as funções não-lineares); a outra fonte de não-linearidade deve-se ao produto vetorial $\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega})$ e à matriz de transformação \mathbf{B}^{-1} , o primeiro contém produtos e potências das velocidades angulares e o segundo funções trigonométricas dos *ângulos de Euler*.

Ainda com relação à última fonte de não-linearidade mencionada, formulações simplificadas poderiam assumir pequenas amplitudes de movimento e assim desprezar termos de ordem superior, permanecendo produtos e potências de menor ordem. Seria possível até aproximações lineares das funções trigonométricas. No entanto, a presente formulação mantém todos os termos não-lineares e, portanto, é válida para grandes amplitudes.

A preservação destas e outras fontes de não-linearidades é possível pelo procedimento de solução adotado, o qual é baseado na integração numérica ao longo do tempo das equações de movimento. O item 5.5 apresenta uma descrição sucinta dos algoritmos utilizados na solução destas equações.

5.4 FORMULAÇÃO DAS LINHAS

O modelo matemático que representa as linhas pode ser classificado como um problema de valor inicial e de contorno (PVI/C). Este modelo compreende um sistema de equações diferenciais parciais (EDP), um sistema de condições de contorno e um de condições iniciais.

As soluções numéricas para este tipo de problema frequentemente efetuam discretizações dos domínios das variáveis de interesse, e usualmente, no estudo de comportamentos dinâmicos estruturais, são efetuadas as discretizações de forma independente (semi-discretização ref.[26]) em duas etapas, e que neste caso seriam: discretização espacial e discretização no tempo.

5.4.1 Discretização Espacial

Com a discretização espacial o sistema de equações diferenciais parciais (EDP) é então transformado em um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO) semi-discretas (ainda funções contínuas no tempo).

O método mais utilizado para a discretização espacial e solução numérica de problemas dinâmicos estruturais é o MEF (Método de Elementos Finitos)

O domínio é subdividido em vários intervalos (ou subdomínios) contíguos, no caso das linhas ao longo do comprimento, e cada intervalo sendo denominado de elemento finito quando da utilização do MEF. O número de graus de liberdade e a função utilizada para a aproximação da resposta em cada intervalo, entre outras características, determinam o “tipo” de elemento.

No presente estudo, quando da representação das linhas por elementos finitos e, portanto, da utilização do MEF, foi empregado o elemento de pórtico espacial.

O elemento de pórtico espacial possui 6 graus de liberdade por nó. Os graus de liberdade (U, V, W, R_U, R_V, R_W) representam os movimentos lineares nas direções x', y', z' e os movimentos angulares em torno destes eixos, conforme ilustrado na figura seguinte, Figura 5.3.

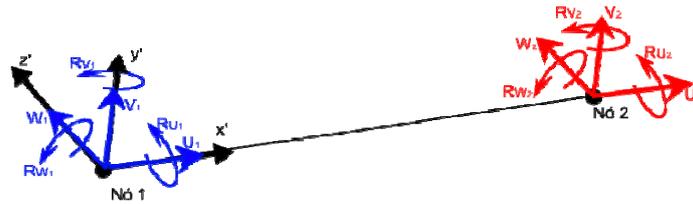


Figura 5.3 Elemento de pórtico espacial

O elemento de pórtico espacial implementado no programa Prosim é baseado numa formulação co-rotacional [27] [28] [29]. Esta formulação é uma alternativa às formulações Lagrangeanas total e atualizada [30], tradicionalmente utilizada 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. Assim obtém-se um elemento mais preciso, robusto e menos sensível à magnitude das rotações incrementais.

5.4.2 Discretização no Tempo

Neste ponto vale ressaltar que o problema de valor inicial e de contorno (PVI/C) representando matematicamente as linhas, após a etapa de discretização espacial, converteu-se em um problema de valor inicial (PVI) compreendendo um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO) e condições iniciais.

O PVI representando as linhas é de certa forma semelhante ao PVI representando a plataforma (este sistema apresentado no capítulo 5.3). Possivelmente mais uma razão para a busca de uma solução simultânea dos dois problemas, isto é, torna-se natural a procura por um procedimento de solução de um sistema composto pelos dois problemas (análise acoplada capítulo 4).

Os PVIs apresentados até aqui podem ser resolvidos por algoritmos de integração numérica. A seção seguinte, capítulo 5.5, apresenta de forma sucinta os principais algoritmos de integração implementados no programa Prosim utilizados neste estudo.

Antes, porém, da utilização dos algoritmos a serem apresentados convém escrever as equações das linhas na seguinte forma:

$$f_{\text{inercial}}(t) + f_{\text{int}}(t) = f_{\text{ext}}(t) \quad (5.10)$$

$f_{\text{int}}(t)$ representa a atuação dos esforços internos, considerado para este caso como função de $U(t)$, vetor deslocamentos nodais, e $\dot{U}(t)$, vetor velocidades nodais, ou seja:

$$f_{\text{int}} = f_{\text{int}}(U(t), \dot{U}(t)) \quad (5.11)$$

$f_{\text{ext}}(t)$ corresponde às forças externas aplicadas à estrutura, e $f_{\text{inercial}}(t)$ corresponde às “forças inerciais”, isto é:

$$f_{\text{inercial}}(t) = M \cdot \ddot{U}(t) \quad (5.12)$$

onde $\ddot{U}(t)$ corresponde às acelerações nodais.

Reescrevendo (5.10) considerando (5.11) e (5.12) tem-se,

$$M \cdot \ddot{U}(t) + f_{\text{int}}(U(t), \dot{U}(t)) = f_{\text{ext}}(t)$$

A matriz de massa M pode ser considerada constante. Já o lado direito, $f_{\text{ext}}(t)$, contém várias não-linearidades, além da geométrica algumas de mesma natureza das encontradas no caso do casco (as forças ambientais, por exemplo, descritas no capítulo 0). As forças internas também contam com não-linearidades, é possível, porém, uma abordagem linear conforme descrita no item seguinte.

Linearizações

Uma linearização comumente utilizada é a aproximação das forças internas $[f_{\text{int}}(U(t), \dot{U}(t))]$ por uma soma de forças elásticas e forças de amortecimento, isto é,

$$\begin{aligned} f_{\text{int}}(t) &= f_{\text{Elásticas}}(t) + f_{\text{Amortecimento}}(t) \\ f_{\text{Elásticas}}(t) &= K \cdot U(t) \\ f_{\text{Amortecimento}}(t) &= C \cdot \dot{U}(t) \end{aligned} \quad (5.13)$$

K é a matriz de rigidez e C a matriz de amortecimento estrutural. Ambas são constantes no tempo. (5.10) pode ser escrita então da seguinte forma:

$$M \cdot \ddot{U}(t) + C \cdot \dot{U}(t) + K \cdot U(t) = f_{\text{ext}}(t) \quad (5.14)$$

Uma abordagem não-linear comum é a consideração das matrizes C e K como variantes no tempo.

Faz-se importante lembrar que (5.14) ainda conta com as não-linearidades de $f_{\text{ext}}(t)$.

5.5 ALGORITMOS DE INTEGRAÇÃO

Neste capítulo estão descritos resumidamente alguns algoritmos para a solução dos Problemas de Valor Inicial apresentados.

5.5.1 Algoritmo Runge-Kutta

Este método é empregado para a solução do PVI do casco (plataforma). O implementado no Prosim especificamente, é denominado de método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Este método é baseado nos conceitos da série de Taylor, sendo sua ordem definida pela ordem da série de Taylor requerida. Emprega uma função de extrapolação polinomial para expressões de primeira ordem do tipo

$$\frac{dy}{dt} = f(y, t) \quad (5.15)$$

, caracterizando os termos do polinômio a partir da estimativa das derivadas em pontos intermediários e no contorno do intervalo de integração.

Apesar do sistema (5.9) estar numa forma similar à descrita acima, deve-se reescrever o sistema considerando o fato de que os vetores **f** e **m** (força e momento) possuem componentes que são proporcionais às acelerações do corpo como os termos de massa adicional – as parcelas de inércia da fórmula de Morison (item 5.7.1.2) – que variam ao longo do tempo.

Separando estas componentes e transferido-as para o lado esquerdo da equação o sistema (5.9) é reescrito da seguinte maneira,

$$\begin{aligned} M \frac{dv}{dt} &= -A \frac{dv}{dt} - B \frac{dv}{dt} + f_1 \\ I \frac{d\omega}{dt} &= -C \frac{dv}{dt} - D \frac{d\omega}{dt} + m_1 - \omega \times (I\omega) \end{aligned} \quad (5.16)$$

A e D são as matrizes de massa adicional avaliadas em cada instante de tempo; B e C são termos cruzados de massa adicional; f_1 e m_1 são as parcelas dos termos de força e momento que dependem da posição, velocidade, tempo e independentes da aceleração.

Isolando os termos com derivadas nas incógnitas,

$$(M + A) \frac{dv}{dt} + B \frac{d\omega}{dt} = f_1 \quad (5.17)$$

$$C \frac{dv}{dt} + (I + D) \frac{d\omega}{dt} = m_1 - \omega \times (I\omega)$$

Em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} M+A & B \\ C & I+D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dv}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ m_1 - \omega \times (I\omega) \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Definindo a matriz de massa global por

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} M + A & B \\ C & I + D \end{bmatrix}$$

\bar{A} é uma matriz simétrica e, em geral, não singular, de modo que sua inversa pode ser expressa numa forma particionada, assim

$$\bar{A}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Multiplicando os dois lados de (5.18) por \bar{A}^{-1} tem-se

$$\frac{dv}{dt} = \bar{A}_{11} f_1 + \bar{A}_{12} [m_1 - \omega \times (I\omega)] \quad (5.20)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \bar{A}_{21} f_1 + \bar{A}_{22} [m_1 - \omega \times (I\omega)]$$

Sistema na forma apropriada para a aplicação do método.

Como mencionado antes, o método baseia-se na extrapolação polinomial de $dy/dt=f(y,t)$, portanto, considerando um intervalo de t até $t+h$ e a função de extrapolação,

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 \quad (5.21)$$

Obtém-se as derivadas em t , $t + \frac{h}{2}$, $t+h$ como,

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

$$\dot{x}\left(t + \frac{h}{2}\right) = a_1 + 2a_2 \left(t + \frac{h}{2}\right) + 3a_3 \left(t + \frac{h}{2}\right)^2 + 4a_4 \left(t + \frac{h}{2}\right)^3 \quad (5.22)$$

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

É possível escrever o valor da função decorrido o tempo h em termos das derivadas da seguinte maneira:

$$x(t+h) = x(t) + \left(\frac{h}{6}\right) \left[\dot{x}(t) + 4\dot{x}\left(t + \frac{h}{2}\right) + \dot{x}(t+h) \right] \quad (5.23)$$

Nesta última equação, (5.23), a derivada é avaliada em três pontos onde a função não é conhecida. Estas derivadas são na verdade estimativas com base numa média ponderada da estimativa da derivada no intervalo seguinte. Comparando-a com as equações do sistema que se quer resolver, (5.20), verifica-se que a avaliação das derivadas pode ser feita calculando o lado direito destas no intervalo h.

Como algumas forças do lado direito destas equações (5.20) dependem das próprias variáveis de movimentos, é necessário que se estimem estes valores. Uma estimativa aprimorada pode ser feita modificando-se (5.23) da seguinte forma:

$$x(t+h) = x(t) + \left(\frac{h}{6}\right) [\dot{x}_1 + 2\dot{x}_2 + 2\dot{x}_3 + \dot{x}_4] \quad (5.24)$$

A derivada no início do presente intervalo de integração é avaliada utilizando valores 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.

A inicialização do processo de integração é feita especificando valores para as variáveis em $t = 0$ (início da simulação). As expressões para estes termos são:

$$\begin{aligned} x_1 &= x(t) \text{ no início do intervalo;} \\ \dot{x}_1 &= f(x_1, t); \\ x_2 &= x_1 + \frac{h}{2} f(x_1, t) = x_1 + \frac{h}{2} \dot{x}_1; \\ \dot{x}_2 &= f\left(x_2, t + \frac{h}{2}\right); \text{ (primeira estimativa de derivada em } \frac{h}{2}) \\ x_3 &= x_1 + \frac{h}{2} \dot{x}_2; \\ \dot{x}_3 &= f\left(x_3, t + \frac{h}{2}\right); \text{ (segunda estimativa de derivada em } \frac{h}{2}); \\ x_4 &= x_1 + h \cdot \dot{x}_3; \\ \dot{x}_4 &= f(x_4, t+h) \end{aligned} \quad (5.25)$$

5.5.2 Algoritmo de Newmark

O algoritmo de *Newmark*, como será visto adiante, é função de dois parâmetros. Portanto, geralmente também é referido como uma “família de algoritmos”.

Apesar do algoritmo utilizado e implementado no Prosim não pertencer a esta família propriamente dita, é em essência derivado desta. Assim será apresentada rapidamente a estrutura principal desta família de algoritmos com o intuito de ilustrar a filosofia do algoritmo utilizado no programa Prosim.

Para a descrição da família de algoritmos de Newmark, a equação (5.12) é reescrita utilizando uma terminologia usualmente empregada na literatura ref.[30] .

$$M \cdot a_{n+1} + C \cdot v_{n+1} + K \cdot d_{n+1} = F_{n+1} \quad (5.26)$$

Os vetores acelerações $\ddot{U}(t)$, velocidades $\dot{U}(t)$ e deslocamentos $U(t)$, funções contínuas no tempo, passam a ser representados, respectivamente, por a_{n+1} , v_{n+1} e d_{n+1} , – ou seja, discretizados em um número n de pontos no tempo. Da mesma forma F_{n+1} representa as forças externas em cada instante $n+1$.

Desta forma o equilíbrio (5.26) deve ser satisfeito em cada instante n .

O algoritmo é caracterizado pela seguinte relação entre os vetores acelerações, velocidades e deslocamentos:

$$d_{n+1} = d_n + \Delta t \cdot v_n + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - 2\beta)a_n + 2\beta a_{n+1}] \quad (5.27)$$

$$v_{n+1} = v_n + \Delta t [(1 - \gamma)a_n + \gamma a_{n+1}] \quad (5.28)$$

γ e β são os parâmetros que caracterizam a família de algoritmos de Newmark. Por exemplo, a regra trapezoidal é obtida tomando-se $\gamma = 1/2$ e $\beta = 1/4$. Δt é a diferença de tempo entre um instante ($n+1$ por exemplo) e o anterior (n), ou também conhecido por intervalo de integração.

Note que (5.27) e (5.28) com (5.26) perfazem um sistema de três equações com três incógnitas: a_{n+1} , v_{n+1} e d_{n+1} . Em outras palavras, temos as acelerações, velocidades e deslocamentos em um instante de tempo a partir de seus valores no instante de tempo anterior.

Há mais de uma maneira de implementação computacional conforme a ordem em que são eliminadas as incógnitas.

Implementação por deslocamentos

Definindo as seguintes constantes:

$$a_0 = \frac{1}{\beta \Delta t^2}; a_1 = \frac{\gamma}{\beta \Delta t}; a_2 = \frac{1}{\beta \Delta t}; a_3 = \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right); a_4 = \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) a_5 = \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \quad (5.29)$$

Isolando o termo com o deslocamento desconhecido, obtém-se:

$$[a_0 M + a_1 C + K] d_{n+1} = F_{n+1} + M[a_0 d_n + a_2 v_n + a_3 a_n] + C[a_1 d_n + a_4 v_n + a_5 a_n] \quad (5.30)$$

Esta expressão é denominada de Sistema Efetivo e pode ser representada da seguinte forma:

$$A \cdot x = b \quad (5.31)$$

A é a *matriz efetiva*, definida portanto como combinação linear das matrizes de massa, rigidez e amortecimento; b é o vetor de termos independentes ou *vetor de cargas efetivas*, calculado em termos das cargas externas, forças elásticas, de inércia e de amortecimento.

Portanto, a resolução do sistema efetivo com a determinação das demais variáveis desconhecidas, conclui o algoritmo de Newmark.

Até o momento a equação considerada, (5.26), possui termos lineares como mencionado no capítulo 5.4.2. A força elástica, por exemplo, varia linearmente com o deslocamento e a força de amortecimento, linearmente com a velocidade.

Contudo, no presente estudo, não-linearidades na força elástica são importantes e o termo $K \cdot d_{n+1}$ (com K constante depende apenas do instante n+1 considerado) pode ser substituído, por exemplo, por $R(d_{n+1})$. Isto é, a força elástica também poderia ser denotada por $K(d_{n+1}) \cdot d_{n+1}$ – matriz de rigidez K função do deslocamento vezes o deslocamento – mas optou-se por $R(d_{n+1})$ – força elástica função do deslocamento – para evitar confusões e deixar a não-linearidade a mais geral possível.

$R(d_{n+1})$ depende então do deslocamento e é claro do instante n+1 considerado, reescrevendo (5.26) considerando as não-linearidades mais relevantes, obtém-se

$$M \cdot a_{n+1} + C \cdot v_{n+1} + R(d_{n+1}) = F_{n+1}(d_{n+1}) \quad (5.32)$$

O método de Newton-Raphson tem sido tradicionalmente empregado na solução de sistemas de equações não-lineares.

Essencialmente o método de Newton-Raphson se baseia numa aproximação linear dos termos não-lineares. Esta aproximação refletirá na equação (5.32), que por sua vez quando combinada com as relações do algoritmo de Newmark resultará em um novo sistema “efetivo” similar ao apresentado em (5.31). Ao contrário deste, (5.31), o novo sistema “efetivo”, devido às aproximações lineares, não pode ser resolvido por técnicas diretas, com a solução aproximada por técnicas iterativas.

A implementação no programa Prosim emprega um procedimento otimizado que combina o algoritmo α B-Newmark de integração com o método de Newton-Raphson para o tratamento das não-linearidades.

O algoritmo α B-Newmark resultou de uma proposta de Bossak e Zienkiewicz ref.[31] de modificação do algoritmo de Newmark original. Possui um procedimento bastante semelhante ao procedimento de Newmark apresentado, possuindo características que tornam interessante o seu uso em conjunto com problemas não-lineares.

A descrição integral e detalhada do procedimento do método de Newton-Raphson e a sua utilização associada com o algoritmo de α B-Newmark, e o próprio algoritmo α B-Newmark, podem ser encontradas em [32] , [4] .

5.6 FORMULAÇÕES DE ACOPLAMENTO

5.6.1 Introdução

Como já mencionado anteriormente, as formulações de análise acoplada de plataformas flutuantes são baseadas na integração numérica no domínio do tempo das equações de movimento de corpo rígido que representam o comportamento hidrodinâmico do casco da plataforma (modelada por elementos cilíndricos), associadas às equações de movimento correspondentes aos modelos de elementos finitos que representam o comportamento estrutural e hidrodinâmico das linhas de ancoragem e risers.

Dependendo de como essas equações são associadas, existem diferentes tipos de acoplamento. O Prosim conta duas maneiras diferentes de acoplamento: uma

formulação Fracamente Acoplada e uma nova formulação Fortemente Acoplada. No presente trabalho utilizou-se a formulação Fracamente Acoplada, contudo, para um melhor entendimento, tanto a implementação Fracamente Acoplada quanto a implementação Fortemente Acoplada estão descritas de forma breve nos itens seguintes. Um descritivo detalhado destas formulações pode ser encontrado em JACOB[33] e BAHIENSE[24]

5.6.2 Formulação Fracamente Acoplada

A formulação Fracamente Acoplada (FrA) está centrada nas equações de movimento do casco: nesta formulação, o acoplamento entre o modelo hidrodinâmico do casco e os modelos de Elementos Finitos das linhas é feito pelo lado direito das equações (5.9).

A cada instante de tempo do processo de integração das equações do casco (5.9), através do método de Runge-Kutta de quarta ordem, efetuam-se passos da análise não-linear dinâmica do 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.

Para isto, montam-se conjuntos de equações (5.14) independentemente para cada uma das linhas de ancoragem e risers. Estas equações são resolvidas por variantes do método de Newmark associado ao método de Newton-Raphson para tratar os efeitos não-lineares em problemas inerciais.

Como resultado, obtém-se as forças e momentos no topo das linhas. Estas forças e momentos são acumulados e introduzidos nos vetores f e m que aparecem no lado direito das equações de movimentos do casco (5.9), somando-se ainda aos carregamentos devidos à onda, vento e correnteza.

5.6.2.1 Implementação Computacional

A Figura 5.4 e Figura 5.5 sintetizam a estratégia computacional adotada para o modelo Fracamente Acoplado. Inicialmente a Figura 5.4 resume a sequência de análises estáticas e dinâmicas como implementado no Prosim. Em seguida, o procedimento de análise dinâmica é detalhado na Figura 5.5, observando-se que existe uma defasagem de

um instante de tempo entre o cálculo das forças no topo da linha e sua aplicação no CG do casco.

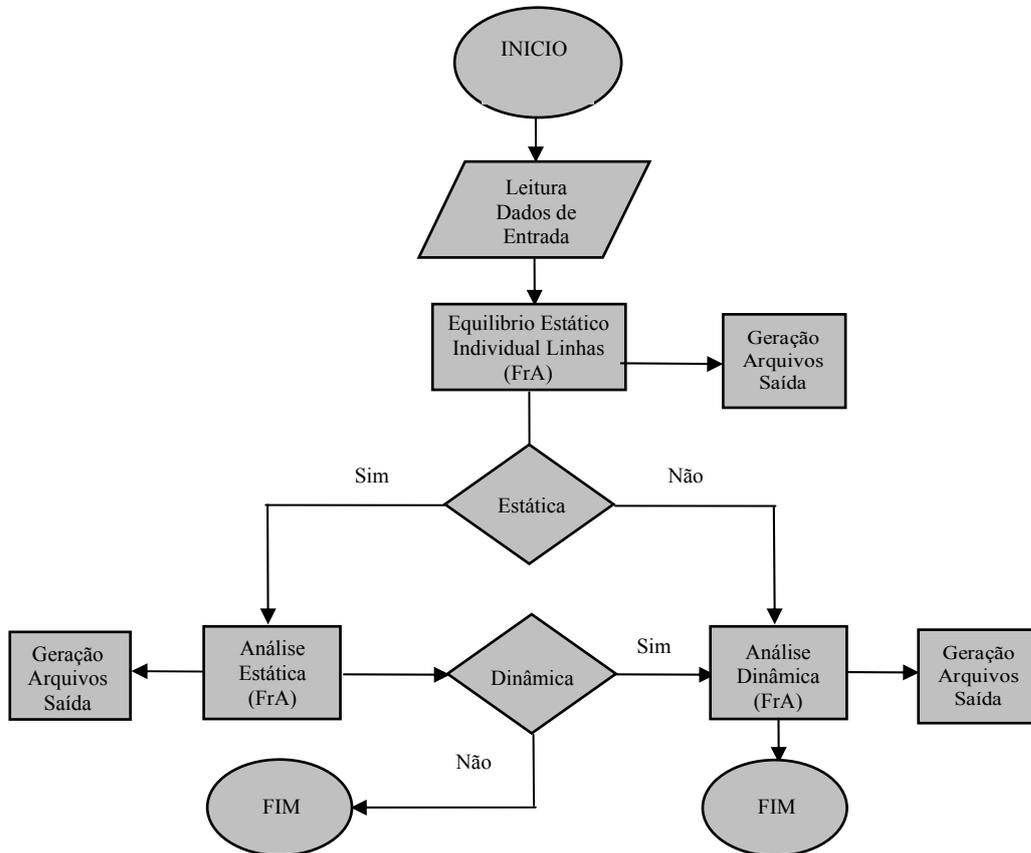


Figura 5.4– Esquema Geral para Análise Fracamente Acoplada.

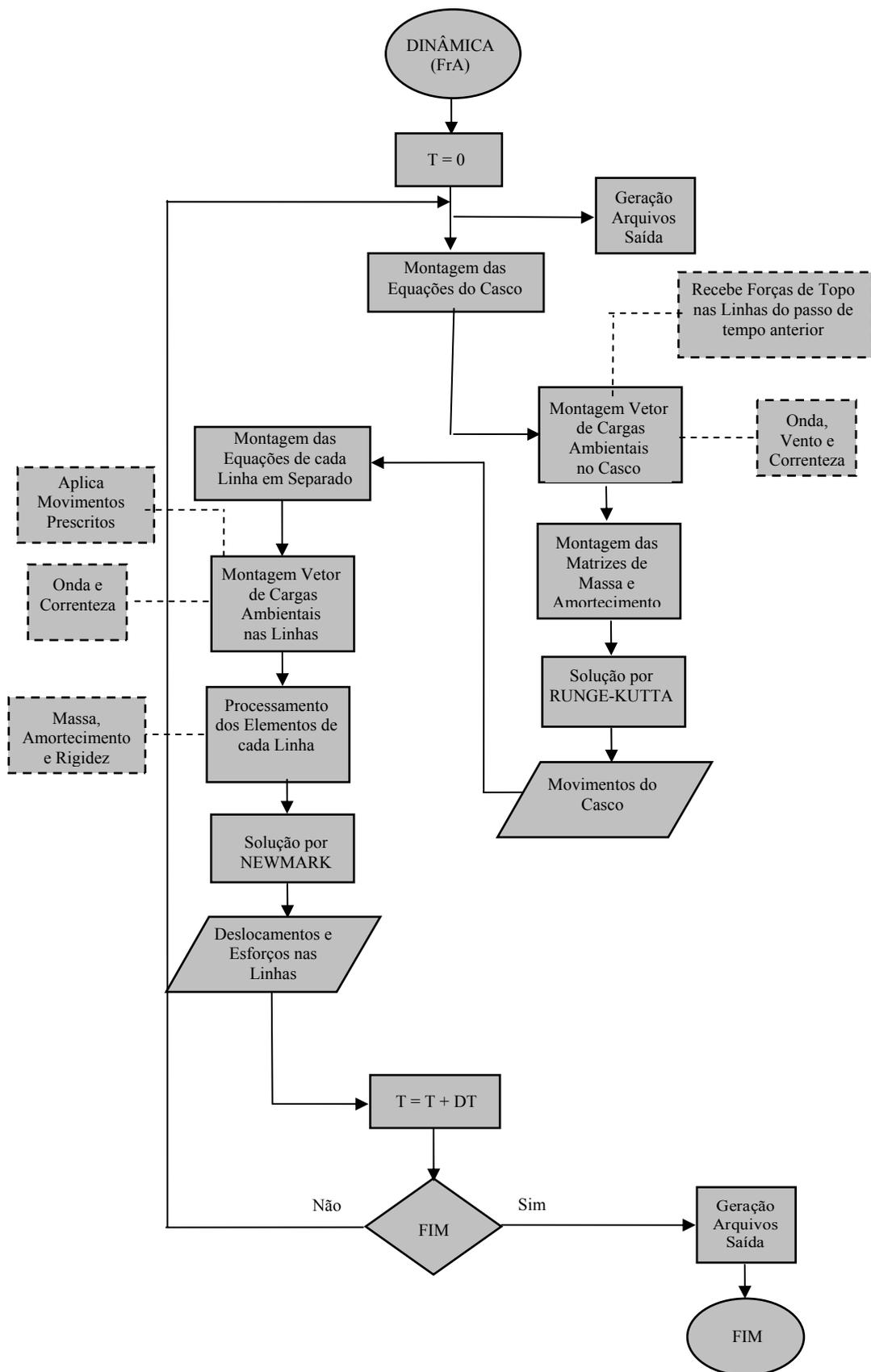


Figura 5.5– Esquema para realização da análise dinâmica FrA.

5.6.3 Formulação Fortemente Acoplada

Enquanto a formulação fracamente acoplada (FrA) estava centrada nas equações de movimento do casco (5.9), a formulação Fortemente Acoplada (FoA), por outro lado, está centrada nas equações de movimento das linhas (5.14).

Esta formulação FoA incorpora, em um único conjunto de equações de movimento, armazenadas em uma única matriz global, as matrizes de elementos finitos (de massa, amortecimento e rigidez) de todas as linhas.

O modelo hidrodinâmico do casco passa a ser associado a um nó desse modelo global de Elementos Finitos, localizado na posição espacial correspondente ao CG. Todas as cargas hidrodinâmicas calculadas para o casco são referenciadas a este nó.

A transferência de movimentos entre o nó que representa o CG do casco e os nós dos pontos de conexão das linhas na plataforma pode ser feita de várias formas: uma solução mais elegante seria implementar procedimentos tipo “*master-slave*”; uma solução mais expedita e eficiente é simplesmente gerar (automaticamente) elementos ligando o nó do CG aos nós das conexões. Tais elementos, com elevada rigidez e massa desprezível, são indicados em verde na Figura 5.6 a seguir.

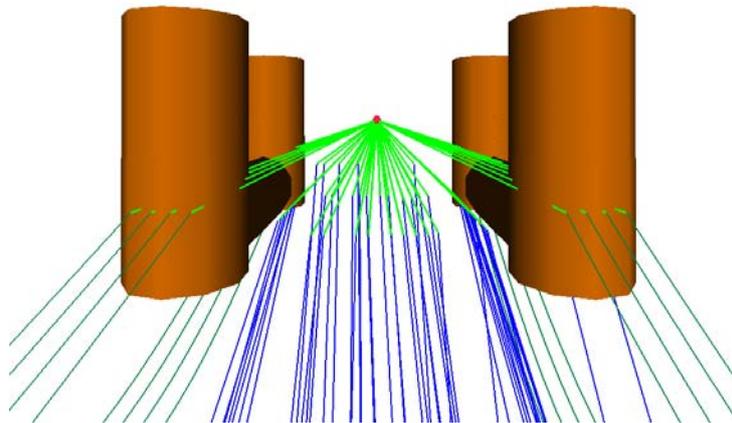


Figura 5.6 – Elementos de transferência do movimento da unidade às linhas

5.6.3.1 Integração Simultânea das Equações de Movimento de todas as linhas

Para a solução das equações de movimento (5.14) totalmente acopladas, empregam-se variantes implícitas do algoritmo de Newmark para integrar as equações de movimento, e o método de Newton-Raphson para tratar os efeitos não-lineares em problemas inerciais. Durante a aplicação do algoritmo de integração, obtém-se uma

única matriz efetiva global, que incorpora os graus de liberdade de todas as linhas, bem como o grau de liberdade correspondente ao CG do casco. Desta forma, tanto a reposta da embarcação como das linhas do sistema, são obtidas simultaneamente no mesmo instante de tempo da simulação.

Observa-se que este procedimento de solução para a formulação fortemente acoplada é o mesmo considerado para a solução de uma linha isolada, baseado na solução das equações diferenciais de movimento (5.14) pela combinação dos métodos de Newmark e Newton-Raphson, levando à montagem do sistema efetivo de equações algébricas. Isto porque se tem apenas uma matriz global, e o modelo hidrodinâmico do casco agora passa a ser introduzido como um nó no modelo de elementos finitos de todas as linhas.

5.6.3.2 *Implementação Computacional*

Na implementação computacional da formulação fortemente acoplada, a estrutura de dados do programa é alterada de forma que as matrizes de elementos de todas as linhas, antes espalhadas em diferentes matrizes globais (uma para cada linha), agora passam a ser espalhadas em uma matriz global única.

Além disso, são automaticamente gerados elementos de pórtico espacial, conectando o nó que representa o centro de gravidade (CG) do casco aos nós que correspondem às conexões de cada linha. Desta maneira, serão criados tantos elementos de conexão quanto forem o número de linhas do modelo, de modo a considerar uma única malha que represente o casco, linhas de ancoragem e risers.

A função destes elementos de conexão é apenas efetuar a transferência de movimentos entre o nó que representa o CG do casco e os nós dos pontos de conexão das linhas. Não pretendem representar o comportamento elástico e inercial do casco, portanto terão elevada rigidez e massa desprezível.

Além disso, também não possuem a função de representar as características hidrodinâmicas do casco; por isso seus coeficientes hidrodinâmicos são tomados como nulos. As características hidrodinâmicas do casco, envolvidas no cálculo das cargas ambientais, são representadas pelo mesmo modelo hidrodinâmico considerado na formulação fracamente acoplada, que levavam à determinação dos vetores f e m indicados na equação (5.9); agora, os valores de forças e momentos resultantes das

cargas ambientais no casco (incluindo onda, vento e correnteza) passam a ser acumuladas no vetor único de cargas equivalentes global, nas posições correspondentes aos graus de liberdade do nó que representa o CG do casco.

Assim como apresentado anteriormente no caso do modelo Fracamente Acoplado, as Figuras a seguir sintetizam a estratégia computacional adotada para o modelo Fortemente Acoplado. Inicialmente a Figura 5.7 resume a sequência de análises estáticas e dinâmicas, destacando agora a fase de geração automática dos nós e elementos de conexão adicionais. Em seguida, o procedimento de análise dinâmica para o modelo FoA é detalhado na Figura 5.8.

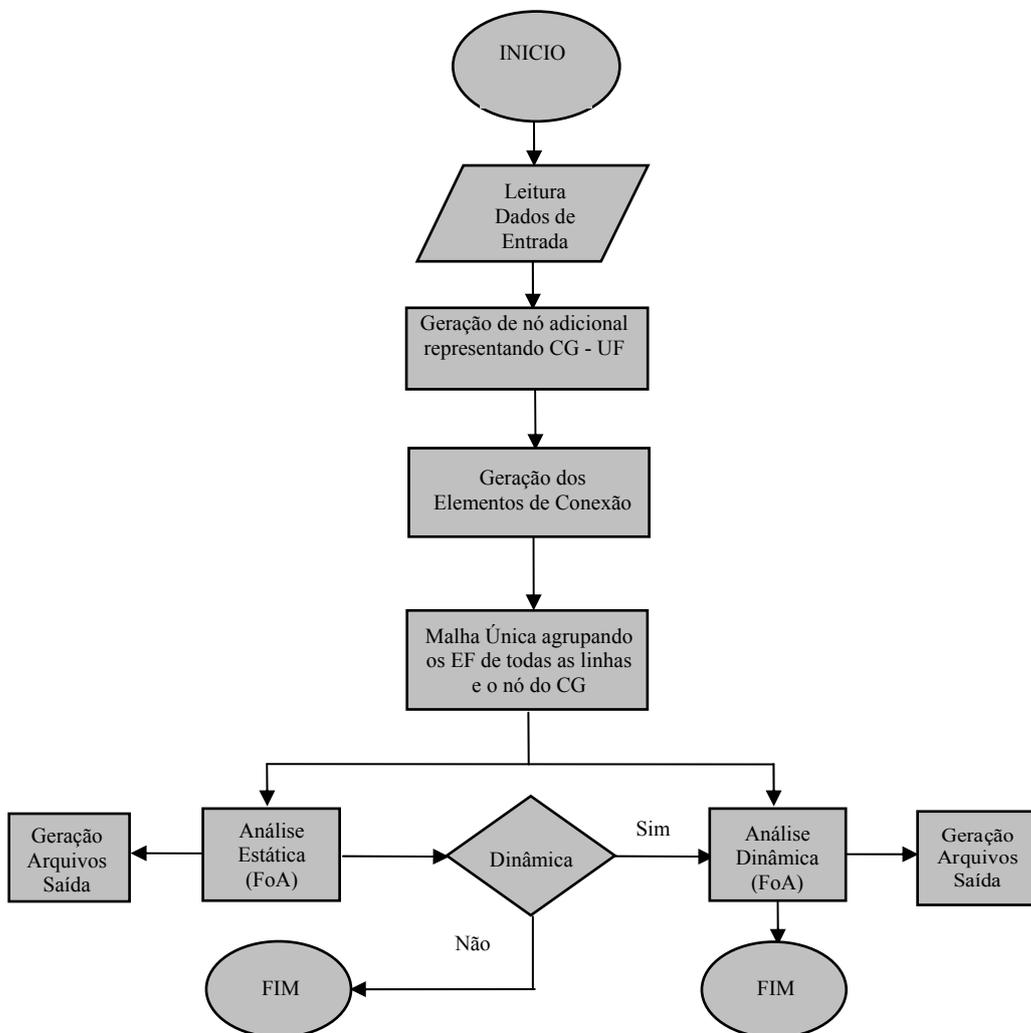


Figura 5.7 – Esquema Geral para análise Fortemente Acoplada.

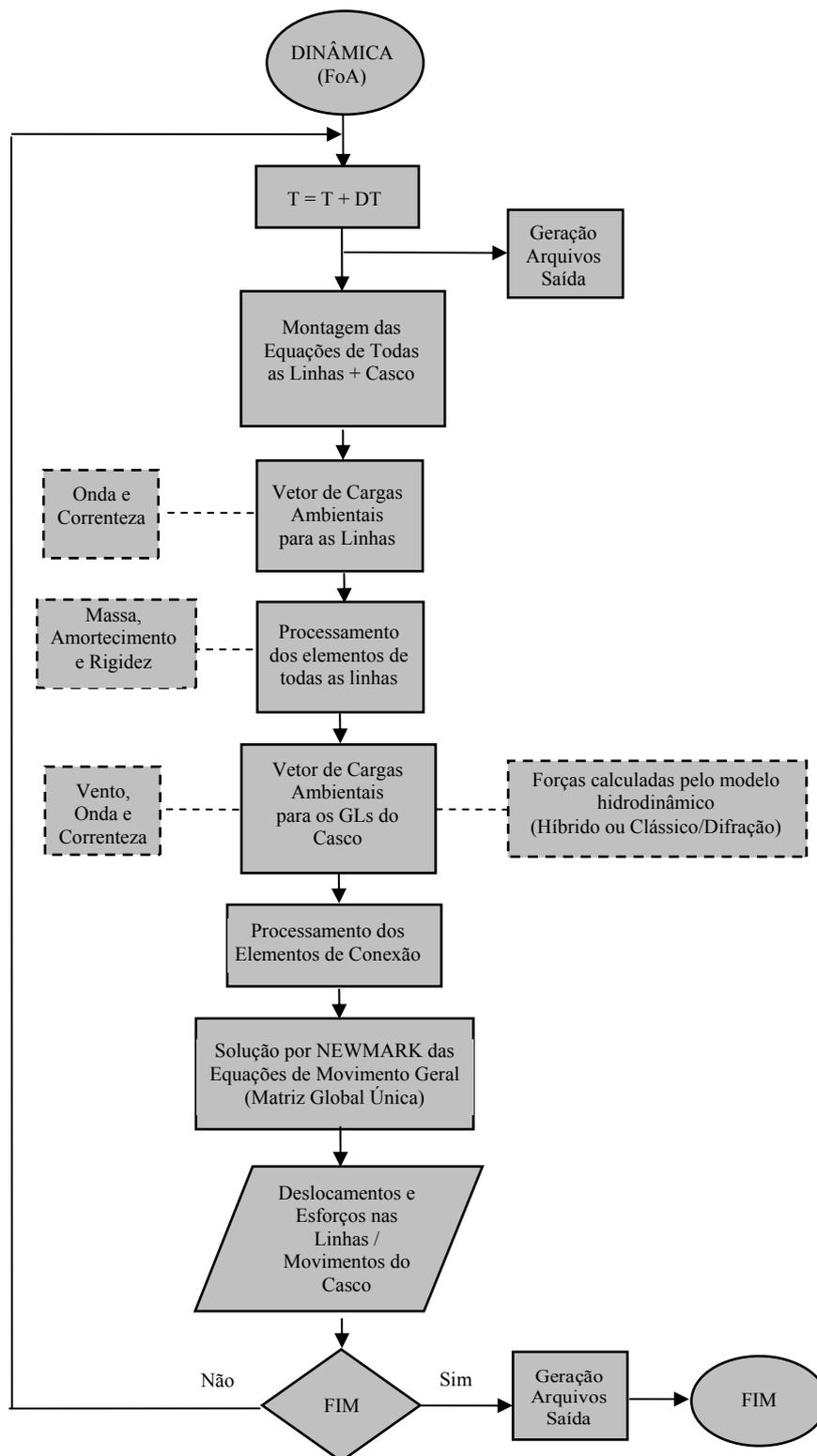


Figura 5.8 – Esquema para realização da análise dinâmica FoA.

5.7 CARREGAMENTO AMBIENTAL

5.7.1 Ondas

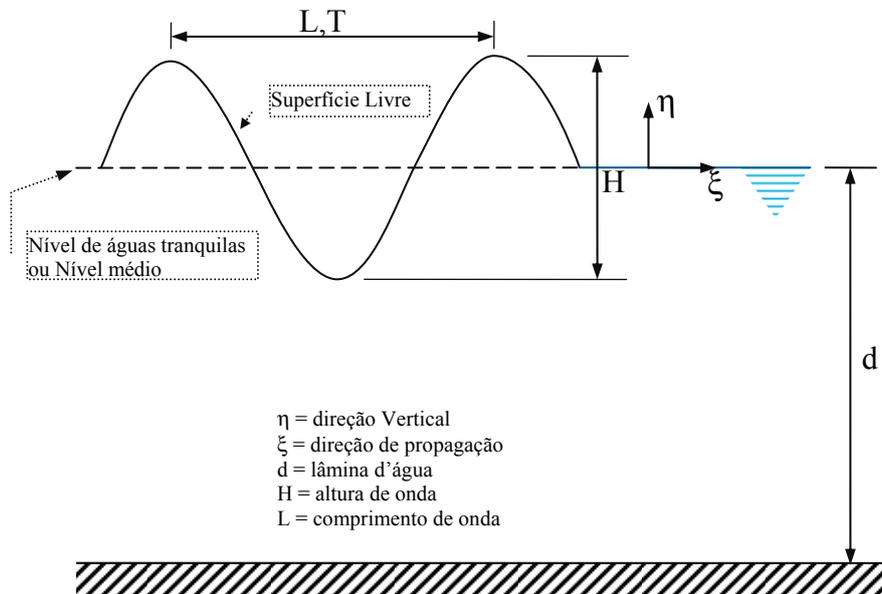


Figura 5.9 Modelo matemático da onda

O modelo matemático que representa as ondas no mar consiste de um problema de valor de contorno (PVC) com condições de contorno associadas. Neste modelo, usualmente adotado, as ondas são bidimensionais no plano $\xi\eta$, periódicas, uniformes e progredindo na direção ξ positiva (ver Figura 5.9). O sentido de propagação da onda também é denominado de “incidência” da onda.

Existem diversos métodos ou “teorias de onda” usadas para a solução deste problema [34], [35]. A solução consiste basicamente na determinação das velocidades e acelerações em cada ponto no fluido através do potencial de velocidade. Outro resultado derivado desta determinação, e também importante, é o campo de pressões no fluido.

O PVC representando as ondas é altamente não-linear, portanto, de modo geral, não é possível obter uma solução analítica rigorosa, assim a solução é frequentemente obtida através de aproximações e/ou utilizando métodos numéricos.

Para exemplificar vale à pena citar duas “teorias de onda” que se utilizam desta aproximação analítica mencionada:

- *Teoria Linear de Airy*, ou Teoria de Onda Senoidal.

- *Teoria de Stokes*, aproximação não-linear

Ambas as teorias aproximam a solução por uma série de potências.

A Teoria Linear de *Airy* parte da premissa que a altura de onda H é pequena quando comparada com o comprimento de onda L . Desta maneira mantém-se apenas o primeiro termo da série (ou termo de primeira ordem) desprezando os demais. A solução passa a ser linear em relação à altura H .

A Teoria de Stokes considera além do primeiro outros termos (segunda, terceira ou quinta ordem).

A Teoria Linear de *Airy* é a mais comum na prática de projetos, adequada em análises com parâmetros estatísticas (variáveis aleatórias), pois permite a superposição de efeitos. Esta teoria, adotada no presente estudo, é implementada no programa Prosim com uma adaptação: o método de extrapolação ou “*stretching*” de Wheeler

Teoria Linear de *Airy* com método de extrapolação de Wheeler

A Teoria de *Airy* é desenvolvida considerando como condição de contorno o nível médio do mar (nível de águas tranquilas) e não a superfície livre da onda.

Mas em muitas situações, onde a altura de onda é significativa (ainda pequena em relação ao comprimento, a premissa permanece), ou seja, o efeito da alteração da superfície livre sobre a força induzida pela onda torna-se significativa, faz-se necessária algum tipo de correção para considerar o efeito dos pontos acima do nível médio. Dentre alguns métodos conhecidos o implementado no Prosim consiste no método proposto por WHEELER ref.[36] .

5.7.1.1 *Representação Espectral*

A Teoria de *Airy* apresentada permite a representação de um mar onde ocorre a propagação unidirecional de uma onda com altura H e período T constantes. Este mar ou estado de mar é conhecido por “mar regular”, ou, referindo-se à onda, como “onda determinística,

Quando a superfície livre de um mar real é analisada, percebe-se que a sua representação por uma única onda de altura H e período T é ruim ou insuficiente, isto é,

o perfil do mar é “irregular”, embora possa ser visto como uma superposição de várias ondas com alturas H , períodos T e até direções diferentes.

A representação desta condição, então, pode ser aproximada por uma soma de várias ondas regulares, ondas senoidais (*Airy*), com uma única direção de propagação (incidindo sobre a unidade), e a esta representação é usual a denominação de “mar irregular” ou “estado de mar irregular”.

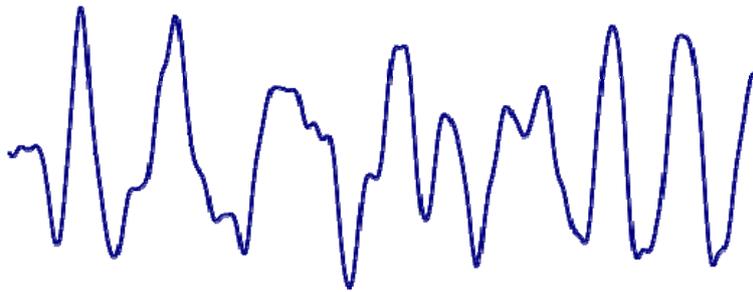


Figura 5.10 Registro de um estado de mar irregular

Cada onda regular é uma “componente do mar” e o conjunto de valores H com períodos T associados de um mar irregular é normalmente representado por um modelo espectral. O modelo visa determinar a energia em cada frequência (ou período T), constituindo então uma curva de densidade de energia, de modo que a área sob a curva deve ser equivalente à energia total do mar.

Desde que o fenômeno é tratado como um processo aleatório o espectro é construído em termos de parâmetros estatísticos da altura H , período T e correlações entre estes. Isto é, a equação da curva que representa o espectro é parametrizada e possui como parâmetros dados estatísticos, como a altura significativa H_s , período de pico T_p e ainda fatores de forma.

Foram propostas diversas equações (modelos espectrais) para a representação de um estado de mar com base em observações. Na prática a escolha é feita por aquela que melhor se ajusta às observações em uma posição geográfica específica - ou seja o modelo de espectro varia conforme a região considerada.

Os dois modelos mais utilizados são:

- Espectro de Pierson-Moskovitz, baseado na altura significativa ou velocidade de vento.
- Espectro de Jonswap, baseado em cinco parâmetros, mas usualmente três desses parâmetros são mantidos constantes.

A Petrobras vem adotando uma expressão do espectro de Jonswap ajustada para representar as condições da Bacia de Campos. Tal expressão, considerada no presente trabalho, é apresentada com maiores detalhes na seção 6.4.2.

5.7.1.2 *Força induzida pelas ondas*

Para o cálculo da força gerada pelas ondas foram desenvolvidas diversas formulações, CHAKRABARTI [34] , por exemplo, apresenta as mais utilizadas. Cada formulação foi desenvolvida considerando sistemas com determinadas características, ou premissas. Mais adiante será apresentada sucintamente a teoria envolvendo cada formulação.

Historicamente, e em muitos casos ainda hoje, uma única formulação é adotada para a solução de um determinado cenário, aquela cujas hipóteses e premissas melhor configurem o sistema em estudo.

O Prosim [8] emprega um modelo híbrido que combina três formulações, referidas como: Formulação de Morison, Formulação de Froude-Krilov e Teoria Potencial. Este procedimento segue a proposta apresentada por HOOFT [37] e PAULING[38] .

Conforme mencionado o modelo híbrido utiliza uma combinação, e não as três formulações integralmente, de tal forma que o sistema considerado não precise “cumprir” rigorosamente todas as hipóteses das três teorias. Isto é, o objetivo é combinar as características positivas de cada formulação buscando o modelo numérico mais realístico possível. Assim, os termos considerados em uma formulação complementam as lacunas ou simplificações utilizadas em outra.

Enfim, a seguinte expressão é utilizada no Prosim para o cálculo das forças atuantes na plataforma devido à movimentação do fluido provocada por ondas:

$$F_{WC} = f_{FK} + f_{Mm} + f_{Md} + f_D + f_{PD} \quad (5.33)$$

- O primeiro termo, f_{FK} , é a força de Froude-Krilov, função da pressão do fluido p . (Formulação de Froude-Krilov)
- O segundo e terceiro termos, f_{Mm} e f_{Md} , correspondem aos termos de arraste e inércia da fórmula de Morison. É importante ressaltar que para ser válida a superposição da parcela de inércia com o termo de Froude-Krilov (que também representa um termo de inércia, considerando somente as acelerações do fluido) na aplicação da fórmula de Morison não deve ser fornecido o coeficiente de inércia C_m e sim o coeficiente de massa adicional C_a (somente as acelerações do corpo). (Formulação de Morison)
- O quarto termo, f_D , corresponde às forças de Deriva Média e Lenta. (Modelo de Difração/Radiação baseado na Teoria Potencial).
- O quinto termo, f_{PD} , corresponde às forças de Amortecimento Potencial. (Modelo de Difração/Radiação baseado na Teoria Potencial).

Formulação de Froude-Krilov

Nesta formulação, a força atuante no corpo é resultado da pressão gerada pela passagem de uma onda incidindo sobre o corpo. A expressão para o campo de pressões no fluido gerado pela passagem da onda é o obtido pelo modelo matemático da onda, no presente estudo pela Teoria de *Airy*. Porém, no desenvolvimento dos modelos de onda as únicas condições de contorno consideradas foram o fundo do mar e a superfície livre, portanto não consideram a presença de um corpo.

Ou seja, a premissa básica desta formulação é a de que a estrutura da plataforma tenha forma e dimensões que não afetem significativamente o fluxo de partículas fluídas, pois o campo de velocidades e acelerações, que resultam no campo de pressões, são calculados ignorando a presença de qualquer corpo (como se a plataforma não existisse).

Não obstante, a força total na estrutura numa determinada direção é obtida pela integração da componente de pressão, sobre a parte submersa do corpo, nesta direção. Isto é:

$$F_X = C_H \iint_S p n_X dS \quad (5.34)$$

$$F_Y = C_V \iint_S p n_Y dS \quad (5.35)$$

F_X e F_Y são as componentes de força horizontal e vertical e n_X e n_Y são as componentes horizontal e vertical do vetor normal à superfície do corpo

A formulação é semi-empírica já que os coeficientes de força horizontal e vertical, C_H e C_V , devem ser determinados empiricamente.

Perceba, pelas eq. (5.34) (5.35), que o cálculo da força leva em conta apenas a pressão, a viscosidade não é considerada. Como as teorias de onda usualmente não consideram também a viscosidade, a formulação de Froude-Krilov é uma formulação que despreza os efeitos viscosos.

Em determinadas situações, quando da utilização de uma teoria de onda linear e para algumas formas particulares de membros submersos (como cilindros ou esferas), CHAKRABARTI [34] demonstra que as expressões resultantes são semelhantes às obtidas pela parcela de inércia da fórmula de Morison (Morison no tópico seguinte).

Assim, segundo CHAKRABARTI [34], a formulação de Froude-Krilov é mais adequada quando a força de arraste é pequena e os efeitos de inércia predominam sobre os viscosos e o corpo é ainda relativamente esbelto (sua presença não afeta significativamente o fluxo de partículas fluídas). Poucas aplicações práticas atendem a estas hipóteses, em casos em que efeitos de difração são significativos, mas 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. Em alguns casos a proximidade do corpo com o fundo ou à superfície livre produz efeitos de difícil quantificação nos coeficientes.

Formulação de Morison

A formulação de Morison é voltada também para corpos esbeltos, pois considera velocidades e acelerações utilizando teorias de onda, como a teoria de *Airy*, considerando assim que a perturbação causada pela presença do corpo é ignorada.

A equação de Morison foi desenvolvida com o foco em membros cilíndricos, por isso corpo esbelto pode ser entendido também como um corpo com dimensão transversal característica D pequena em relação ao comprimento de onda λ . Um critério usualmente empregado para verificar se um corpo é esbelto consiste em verificar se $D/\lambda < 5$.

A formulação de Morison assume que as forças podem ser calculadas com a aproximação de que parâmetros como velocidades, acelerações e pressões na superfície do corpo podem ser substituídos pelo valor correspondente calculado no eixo do corpo esbelto (pela teoria de onda como se ele não existisse).

Enfim, a equação da Força de Morison é baseada na soma de duas parcelas: uma parcela de arraste associada a efeitos viscosos, proporcional à velocidade do fluido e do corpo; e uma parcela de inércia, proporcional às acelerações do fluido e do corpo.

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_D \cdot |\dot{u} - \dot{x}| \cdot (\dot{u} - \dot{x}) + \rho_w \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (C_m \cdot \ddot{u} - C_a \cdot \ddot{x}) \quad (5.36)$$

ρ_w é a massa específica do fluido; D é uma dimensão transversal característica (usualmente o diâmetro de um membro cilíndrico); \dot{u} , \dot{x} , \ddot{u} e \ddot{x} são respectivamente as velocidades e acelerações do fluido e do corpo. A primeira parcela, proporcional às velocidades, corresponde à parcela de arraste. A segunda parcela, proporcional às acelerações, corresponde à parcela de inércia.

A equação de Morison é semi-empírica já que as parcelas de arraste e inércia são afetadas por coeficientes adimensionais C_D , C_M e C_A , que devem ser obtidos experimentalmente (não devem ser confundidos com os coeficientes de força horizontal e vertical C_H e C_V de Froude-Krilov).

Em casos onde os membros da plataforma se encontram muito próximos, podem ocorrer situações em que uma porção da massa do fluido fique confinada, agindo como parte da estrutura e levando ao aumento da parcela relacionada com a massa adicional. Assim, a utilização da formulação de Morison sem mais nenhuma consideração, leva a adoção da premissa de que os membros além de esbeltos estão razoavelmente espaçados entre si, de modo que o espaçamento entre dois membros é grande comparado com as dimensões transversais da seção.

Com isto em consideração, a presença de outros membros não afetaria no cálculo da força em cada membro. A força total pode ser obtida somando-se as forças calculadas individualmente para cada membro da plataforma.

Ainda o efeito de “confinamento” do fluido poderia ser modelado empiricamente, aumentando o valor de C_A (proporcional à aceleração do corpo) sem alterar o C_M (proporcional à aceleração do fluido).

Modelo de Difração/Radiação

A formulação baseada no modelo de difração/radiação considera que a presença do corpo altera de forma significativa o fluxo de partículas fluídas (conceito oposto do adotado na formulação de Morison e na Froude-Krilov). Por isto se torna o mais adequado para corpos de grandes dimensões, quando comparados com o comprimento de onda (corpos que perturbam as ondas).

Neste caso, há uma interação fluido-estrutura e podem ser observados fenômenos como difração, interferência e radiação de ondas pela estrutura. O campo de velocidades, acelerações e pressões será resultado de todos estes efeitos.

O modelo de Difração/Radiação é um modelo matemático tridimensional e pode ser visto como uma generalização do modelo bidimensional que representam as “teorias de onda”. Ou em outras palavras, os PVCs são análogos, é a mesma equação diferencial com uma parcela a mais considerando assim três dimensões (na teoria de onda considerou-se apenas a direção de propagação e a vertical).

Da mesma forma, o modelo de Difração/Radiação busca determinar o potencial de velocidades, e novamente, a determinação do potencial não leva em consideração os efeitos viscosos. Modelos mais rigorosos que levem em conta efeitos viscosos devem utilizar as equações de Navier-Stokes [37] constituindo um modelo matemático ainda mais complexo. O modelo de Difração é então mais adequado em sistemas onde os efeitos viscosos são pequenos e os efeitos inerciais preponderam, como no caso de navios.

Como no caso do PVC da teoria de ondas, o PVC de Difração/Radiação é altamente não-linear e de modo geral não é possível obter uma solução analítica rigorosa. A solução deve ser obtida introduzindo aproximações e métodos numéricos.

O WAMIT por exemplo é um código extensamente utilizado para a resolução numérica do PVC de Difração/Radiação no domínio da frequência

De modo semelhante ao que é feito na “teoria de onda” a solução do modelo de Difração/Radiação pode ser aproximada por uma soma de potências. Assim podem ser obtidas separadamente soluções conforme a quantidade de termos que se tomar da série.

Em expressões de primeira ordem os resultados são funções lineares da altura de onda. Em soluções de segunda ordem os resultados possuem termos lineares e quadráticos da altura de onda.

Como resultado da aplicação de uma solução de primeira ordem obtém-se um potencial de velocidades, originado um campo de pressões, acelerações, e que por sua vez podem ser utilizados para o cálculo das forças (cargas) de “primeira ordem” atuantes no corpo. Estas cargas (forças) frequentemente são dispostas em curvas/tabelas conhecidas por RAO's (*Response Amplitude Operator*).

Forças de Segunda Ordem

Em soluções de segunda ordem surgem forças que atuam em frequências diferentes da frequência de excitação.

Quando o sistema é excitado por ondas regulares (altura e período constantes) é possível identificar uma parcela estática denominada *força de deriva média*. Geralmente esta parcela é determinada através de “funções de transferência quadrática”(QTF). Para cada frequência ω_i da onda regular é fornecido um coeficiente que define a força de deriva média associada à onda ω_i .

Em estados de mar irregulares, representados por um espectro e compostos pela superposição de diferentes ondas regulares de amplitude A_i e frequência ω_i , além da força de deriva média podem ser identificadas mais duas parcelas:

- *Forças de Deriva Lenta*. Estas forças atuam em frequências baixas, correspondentes à diferença de frequências que representam o espectro.
- *Forças de Frequência Altas*. Correspondentes à soma das frequências que compõem o espectro. Em TLPs levam a movimentos usualmente referidos a “*springing*”. (Há também uma resposta observada em TLPs denominada “*ringing*”, relacionada às forças não-lineares de altas frequências

provocadas quando da incidência de uma onda com grande inclinação. Ver ref.[11])

O cálculo das forças de segunda ordem pode ser efetuado avaliando e integrando o campo de pressões 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 os coeficientes de transferência (QTF) similarmente ao feito para as cargas de deriva média.

É importante destacar que como no caso da teoria de onda, as aproximações na solução do modelo de Difração/Radiação tornam os resultados válidos para pequenas amplitudes ou alturas de onda.

Amortecimento Potencial

Segundo HOOFT [37] , nenhum efeito de amortecimento é observado em corpos submersos oscilando longe da superfície livre em um fluido invíscido. Efeitos de amortecimento na teoria potencial são observados com o movimento do corpo próximo à superfície livre.

O amortecimento potencial pode ser entendido como a perda de energia por irradiação de ondas pelo movimento do corpo. A partir da teoria potencial é possível determinar coeficientes de amortecimento para cada frequência.

5.7.2 Correnteza

A correnteza é representada através de um “perfil” poligonal que define vetores de velocidade para cada profundidade, desde o fundo do mar até a superfície.

Na grande maioria dos cenários a correnteza é considerada como um carregamento estático, a taxa de variação da intensidade e direção é muito pequena comparada com o período analisado. Apesar disso pode ainda resultar em efeitos dinâmicos como as vibrações induzidas por vórtices (VIV) em *risers* e tendões.

A força atuante da correnteza é calculada através da formulação de Morison.

5.7.3 Vento

O vento também pode ser representado por um perfil de velocidades, normalmente parabólico sendo zero na superfície livre e aumentando com a altura. Diferentemente da correnteza é usual assumir uma direção constante ao longo altura h , altura a partir do nível de águas tranquilas.

A força induzida pelo vento pode ser considerada, em um projeto, de duas maneiras:

- força de vento estática, constante no tempo
- força de vento variável, calculada em função de uma componente estática somada a uma componente variando, representada através de um espectro de vento (utilizado do mesmo modo que o espectro de mar no caso das ondas)

A força pode ser calculada a partir das seguintes expressões:

$$\begin{aligned}F_X &= \frac{1}{2} \rho_{\text{ar}} C_{vx}(\psi) A_{ts} V_W^2 \\F_Y &= \frac{1}{2} \rho_{\text{ar}} C_{vy}(\psi) A_{ls} V_W^2 \\M_Z &= \frac{1}{2} \rho_{\text{ar}} C_{mz}(\psi) A_{ls} L V_W^2\end{aligned}\tag{5.37}$$

ρ_{ar} é a massa específica do ar; V_W velocidade do vento; A_{ts} área exposta frontal da unidade (medida no plano de normal X estrutural); A_{ls} área exposta lateral da unidade (medida no plano de normal Y estrutural); L comprimento da unidade ao longo do eixo X estrutural; $C_{vx}(\psi)$, $C_{vy}(\psi)$, $C_{mz}(\psi)$ coeficientes aerodinâmicos de força e momento tabelados para cada direção de ψ . O ângulo ψ é a direção de incidência do vento em relação ao sistema de eixos local da unidade (sistema móvel que acompanha o movimento da unidade).

Os coeficientes aerodinâmicos geralmente são obtidos empiricamente através de ensaios em túneis de ventos.

As forças são aplicadas no centróide da área exposta.

O espectro mais utilizado e implementado no programa Prosim é o proposto pelo API RP 2A [39].

6 DESCRIÇÃO DOS CASOS ESTUDADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma descrição do cenário escolhido e dos modelos elaborados. O item 6.2 trata das características físicas do sistema considerado para os estudos. O item 6.3 apresenta os diferentes modelos numéricos elaborados para representar os diferentes componentes do sistema em questão. Os carregamentos ambientais considerados são descritos no item 6.4. E por último, no item 6.5, uma tabela de referência com todos os modelos computacionais e suas características mais importantes.

6.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

O sistema de produção em estudo foi concebido para operar em uma lâmina d'água de 1200 metros na Bacia de Campos. Este sistema, descrito nos itens seguintes, foi empregado em todos os estudos paramétricos, tendo sido variado apenas os tipos de modelos numéricos utilizados nas simulações.

6.2.1 Casco da TLP

O casco utilizado para a TLP é um casco convencional, 4 colunas e 4 *pontoons*, conforme ilustrado na Figura 6.1 e as características da Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 - Dimensões principais TLP

<i>Dimensões</i>		<i>Valores</i>
Diâmetro das colunas	(m)	20,5
Distância entre colunas	(m)	62
Altura da coluna	(m)	49,5
Altura do <i>pontoom</i>	(m)	9
Largura do <i>pontoom</i>	(m)	12
Calado	(m)	28,7
Deslocamento	(ton)	58026
Área vélica	(m ²)	1250

Tabela 4 – Propriedades de Massa e raios de giração da unidade

<i>Massa</i>	43319,5 toneladas		
<i>CG (x,y,z)</i>	(0 m; 0 m; 24,119 m)		
<i>Raios de Giração (m)</i>			
	<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Yaw</i>
<i>Roll</i>	30,7	12,5	-6,53
<i>Pitch</i>	12,5	32,1	-9,8
<i>Yaw</i>	-6,53	-9,8	32,7

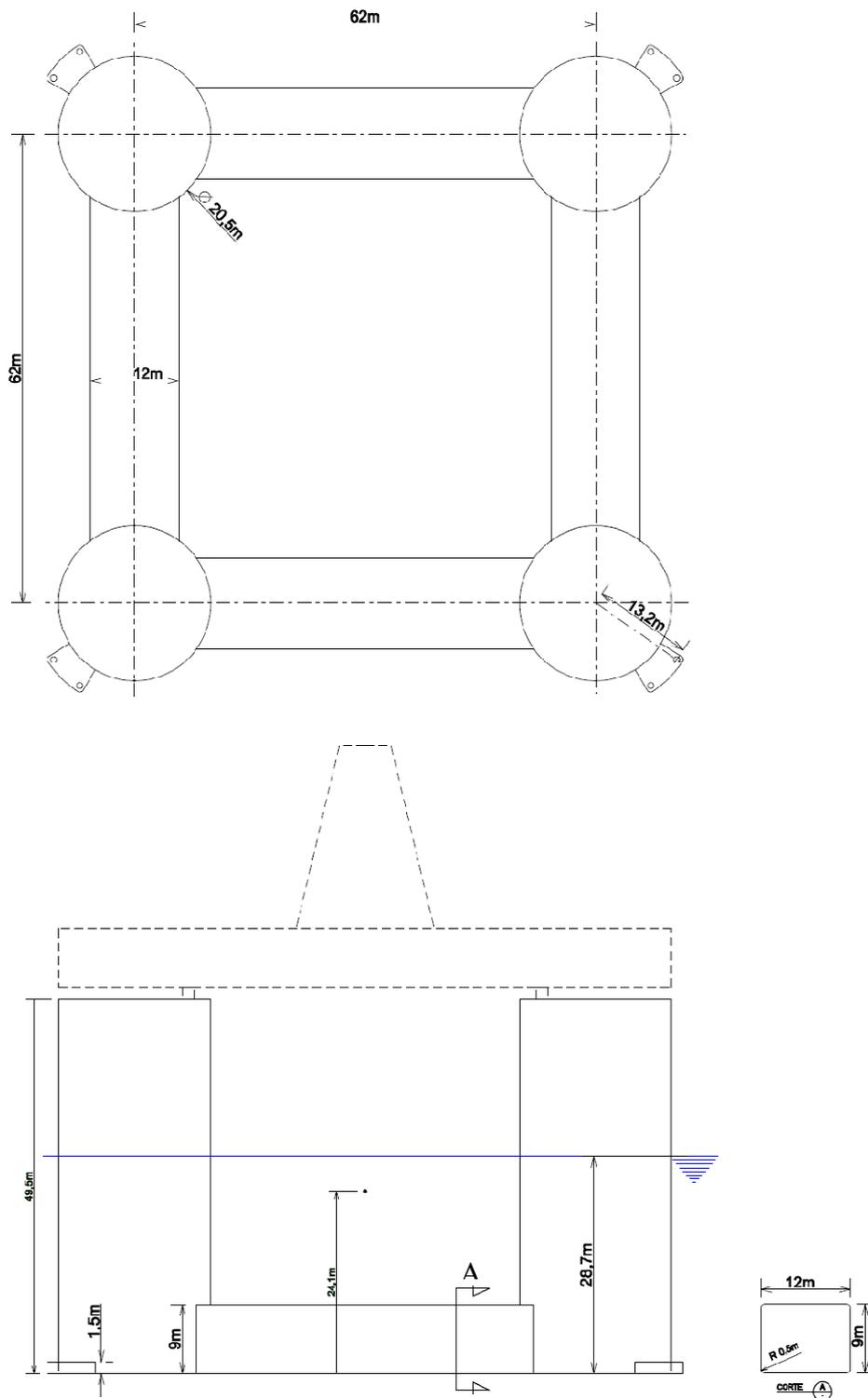


Figura 6.1 Principais dimensões de TLP considerada

6.2.2 Tendões

Os tendões considerados possuem as mesmas propriedades básicas dos tendões projetados em unidades TLP já instaladas: são tubos de aço estanques não pressurizados, isto é, possuem empuxo.

Neste estudo os 8 tendões possuem características físicas idênticas, descritas na tabela seguinte

Tabela 5 - Propriedades dos tendões

Comprimento	1170,218	(m)
Diâmetro Externo Físico	0,8128	(m)
Diâmetro Externo Hidrodinâmico	0,8128	(m)
Espessura	38,1	(mm)
Peso Seco	8518	(KN)
Peso Submerso	2413	(KN)
Pré-Tração	18004	(KN)
Tensão de Escoamento	450	(MPa)
CD	1,7	
CM	2	
EA	19472768	(KN)
Diâmetro/Espessura	21,33	

6.2.3 Risers

Procurou-se definir um arranjo de risers que fosse representativo de uma aplicação real. O sistema de risers definido consiste de 21 risers: 17 de produção, 1 de perfuração, 2 SCR de exportação de óleo e 1 SCR de exportação de gás. Os risers de produção e perfuração são do tipo rígido vertical ou TTRs (principais características de risers do tipo TTRs e SCR já descritas no item 3.5).

A Tabela 6 apresenta as principais características físicas dos *risers*. A Figura 6.2 e Figura 6.3 apresentam o arranjo dos *risers*.

Tabela 6 – Características físicas e geométricas dos risers

<i>Produção</i>		
	Diâmetro Externo	Espessura
<i>Outer casing</i>	14 in (0,356 m)	0,75 in (0,019 m)
<i>Tubing</i>	7 in (0,178 m)	0,5 in (0,013 m)
<i>SCR</i>	12,75 in (0,324 m)	0,688 in (0,017 m)
<i>Isolamento Térmico</i>	2 in (0,051 m) Espessura para óleo e nenhum para gás	
<i>Rigidez Riser</i>	4608 KN/m	
<i>Rigidez Tensionador</i>	1600 KN/m	
<i>Rigidez Total</i>	1191 KN.m	
<i>Pré-Tração</i>	1961 KN (200 tonf)	
<i>Perfuração</i>		
	Diâmetro Externo	Espessura
<i>Outer casing</i>	21 in (0,533 m)	0,875 in (0,022 m)
<i>Rigidez Riser</i>	6154 KN/m	
<i>Rigidez Tensionador</i>	1600 KN/m	
<i>Rigidez Total</i>	1273 KN.m	
<i>Pré-Tração</i>	5884KN (600 tonf)	

Existem poucas informações disponíveis a respeito das características de um sistema tracionador (referenciado aqui como PRT – *Production Riser Tensioner*), provavelmente devido à grande diversidade de parâmetros envolvendo a definição de um PRT. MYERS[19] realiza um estudo com PRT considerando variação de tração no *riser* de no máximo 40%. JORDAN[17] apresenta um estudo sobre tracionadores sem uma aplicação específica e adota uma variação de tração de $\pm 20\%$ para produção e $\pm 10\%$ para perfuração. DENISON[40] indica que os PRTs utilizados em *Auger* e *Mars* são ajustados para apresentarem uma rigidez como porcentagem da tração total por unidade de *stroke*, a rigidez contudo é não-linear e vantajosa pois, próximo dos limites

de *stroke*, ela aumenta rapidamente, o que diminui os requisitos de *stroke* máximo. CARMINATI[41] indica que a rigidez do tensionador considerado no projeto de *Ursa* é de 110 kips/ft, como a unidade apresenta características relativamente próximas do cenário em estudo adotou-se este valor.

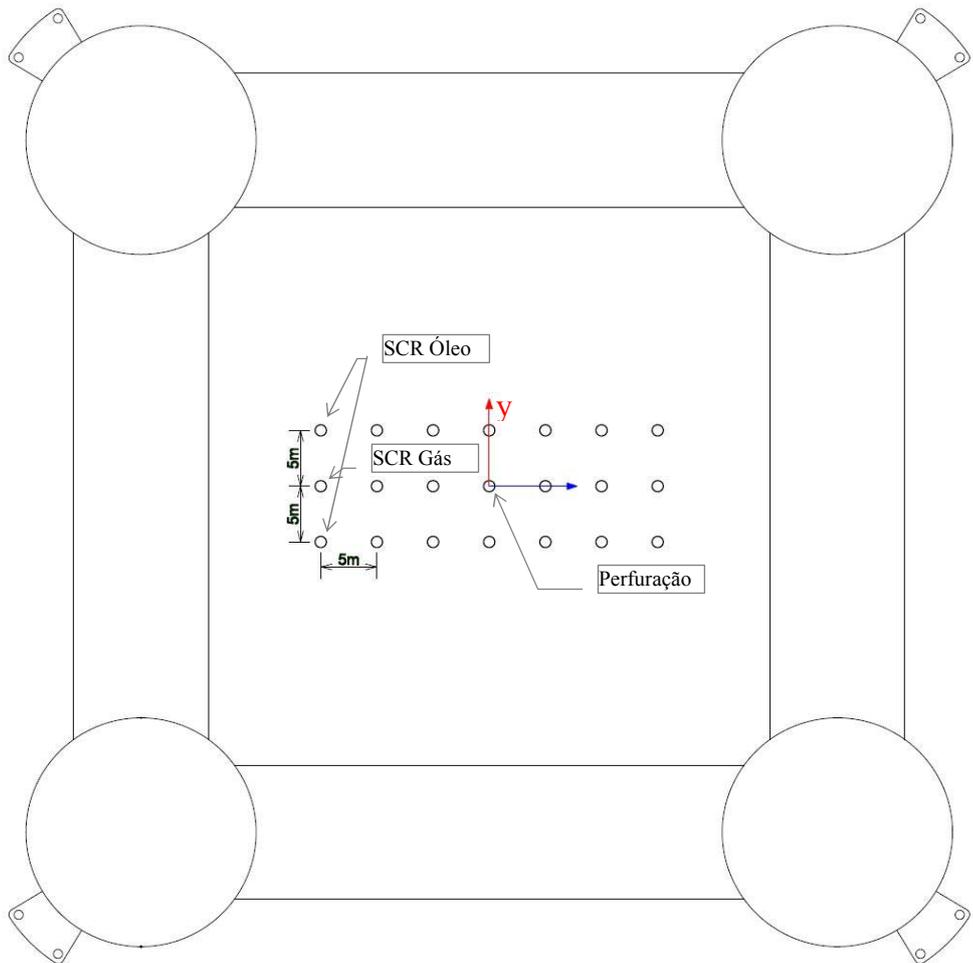


Figura 6.2 Arranjo dos risers no convés de produção, conexão dos risers à TLP.

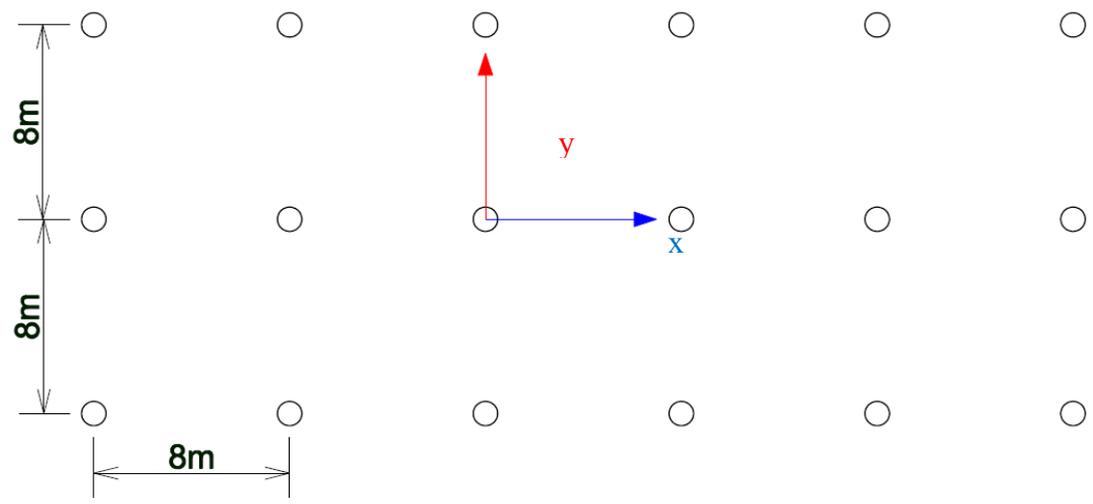


Figura 6.3 Arranjo dos poços dos risers verticais no solo marinho

6.3 GERAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

6.3.1 Casco

Conforme descrito no item 5.7.1.2 - *Força induzida pelas ondas*, o Prosim emprega um modelo hidrodinâmico híbrido, no qual o casco é representado por elementos cilíndricos. As figuras seguintes, Figura 6.4 e Figura 6.5, ilustram o modelo elaborado para o casco seguindo as propriedades definidas no item 6.2.1.

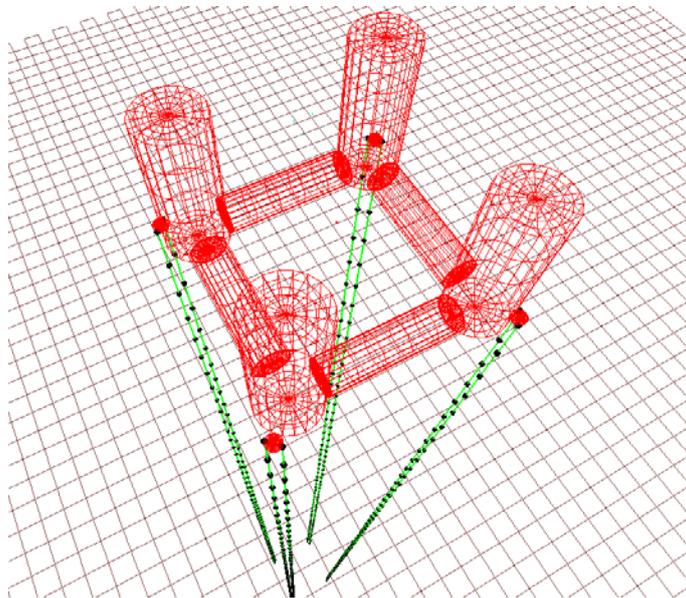


Figura 6.4 Malha 3D do casco da TLP gerado pelo SITUA

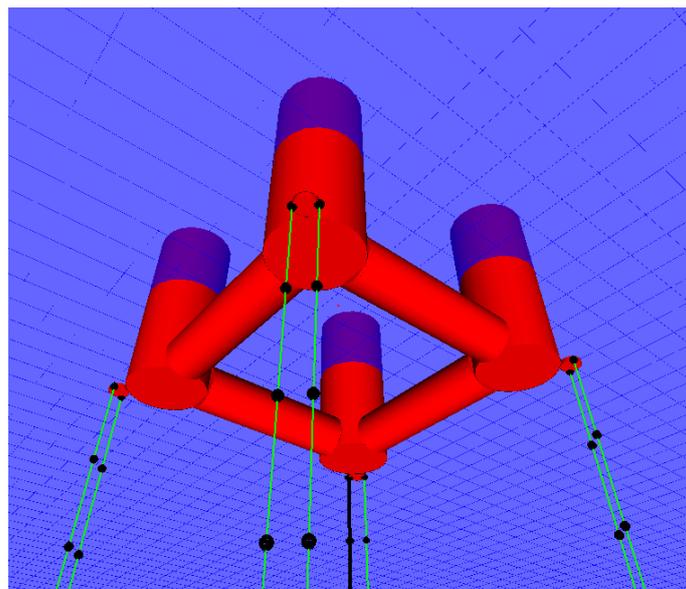


Figura 6.5 Modelo 3D do casco gerado pelo SITUA (Vista Sólida)

Faz-se importante lembrar que este modelo incorpora coeficientes calculados em um programa de difração, neste caso o WAMIT, que gera matrizes de amortecimento potencial e os coeficientes de deriva empregados na formulação hidrodinâmica do Prosim conforme descrito no capítulo 5.7.1.2

O cálculo do diâmetro equivalente é feito de modo que o volume permaneça o mesmo. Os coeficientes hidrodinâmicos de arraste e massa adicional foram calibrados conforme DNV [42] e estão apresentados na tabela seguinte, Tabela 7.

Tabela 7 Coeficientes hidrodinâmicos calibrados para cada membro^{1,2}

Membro	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Diam. (m)	CDy	CDz	CAy	CAz	CDx1	CDx2
1	31	31	0	31	31	49,5	20,5	0,63	0,63	0,85	0,85	1	0
2	-31	31	0	-31	31	49,5	20,5	0,63	0,63	0,85	0,85	1	0
3	-31	-31	0	-31	-31	49,5	20,5	0,63	0,63	0,85	0,85	1	0
4	31	-31	0	31	-31	49,5	20,5	0,63	0,63	0,85	0,85	1	0
5	-21	31	4,5	21	31	4,5	11,726	1,34	2,05	0,9	1,4	0	0
6	31	21	4,5	31	-21	4,5	11,726	1,34	2,05	0,9	1,4	0	0
7	21	-31	4,5	-21	-31	4,5	11,726	1,34	2,05	0,9	1,4	0	0
8	-31	-21	4,5	-31	21	4,5	11,726	1,34	2,05	0,9	1,4	0	0
9	-40	40	0	-40	40	1	5	0	0	0	0	1	1
10	40	40	0	40	40	1	5	0	0	0	0	1	1
11	40	-40	0	40	-40	1	5	0	0	0	0	1	1
12	-40	-40	0	-40	-40	1	5	0	0	0	0	1	1

6.3.2 Tendões

Conforme já mencionado, o objetivo da presente dissertação é efetuar estudos relacionados com os diferentes modelos que podem ser empregados para representar os tendões e os risers. Nesta seção serão descritos os modelos utilizados para representar os tendões: Mola Linear, Tendão Vertical, TautLeg e Elementos Finitos.

Para a metodologia desacoplada (modelos Mola Linear, Tendão Vertical, TautLeg) as linhas são representadas por três termos: Rigidez, Massa e Carga hidrodinâmica.

A consideração da Massa e Carga hidrodinâmica segue a linha mencionada por SENRA [1]. O efeito da massa das linhas é levada em conta adicionando 1/3 (um terço)

¹ As coordenadas (X,Y,Z) representam as extremidades dos cilindros através de pontos no seu eixo axial

² Os coeficientes são expressos considerando os eixos Y e Z transversais ao elemento cilíndrico

de sua massa à massa do casco. A consideração da Carga hidrodinâmica é apresentada no capítulo 6.4.1 *Correnteza*.

Os itens seguintes descrevem detalhadamente os modelos empregados para representar os tendões.

6.3.2.1 *Mola Linear*

O Modelo mais simples compreende de escalares que representam constantes de rigidez (ou apenas rigidez) para o cálculo das forças de restauração aplicadas na TLP. Há uma constante de rigidez para cada um dos seis graus de liberdade. Portanto a rigidez em certo grau de liberdade pode ser obtida através da força de restauração resultante de um deslocamento unitário neste grau de liberdade.

O deslocamento do ponto considerado, que neste caso corresponde ao ponto de conexão do tendão à unidade, é a diferença entre a posição deste ponto em um dado instante de tempo e a “posição inicial” deste mesmo ponto – configuração geométrica sem a aplicação de nenhuma força ambiental. Este deslocamento pode então ser decomposto nos seis graus de liberdade para cálculo da restauração.

A tabela seguinte, Tabela 8, proposta por CHOU [43] oferece uma boa aproximação para a rigidez de um tendão.

Tabela 8 Matriz de rigidez para um tendão, com referência ao CG¹:

<i>Força ou momento</i>	<i>Surge</i>	<i>Sway</i>	<i>Heave</i>	<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Yaw</i>
<i>Deslocamento (da TLP)</i>						
<i>Surge</i>	T_{11}	0	0	0	T_{15}	T_{16}
<i>Sway</i>	0	T_{22}	0	T_{24}	0	T_{26}
<i>Heave</i>	0	0	T_{33}	T_{34}	T_{35}	0
<i>Roll</i>	0	T_{42}	T_{43}	T_{44}	0	0
<i>Pitch</i>	T_{51}	0	T_{53}	0	T_{55}	0
<i>Yaw</i>	T_{61}	T_{62}	0	0	0	T_{66}

$$T_{11} = T_{22} = T_i/L$$

$$T_{15} = T_{51} = T_{24} = T_{42} = \frac{T_i}{L}(Z_T - Z_G)$$

¹ Note que a matriz é simétrica

$$T_{16} = T_{61} = \frac{T_i}{L}(Y_T - Y_G)$$

$$T_{26} = T_{62} = \frac{T_i}{L}(X_T - X_G)$$

$$T_{33} = AE/L$$

$$T_{34} = T_{43} = \frac{AE}{L}(Y_T - Y_G)$$

$$T_{35} = T_{53} = -\frac{AE}{L}(X_T - X_G)$$

$$T_{44} = \frac{AE}{L}(Y_T - Y_G)^2 + \frac{T_i}{L}(Z_T - Z_G)^2$$

$$T_{55} = \frac{AE}{L}(X_T - X_G)^2 + \frac{T_i}{L}(Z_T - Z_G)^2$$

$$T_{66} = \frac{T_i}{L}(X_T - X_G)^2 + \frac{T_i}{L}(Y_T - Y_G)^2$$

Onde:

A = Área da seção transversal do tendão

E = módulo de elasticidade

L = comprimento conexão-ancoragem

T_i = Pré-tração no tendão

(X_T, Y_T, Z_T) = coordenadas do topo do tendão

(X_G, Y_G, Z_G) = coordenadas do CG

Como ilustração, é descrita uma dedução do primeiro termo T_{11} a seguir:

A força de restauração em surge é escrita como,

$$F_{\text{horiz}} = T_i \cdot \text{sen}\theta \quad (6.1)$$

Para pequenos valores de deslocamentos é possível aproximar,

$$\text{sen}(\theta) \approx \theta \approx \frac{\text{offset}}{L} \quad (6.2)$$

Onde *offset* = deslocamento em surge.

Portanto:

$$F_{\text{horiz}} = \frac{T_i}{L} \cdot \text{offset} \quad (6.3)$$

Enfim com *offset* unitário tem-se a rigidez em surge como T_i/L .

É importante notar nestas aproximações que a força de restauração é por vezes considerada constante e igual à tração inicial ou pré-tração T_i .

Modelação no Prosim

O algoritmo implementado no Prosim considera que as forças de restauração são aplicadas no CG da unidade e correspondem a deslocamentos do CG. Esta abordagem torna interessante, portanto, a utilização da matriz proposta por CHOU [43], Tabela 8.

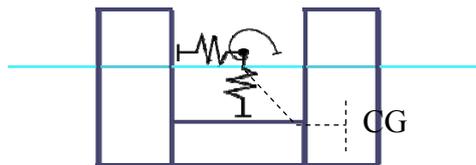


Figura 6.6 Representação das linhas por Mola Linear

A formulação implementada, entretanto, considera apenas os termos da diagonal principal, ignorando termos acoplados (fora da diagonal).

De fato, em um arranjo de linhas simétrico como o considerado, a soma das matrizes de rigidez de cada linha resulta em uma matriz de rigidez global com muitos termos fora da diagonal nulos (os termos se anulam).

Neste caso os termos T_{16} , T_{26} , T_{34} e T_{35} , e seus simétricos T_{61} , T_{62} , T_{43} e T_{53} se anulam. Ainda assim, persistem os termos T_{24} , T_{42} e T_{15} , T_{51} .

A formulação empregada no código, conforme mencionada, não considera estes termos, limitando-se apenas aos termos da diagonal principal (T_{11} , T_{22} , ...).

Avaliação da matriz proposta

Para uma rápida avaliação das fórmulas propostas por CHOU [40], calculou-se a força de restauração em cada grau de liberdade, através de deslocamentos unitários, e comparou-se a matriz assim obtida com a matriz obtida através das fórmulas propostas. As tabelas seguintes, Tabela 9 e Tabela 10, mostram a comparação para a soma dos oito tendões.

Coeficientes de Rigidez (kN/m) e (kN·m/rad)			
<i>Surge</i>	15,4	<i>Roll</i>	$218,54 \times 10^6$
<i>Sway</i>	15,4	<i>Pitch</i>	$218,54 \times 10^6$
<i>Heave</i>	16640	<i>Yaw</i>	$397,27 \times 10^3$

Coeficientes de Rigidez (kN/m) e (kN·m/rad)			
<i>Surge</i>	15,4	<i>Roll</i>	$214,88 \times 10^6$
<i>Sway</i>	15,4	<i>Pitch</i>	$214,88 \times 10^6$
<i>Heave</i>	16640	<i>Yaw</i>	$397,22 \times 10^3$

É possível notar que a aplicação das fórmulas propostas por CHOU [40] apresentam boa aproximação quando comparadas com o cálculo “manual” (assumindo deslocamento unitário e calculando as forças), e é claro com maior praticidade.

A matriz adotada neste trabalho é a calculada “manualmente”, devendo apresentar melhor aproximação e aproveitando-se o trabalho despendido. Para um novo projeto recomenda-se a praticidade das fórmulas propostas e, se possível, considerar os termos acoplados (fora da diagonal).

6.3.2.2 *Tendão Vertical*

Enquanto no código utilizado este modelo de linha recebe a designação de “Tendão Vertical”, nesta dissertação será referido por “TV” a fim de obter maior clareza no texto. Em outras palavras, para melhor entendimento é importante a distinção entre o componente estrutural real, físico – tendão – e a sua representação matemática – TV.

Neste modelo o tendão é representado por um único coeficiente de rigidez. É a própria rigidez elástica do tendão, isto é, a variação de tração atuante no tendão devido a uma deformação de valor unitário (encurtamento ou alongamento).

O ponto de ancoragem ou ponto de fixação do tendão no solo marinho é definido através de uma vertical passando por um determinado ponto, no caso o ponto de conexão tendão-TLP. Com isto a deformação é a diferença entre o comprimento (distância conexão-ancoragem) em um dado instante e o comprimento inicial.

A força de restauração possui sempre a direção da linha (ponto de conexão até ponto de ancoragem), que varia ao longo do tempo. Portanto a restauração em cada grau de liberdade é a própria componente da tração na direção considerada.

Diferentemente do modelo Mola Linear a tração no topo do tendão é aplicada efetivamente no ponto de conexão, e embora a intensidade da restauração seja linear com a deformação, suas componentes não são funções lineares dos deslocamentos do ponto de conexão.

Enfim o coeficiente adotado, rigidez elástica de cada tendão, é de 16640 kN/m.

6.3.2.3 *TautLeg*

A formulação deste modelo é a mesma utilizada no modelo TV, com a força de restauração aplicada no ponto de conexão, atuante na direção da linha e calculada pela rigidez elástica do tendão, mas ao contrário do modelo TV não se restringe às linhas verticais.

Como a formulação é a mesma a expectativa é que os resultados sejam idênticos. Portanto, o principal objetivo é a verificação da implementação dos dois modelos no programa Prosim e a utilização deste modelo em linhas que não sejam verticais.

A rigidez adotada é a mesma do modelo TV, rigidez elástica, 16640 kN/m.

6.3.2.4 Elementos Finitos

O modelo de elementos finitos para cada linha consiste de uma malha de elementos de pórtico com 6 graus de liberdade em cada nó. O tamanho do elemento utilizado foi escolhido com base na calibração efetuada na seção 7.3-Estudos Paramétricos em Refinamento de malha.

No caso dos tendões foram adotadas malhas com 59 elementos (60 nós), ao redor de 20 metros cada elemento.

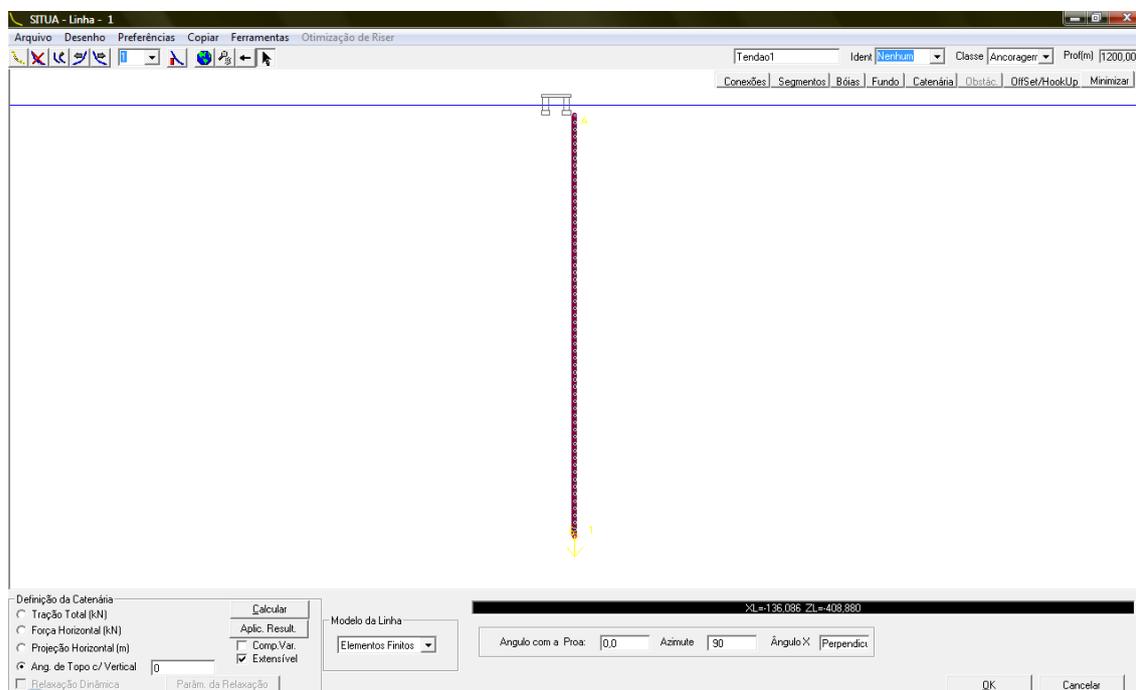


Figura 6.7 Tela de edição de linhas da interface gráfica SITUA

6.3.3 Risers

Observando a distribuição dos pontos de conexão dos risers à unidade, Figura 6.2, e a distribuição de poços no solo marinho, Figura 6.3, é possível notar que os risers rígidos verticais não permanecem exatamente verticais – ilustração na figura seguinte.

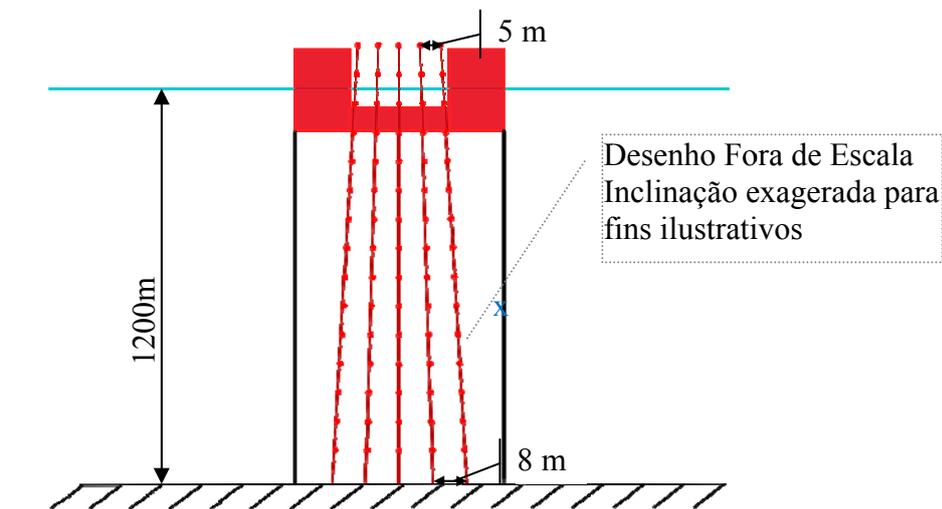


Figura 6.8 Espaçamento entre risers. Desenho FORA DE ESCALA.

A inclinação é desprezível para o comportamento global do sistema. No entanto foi considerada com o intuito de enfatizar a sua existência em uma grande quantidade de sistemas com TLPs, além de tornar o modelo mais realístico possível.

Esta configuração é resultado da busca pelo maior espaçamento entre *risers* possível, procurando evitar problemas de interferência e riscos de colisão. No convés da unidade há uma limitação física para o espaçamento entre *risers*, enquanto no solo é possível, usualmente, um espaçamento maior.

6.3.3.1 TautLeg

Os risers rígidos verticais foram representados por linhas TautLeg, cada linha representada por uma mola simples, exatamente da mesma forma que a utilizada para os tendões, seção 6.3.2.3. , rigidez constante e a força de restauração aplicada no ponto de conexão *riser*-unidade.

A rigidez desta mola é a rigidez equivalente ou total apresentada anteriormente na Tabela 6, rigidez elástica somada à rigidez do tensionador. Como nos tendões, o

efeito da correnteza atuando sobre os risers, transmitindo forças à TLP, é também considerada neste modelo desacoplado como força concentrada no CG, calculada conforme 6.4.1.

6.3.3.2 Curva de restauração

Os risers SCR, que possuem uma configuração em catenária, são representados por um modelo denominado de Curva de restauração. A formulação também pode ser vista como uma representação escalar, embora seu valor não permaneça constante com o tempo.

Nesta representação cada linha é uma função força x deslocamento. A função é definida através de uma tabela que fornece a força de restauração (tração no ponto de conexão) para um conjunto de posições, horizontal e vertical, do ponto de conexão.

A força é calculada através da equação da catenária em cada posição do topo da linha. As posições do topo da linha a serem consideradas são determinadas através de deslocamentos constantes deste ponto na direção horizontal e na vertical, contidos no plano vertical da catenária. Durante a simulação, a força atuante é obtida através de uma interpolação entre a posição onde o topo da linha se encontra e os pontos disponíveis nesta tabela gerada previamente.

O programa SITUA, Figura 6.9 seguinte, apresenta esta tabela na forma de curvas. Uma curva para cada conjunto de pontos de mesma posição vertical, assim cada curva pode ser entendida como força em função do offset (deslocamento horizontal).

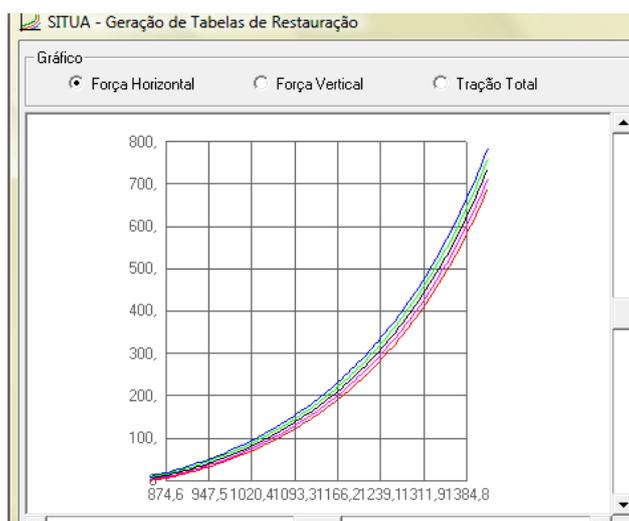


Figura 6.9 Parte da tela de edição do SITUA apresentando as curvas de restauração para uma linha

6.3.3.3 Elementos Finitos

Para a representação dos risers por elementos finitos foram utilizados elementos de pórtico, exatamente os mesmos usados para os tendões com 6 graus de liberdade por nó.

Os *risers*, entretanto, possuem uma seção composta, tubos concêntricos, que não é rigorosamente representada pela formulação do elemento. Optou-se, então, por manter o maior diâmetro externo e mesma seção transversal, como um único duto.

Para os efeitos hidrodinâmicos foi considerado o diâmetro externo mais o isolamento térmico – diâmetro hidrodinâmico.

O PRT (sistema tracionador) foi modelado como um elemento de pórtico de um metro de comprimento fazendo parte da malha de elementos finitos de cada linha. Para este elemento foram consideradas as mesmas propriedades da linha, exceto pelo módulo de elasticidade que foi ajustado de modo que este segmento fornecesse a rigidez definida para o PRT conforme definida na Tabela 6.

Para os risers rígidos verticais foi adotada uma malha uniforme com 40 elementos (41 nós), para os SCRs uma malha com 276 nós (275 elementos). A figura seguinte, Figura 6.10, apresenta a tela do programa SITUA onde é possível visualizar as linhas.

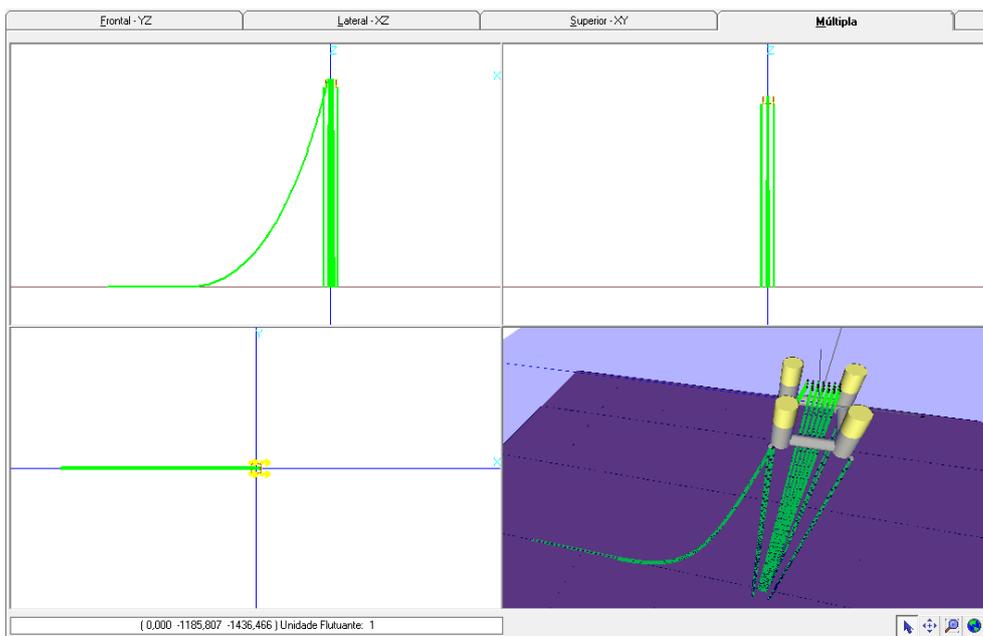


Figura 6.10 Tela capturada do modelador SITUA com arranjo de risers

A Figura 6.11 mostra a malha com 275 elementos dos SCRs. Na região suspensa os elementos possuem 30 m de comprimento diminuindo de tamanho até a região do TDP (*Touch Down Point* – ponto que delimita a região em contato com o solo e a região suspensa) onde os elementos passam a ter comprimento da ordem de 2 m.

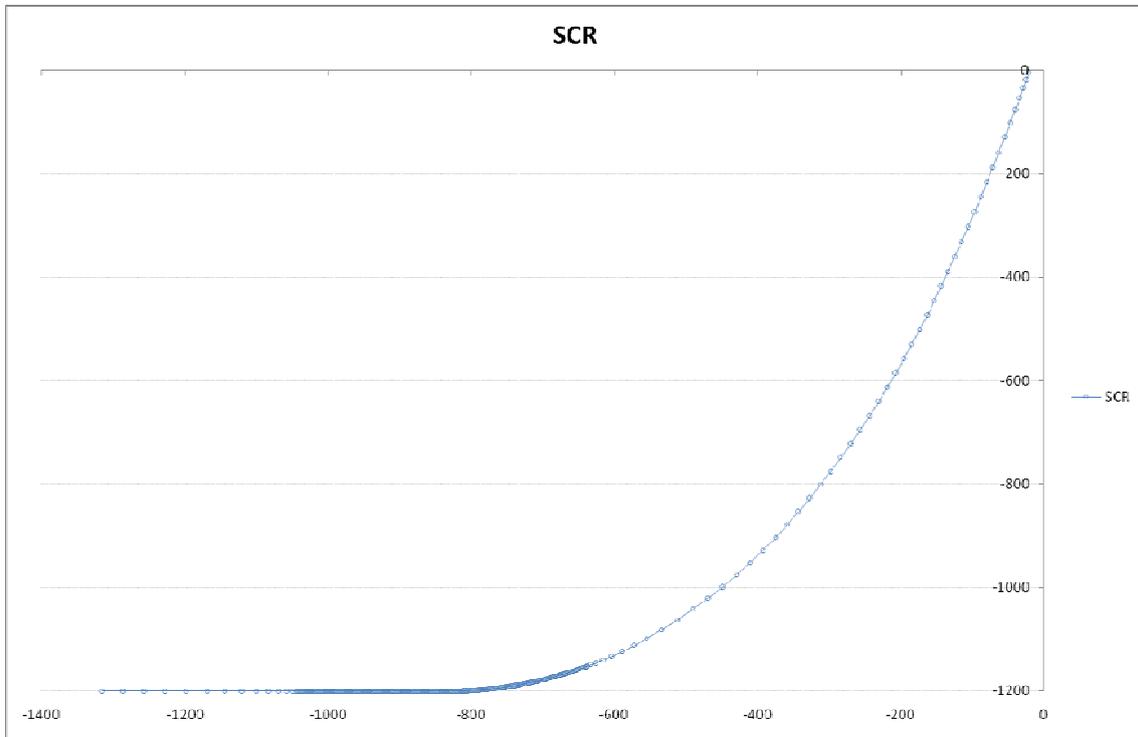


Figura 6.11 Malha de elementos finitos dos risers SCR

6.4 DADOS AMBIENTAIS

O carregamento ambiental aplicado é a designada como condição extrema centenária. Neste estudo isto significa um estado de mar e ventos com período de retorno de 100 anos e uma correnteza com período de retorno de 10 anos.

O critério de seleção de uma condição ambiental extrema é de fato aquela na qual o sistema apresenta uma resposta extrema, ref.[11] . Ou seja, o objetivo é analisar a resposta (tensões, deslocamentos...) cuja magnitude ocorre com período de retorno de 100 anos – extremo centenário. Uma prática usual de projeto consiste em adotar, por hipótese, que o sistema apresenta resposta extrema centenária quando submetido a uma condição ambiental extrema centenária.

Os três agentes ambientais aplicados são colineares, suas resultantes possuem a mesma direção, para resultar numa resposta conservativa. A direção de aplicação das cargas ambientais é o do eixo X positivo – ou sentido positivo do deslocamento surge.

6.4.1 Correnteza

O perfil da correnteza é triangular, Figura 6.12, possui um valor máximo na superfície e decresce linearmente com a profundidade até zero no fundo. A direção ao longo da profundidade é a mesma.

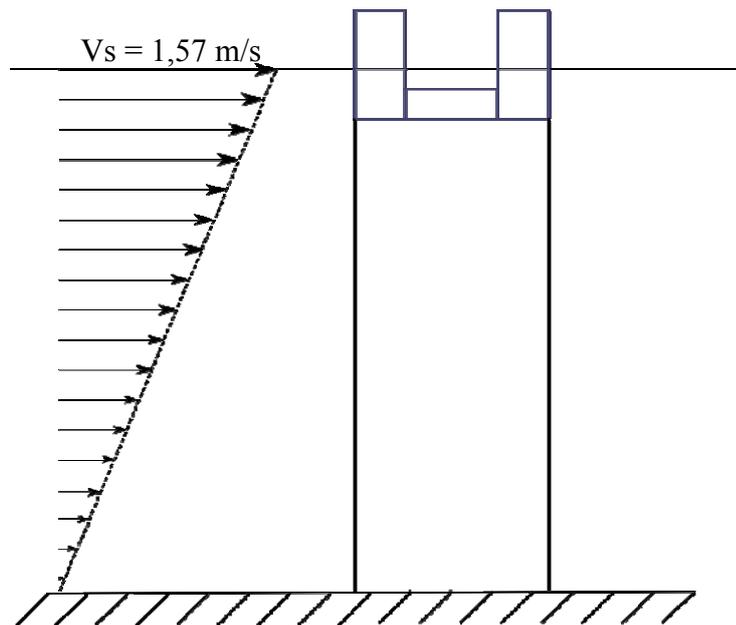


Figura 6.12 Perfil da correnteza

A correnteza atuante nas linhas gera uma força hidrodinâmica que é transmitida à TLP através do ponto de conexão. Nas análises desacopladas – linhas modeladas por TV, TautLeg e Mola Linear – tal efeito é representado através da aplicação de uma força concentrada no CG da unidade. Esta força (F_c) é calculada como se a linha fosse uma “viga bi-apoiada” conforme sugerido por SENRA [1] e ilustrado na figura seguinte, Figura 6.13.

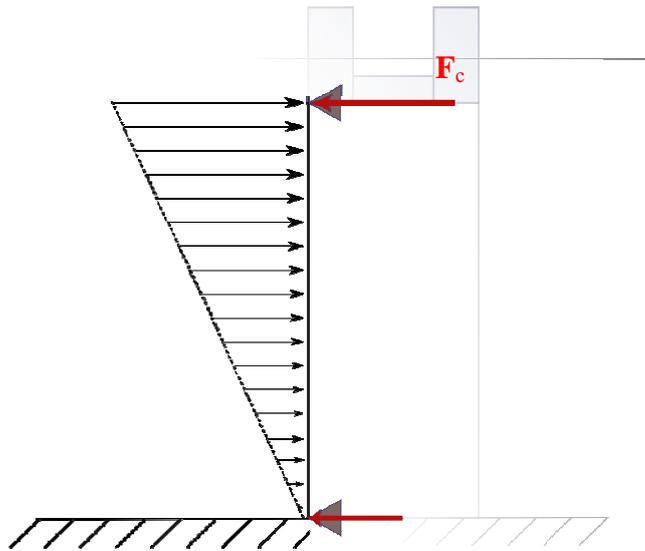


Figura 6.13 Consideração do efeito da correnteza nas linhas para metodologias desacopladas

O carregamento hidrodinâmico é determinado pela parcela de arraste da formulação de Morison, seção 5.7.1.2 reescrita a seguir:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w \cdot C_D \cdot D \cdot V^2(z) \quad (6.4)$$

A equação define a força atuante na linha por unidade de comprimento, sendo:

ρ_w = a massa específica da água. Adotou-se 1025 kg/m^3

D = diâmetro do cilindro. Neste trabalho é o diâmetro hidrodinâmico (HD) de cada linha

C_D = Coeficiente de arraste.

$V(z)$ = velocidade da correnteza em função de um ponto na linha (elemento cilíndrico). Como a linha é calculada na vertical, a variável z pode ser correlacionada com a profundidade.

6.4.1.1 *Expressão da força F_c para Perfil Linear de Correnteza*

Vale ressaltar que a força é função quadrática da velocidade, por isso, para um perfil de correnteza linear, como o considerado neste estudo, a força deve apresentar uma distribuição parabólica, ilustração na Figura 6.14 seguinte.

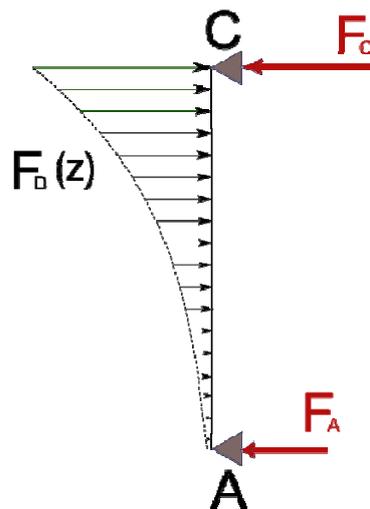


Figura 6.14 Diagrama de forças para o cálculo do efeito da correnteza.

Sendo o ponto de fixação no solo igual a A e o ponto de conexão linha-unidade igual a C, obtém-se o comprimento da linha (AC) igual a L, e considerando a origem da profundidade z no ponto A, é possível escrever a expressão da velocidade e força como:

$$V(z) = \frac{V_C}{L} \cdot z$$

$$F_D(z) = \frac{1}{2} \rho_w \cdot C_D \cdot D \cdot \left[\frac{V_C}{L} \cdot z \right]^2 \quad (6.5)$$

onde V_C é a velocidade da correnteza no ponto C.

Aplicando o somatório de forças e o somatório de momentos em relação ao ponto A obtém-se:

$$F_C + F_A = \int_0^L F_D(z) \cdot dz \quad (6.6)$$

$$F_C \cdot L = \int_0^L F_D(z) \cdot z \cdot dz$$

Substituindo (6.5) em (6.6) obtém-se,

$$F_C + F_A = \frac{1}{6} \rho_w \cdot C_D \cdot D \cdot V_C^2 \cdot L \quad (6.7)$$

$$F_C = \frac{1}{8} \rho_w \cdot C_D \cdot D \cdot V_C^2 \cdot L$$

Chega-se então, Tabela 11, aos seguintes valores calculados de F_c para cada tipo de linha:

Tabela 11 Força da correnteza nas linhas aproximada como força concentrada no CG.

<i>Linha</i>	<i>Força da correnteza (kN)</i>
Tendão	511,1
Riser de produção	294,6
Riser de perfuração	343,7
SCR	274,1

6.4.2 Onda

O estado de mar centenário é um mar irregular representado por um espectro. Neste caso foi utilizado um espectro de Jonswap, Figura 6.15, discretizado em 50 componentes de onda, e com os seguintes parâmetros:

$$H_s = 9$$

$$T_p = 14$$

utilizados para calcular a densidade de energia $S(w)$ como se segue:

$$S(w) = \alpha \frac{g^2}{2\pi^4 w^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{w}{w_p} \right)^{-4} \right] \cdot \gamma \exp \left[- \left(\frac{w - w_p}{2\sigma^2 w_p^2} \right)^2 \right] \quad (6.8)$$

Onde:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0,07 & \text{para } w \leq w_p \\ \sigma_a = 0,07 & \text{para } w > w_p \end{cases} \quad (6.9)$$

$$\gamma = \exp \left(1,0394 - 0,01966 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right) \quad (6.10)$$

$$\alpha = 5,0609 \frac{H_s^2}{T_p^4} [1 - 0,287 \cdot \ln(\gamma)] \quad (6.11)$$

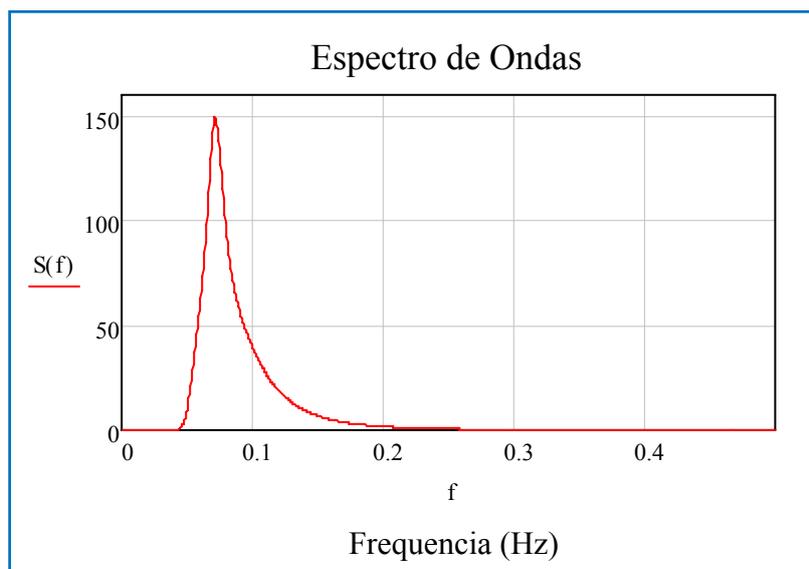


Figura 6.15 Estado de mar centenário. Espectro de Jonswap

6.4.3 Vento

Como citado na seção 5.7.3 as normas, API RP 2T [11] , API RP 2A [39] API RP 2SK [44] [42] , indicam duas metodologias para o cálculo da carga de vento considerando as fórmulas já apresentadas na seção 5.7.3:

- como força estática considerando uma velocidade de vento com direção e intensidade constantes. A velocidade a ser considerada é a do vento de 1 minuto. Isto é, tomam-se todos os intervalos de 1 minuto possíveis em um registro de medição de vento (usualmente 1 hora de medição) e calculam-se as médias, destas o maior valor define a velocidade do vento de um minuto.
- como força variável. A força de vento é calculada através da soma de duas parcelas: uma parcela estática e uma parcela variável. A parcela estática é calculada considerando o vento de 1 hora (definido do mesmo modo descrito na alínea anterior). A velocidade da parcela variável é obtida através de um espectro de vento, de modo similar ao que ocorre com o estado de mar irregular, neste caso, porém, não há uma função universalmente adotada para o espectro. Um espectro bastante utilizado e implementado no Prosim está no API RP 2A [39]

Para o objetivo do presente estudo a primeira metodologia, mais simplificada, é considerada suficiente.

Foi adotado um coeficiente aerodinâmico igual a 2.

O vento normalmente apresentado em relatórios de dados meteoceanográficos é o vento de 10 minutos, isto é, velocidade de vento de 10 minutos definido da forma já descrita. As normas apresentam fatores de correlação entre os ventos de 1 hora, 10 minutos, 1 minuto, e muitos outros períodos.

Enfim, o vento adotado foi:

$$V_{10\text{minutos}} = 30 \text{ m/s}$$

6.5 SISTEMAS ESTUDADOS

A Tabela 12 seguinte resume os principais modelos de sistemas estudados conforme suas características principais: presença ou não de risers, modelo do tendão, modelo dos risers e forma de consideração da correnteza. Estão agrupados de forma a refletir as comparações que serão realizadas no capítulo seguinte.

Tabela 12 Resumo dos modelos estudados

	<i>Tendões</i>	<i>Risers</i>		<i>Correnteza nas linhas</i>
		<i>TTR</i>	<i>SCR</i>	
Modelos sem Risers				
Modelos sem correnteza				
Modelo 1	Mola Linear	-	-	Não
Modelo 2	TV	-	-	Não
Modelo 3	TautLeg	-	-	Não
Modelo 4	Elementos Finitos	-	-	Não
Modelos com correnteza				
Modelo 5	Mola Linear	-	-	Aproximada
Modelo 6	TV	-	-	Aproximada
Modelo 7	TautLeg	-	-	Aproximada
Modelo 8	Elementos Finitos	-	-	Incorporada na Formulação
Modelos com risers				
Modelo 9	Elementos Finitos	TautLeg	Curva de Restauração	Aproximada e Incorporada
Modelo 10	Elementos Finitos	Elementos Finitos	Elementos Finitos	Incorporada na Formulação

Recorda-se que, no contexto de metodologias desacopladas e acoplada descritas no item 4.4, os modelos 1 a 3 e 5 a 7 podem ser considerados desacoplados, e que os modelos que incorporam linhas representadas por elementos finitos (4, 8 e 10) podem ser considerados acoplados. Já o modelo 9 trata os tendões de forma acoplada, porém com os risers representados por um modelo desacoplado.

7 RESULTADOS DOS ESTUDOS PARAMÉTRICOS

7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos estudos paramétricos e estudos comparativos das metodologias acoplada e desacopladas.

Os resultados foram separados em seções de acordo com as características a serem analisadas e comparadas. Assim é possível destacar:

- intervalos de integração. Parâmetros utilizados no processo de integração no tempo para a solução das equações do casco e das linhas. O objetivo é fornecer subsídios para a escolha de valores adequados a uma simulação.
- tamanho de elemento ou refinamento de malha. Foram realizadas diversas simulações variando-se o comprimento do elemento utilizado na malha de elementos finitos que representa os tendões. O estudo busca aumentar a confiabilidade na seleção do tamanho adequado em uma simulação.
- metodologia acoplada vs. desacoplada sem a presença de risers (observar os modelos elaborados citados na Tabela 12).
 - sem correnteza. Ignora-se o efeito da correnteza nas linhas. O sistema é simulado como se não houvesse correnteza nas linhas, contudo ainda é considerada sua presença no casco. Procurou-se avaliar o papel da correnteza na diferença entre as metodologias empregadas, comparando os resultados sem correnteza e com correnteza.
 - com correnteza. Neste estudo todos os efeitos hidrodinâmicos são considerados. As diferenças entre as metodologias, em um cenário típico, são determinadas em termos de movimentos e trações.
- metodologia acoplada vs. desacoplada com um arranjo típico de risers (observar os modelos elaborados citados na Tabela 12). Neste estudo procurou-se estabelecer o efeito dos risers no comportamento global e seu papel na diferença entre as metodologias, comparando estes resultados com os resultados sem os risers

7.2 ESTUDOS PARAMÉTRICOS EM INTERVALOS DE INTEGRAÇÃO

A tabela seguinte, Tabela 13, resume os parâmetros de simulação utilizados nesta seção.

Tabela 13 Principais parâmetros utilizados no estudo

<i>Parâmetros Fixos</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de simulação: 1200 s • Metodologia acoplada • Modelo de tendões por Elementos Finitos • Risers desconectados 	<ul style="list-style-type: none"> • Rampa de tempo de aplicação das forças ambientais: 70 s • Instante de tempo de início do cálculo dos dados estatísticos: 280 s • Tamanho da Malha: 30 nós (40 m) •
<i>Parâmetros Variáveis</i>	
<p>➤ Intervalo de integração do Casco: 0,05 a 0,5 s</p>	<p>➤ Intervalo de integração das linhas: 0,0025 a 0,05 s conforme Tabela 14</p>

O modelo utilizado neste estudo compreende do casco e dos tendões, este último modelado por elementos finitos. O sistema modelado não considera os risers. Espera-se, entretanto, a extrapolação das conclusões obtidas desta forma para os modelos que contam com os risers.

A metodologia acoplada utilizada neste trabalho e implementada no Prosim é denominada de *Fracamente Acoplada* (rever Capítulo 5.6). A principal característica a ser destacada é o procedimento de solução das equações das linhas que pode ser resumido em: aplicação no topo das linhas, a cada instante de tempo, dos movimentos transmitidos pelo casco; com estes deslocamentos são efetuadas análises não-lineares dinâmicas das linhas; com os resultados das análises obtêm-se as forças no topo de cada linha, acumuladas e aplicadas no lado direito das equações de movimentos do casco.

Esta abordagem permite a utilização de procedimentos de integração diferentes para as linhas e para o casco, sendo possível até a utilização de intervalos de integração distintos.

A tabela seguinte, Tabela 14, apresenta os intervalos de integração utilizados nas diversas simulações realizadas.

Tabela 14 – Intervalos de integração considerados

<i>Intervalo de Integração do Casco (s)</i>	<i>Intervalos de Integração para as Linhas (s)</i>			
0,05	0,025	0,0125	0,005	0,0025
0,1	0,050	0,025	0,010	0,0050
0,25	0,125	0,0625	0,025	-
0,5	0,250	0,125	0,050	-

7.2.1 Resultados: Movimentos

As tabelas seguintes, Tabela 15 , Tabela 16 e apresentam as respostas de movimentos da unidade em forma de dados estatísticos. Como referências foram utilizados os valores obtidos com o menor intervalo do casco (0,05 s) e menor intervalo das linhas (0,0025 s) assinalados nas tabelas em azul.

Média dos Movimentos

Tabela 15 – Média dos movimentos surge, heave e pitch para diferentes intervalos de integração.

<i>Intervalo de integração (s)</i>		<i>Surge</i>		<i>Heave</i>		<i>Pitch</i>	
<i>casco</i>	<i>linhas</i>	<i>(m)</i>	<i>Var.¹ %</i>	<i>(m)</i>	<i>Var. %</i>	<i>(graus)</i>	<i>Var. %</i>
0,05	0,025	74,3142	0,4%	-2,2077	-0,7%	0,0333	-2,1%
	0,0125	74,2795	0,3%	-2,2057	-0,6%	0,0334	-1,8%
	0,005	74,1347	0,1%	-2,1975	-0,3%	0,0336	-1,2%
	0,0025	74,0305	0,0%	-2,1918	0,0%	0,034	0,0%
0,1	0,05	74,276	0,3%	-2,2053	-0,6%	0,0333	-2,1%
	0,025	74,3186	0,4%	-2,208	-0,7%	0,0334	-1,8%
	0,01	74,236	0,3%	-2,2035	-0,5%	0,0336	-1,2%
0,25	0,005	74,0693	0,1%	-2,1942	-0,1%	0,0339	-0,3%
	0,125	74,1252	0,1%	-2,1962	-0,2%	0,033	-2,9%
	0,0625	74,2566	0,3%	-2,2044	-0,6%	0,0331	-2,6%
0,5	0,025	74,1089	0,1%	-2,196	-0,2%	0,0334	-1,8%
	0,125	74,0403	0,0%	-2,1911	0,0%	0,0329	-3,2%
	0,05	73,9876	-0,1%	-2,1885	0,2%	0,0327	-3,8%
	0,05	74,0132	0,0%	-2,1909	0,0%	0,0329	-3,2%

¹ Variação em relação ao menor intervalo de integração do casco e das linhas

Observando a média dos movimentos da unidade nota-se que os valores praticamente não se alteram – com variação percentual máxima para *surge*, *heave* e *pitch* de 0,45%, 0,89% e 3,98% respectivamente. Para *yaw* a variação é maior, porém a magnitude dos valores representa movimentos desprezíveis da unidade, como era de se esperar, e por isso está muito mais ligada a perturbações numéricas do que a fenômenos físicos.

Desvio Padrão dos Movimentos

Tabela 16 – Desvio padrão dos movimentos *surge*, *heave* e *pitch* para diferentes intervalos de integração.

Intervalo de integração		Surge		Heave		Pitch	
casco	linhas	(m)	Var. ¹ %	(m)	Var. %	(graus)	Var. %
0,05	0,025	1,7854	14,8%	0,1097	15,4%	0,1242	-10,5%
	0,0125	1,7373	11,7%	0,1068	12,3%	0,1261	-9,1%
	0,005	1,6389	5,4%	0,1007	5,9%	0,1223	-11,9%
	0,0025	1,5551	0,0%	0,0951	0,0%	0,1388	0,0%
0,1	0,05	1,7803	14,5%	0,1094	15,0%	0,1184	-14,7%
	0,025	1,7265	11,0%	0,1059	11,4%	0,1328	-4,3%
	0,01	1,6298	4,8%	0,1006	5,8%	0,145	4,5%
	0,005	1,5447	-0,7%	0,0942	-0,9%	0,156	12,4%
0,25	0,125	1,7482	12,4%	0,1065	12,0%	0,085	-38,8%
	0,0625	1,6775	7,9%	0,1023	7,6%	0,1281	-7,7%
	0,025	1,611	3,6%	0,0991	4,2%	0,1248	-10,1%
0,5	0,25	1,7299	11,2%	0,1039	9,3%	0,0714	-48,6%
	0,125	1,7099	10,0%	0,1025	7,8%	0,087	-37,3%
	0,05	1,5851	1,9%	0,0966	1,6%	0,1488	7,2%

Enquanto as médias estão associadas à parcela estática da resposta, e por isso o intervalo de integração exerce pouca influência, os desvios padrões estão associados à parte dinâmica da resposta. O que justifica uma maior variação como a observada em *surge*, por exemplo, de 14,75%.

Apesar da significativa diferença, os valores dos desvios padrões permanecem pequenos quando comparados aos valores médios, e em termos de critérios de offset da unidade (valores máximos admissíveis) o resultados se tornam praticamente equivalentes – o que provavelmente não fornece motivação suficiente para a escolha de intervalos de integração pequenos (para a condição ambiental considerada).

Para uma avaliação em termos de critérios estruturais são apresentados no item seguinte os resultados em termos de tração atuante no topo de um tendão (no ponto de conexão com a unidade)

¹ Variação em relação ao menor intervalo de integração do casco e das linhas

7.2.2 Resultados: Trações

As tabelas seguintes, Tabela 17 apresenta a resposta em termos de tração no topo do tendão nº1 na forma de parâmetros estatísticos. Novamente como referência foram utilizados os valores obtidos com o menor intervalo do casco (0,05 s) e menor intervalo das linhas (0,0025 s) assinalados nas tabelas em azul

Tabela 17 – Tração média, máxima¹ e mínima² do Tendão 1

<i>Intervalo de integração</i>		<i>Mínima</i>		<i>Média</i>		<i>Máxima</i>	
<i>casco</i>	<i>linhas</i>						
0,05	0,025	19592	2,2%	22072	0,1%	24547	-1,7%
	0,0125	19543	1,9%	22069	0,1%	24602	-1,4%
	0,005	19563	2,0%	22058	0,0%	24558	-1,6%
0,1	0,0025	19172	0,0%	22052	0,0%	24962	0,0%
	0,05	19653	2,5%	22067	0,1%	24476	-1,9%
	0,025	19265	0,5%	22072	0,1%	24876	-0,3%
	0,01	18920	-1,3%	22066	0,1%	25215	1,0%
	0,005	18599	-3,0%	22053	0,0%	25492	2,1%
0,25	0,125	20336	6,1%	22051	0,0%	23786	-4,7%
	0,0625	19108	-0,3%	22060	0,0%	24995	0,1%
	0,025	19124	-0,3%	22047	0,0%	24963	0,0%
0,5	0,25	21118	10,2%	22042	0,0%	22934	-8,1%
	0,125	20332	6,1%	22036	-0,1%	23755	-4,8%
	0,05	19112	-0,3%	22026	-0,1%	24907	-0,2%

Valores Médios

Assim como já observado para os valores médios dos movimentos da unidade, os valores médios de tração no topo do tendão considerado também exibem uma variação pequena, 0,1% de variação máxima.

Valores Máximos e Mínimos

A tração referida como “máxima” é na verdade a média dos picos positivos e a “mínima”, média dos picos negativos da série temporal.

Pela tabela apresentada é possível notar que, para intervalos de integração acima de 0,25 s (inclusive) do casco, ocorrem variações de até 8,2% para trações “máximas”, quanto para trações “mínimas” pode-se encontrar até 10,5%.

¹ Média dos picos positivos

² Média dos picos negativos

Para os intervalos de integração menores que 0,25 s do casco os resultados se aproximam e a diferença alcança o máximo de 4% para tração máxima e 5,5% para tração mínima, tornando mais indiferente o intervalo da linha adotado.

7.2.3 Conclusões sobre intervalo de integração

Com relação aos valores médios, tanto em termos de movimentos quanto em termos de trações, não há uma variação significativa, pois estes representam a parcela estática da resposta - tratando a resposta por uma soma de parcelas.

Na parcela dinâmica ocorrem variações significativas. Os resultados obtidos demonstram que os valores possuem razoável tendência de permanecerem próximos para os mesmos valores de intervalo de integração das linhas, tanto em termos de movimentos e mais acentuadamente em termos de trações. O que indica que os resultados são mais sensíveis ao intervalo adotado nas linhas do que ao intervalo adotado para o casco.

Esta constatação confirma a premissa que motiva a implementação de um esquema de integração diferenciado para as linhas e para o casco. Pode-se manter um intervalo menor somente para as linhas enquanto se utiliza um maior para o casco, otimizando assim custos computacionais.

O menor intervalo para as linhas é consequência da escala de tempo do comportamento estrutural e hidrodinâmico (frequências naturais por exemplo) serem menores que os períodos de tempo característicos relacionados ao movimento do casco. O erro em um processo de solução de equações por integração no tempo é proporcional à razão entre intervalo de integração adotado e período de tempo característico do fenômeno em estudo. Portanto, as linhas requerem intervalos menores quando se quer um determinado nível de erro.

Voltando-se novamente para os valores obtidos, intervalos de integração de 0,25 s para casco ou maiores apresentam resultados próximos da referência com intervalo para linhas iguais ou menores que 0,05 s

Para intervalos do casco menores que 0,25 s, os resultados em termos de movimentos sugerem intervalos para as linhas da ordem de 0,01 s (ou menores) enquanto em termos de trações todos os intervalos utilizados permanecem próximos.

Tendo em vista os pontos já levantados, o custo computacional e o foco do trabalho adotou-se um intervalo de integração igual a 0,05 s para o casco e um intervalo para as linhas igual a 0,0125 s para o estudo comparativo entre metodologias (Seção 7.4).

7.3 ESTUDOS PARAMÉTRICOS EM REFINAMENTO DE MALHA

A tabela seguinte, Tabela 18, resume os parâmetros de simulação utilizados nesta seção.

Tabela 18 Principais parâmetros utilizados no estudo

<i>Parâmetros Fixos</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de simulação: 1200 s • Intervalo de integração para o casco: 0,05 s • Intervalo de integração para o casco: 0,005 s • Metodologia acoplada 	<ul style="list-style-type: none"> • Instante de tempo de início do cálculo dos dados estatísticos: 280 s • Rampa de tempo de aplicação das forças ambientais: 70 s • Modelo de tendões por elementos finitos • Risers desconectados
<i>Parâmetros Variáveis</i>	
<p>➤ Tamanho da Malha: de 20 nós (40 m) a 90 nós (13,2 m)</p>	

Esta seção trata do estudo comparativo, ou “calibração”, da malha de elementos finitos nos modelos que utilizam linhas com esta formulação. Nesta análise, onde se variou o tamanho do elemento, pode ser referida também como um estudo do refinamento de malha (malhas mais refinadas, menores os elementos).

As malhas utilizadas são uniformes, elementos de mesmo tamanho, o tamanho da malha está indicado em cada tabela apresenta a seguir.

7.3.1 Movimentos

As tabelas e gráficos seguintes, Tabela 19 Figura 7.1, apresentam os resultados, em termos de movimentos.

Tabela 19 – Movimentos conforme malha de elementos finitos. Unidades em metros e graus

Tamanho da malha em nós ¹	Média					Máximo				
	Surge	Heave	Roll	Pitch	Yaw	Surge	Heave	Roll	Pitch	Yaw
20 (62 m)	74,220	-2,203	-0,0009	0,0332	-0,0132	78,218	-1,927	0,3141	0,4016	0,0532
30 (40 m)	74,089	-2,195	-0,0007	0,0331	-0,0114	78,082	-1,920	0,2967	0,3838	0,0506
40 (30 m)	74,045	-2,194	-0,0007	0,0332	-0,0108	78,032	-1,918	0,3140	0,3978	0,0548
50 (24 m)	74,003	-2,192	-0,0008	0,0332	-0,0123	77,995	-1,915	0,3268	0,3941	0,0541
60 (20 m)	73,980	-2,192	-0,0008	0,0332	-0,0130	77,972	-1,913	0,3345	0,3930	0,0543
70 (17 m)	73,957	-2,191	-0,0008	0,0332	-0,0129	77,952	-1,913	0,3385	0,3940	0,0549
80 (15 m)	73,943	-2,191	-0,0008	0,0332	-0,0128	77,937	-1,913	0,3399	0,3948	0,0553
90 (13,2 m)	73,932	-2,190	-0,0008	0,0332	-0,0127	77,926	-1,912	0,3405	0,3958	0,0556

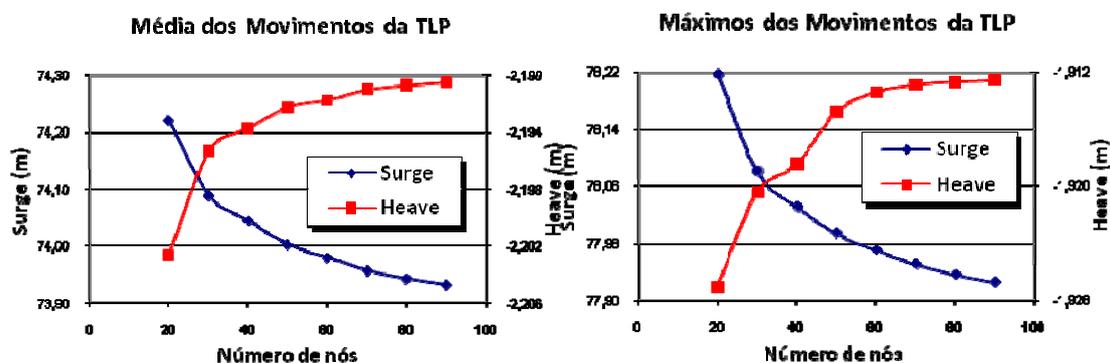


Figura 7.1 Variação do valor médio e máximo

Observando a Tabela 19, Figura 7.1, pode-se notar que os valores tendem a se aproximar, de forma assintótica, a um determinado nível com o aumento do refinamento da malha. A variação, contudo, é muito pequena. Por exemplo, a variação entre maior e menor valor para a média dos movimentos *surge* e *heave* é de 0,39% e 0,55% respectivamente. Já para valores máximos a variação de *surge* é de 0,37% e a de *heave* é de 0,76%.

Levando em conta que a malha mais refinada (90 nós ou 89 elementos) serve de referência, pois teoricamente modela melhor o contínuo, os resultados em termos de movimentos oferecem uma fraca motivação para a adoção de malhas refinadas (grande número de elementos). Ocorre considerável aumento do custo computacional para apenas um pequeno ganho na resposta (isto é os valores permanecem próximos, a aproximação em relação o valor real é praticamente a mesma).

¹ Comprimento do elemento entre parenteses

7.3.2 Trações

A Tabela 20 e Figura 7.2 apresentam os resultados em termos de dados estatísticos da tração no topo de alguns tendões.

Tabela 20 – Trações em tendões conforme malha de elementos finitos

Tamanho da malha	Média				Máxima ¹			
	Tendão 1	Tendão 3	Tendão 5	Tendão 7	Tendão 1	Tendão 3	Tendão 5	Tendão 7
20 (62 m)	22059	21368	21338	22028	24530	23871	23843	24508
30 (40 m)	22047	21356	21326	22016	24460	23814	23766	24444
40 (30 m)	22044	21353	21323	22013	24521	23877	23836	24513
50 (24 m)	22042	21351	21320	22011	24583	23977	23885	24611
60 (20 m)	22041	21351	21319	22010	24626	24050	23928	24683
70 (17 m)	22039	21349	21318	22009	24685	24150	23991	24776
80 (15 m)	22038	21348	21318	22008	24689	24160	23996	24785
90 (13,2 m)	22038	21348	21318	22008	24690	24163	23998	24788

Através da Tabela 20 percebe-se a variação desprezível dos valores de tração médios: 0,10% , 0,09%, 0,09% e 0,09% para o Tendão 1, Tendão 3, Tendão 5 e Tendão 7 respectivamente.

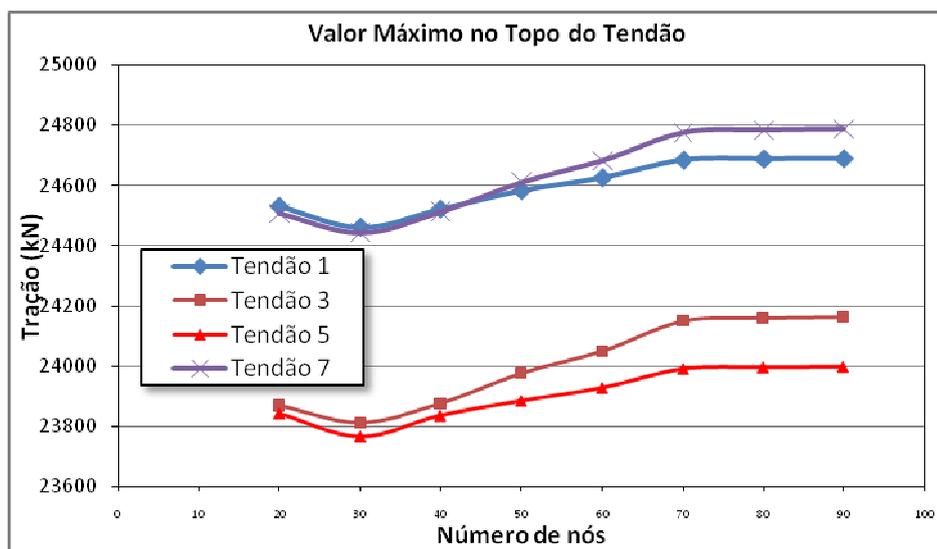


Figura 7.2 Variação da tração no topo do tendão conforme tamanho da malha em nós

¹ Média dos picos positivos

Observando os valores máximos pela Tabela 20 e Figura 7.2 é possível concluir que após determinado nível de refinamento de malha, ou tamanho de elemento, não há ganho significativo na precisão dos resultados. Isto é, os valores tendem a permanecer constantes para malhas acima de 70 nós.

A variação entre o menor e maior valor é :0,94% , 1,47%, 0,98% e 1,41% para o Tendão 1, Tendão 3, Tendão 5 e Tendão 7 respectivamente.

7.3.3 Conclusões sobre refinamento de malha

O refinamento da malha mostrou muito pouca alteração nos movimentos da unidade.

Quanto às trações nos tendões a influência do tamanho do elemento é maior, principalmente quando observada apenas a parcela dinâmica. Isto é, a parcela estática da tração nos tendões possui uma variação desprezível com o refinamento da malha.

Neste estudo a parcela dinâmica da tração representa uma pequena parte da tração total atuante no tendão – algo da ordem de 10%. Por isso a tração máxima considerada (estática + dinâmica) varia apenas 1,47% para o pior caso com o refinamento da malha.

Estas diferenças são muito pequenas quando num contexto de prática de projetos reais. Dificilmente em um projeto real, mesmo em fases mais avançadas, será possível encontrar dimensionamentos que exijam um grau de precisão tão alto. Assim, a escolha de malhas tão refinadas só se justificaria em casos muito específicos.

É importante, contudo, destacar que esta conclusão baseia-se numa parcela dinâmica pequena em relação à parcela estática. Caso isto não aconteça um estudo de refinamento de malha torna-se necessária para o projeto em questão.

Metodologia com refinamento de malha

Um procedimento que pode ser realizado com base neste resultado é a escolha de uma malha relativamente pobre para as fases iniciais de projeto (no qual, por exemplo, o enfoque seja principalmente os movimentos) e uma malha mais refinada na fase final.

Particularidades do cenário

Outro ponto importante é o perfil de correnteza “triangular” adotado, variando linear e constantemente de um valor máximo na superfície até zero no fundo, tem papel principal nestas pequenas variações e na conclusão deste estudo.

Nos projetos atuais os perfis de correnteza são cada vez mais detalhados, contando não só com irregularidades representando a variação de intensidade das correntes, como também com significativas variações de direção de atuação com a profundidade. Nestes casos, elementos grandes podem não captar corretamente a força hidrodinâmica da correnteza prejudicando o resultado. Por consequência a análise de um refinamento da malha , torna-se recomendável.

No presente estudo as malhas avaliadas atenderiam satisfatoriamente ao objetivo proposto, não obstante, para os tendões, foi adotada uma malha de 60 nós.

7.4 ESTUDOS PARAMÉTRICOS EM TIPOS DE MODELAÇÃO

7.4.1 Modelos sem Risers

Nesta seção encontram-se os resultados em movimentos da unidade e em trações nos tendões para modelos que não compreendem dos risers. Ou em outras palavras, foram simulados modelos nos quais os risers estão desconectados.

Em essência a diferença entre cada modelo está na formulação utilizada para representar os tendões: Mola Linear, Elementos Finitos, TV e TautLeg.

Primeiramente efetuou-se uma estimativa das frequências naturais apresentadas no item 7.4.1.1. Em seguida são apresentados os resultados de simulações que não consideram o efeito da correnteza nas linhas, apenas seu efeito no casco, item 7.4.1.2. No item 7.4.1.3 seguinte estão os resultados das simulações que consideram todos os efeitos da correnteza, no casco e nas linhas. Por fim, no item 7.4.1.4, registra-se as principais conclusões a respeito da diferença entre os modelos e sobre o papel da correnteza nesta diferença.

7.4.1.1 Análise de Vibração Livre

A Tabela 21 adiante apresenta os períodos naturais em cada direção de movimento obtidos por uma análise modal do programa SITUA. Nesta análise, em essência, os períodos são calculados a partir de uma avaliação da massa do sistema (incluindo-se a massa adicionada) e de uma avaliação da rigidez, ambos na posição “neutra” (sem cargas ambientais).

A Figura 7.3 e Figura 7.4 procuram ilustrar as frequências e períodos naturais obtidos em conjunto com o estado de mar considerado nas simulações.

Tabela 21 Períodos naturais da unidade

<i>Movimento</i>	<i>Período Natural (s)</i>
<i>Surge</i>	151,2
<i>Sway</i>	151,2
<i>Heave</i>	4,343
<i>Roll</i>	3,035
<i>Pitch</i>	3,470
<i>Yaw</i>	92,58

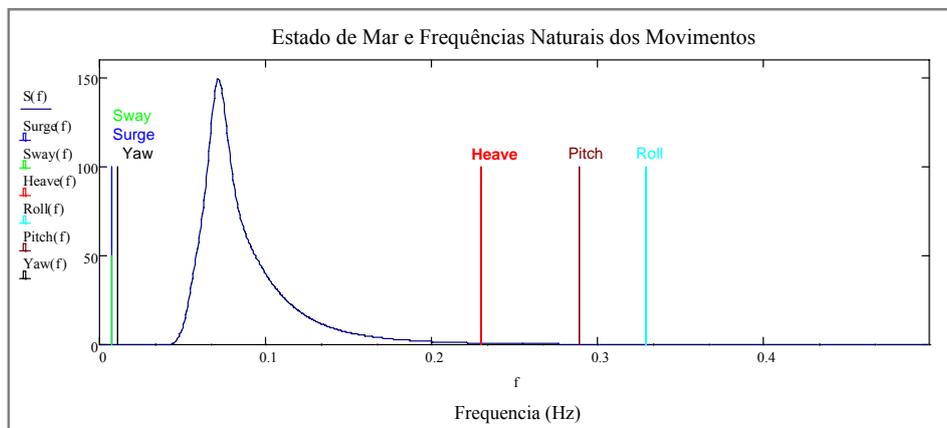


Figura 7.3 Frequências naturais e estado de mar considerado

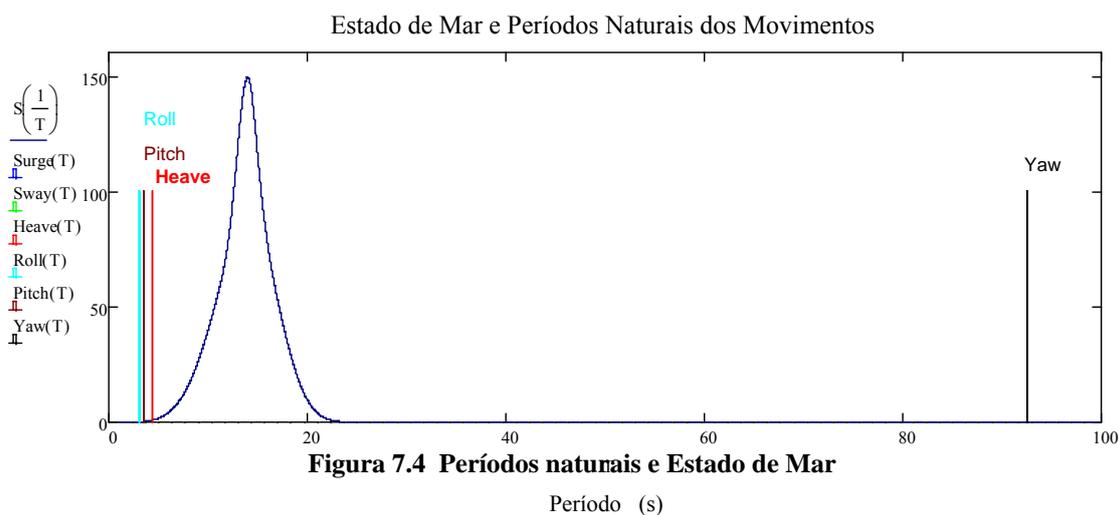


Figura 7.4 Períodos naturais e Estado de Mar

Observando Tabela 21 , Figura 7.3 e Figura 7.4 é possível notar que a frequência natural em *surge* e em *sway* são idênticas, e que a frequência natural em *surge*, *sway* e *yaw* permanecem abaixo das frequências de maior energia do mar enquanto que as frequências de *heave*, *pitch* e *roll* permanecem acima.

Ainda na Figura 7.3, destacam-se as frequências naturais em *pitch* e *roll* distintas, fato ocasionado tanto pela distribuição de massa com termos acoplados, como também pela matriz de rigidez com graus de liberdade acoplados (deslocamento em um grau de liberdade resulta em restauração em outro grau).

7.4.1.2 Análises Dinâmicas Sem Correnteza

A Tabela 22 resume os parâmetros de simulação utilizados nesta seção.

Tabela 22 Principais parâmetros utilizados no estudo

<i>Parâmetros Fixos</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de simulação: 1200 s • Instante de tempo de início do cálculo dos dados estatísticos: 280 s • Intervalo de integração do casco: 0,05 s 	<ul style="list-style-type: none"> • Risers desconectados • Rampa de tempo de aplicação das forças ambientais: 70 s • Intervalo de integração das linhas: 0,0125 s
<i>Parâmetros Variáveis</i>	
➤ Análise acoplada e desacoplada sem considerar a correnteza nas linhas	➤ Modelo de tendões: Elementos Finitos, Mola Linear, TV e TautLeg

Nesta seção são apresentadas as séries temporais e dados estatísticos das simulações para diferentes modelos de tendões. Para este estudo não foram considerados os risers.

Procurando isolar os fatores que interferem na diferença entre as metodologias, neste item foi desconsiderado o efeito da correnteza sobre as linhas, mantendo seu efeito apenas no casco. Para isso, no modelo de Elementos Finitos, o código Prosim conta com uma opção de “desativar” a correnteza, isto é, no cálculo da velocidade relativa entre a linha e o fluido, para a obtenção dos esforços hidrodinâmicos, não é considerada a velocidade da correnteza. Nos modelos desacoplados (Mola Linear, TV e TautLeg) a correnteza é naturalmente ignorada, já que a formulação das linhas não considera efeitos hidrodinâmicos, sem a necessidade de “modificações” para isto.

Para as análises dinâmicas apresentadas a seguir uma simulação estática é realizada em um passo anterior à análise dinâmica, apenas com as parcelas constantes dos agentes ambientais. O resultado da análise estática passa a ser condição inicial para a simulação dinâmica.

A Figura 7.5 até a Figura 7.17 apresentam as séries temporais e os espectros destas séries para cada movimento da unidade – *surge, sway, heave, roll, pitch, yaw*.

Movimentos

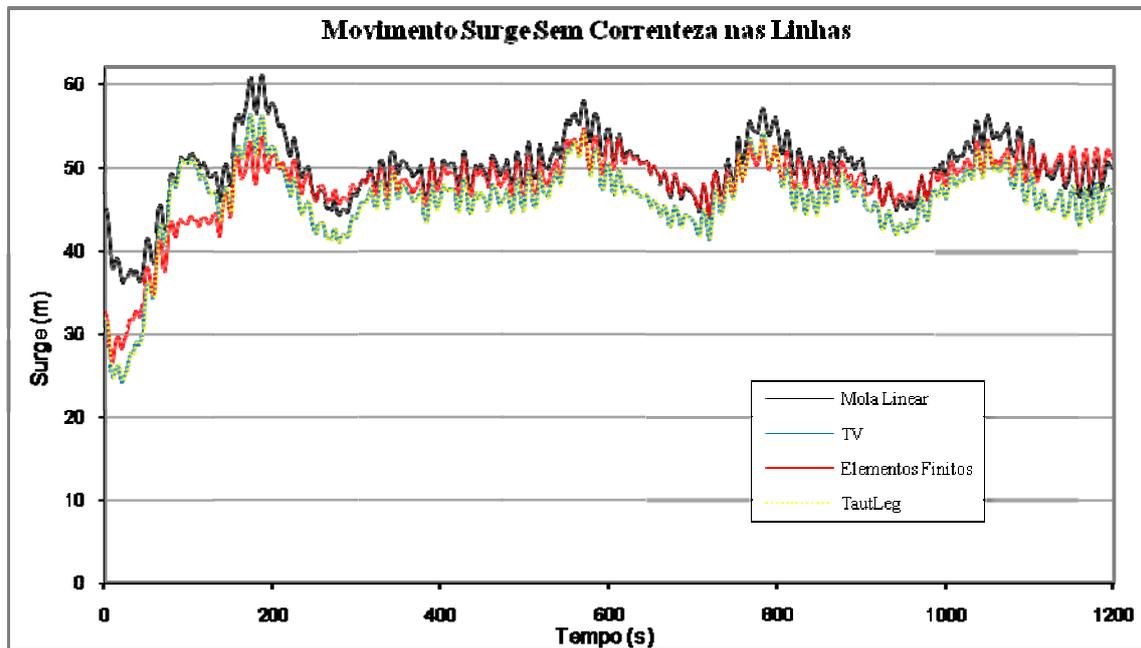


Figura 7.5 Surge da TLP sem correnteza nas linhas

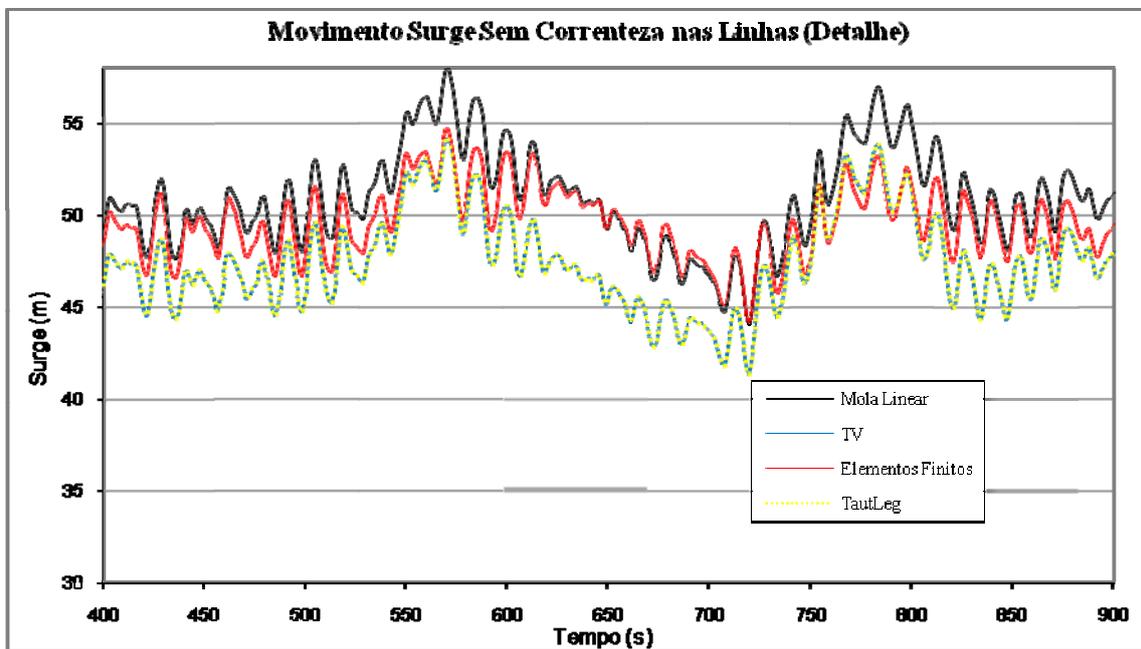


Figura 7.6 Surge da TLP sem correnteza nas linhas (zoom)

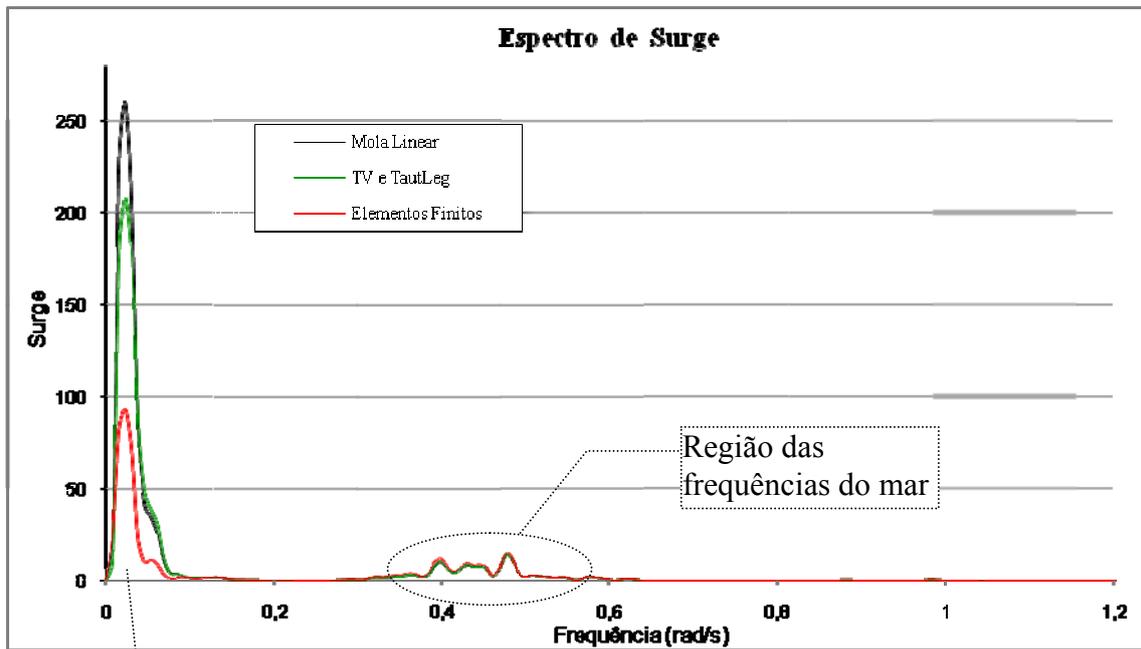


Figura 7.7 Espectro de surge da TLP sem correnteza nas linhas

Região das frequências naturais

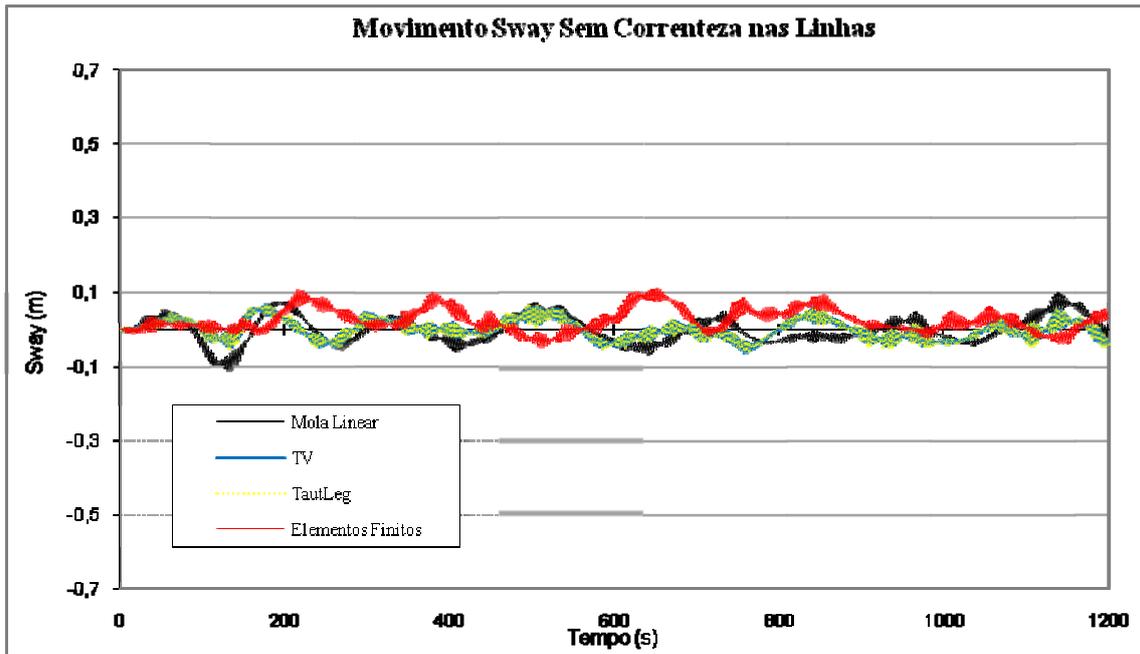


Figura 7.8 Sway da TLP sem correnteza nas linhas

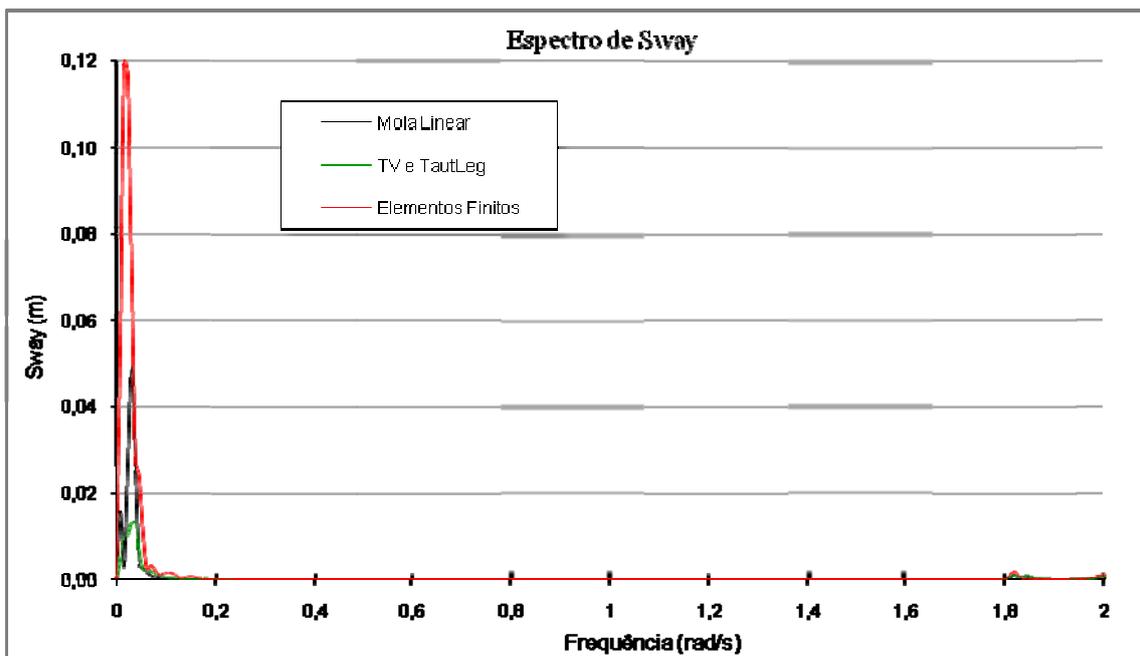


Figura 7.9 Espectro de sway da TLP sem correnteza nas linhas

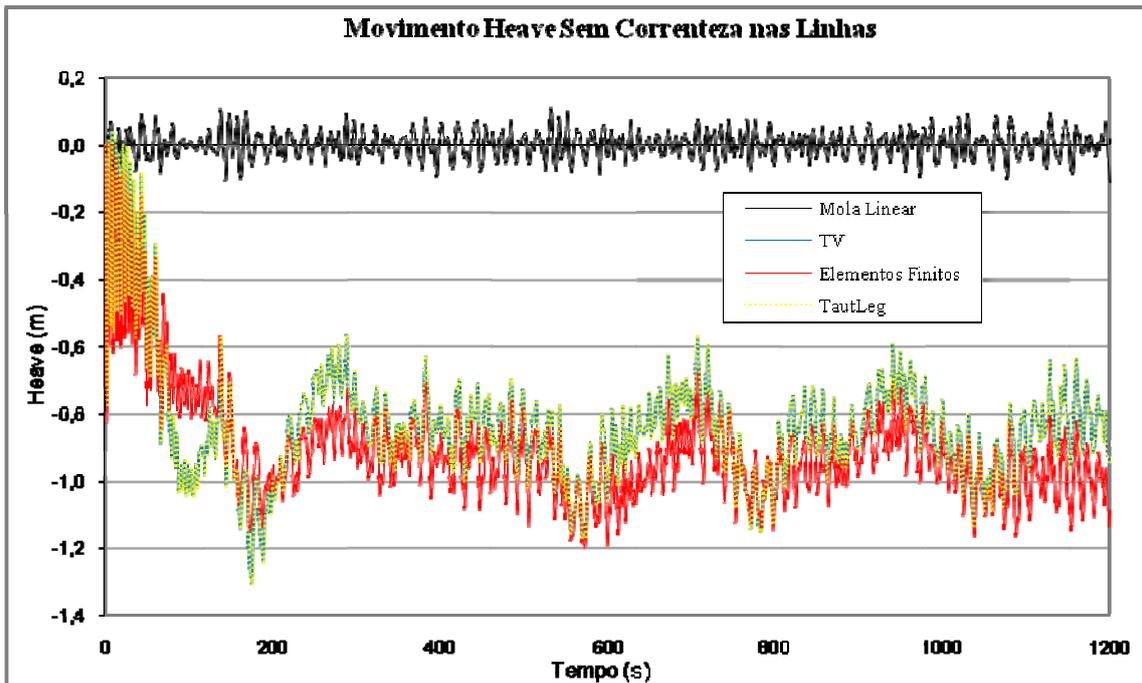


Figura 7.10 Heave da TLP sem correnteza nas linhas

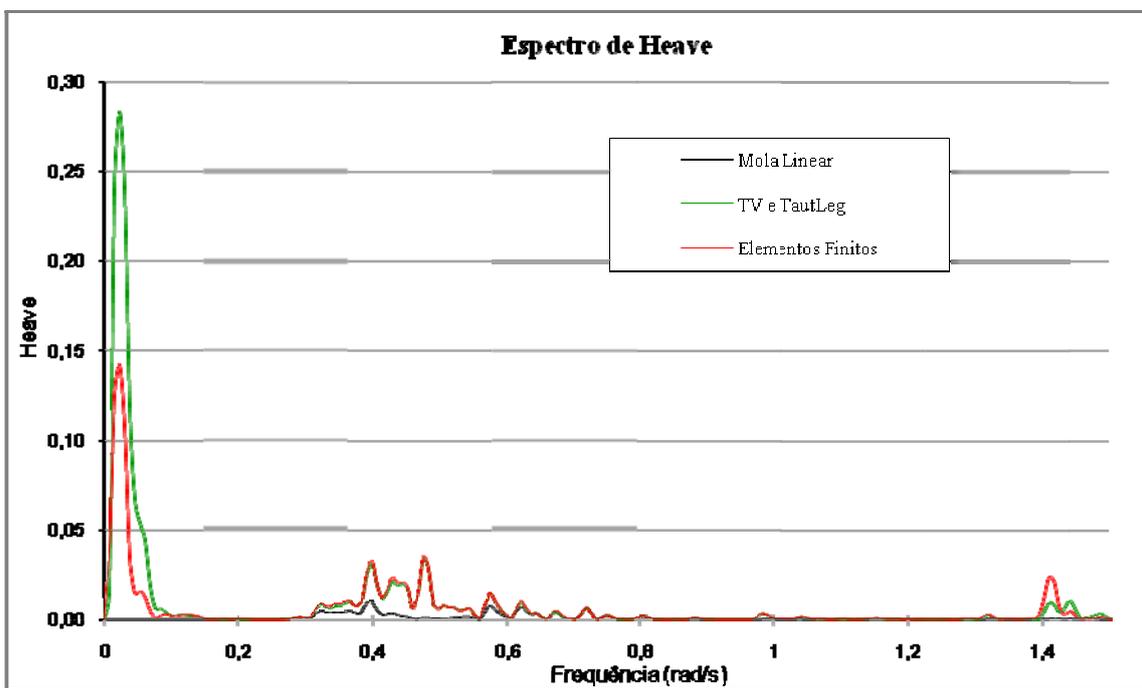


Figura 7.11 Espectro heave da TLP sem correnteza nas linhas

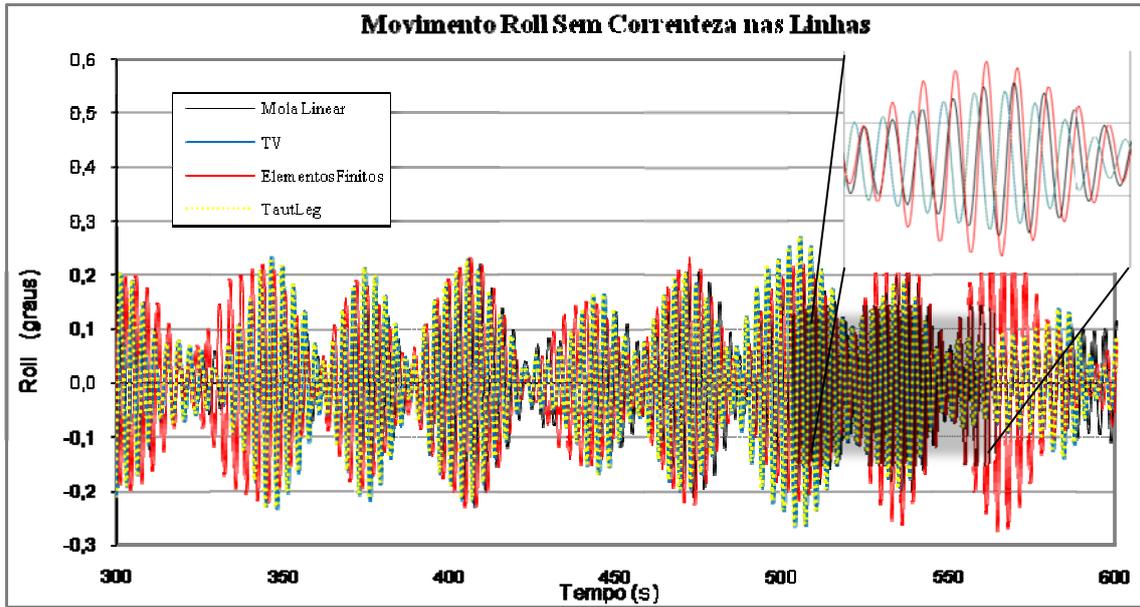


Figura 7.12 Roll da TLP sem correnteza nas linhas

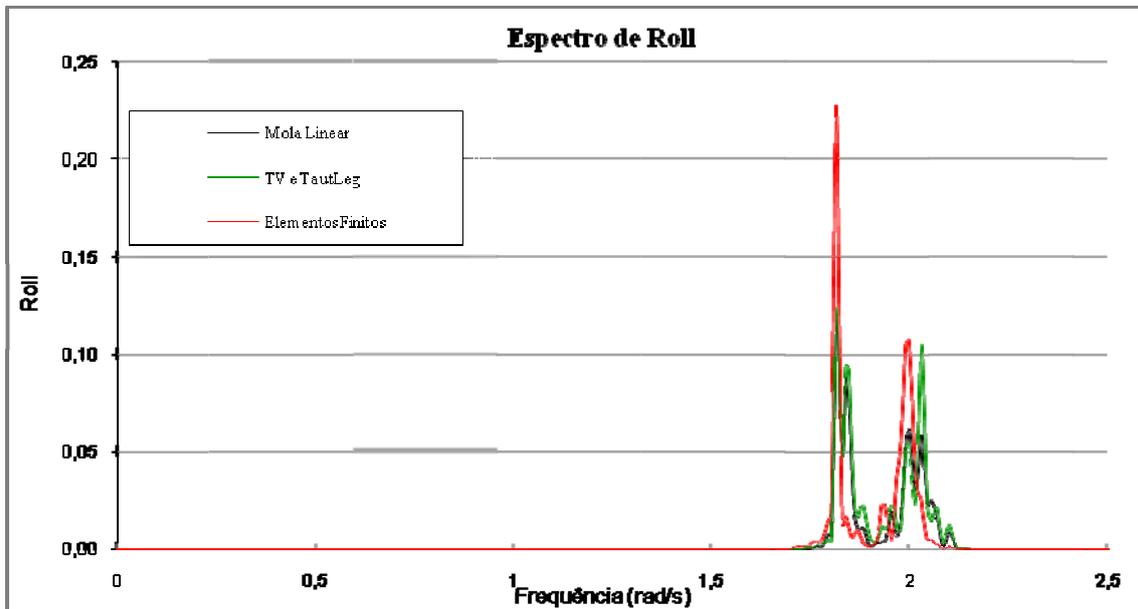


Figura 7.13 Espectro de roll da TLP sem correnteza nas linhas

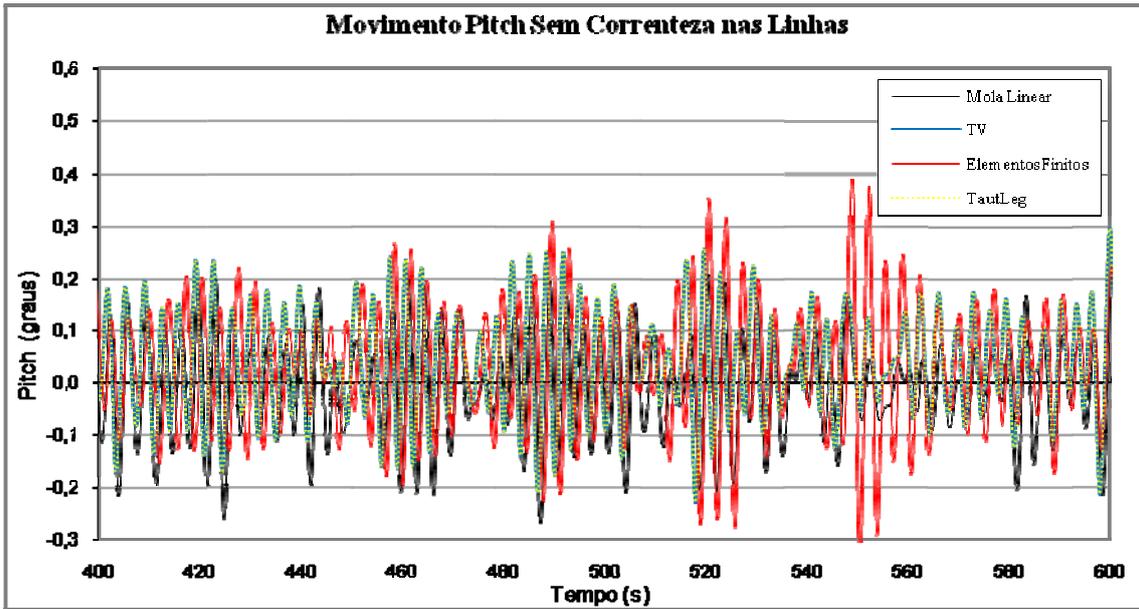


Figura 7.14 Pitch da TLP sem correnteza nas linhas

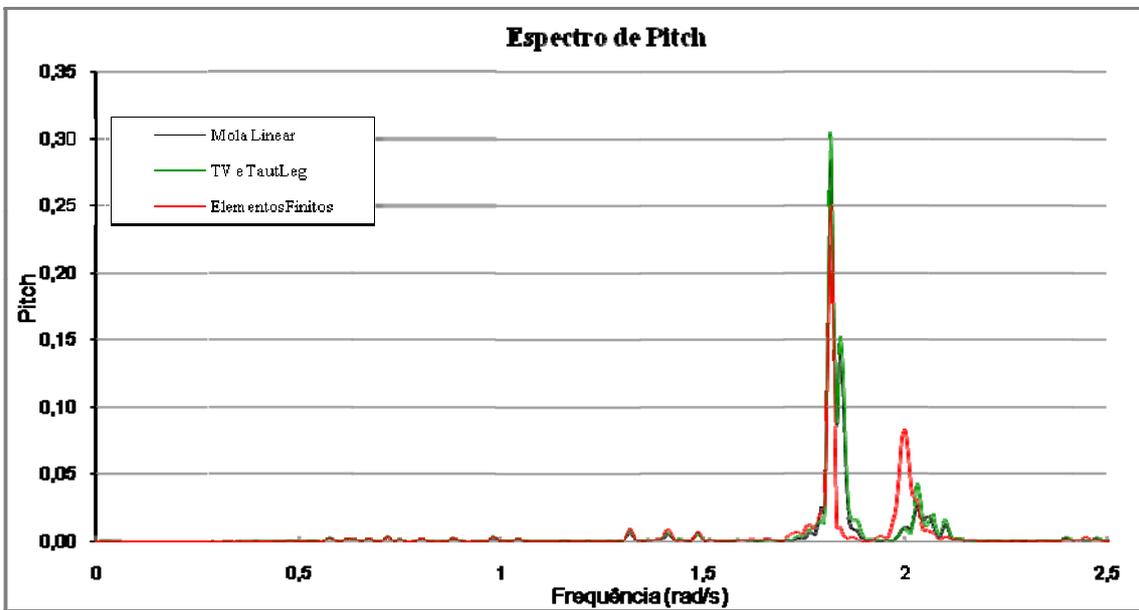


Figura 7.15 Espectro de pitch da TLP sem correnteza nas linhas

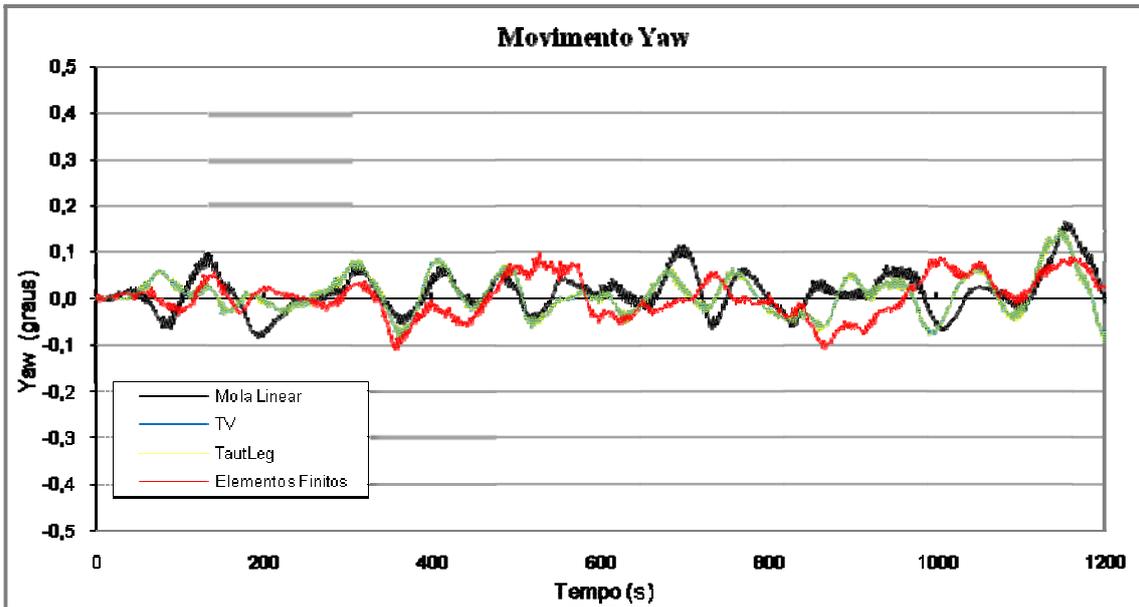


Figura 7.16 Yaw da TLP sem correnteza nas linhas

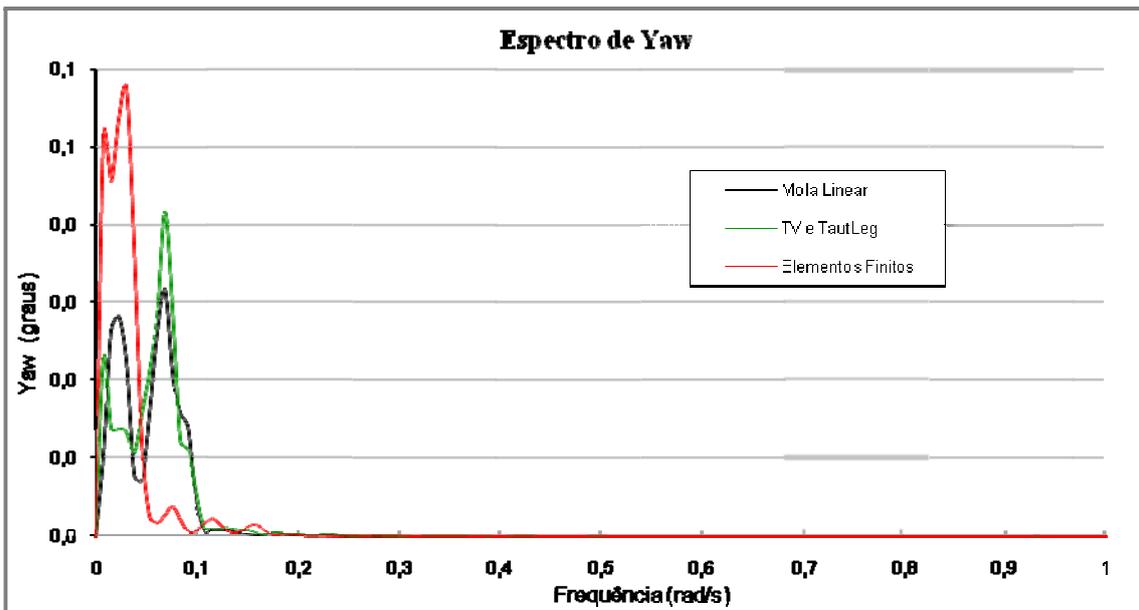


Figura 7.17 Espectro de yaw da TLP sem correnteza nas linhas

A Tabela 23 seguinte apresenta os dados estatísticos dos movimentos de *surge*, *heave*, *roll* e *pitch* e a variação destes dados em relação ao modelo acoplado utilizado como referência. Os valores máximos e mínimos foram calculados utilizando-se o programa POSSINAL que calcula os valores esperados através de uma estatística de extremos, a distribuição de ajuste escolhida é uma distribuição de Weibull.

Tabela 23 – Dados Estatísticos de *surge*, *heave*, *roll* e *pitch* sem correnteza nas linhas

		<i>Surge</i> (m) (var.) ¹		<i>Heave</i> (m) (var.)		<i>Roll</i> (graus) (var.)		<i>Pitch</i> (graus) (var.)	
Mola Linear	Máx. Extremo ²	61,00	8,9%	0,138	123%	0,320	-6%	0,310	-28%
	Média	50,31	1,9%	0	100%	0	0%	-0,011	-138%
	Mín. Extremo	41,79	-2,5%	-0,122	90%	-0,320	3%	-0,340	8%
TV e TautLeg	Máx. Extremo ²	57,75	3,1%	-0,450	25,0%	0,360	5,9%	0,400	-7,0%
	Média	47,03	-4,7%	-0,859	9,8%	0	0%	0,035	24,0%
	Mín. Extremo	39,87	-6,9%	-1,350	-6,3%	-0,360	-9,1%	-0,330	10,8%
Elementos Finitos	Máx. Extremo ²	56,00	-	-0,600	-	0,340	-	0,430	-
	Média	49,35	-	-0,952	-	0	-	0,029	-
	Mín. Extremo	42,84	-	-1,270	-	-0,330	-	-0,370	-

Antes da discussão dos resultados por modelo é importante lembrar que foi considerada uma condição de carregamento em que todos os agentes ambientais atuam no sentido positivo do eixo x. Isto é, a TLP apresenta *offset* no plano horizontal apenas na direção de *surge* (eixo x), com *offset* na direção *sway* desprezível. Em outras palavras, o *surge* representa praticamente o *offset* total da TLP.

Ainda é importante ressaltar a semelhança entre os espectros de *pitch* e *roll* da unidade, Figura 7.13 e Figura 7.15, consequência do acoplamento existente entre estes movimentos. Este acoplamento é em grande parte devido à distribuição não-uniforme de massa representada pela matriz de raios de giração Tabela 4.

Mola Linear

Analisando a série temporal do *surge*, percebe-se que o modelo com formulação Mola Linear resultou em *offset* maior que o *offset* com Elementos Finitos, ficando a sua média acima da média com Elementos Finitos.

¹ Variação em relação ao modelo de referência (Modelo de Elementos Finitos)

² Máximo e mínimo calculados utilizando estatísticas de extremos

Esta diferença deriva essencialmente das simplificações utilizadas na Mola Linear identificadas. Ao reexaminar rigorosamente a dedução da equação da Mola Linear (eq.(6.3) Capítulo 6.3.2.1) duas aproximações podem ser destacadas. A primeira é uma linearização trigonométrica, onde foi adotado o valor do ângulo ao invés do seno deste ângulo, de maneira que a força de restauração calculada deste modo seja sempre maior que a calculada sem esta aproximação. Ou seja, esta linearização tende a aumentar a rigidez horizontal. O erro é considerado pequeno para ângulos pequenos.

A segunda aproximação é a consideração de tração constante na linha. A tração na linha aumenta à medida em que ocorre o *setdown* da unidade, e este por sua vez aumenta com o *offset* da mesma. Neste modelo porém não ocorre *setdown* e portanto aumento de tração, o que resulta numa força de restauração, calculada **com** a premissa de tração constante, menor do que a restauração que ocorre na realidade com a tração que efetivamente atua na linha (que não é constante). Assim, esta simplificação adotada tende a diminuir a rigidez horizontal.

Outra aproximação que altera a matriz de rigidez da linha é a própria configuração geométrica da linha. A

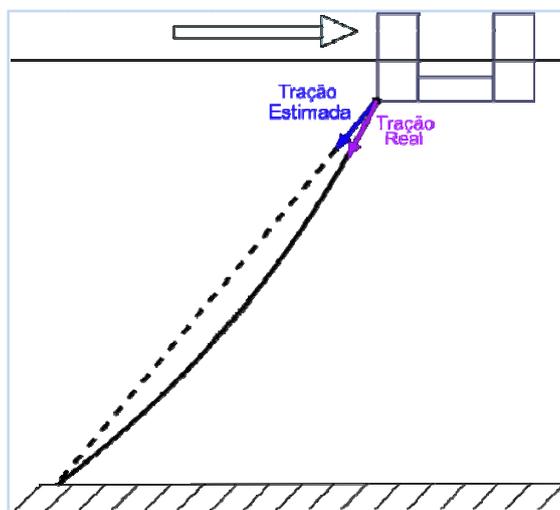


Figura 7.18 Configuração geométrica de uma linha

A Figura 7.18 busca ilustrar a diferença da tração considerada no modelo Mola Linear, e a tração considerada no modelo de Elementos Finitos. No modelo de Elementos Finitos a linha sofre um “embarrigamento”, ou melhor, apresenta a forma de uma catenária retesada - curvatura devido ao peso e demais agentes. Na Mola Linear considera-se uma reta. Espera-se então que a força de restauração real seja menor que a

restauração considerando a linha retilínea. Ou seja, esta aproximação tende a aumentar a rigidez horizontal.

Existem inúmeras outras aproximações, cujo impacto sobre a média do offset (surge neste caso) é de difícil avaliação, ainda assim espera-se que as mais significativas sejam estas já levantadas. Não obstante, o principal objetivo foi mostrar que no modelo Mola Linear existem erros que aumentam o offset da TLP e erros que diminuem este offset. Por isso o passeio da TLP com Mola Linear se aproxima muito bem do passeio de Elementos Finitos (modelo acoplado), melhor até do que o modelo TV e TautLeg, resultado do cancelamento casual destes erros (os erros que aumentam anularam os erros que diminuem).

Quanto à série temporal do movimento de *sway*, todos os 4 modelos estudados apresentaram valores desprezíveis , conforme o esperado numa situação onde o carregamento é todo alinhado na direção de *surge*. O mesmo ocorre com o movimento de *Yaw*.

Quanto ao *heave* é possível notar que o modelo Mola Linear apresenta *setdown* (média do *heave*) praticamente zero. A rigidez na direção vertical permanece constante e assim a TLP mantém o mesmo calado (consequentemente *setdown*) para qualquer passeio.

Conforme mencionado no Capítulo 6.3.2.1 este modelo não apresenta termos de rigidez acoplados, ou seja, a matriz de rigidez de cada linha possui coeficientes apenas na diagonal principal. O *setdown* poderia ser aproximado através dos termos de rigidez acoplados caso fossem considerados.

A amplitude de variação de *heave* neste modelo é bem menor que nos outros. Pode ser explicada pela rigidez vertical que na realidade deve diminuir com o offset (o inverso do que ocorre com rigidez horizontal), enquanto no modelo Mola Linear é adotada como constante.

Analisando a série temporal de *roll* da unidade nota-se que apesar de não haver carregamentos no plano YZ, isto é, cargas que pudessem gerar momentos de *roll*, a TLP apresenta *roll* significativo. O fato é um indicativo do alto grau de acoplamento entre o *roll* e o *pitch* da unidade. A conclusão fundamenta-se nos espectros de *roll* e *pitch*.

A amplitude de movimentos de *roll* e *pitch* é menor na Mola Linear, principalmente pela adoção de rigidezes rotacionais conservadoras.

TV e TautLeg

O modelo TV e TautLeg apresentaram valores idênticos. Ambos os modelos possuem a mesma representação matemática das linhas, diferindo apenas na implementação computacional.

A formulação considera o efeito de variação de tração e *setdown*, entre outros, e portanto é fisicamente mais próximo do modelo de Elementos Finitos que a Mola Linear. O movimento em *surge*, entretanto, é ligeiramente mais afastado do surge do modelo acoplado que o *surge* do modelo Mola Linear. Isto é, em relação ao modelo acoplado, a média do *offset*, por exemplo, do TV e TautLeg é -4,7% da média de referência enquanto a média do *offset* da Mola Linear é apenas 1,9%.

Conforme apontado no modelo Mola Linear existem simplificações que subestimam a rigidez horizontal das linhas e simplificações que superestimam a rigidez horizontal. O modelo TV e TautLeg não utilizam algumas simplificações que subestimam a rigidez horizontal e mantém as simplificações que superestimam esta rigidez. O resultado é uma rigidez horizontal maior levando ao passeio observado menor que o modelo acoplado.

Observando a média do movimento *heave*, percebe-se que modelo TV e TautLeg apresentam um *setdown* 9,8% menor que o modelo de acoplado (Elementos Finitos), o que decorre principalmente do fato de apresentar um *offset* menor – o *setdown* conforme visto anteriormente é proporcional com o *offset*.

Pelo histórico de *roll* nota-se que o modelo TV e TautLeg possuem a mesma média que o modelo de referência. A variação entretanto é maior. Em grande parte resultado da desconsideração dos efeitos dinâmicos e hidrodinâmicos das linhas - amortecimento viscoso e efeitos inerciais.

Elementos Finitos

O modelo de Elementos Finitos representa o modelo acoplado, pois considera a interação entre o comportamento das linhas e o comportamento do casco. É o modelo de

referência, com a melhor representação das linhas, pois além desta interação também leva em conta os efeitos hidrodinâmicos e as não-linearidades geométricas.

Neste modelo a amplitude do *offset* (*surge*) e do movimento *heave* são menores que nos modelos Mola Linear , TV e TautLeg. Este resultado deriva da consideração dos efeitos dinâmicos e hidrodinâmicos das linhas – como amortecimento viscoso e efeitos inerciais – reduzindo os movimentos da unidade.

O amortecimento viscoso, por exemplo, pode ser percebido no espectro do movimento *surge*, Figura 7.7. Na região onde a energia do mar é preponderante , frequências em torno de 0,4 até 0,8 rad/s, praticamente não há diferença entre os modelos, enquanto na região de ressonância de *surge*, nas frequências próximas às frequências naturais de *surge*, a energia (área sob a curva) do modelo acoplado é menor do que a energia dos outros modelos, mostrando portanto uma dissipação de energia nessa região (consequência do amortecimento).

É importante perceber que o amortecimento é menos significativo para os movimentos de primeira ordem, movimentos nas frequências do estado de mar considerado, sendo importante para os movimentos de segunda ordem e movimentos em frequências mais próximas das frequências naturais.

Trações

A Figura 7.19 logo a seguir apresenta o histórico de tração no topo dos tendões, e a Tabela 24 à Tabela 27 apresentam os resultados estatísticos. Devido à uma limitação no programa Prosim não foi possível obter os resultados de tração para o modelo Mola Linear, por isso o modelo Mola Linear é expurgado do comparativo de trações.

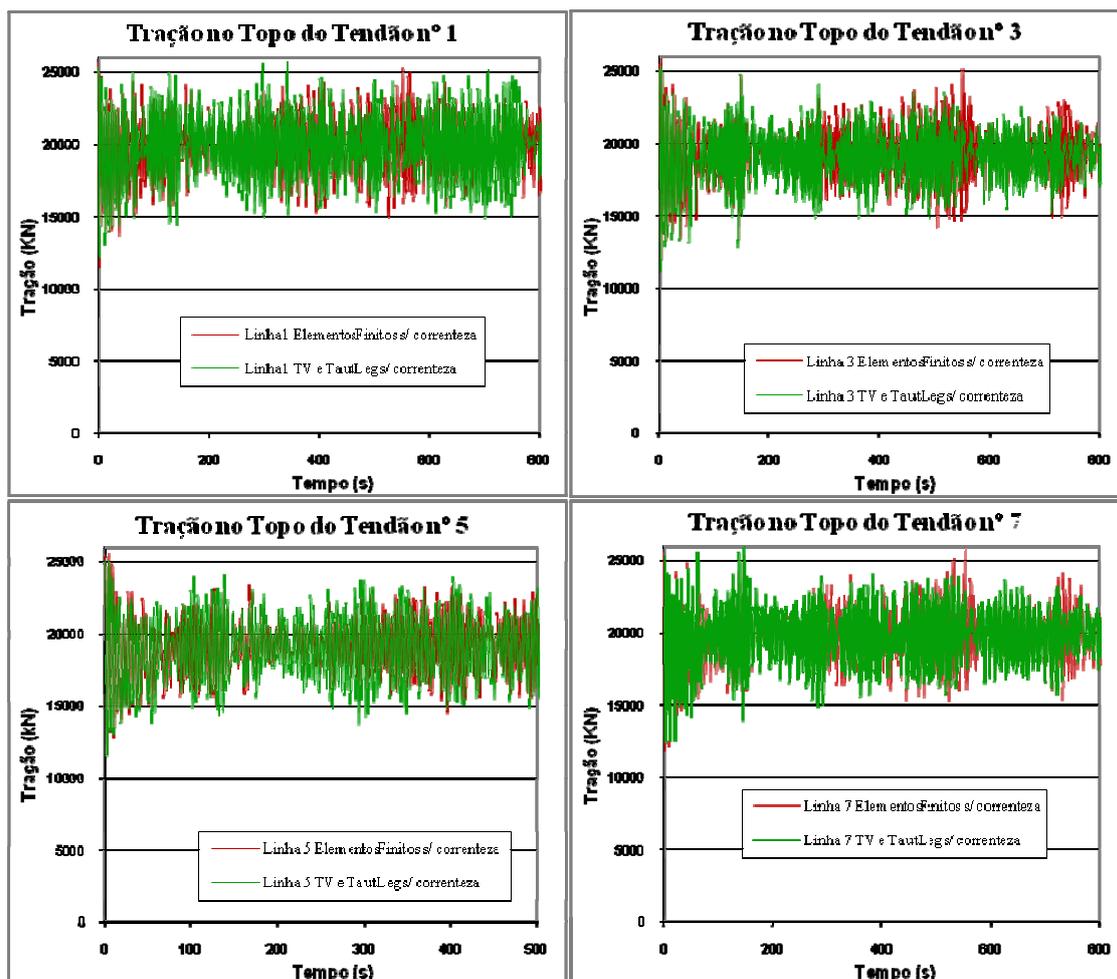


Figura 7.19 Série temporal da tração no topo dos tendões sem a atuação da correnteza nas linhas

A Figura 7.20 a seguir apresenta o espectro de tração no topo de um tendão.

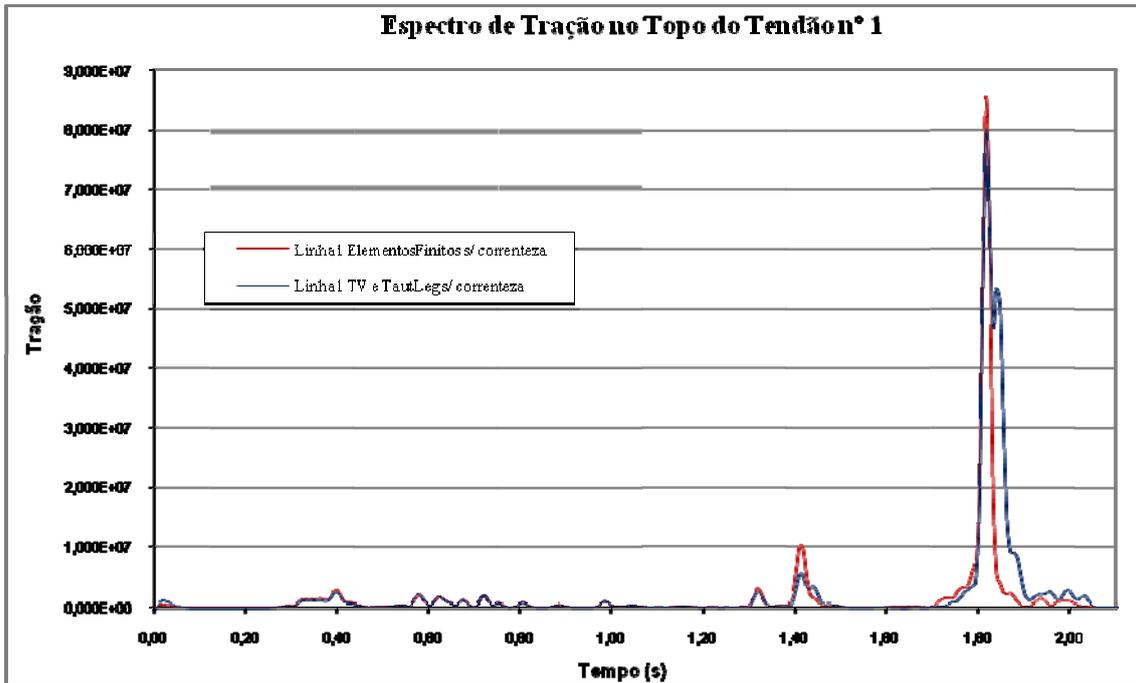


Figura 7.20 Espectro de tração no topo do tendão n°1 sem correnteza nas linhas.

Tabela 24 – Trações nos tendões sem a consideração do efeito da correnteza nas linhas

		Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6	Linha 7	Linha 8
TV e TautLeg	Máxima ¹	27030	26996	25419	25593	25437	25430	25577	25875
	Média	19899	19863	19074	19038	19038	19074	19863	19899
	Mínima ¹	12842	12707	13380	13138	12257	12127	14056	13874
Elementos Fimnitos	Máxima ¹	26102	26071	25867	26006	25007	25098	26959	27108
	Média	19969	19940	19308	19279	19279	19308	19940	19969
	Mínima ¹	14162	14162	13146	13003	14016	14010	14261	14244

Tabela 25 – Tração nos tendões sem a correnteza nas linhas em relação ao modelo acoplado

		Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6	Linha 7	Linha 8
TV e TautLeg	Máxima ¹	3,6%	3,5%	-1,7%	-1,6%	1,7%	1,3%	-5,1%	-4,5%
	Média	-0,4%	-0,4%	-1,2%	-1,3%	-1,3%	-1,2%	-0,4%	-0,4%
	Mínima ¹	-9,3%	-10,3%	1,8%	1,0%	-12,5%	-13,4%	-1,4%	-2,6%

¹ Máximo e mínimo calculados utilizando estatísticas de extremos

Tabela 26 – Variação da tração, parcela dinâmica, atuante no topo das linhas (máximos e mínimos descontados da média)

	Tração							
	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6	Linha 7	Linha 8
<i>TV e TautLeg</i> Máxima ¹	7131	7133	6345	6555	6399	6356	5714	5976
Mínima	-7057	-7156	-5694	-5900	-6781	-6947	-5807	-6025
<i>Elementos Finitos</i> Máxima	6133	6131	6559	6727	5728	5790	7019	7139
Mínima	-5807	-5778	-6162	-6276	-5263	-5298	-5679	-5725

Tabela 27 – Comparação da parcela dinâmica em relação ao modelo de referência (Modelo de Elementos Finitos)

	Tração							
	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6	Linha 7	Linha 8
<i>TV e TautLeg</i> Máxima	16,3%	16,3%	-3,3%	-2,6%	11,7%	9,8%	-18,6%	-16,3%
Mínima	21,5%	23,8%	-7,6%	-6,0%	28,8%	31,1%	2,3%	5,2%

O gráfico seguinte, Figura 7.21, é uma representação gráfica dos resultados estatísticos.

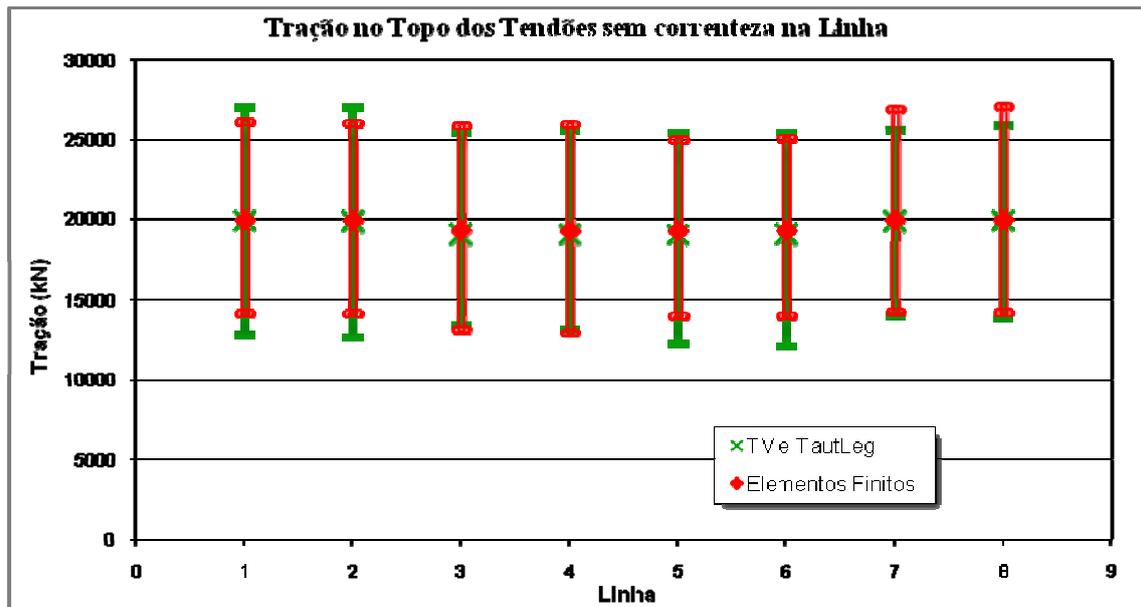


Figura 7.21 Trações no topo dos tendões sem o efeito da correnteza nas linhas

Observando o espectro de tração é possível notar uma maior concentração de energia ao redor de 1,80 rad/s possibilitando concluir que neste caso o *pitch* é o principal responsável pela parte dinâmica da tração. O *roll* também possui grande colaboração devido ao acoplamento *roll-pitch* já mencionado. O *heave* colabora nas regiões de menor frequência (ao redor de 1,40 rad/s) e relativamente menor energia.

¹ Máximo e mínimo calculados utilizando estatísticas de extremos

Com a Tabela 24 e a Figura 7.21 nota-se uma boa concordância das médias dos modelos desacoplados e acoplado. Os modelos também concordam quanto à tendência de algumas linhas (linha 1, 2, 7 e 8) permanecerem ligeiramente mais carregadas, com valores de tração maiores.

Considerando apenas a parte dinâmica, a diferença entre modelo TV e TautLeg e modelo de Elementos Finitos chega a 18,6% para tração máxima e 31,1% para tração mínima conforme Tabela 27.

7.4.1.3 Análises Dinâmicas Com Correnteza

A Tabela 28 resume os parâmetros de simulação utilizados nesta seção.

Tabela 28 Principais parâmetros utilizados no estudo

<i>Parâmetros Fixos</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de simulação: 1200 s • Instante de tempo de início do cálculo dos dados estatísticos: 280 s • Intervalo de integração do casco: 0,05 s 	<ul style="list-style-type: none"> • Risers desconectados • Rampa de tempo de aplicação das forças ambientais: 70 s • Intervalo de integração das linhas: 0,0125 s
<i>Parâmetros Variáveis</i>	
<p>➤ Análise acoplada e desacoplada com a consideração da correnteza nas linhas</p>	<p>➤ Modelo de tendões: Elementos Finitos, Mola Linear, TV e TautLeg</p>

Como indicado na tabela acima, Tabela 28, neste item estão os resultados de simulações com modelos desacoplados e acoplado, com a consideração dos efeitos da correnteza atuando nas linhas, que no item anterior haviam sido ignorados. Os demais parâmetros permanecem os mesmos da seção anterior.

O modelo acoplado, que possui tendão representado por elementos finitos, incorpora em sua formulação o cálculo das forças hidrodinâmicas provenientes da correnteza. Por isso não é necessário nenhum “artifício” no modelo.

Já nos modelos desacoplados (Mola Linear, TV e TautLeg) a formulação das linhas não leva em consideração efeitos hidrodinâmicos. Assim, nestes modelos, a correnteza é considerada de forma indireta e simplificada conforme proposto em 6.4.1 – é aplicada uma força externa F_c , representando o efeito da correnteza nas linhas, no CG da unidade.

Espera-se que a correnteza contribua para a diferença dos valores entre os modelos desacoplados e o acoplado. Assim a comparação dos resultados desta seção, onde a correnteza é considerada integralmente, com os resultados da seção anterior, onde a correnteza é considerada apenas no casco, permite levantar indícios do papel da correnteza nesta diferença.

E ainda, igualmente importante, a comparação permite uma avaliação da qualidade da aproximação proposta (seção 6.4.1) para a consideração dos efeitos da correnteza, isto é, se a aplicação de uma força externa oferece representação satisfatória da correnteza. A Figura 7.22 até a Figura 7.29 apresentam as séries temporais e os espectros para os principais movimentos da unidade, a Tabela 29 apresenta os dados estatísticos destas séries.

Movimentos

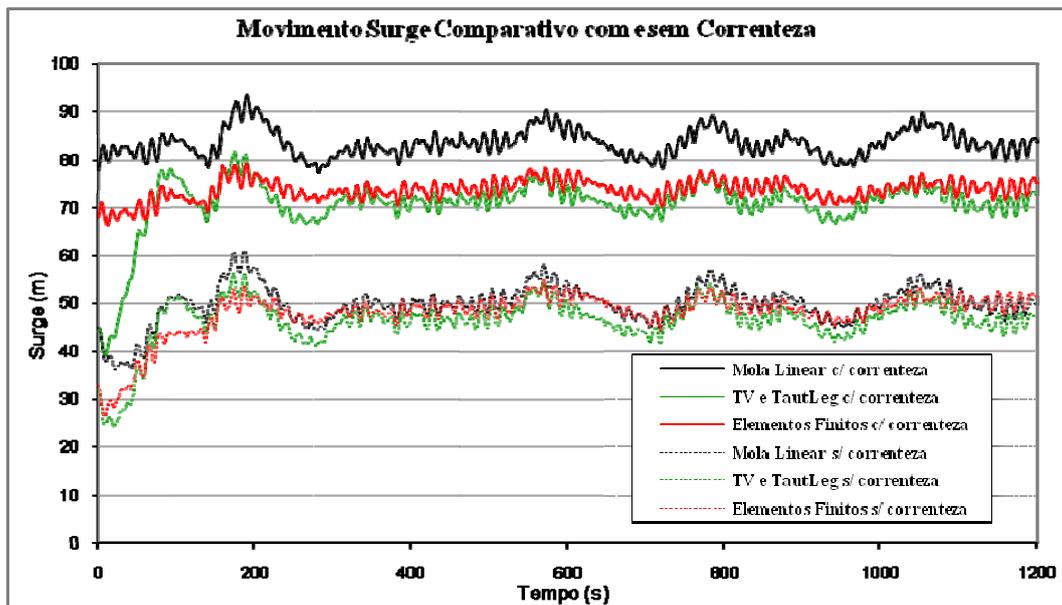


Figura 7.22 Surge da TLP com correnteza nas linhas

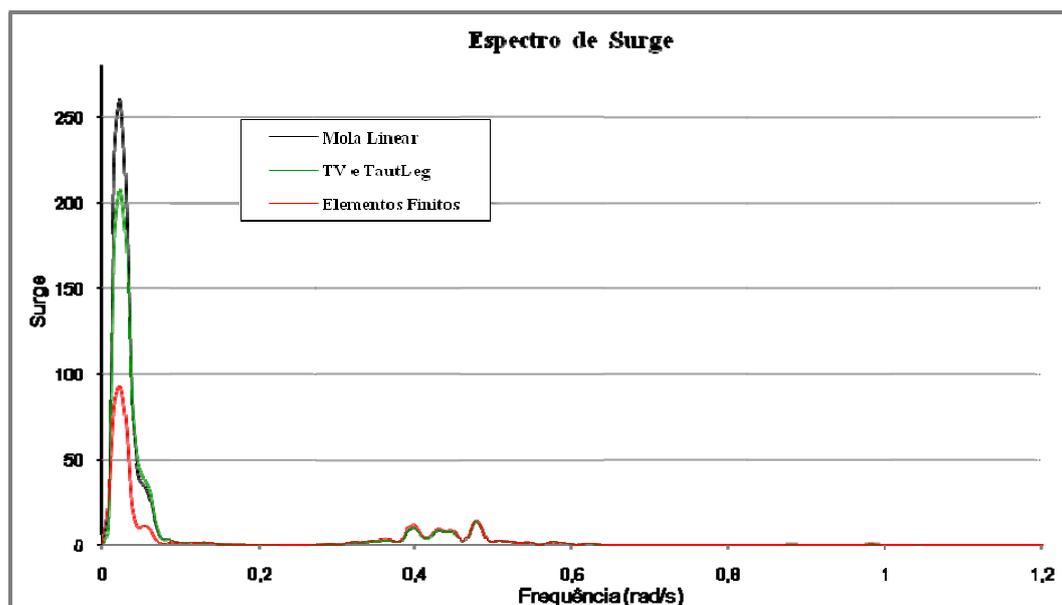


Figura 7.23 Espectro de surge da TLP com correnteza nas linhas

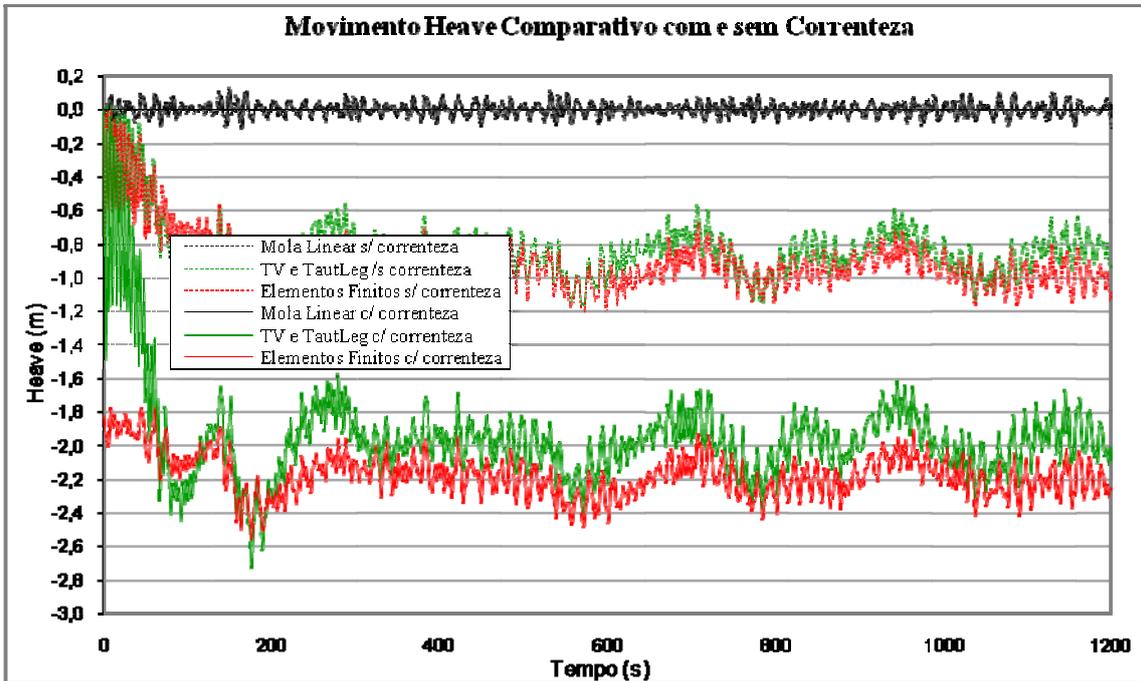


Figura 7.24 Heave da TLP com correnteza nas linhas

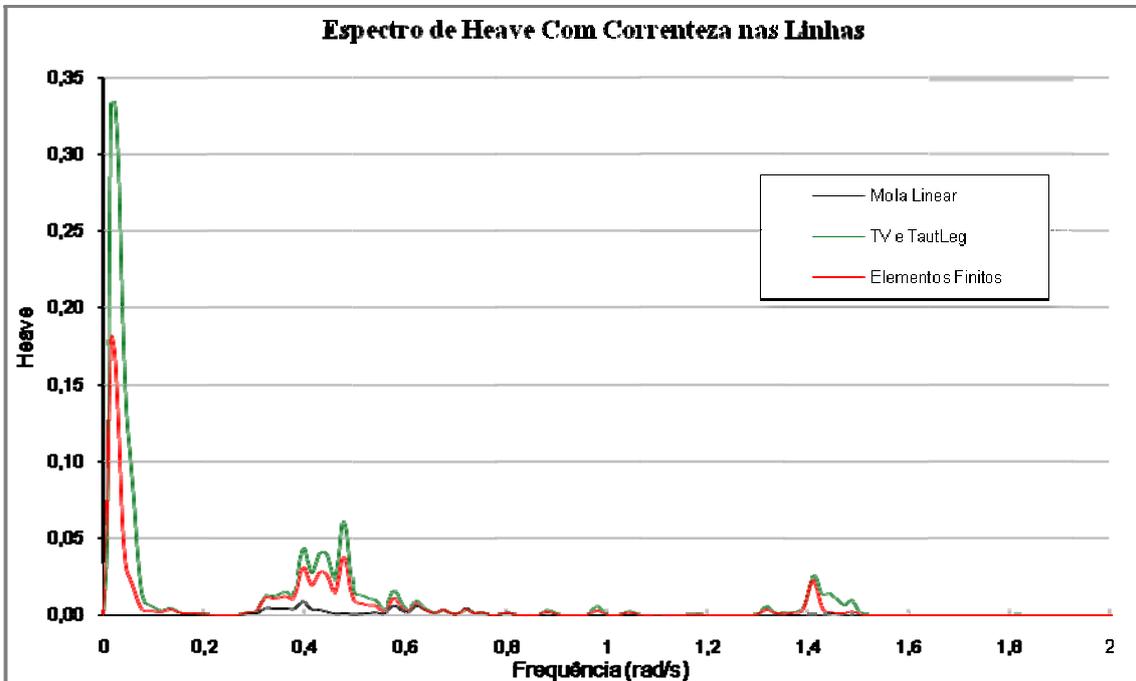


Figura 7.25 Espectro de heave da TLP com correnteza nas linhas

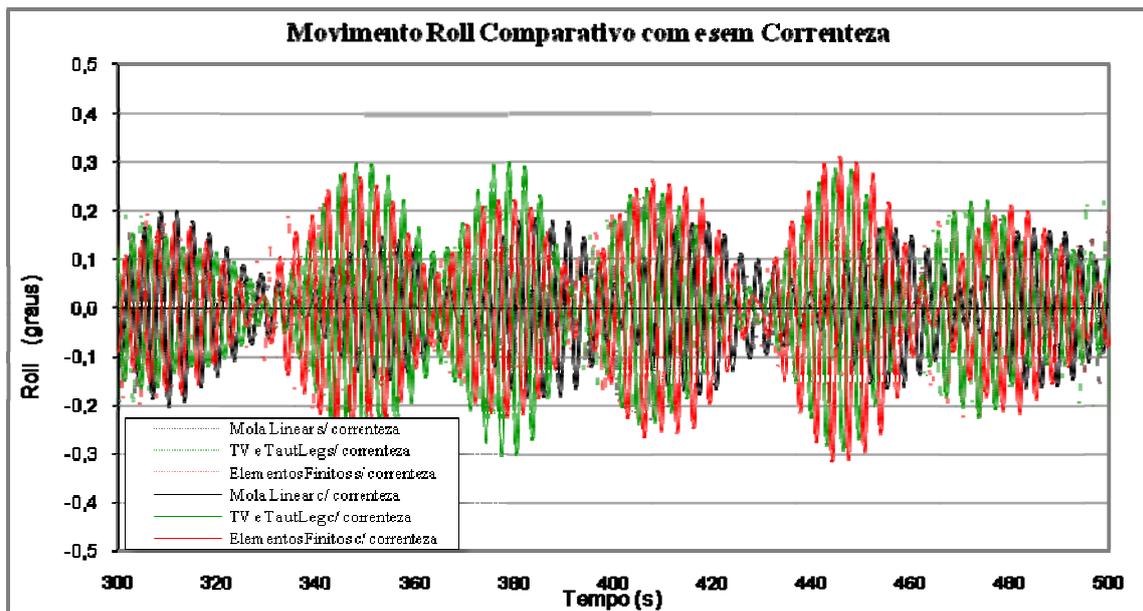


Figura 7.26 Roll da TLP com correnteza nas linhas

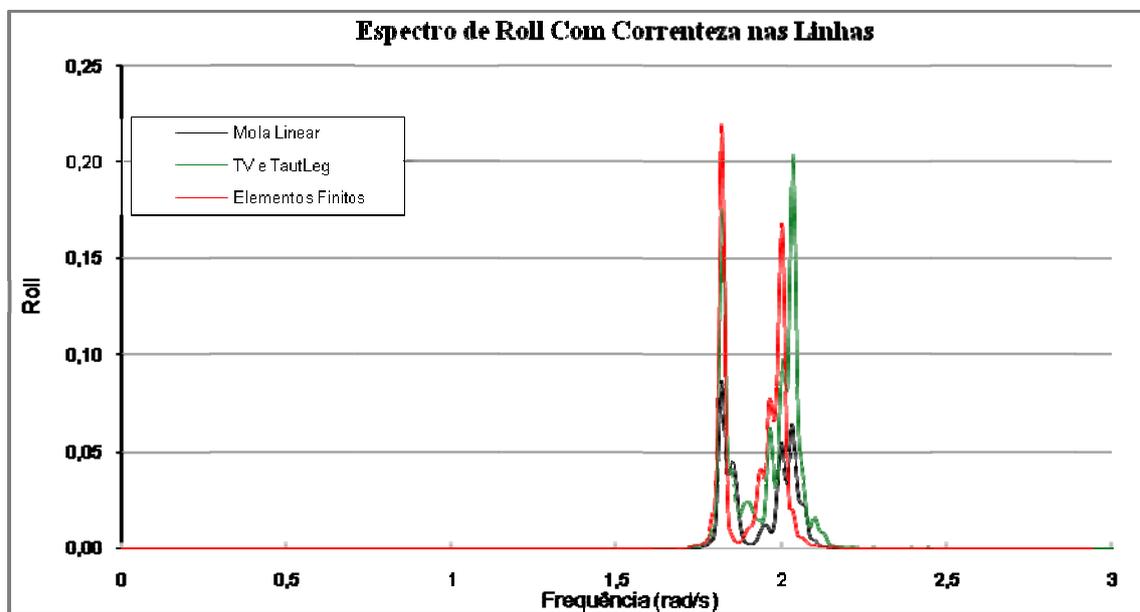


Figura 7.27 Espectro de Roll da TLP com correnteza nas linhas

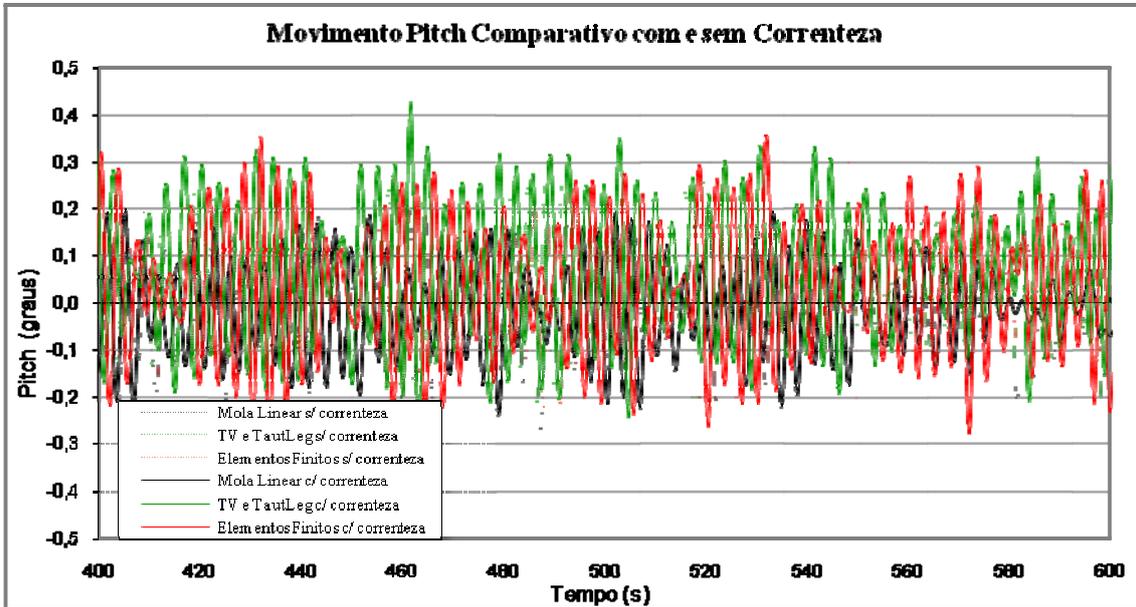


Figura 7.28 Pitch da TLP com correnteza nas linhas

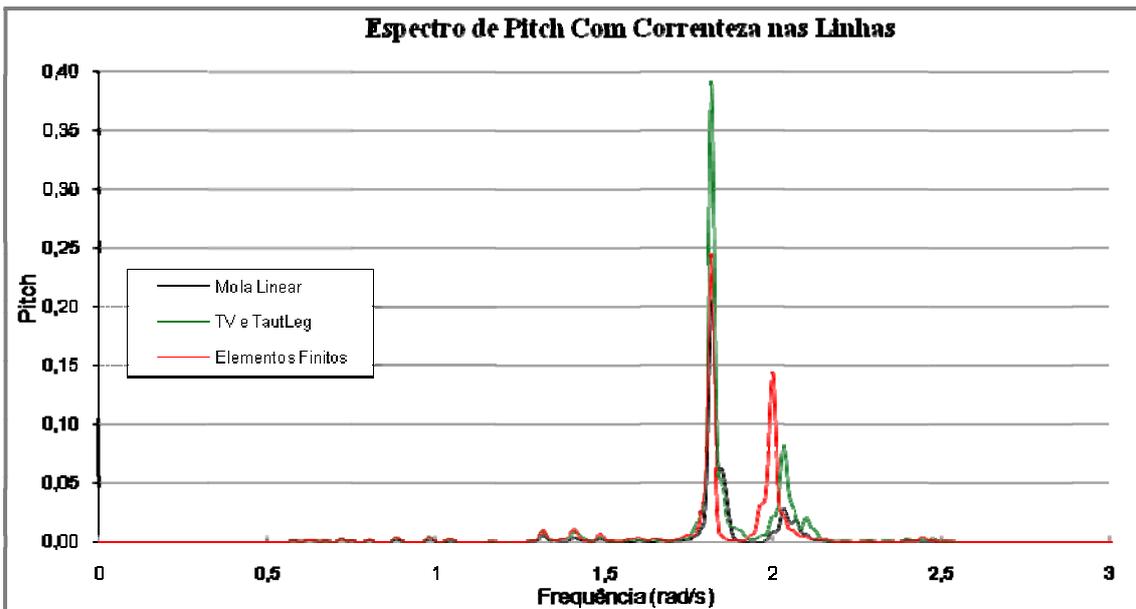


Figura 7.29 Espectro de pitch da TLP com correnteza nas linhas

Tabela 29 – Dados Estatísticos de surge, heave, roll e pitch com correnteza nas linhas

		<i>Surge</i>		<i>Heave</i>		<i>Roll</i>		<i>Pitch</i>	
Mola Linear	Máx. Extremo ¹	93,07	17%	0,138	108%	0,310	-14%	0,330	-23%
	Média	83,38	12,6%	0	100%	0	0%	-0,01	132%
	Mín. Extremo ²	75,88	9,9%	-0,132	95%	-0,310	14%	-0,350	12,5%
TV e TautLeg	Máx. Extremo ¹	78,89	-0,9%	-1,520	16%	0,420	17%	0,500	16%
	Média	71,49	-3,4%	-1,98	9,7%	0	0,0%	0,07	100%
	Mín. Extremo ²	64,62	-6,4%	-2,550	1,5%	-0,430	-19%	-0,410	-2,5%
Elementos Fimnitos	Máx. Extremo ¹	79,63	-	-1,820	-	0,360	-	0,430	-
	Média	74,04	-	-2,195	-	0	-	0,033	-
	Mín. Extremo ²	69,05	-	-2,590	-	-0,360	-	-0,400	-

A Tabela 30 compara a variação dos dados dos modelos desacoplados em relação ao modelo de referência, modelo acoplado, com e sem correnteza nas linhas.

Tabela 30 – Comparação da variação dos modelos desacoplados com e sem correnteza nas linhas

	<i>Correnteza na linha</i>	<i>Mola Linear</i>			<i>TV e TautLeg</i>		
		<i>Mínimo</i> ²	<i>Média</i>	<i>Máximo</i> ¹	<i>Mínimo</i> ²	<i>Média</i>	<i>Máximo</i> ¹
Surge	Desconsiderada	-2,5%	1,9%	8,9%	-6,9%	-4,7%	3,1%
	Considerada	9,9%	12,6%	17%	-6,4%	-3,4%	-0,9%
	Variação ³	7,4%	10,7%	8,1	-0,5%	-0,9%	-2,2%
Heave	Desconsiderada	90%	100%	123%	-6,3%	9,8%	25,0%
	Considerada	95%	100%	108%	1,5%	9,7%	16%
	Variação	5%	0%	-15%	-4,8%	-0,1%	-9%
Roll	Desconsiderada	3%	0%	-6%	-9,1%	0%	5,9%
	Considerada	14%	0%	-14%	-19%	0%	17%
	Variação	11%	0%	12%	9,9%	0%	11,1%
Pitch	Desconsiderada	8%	-138%	-28%	10,8%	24,0%	-7,0%
	Considerada	12,5%	-132%	-23%	-2,5%	100%	16%
	Variação	4,5%	-6%	-5%	-8,3%	76%	9%

 Afastamento do modelo acoplado

 Aproximação do modelo acoplado

Mola Linear

Observando a Tabela 30, o modelo Mola Linear apresenta valores mais distantes da referência com a correnteza. Revendo o capítulo anterior 7.4.1.2 é possível atribuir boa parte deste resultado ao maior offset, e consequentemente menor *setdown*

¹ Máximo Extremo Esperado. Estatística de extremo. Ajuste por Weibull

² Mínimo Extremo Esperado. Estatística de extremo. Ajuste por Weibull

³ Diferença em pontos percentuais em valor absoluto |Considerada| – |Desconsiderada|

da TLP. Por isso parcela significativa do erro está ligada a um efeito “indireto” da correnteza nas linhas.

O modelo Mola Linear adota para o cálculo dos coeficientes de rigidez a premissa de tração constante na linha. Como já discutido em item anterior, 7.4.1.2, esta simplificação diminui o valor da rigidez horizontal em relação ao valor que ocorre na realidade. Por isto quanto maior o *offset*, maior a tração atuante na linha, e maior, portanto, o efeito desta simplificação, implicando na maior diferença observada entre Mola Linear (Capítulo 6.3.2.1) e Elementos Finitos.

Outro ponto observado e que merece ser destacado é o fato de que uma parcela significativa do passeio é devida à correnteza atuante nas linhas

TV e TautLeg

O modelo TV e TautLeg não apresentaram um distanciamento dos valores de referência de forma consistente, com alguns dados se afastando da referência outros se aproximando. Tal comportamento sugere que outras simplificações são preponderantes na diferença de movimentos entre o modelo TV e TautLeg e o modelo acoplado.

Trações

Os próximos gráficos, Figura 7.30 à Figura 7.32, apresentam algumas comparações entre as séries temporais da tração no topo de algumas linhas.

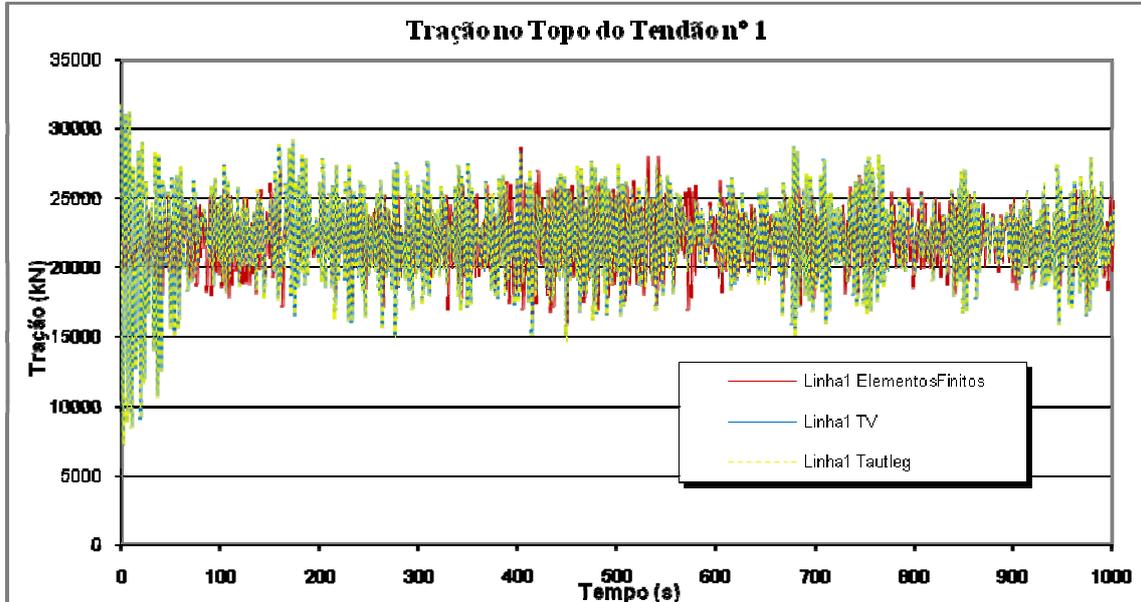


Figura 7.30 Tração no tendão 1

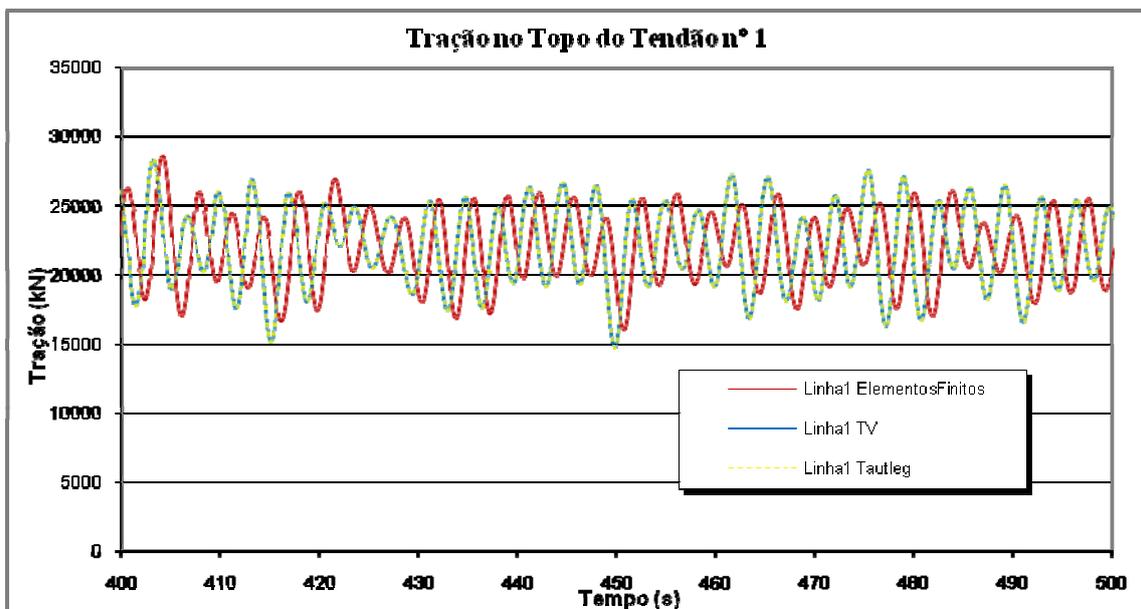


Figura 7.31 Tração no tendão 1 em detalhe

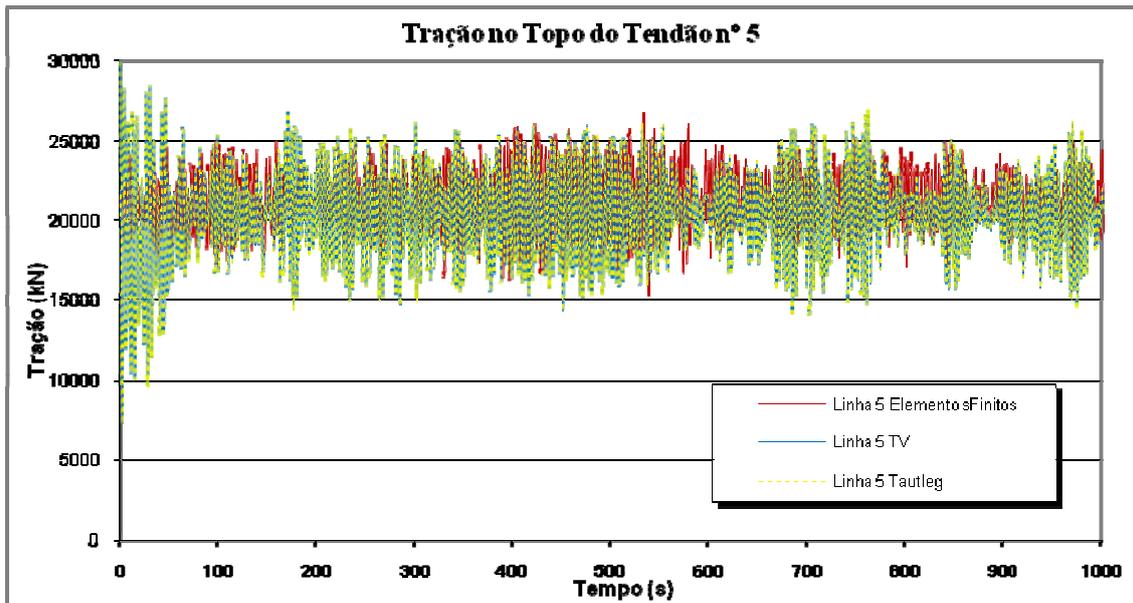


Figura 7.32 Série temporal da tração no topo do tendão 5

As tabelas seguintes, Tabela 31 à Tabela 34, apresentam os dados estatísticos. A Figura 7.33 até a Figura 7.36 apresentam os espectros de tração no topo para algumas linhas.

Tabela 31 – Comparação da tração atuante no topo das linhas com a correnteza

		Tração							
		Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6	Linha 7	Linha 8
TV e TautLeg	Máxima ¹	31031	31041	28174	28187	27796	27877	29168	29154
	Média	22158	22091	20620	20553	20557	20624	22096	22163
	Mínima ¹	13458	13344	13144	12993	12833	12879	14448	14550
Elementos Finitos	Máxima ¹	29339	29336	27952	27992	27387	27471	28693	28750
	Média	22044	22013	21359	21329	21327	21356	22012	22044
	Mínima ¹	14550	14505	15053	14971	14869	14945	15284	15385

Tabela 32 – Tração nos tendões nas linhas em relação ao modelo acoplado com a correnteza

		Tração							
		Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6	Linha 7	Linha 8
TV e TautLeg	Máxima ¹	5,8%	5,8%	0,8%	0,7%	1,5%	1,5%	1,7%	1,4%
	Média	0,5%	0,4%	-3,5%	-3,6%	-3,6%	-3,4%	0,4%	0,5%
	Mínima ¹	-7,5%	-8,0%	-12,7%	-13,2%	-13,7%	-13,8%	-5,5%	-5,4%

Tabela 33 – Variação da tração, parcela dinâmica, atuante no topo das linhas (máximos e mínimos descontados da média)

		Tração							
		Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6	Linha 7	Linha 8
TV e TautLeg	Máxima ¹	8873	8950	7554	7634	7239	7253	7072	6991
	Mínima ¹	-8700	-8747	-7476	-7560	-7724	-7745	-7648	-7613
Elementos Finitos	Máxima ¹	7295	7323	6593	6663	6060	6115	6681	6706
	Mínima ¹	-7494	-7508	-6306	-6358	-6458	-6411	-6728	-6659

¹ Valor Extremo Esperado obtido utilizando estatística de extremos. Ajuste por Weibull

Tabela 34 – Comparação da parcela dinâmica em relação ao modelo de referência (Modelo de Elementos Finitos)

		Tração							
		Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6	Linha 7	Linha 8
TV e TautLeg	Máxima ¹	21,6%	22,2%	14,6%	14,6%	19,5%	18,6%	5,9%	4,3%
	Mínima	-16,1%	-16,5%	-18,5%	-18,9%	-19,6%	-20,8%	-13,7%	-14,3%

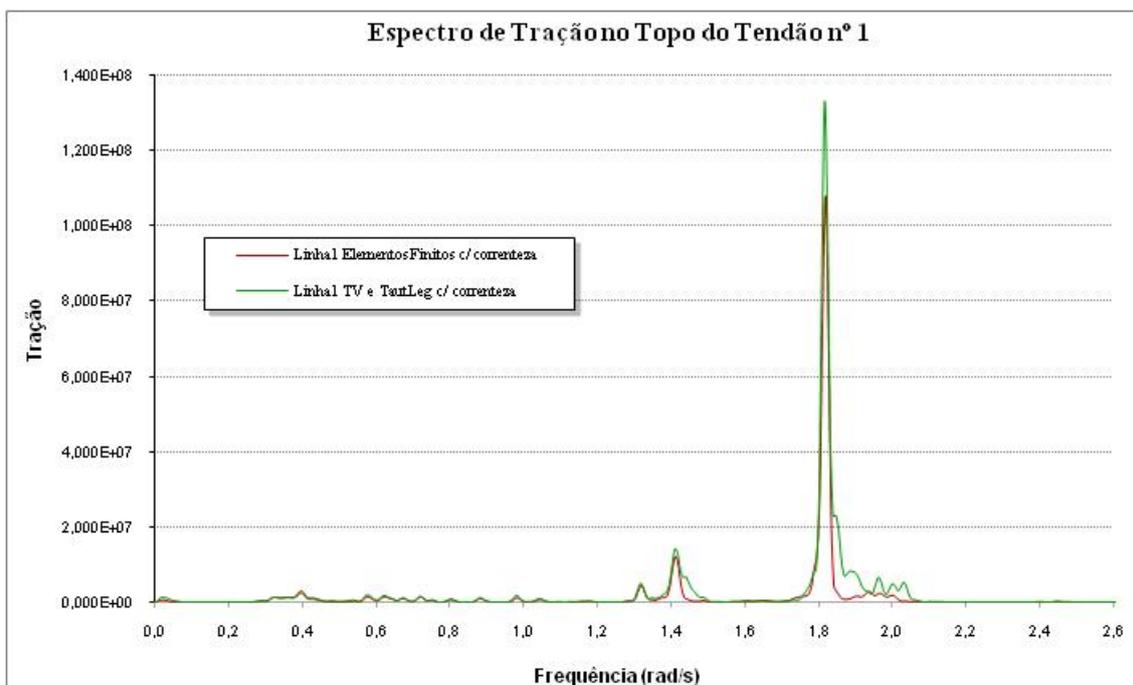


Figura 7.33 Espectro de tração no topo do tendão nº1 com correnteza nas linhas

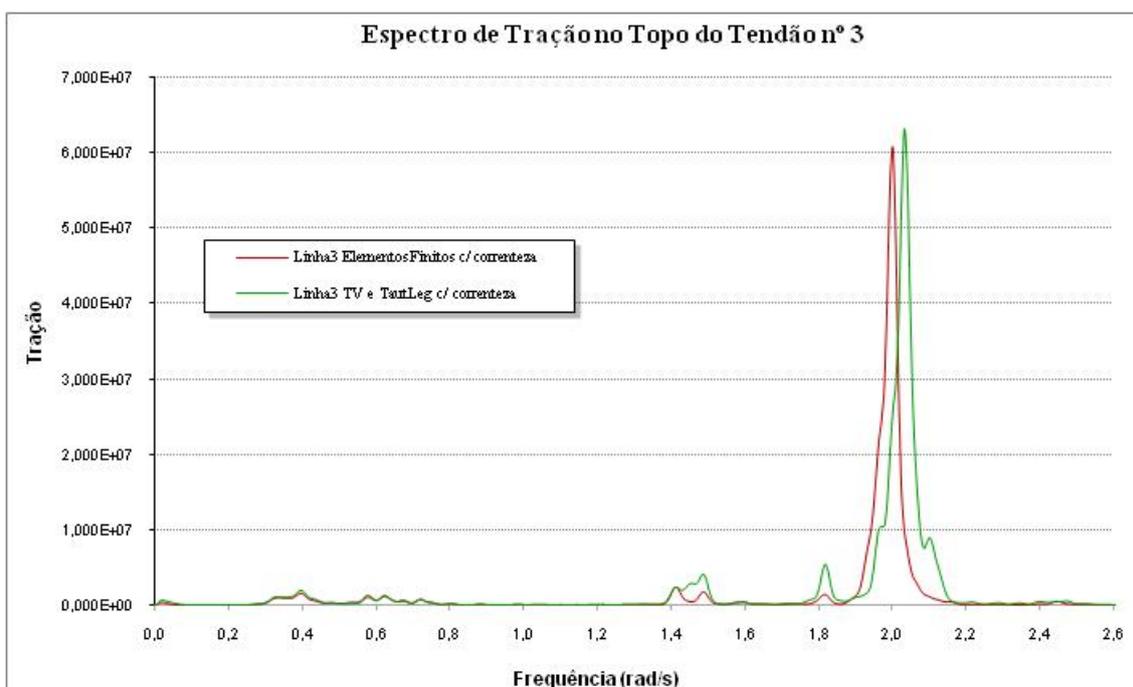


Figura 7.34 Espectro de tração no topo do tendão nº3 com correnteza nas linhas

¹ Valor Extremo Esperado obtido utilizando estatística de extremos. Ajuste por Weibull

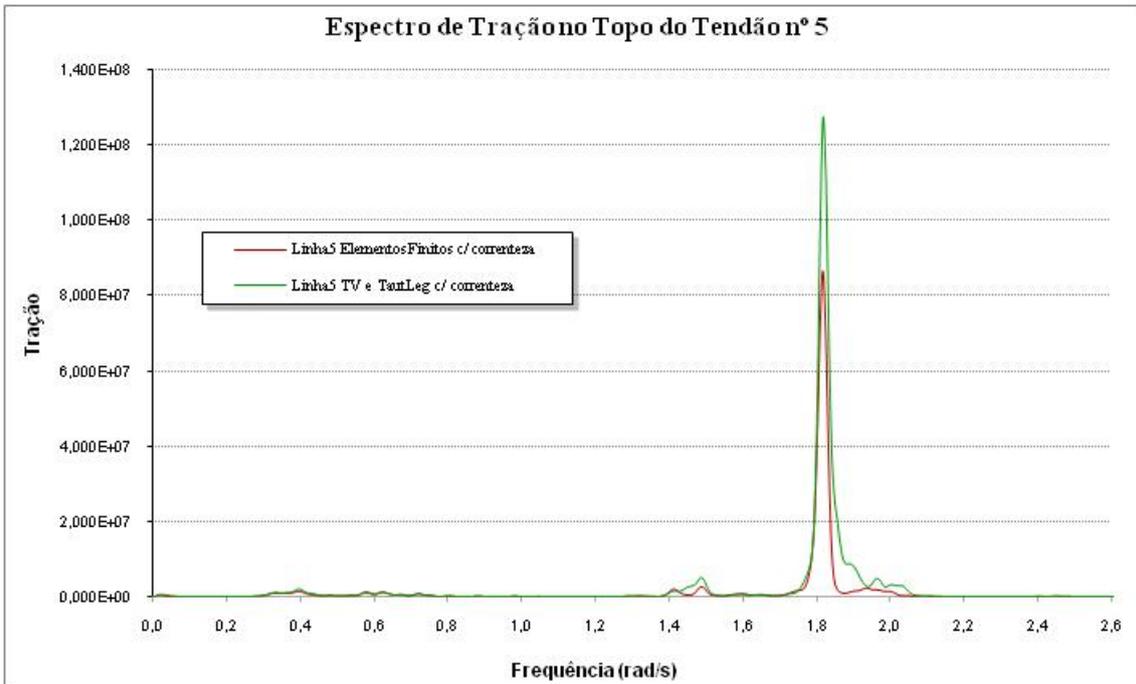


Figura 7.35 Espectro de tração no topo do tendão nº5 com correnteza nas linhas

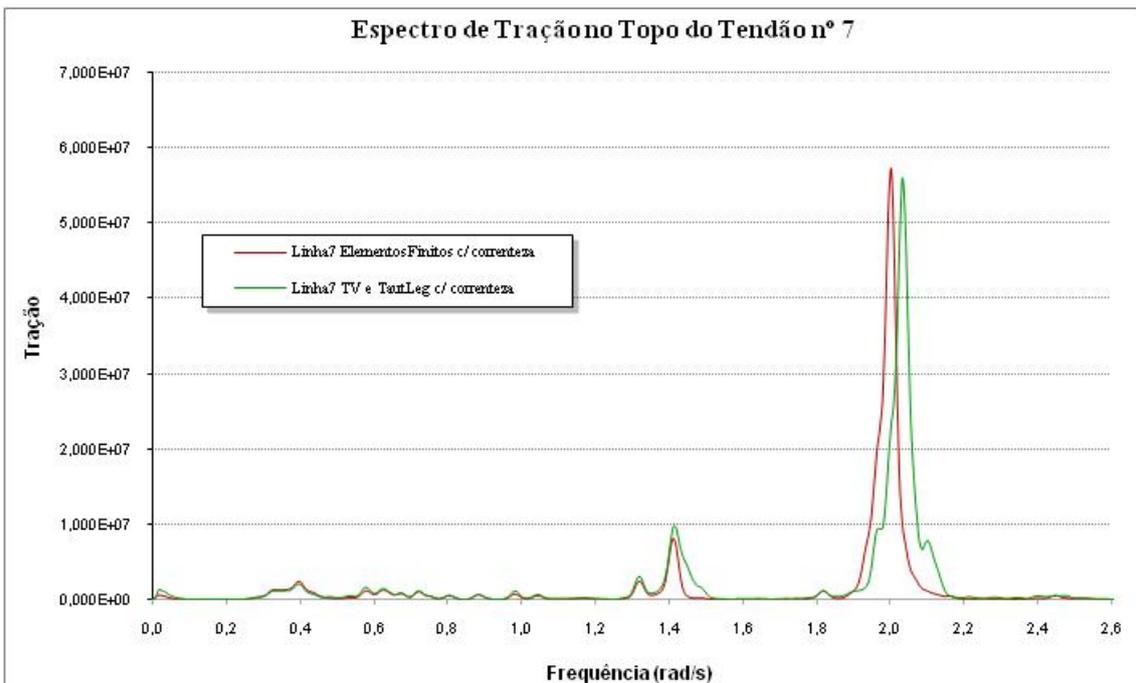


Figura 7.36 Espectro de tração no topo do tendão nº7 com correnteza nas linhas

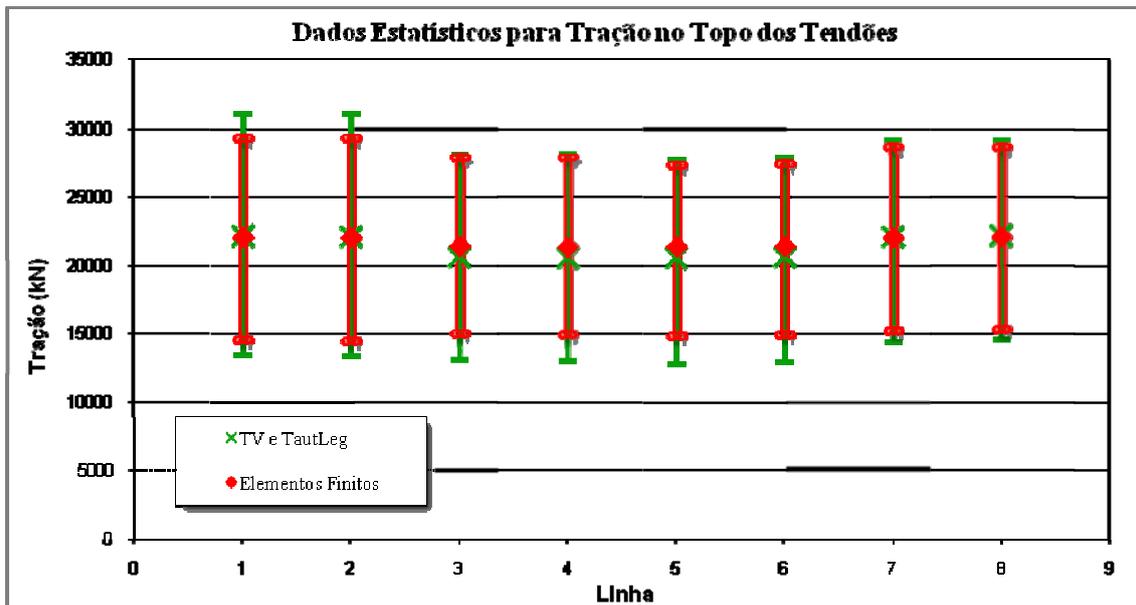


Figura 7.37 Tração nas linhas : Valor médio, Máximo Esperado e Mínimo Esperado

TV e TautLeg

A Figura 7.37 apresentada procura sintetizar as informações da Tabela 31 a Tabela 34.

Com o auxílio desta figura e tabelas é possível notar uma aproximação razoável entre as médias do modelo TV e TautLeg, e o modelo de Elementos Finitos, encontrando o máximo de 3,6% de diferença.

Nota-se também que a tração média no modelo acoplado (Elementos Finitos) é aproximadamente igual para todas as linhas, enquanto os modelos desacoplados apresentam linhas com trações médias (linha 3, 4, 5 e 6) ligeiramente mais baixas que outras (linhas 1, 2, 7 e 8).

É possível que para esta diferença (tração média diferente em dois grupos de tendões do modelo TV e TautLeg) a forma de consideração da correnteza seja uma grande contribuinte. Conforme já descrito, item 6.4.1, o efeito da correnteza nos tendões é considerado como força concentrada no CG da unidade. Entretanto, espera-se que as linhas devam transmitir esforços à unidade através do ponto no topo das linhas, ou seja, como forças atuantes no ponto de conexão, cuja representação no CG seria mais bem descrita através de uma força e de um momento (desprezado neste caso portanto). Esta

conclusão também se baseia na diferença do valor médio de *pitch* (Tabela 30) entre o modelo de Elementos e o modelo TV e TautLeg, que aumentou 76% quando a correnteza passou a ser considerada nas linhas.

Voltando-se para as comparações de trações, os valores máximos e mínimos no modelo acoplado pouco variam com a linha escolhida, já para os modelos desacoplados os valores máximos e mínimos apresentam razoável variação de acordo com a linha.

Considerando apenas a parcela dinâmica (valores máximos e mínimos descontados da média) apresentada na Tabela 33, é possível perceber que o modelo TV e TautLeg possuem uma maior variação na tração, explicado pela ausência, na formulação do modelo da linha, do amortecimento hidrodinâmico devido ao movimento das linhas.

A diferença entre a parcela dinâmica do TV e TautLeg e a parcela dinâmica Elementos Finitos chega a até 22,2%.

Elementos Finitos

A diferença mais relevante entre este modelo e o modelo TV e TautLeg é a parcela dinâmica – máximos e mínimos descontados da média (parcela estática) – menor neste modelo, conforme já mencionado, devido ao amortecimento. Com os valores médios razoavelmente próximos (3,6%) esta parcela dinâmica menor resultou em trações máximas menores e trações mínimas maiores quando comparado com modelo TV e TautLeg, ver Figura 7.37.

7.4.1.4 Conclusões sobre influência da correnteza

Como mencionado anteriormente, nos modelos desacoplados a força de restauração aplicada pelas linhas não leva em consideração os efeitos hidrodinâmicos. Porém, é possível identificar a correnteza produzindo um efeito importante, carga hidrodinâmica atuante na linha, que foi considerada indiretamente como uma força concentrada no CG da unidade. E para o cálculo desta força considerou-se a linha como uma “viga bi-apoiada” (seção 6.4.1). O estudo nesta seção procurou determinar a

qualidade desta aproximação além de fornecer pistas para o papel da correnteza na diferença entre modelo desacoplado e modelo acoplado.

Quanto ao modelo Mola Linear a correnteza aumentou a diferença entre os resultados deste e os do modelo de Elementos Finitos. Basicamente, a maior carga ambiental aumentou o passeio da unidade, e a diferença entre estes dois modelos aumenta conforme o passeio devido às simplificações já mencionadas – (item anterior 7.4.1.2).

Quanto ao modelo TV e TautLeg a correnteza pouco interferiu na diferença entre este e o modelo de Elementos. De forma geral, tanto em termos de movimentos quanto em termos de trações a diferença entre os modelos não apresentou alterações relevantes, ressaltando-se apenas a diferença nos valores de trações médias em metade das linhas conforme já discutido. Esta constatação contribui para o entendimento de que a aproximação da correnteza por uma força externa concentrada, calculada através de uma viga “bi-apoiada” (seção 6.4.1), é uma aproximação razoável, todavia, uma aproximação através de uma força e um momento levaria a valores de trações mais próximos entre os modelos.

Quanto a outros efeitos da correnteza é possível notar que tanto a parcela estática da tração (tração média) quanto a parcela dinâmica aumentam com a correnteza

Também se torna importante destacar que as conclusões são baseadas em um perfil de correnteza triangular, em cenários com perfis acentuadamente irregulares novos estudos são necessários para uma correta avaliação.

Por outro lado, o resultado também indica que quantidade significativa da diferença entre o modelo TV e TautLeg (desacoplados) e o modelo de Elementos Finitos (acoplado) reside em outros fatores da interação linhas-casco de difícil aproximação ou representação prática em uma análise desacoplada (amortecimento por exemplo).

7.4.2 Estudos Paramétricos em Tipos de Modelos de Risers

A Tabela 35 resume os parâmetros de simulação utilizados nesta seção.

Tabela 35 Principais parâmetros utilizados no estudo

<i>Parâmetros Fixos</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de simulação: 1200 s • Instante de tempo de início do cálculo dos dados estatísticos: 280 s • Rampa de tempo de aplicação das forças ambientais: 70 s 	<ul style="list-style-type: none"> • Intervalo de integração do casco: 0,05 s • Intervalo de integração das linhas: 0,0125 s • Modelo de tendões: Elementos Finitos com 60 nós (20 m)
<i>Parâmetros Variáveis</i>	
<p>➤ Risers desconectados, Risers modelados como TautLeg e Curva de restauração, Risers modelados com malha de Elementos Finitos</p>	

Nesta seção continua-se com as simulações do sistema de produção definido no item 6.2 considerado como representativo de um sistema TLP típico. Contudo, foca-se numa condição, ou configuração da plataforma, diferente da considerada nos itens anteriores: nesta seção considera-se a presença dos *risers*. Isto é, os risers estão conectados à TLP.

Os risers são representados de duas formas:

- tratados de forma acoplada, modelados portanto por uma malha de elementos finitos
- tratados de forma desacoplada, utilizando-se então o modelo TautLeg para os TTR (risers rígidos verticais) e o modelo Curva de Restauração para os SCRs. Neste modelo a o efeito da correnteza sobre os *risers* é representado como força concentrada na unidade, conforme já apresentado anteriormente em 6.4.1.

Os tendões são tratados em todos os casos de forma acoplada, modelados por uma malha de elementos finitos.

Para comparação coloca-se, junto com estes resultados, o resultado com o modelo do item anterior (7.4.1.3) que não conta com os *risers* (*risers* desconectados) e possui tendões representados por Elementos Finitos .

7.4.2.1 Movimentos

As figuras seguintes, Figura 7.38 a Figura 7.48, apresentam o histórico de movimentos da unidade e espectros destes. A Tabela 36 apresenta os resultados estatísticos relacionados a estes movimentos.

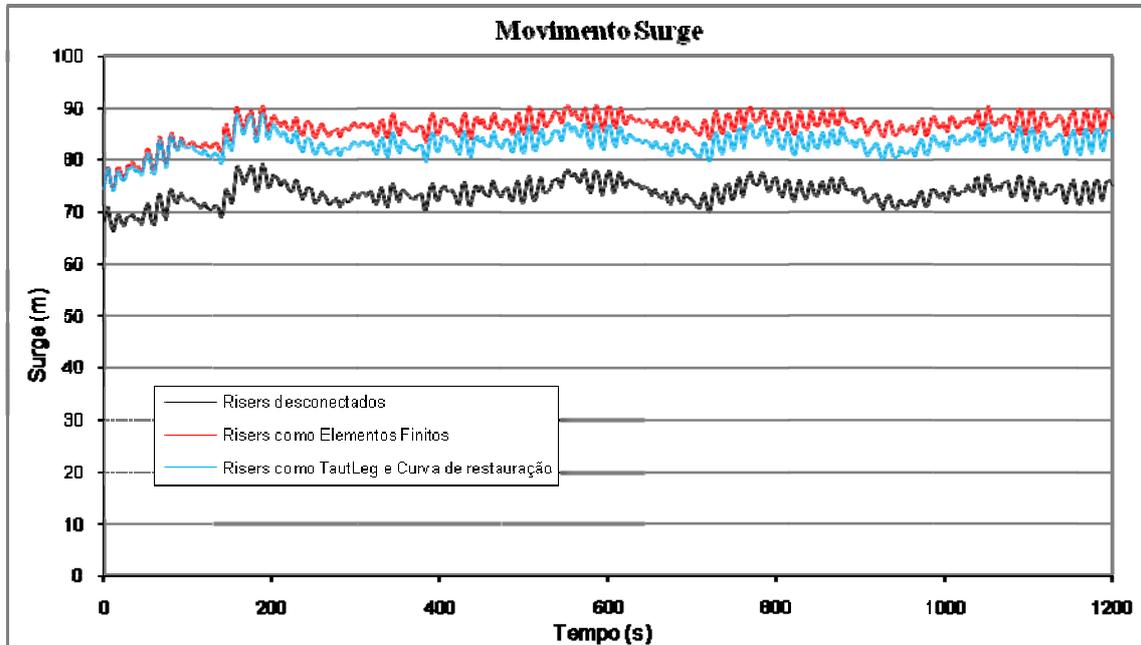


Figura 7.38 Movimento surge com e sem risers

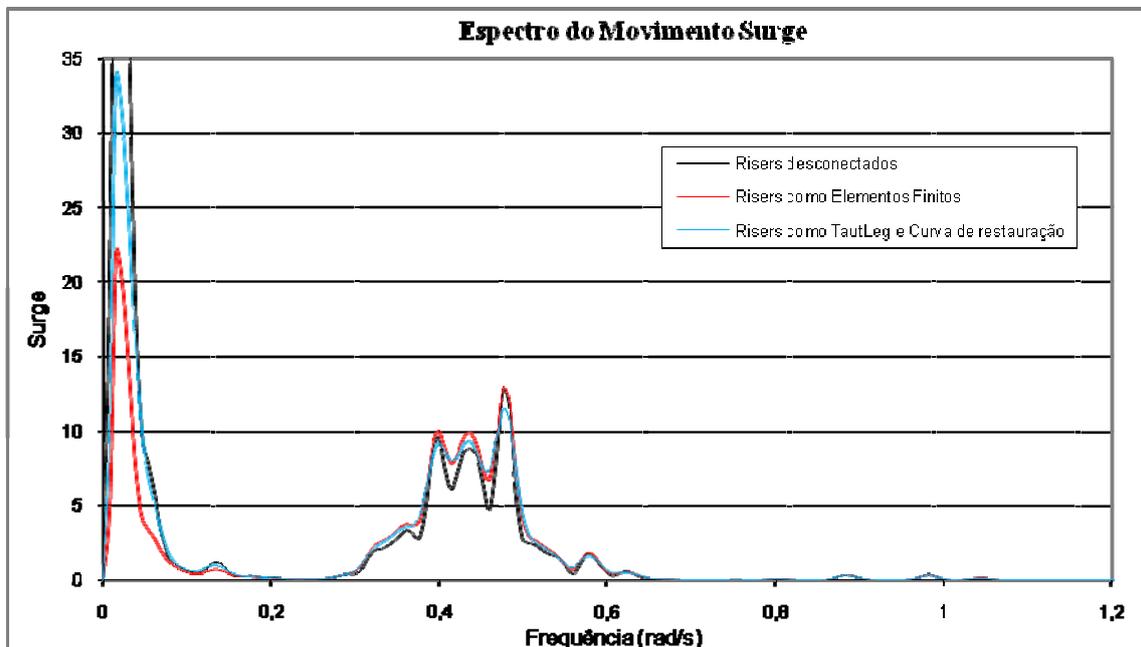


Figura 7.39 Espectro do Movimento Surge

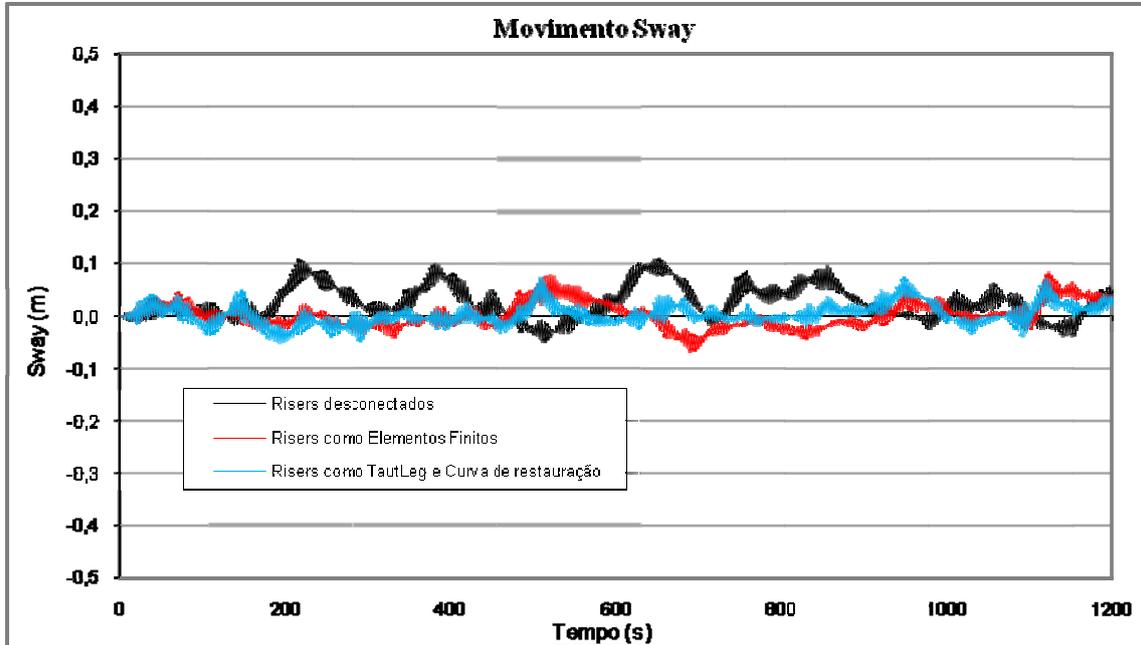


Figura 7.40 Movimento sway com e sem risers

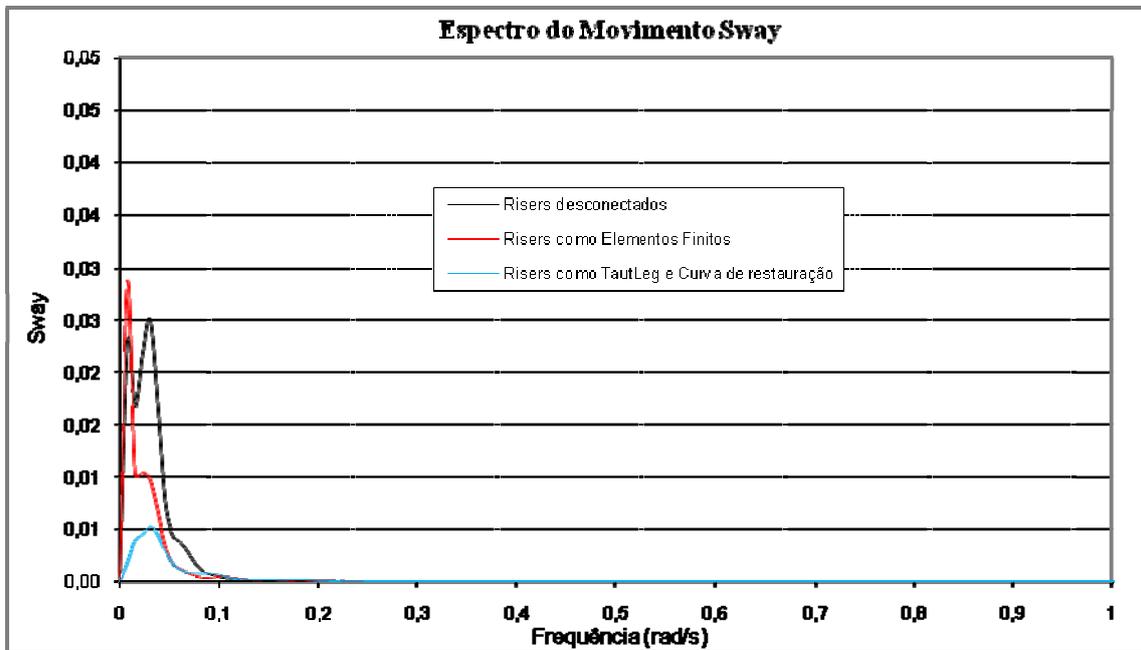


Figura 7.41 Espectro do movimento sway

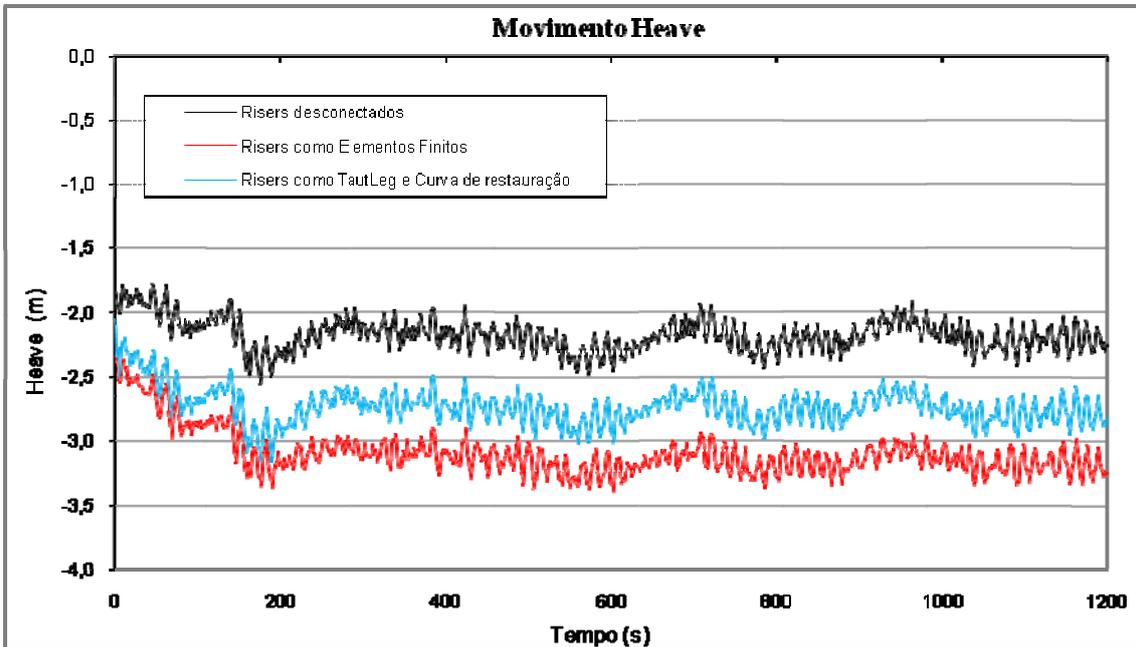


Figura 7.42 Movimento heave com e sem risers

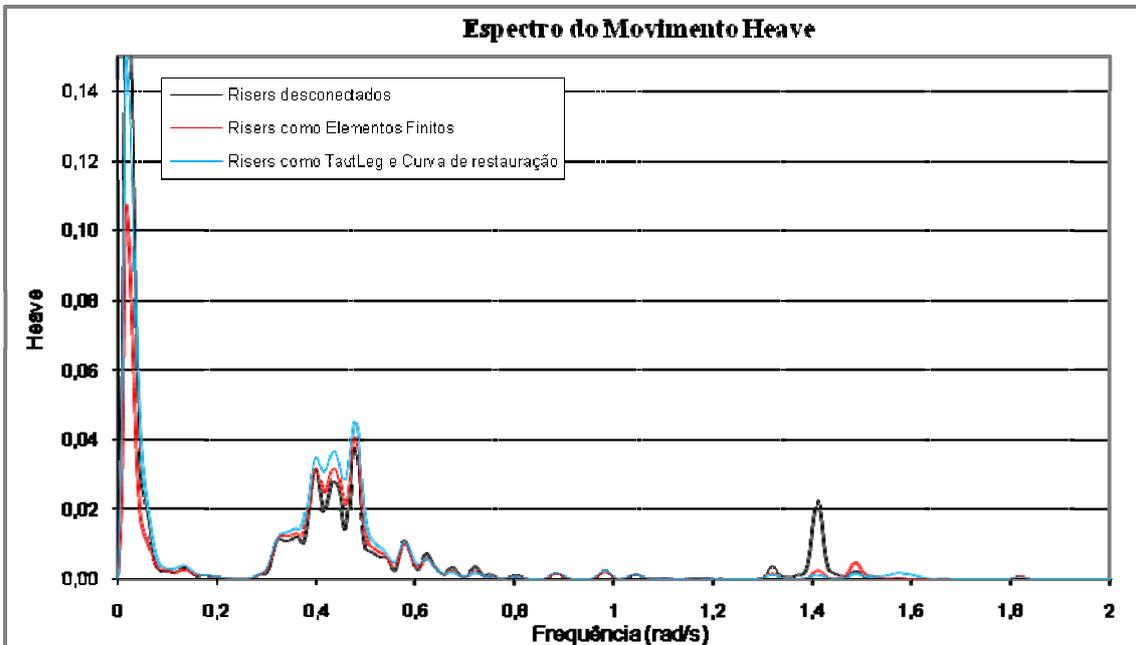


Figura 7.43 Espectro do movimento heave

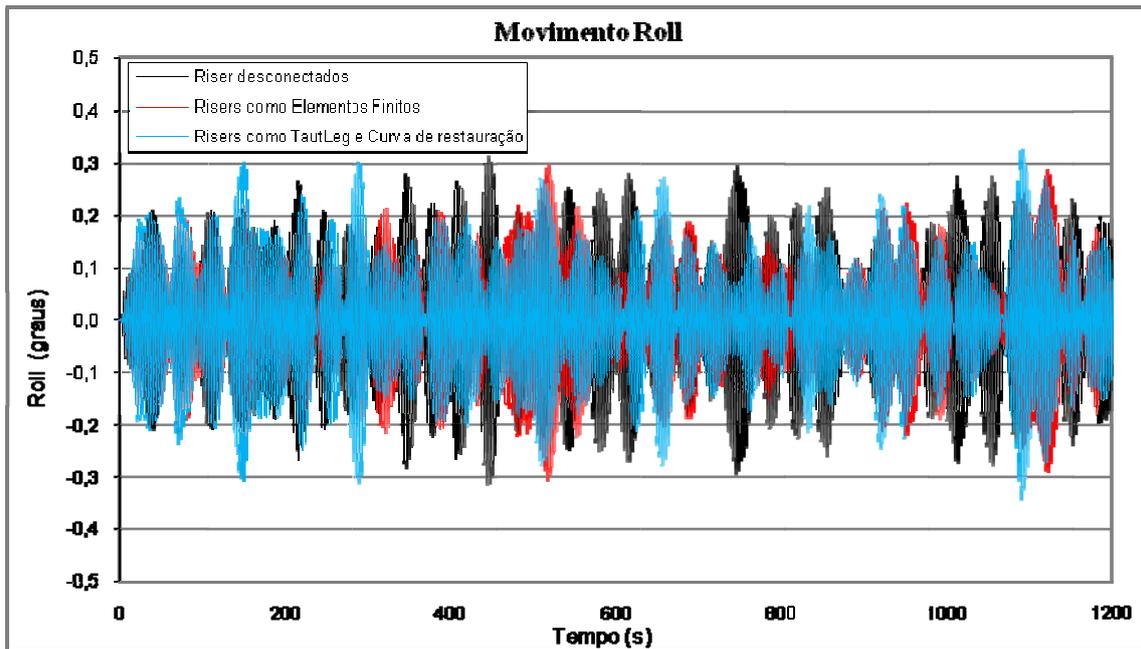


Figura 7.44 Movimento roll com e sem risers

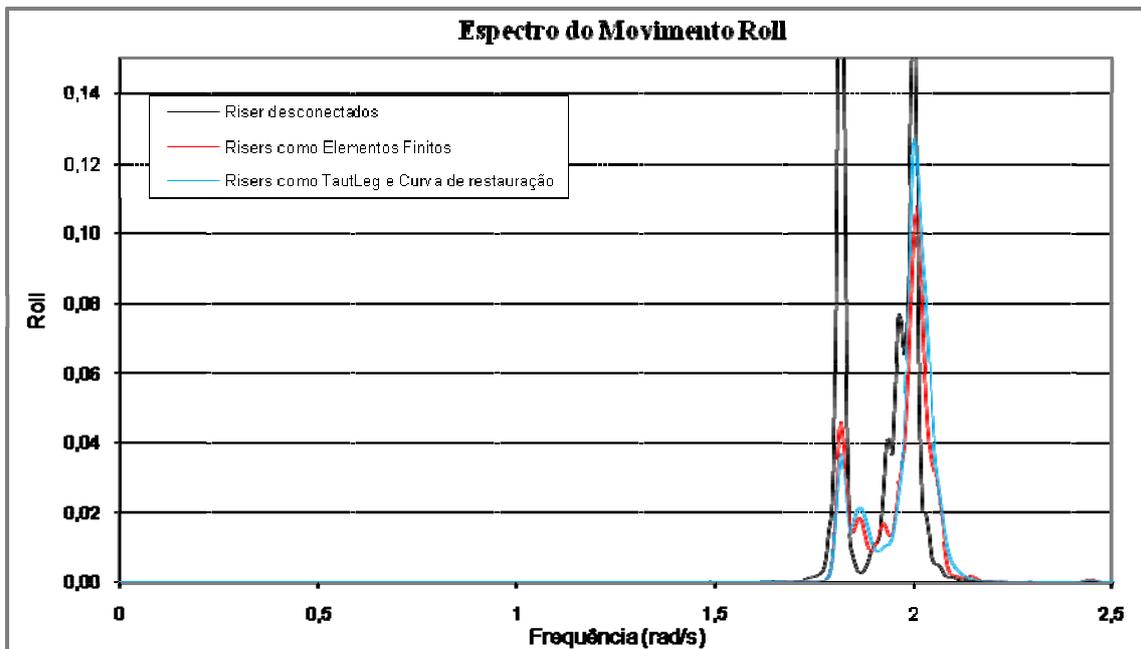


Figura 7.45 Espectro movimento roll

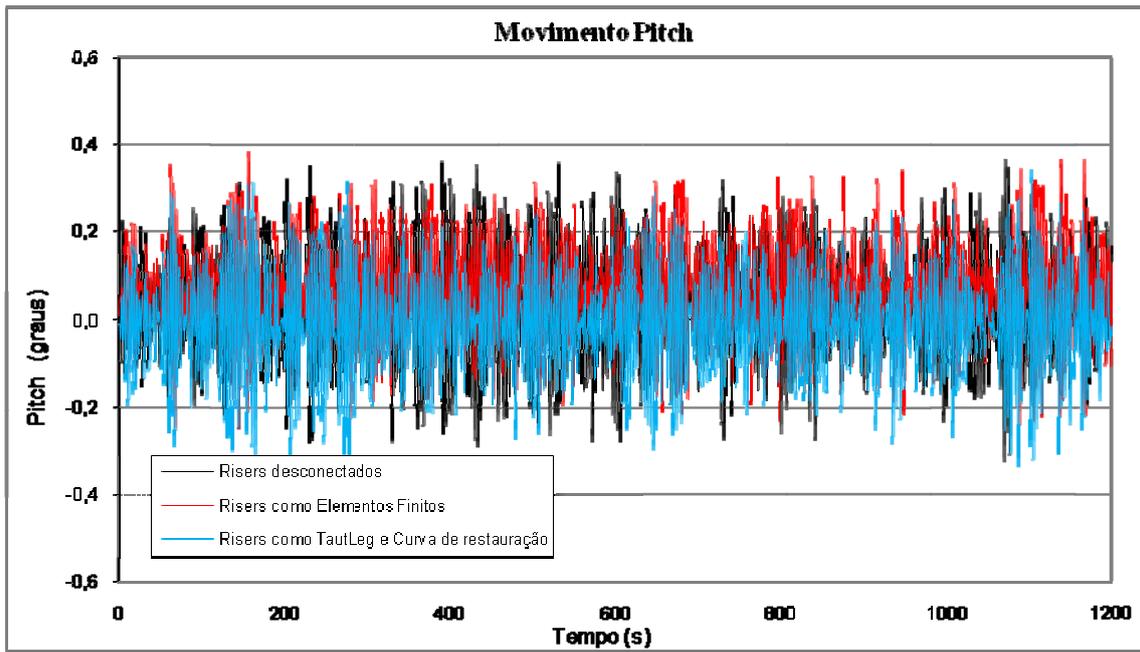


Figura 7.46 Movimento pitch com e sem risers

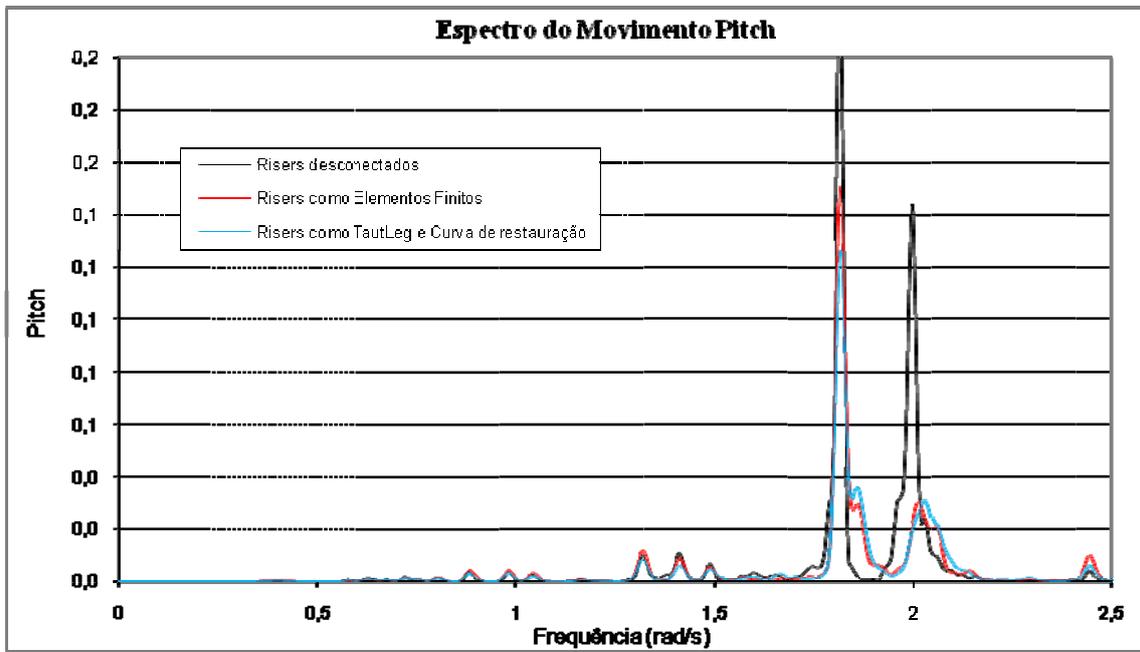


Figura 7.47 Espectro do movimento pitch

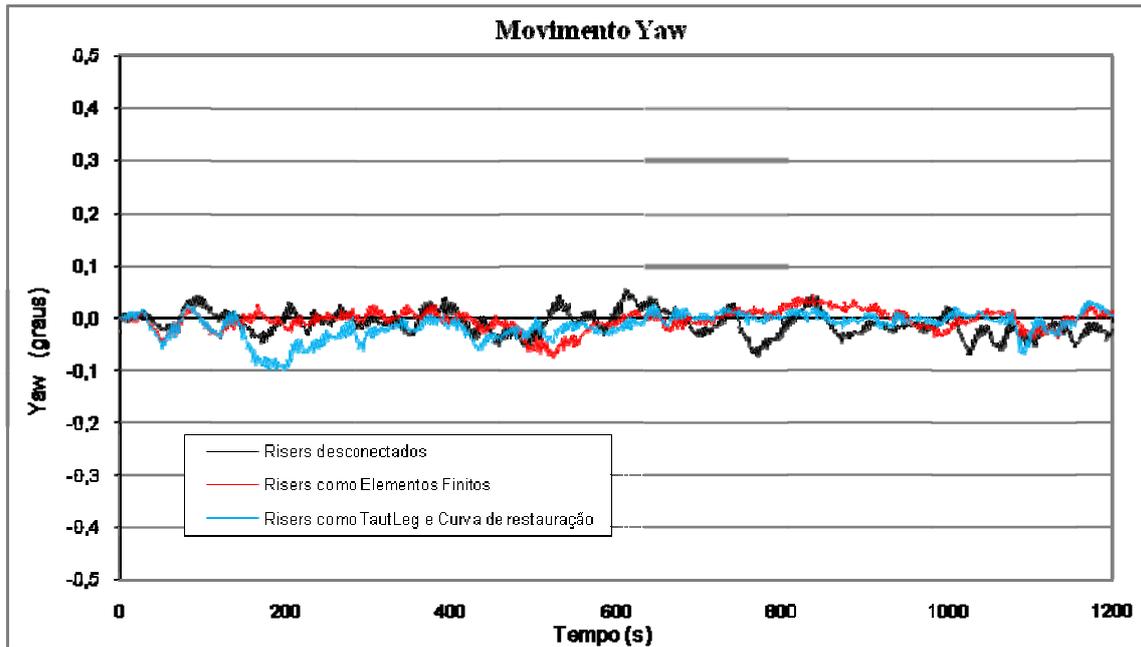


Figura 7.48 Movimento yaw com e sem risers

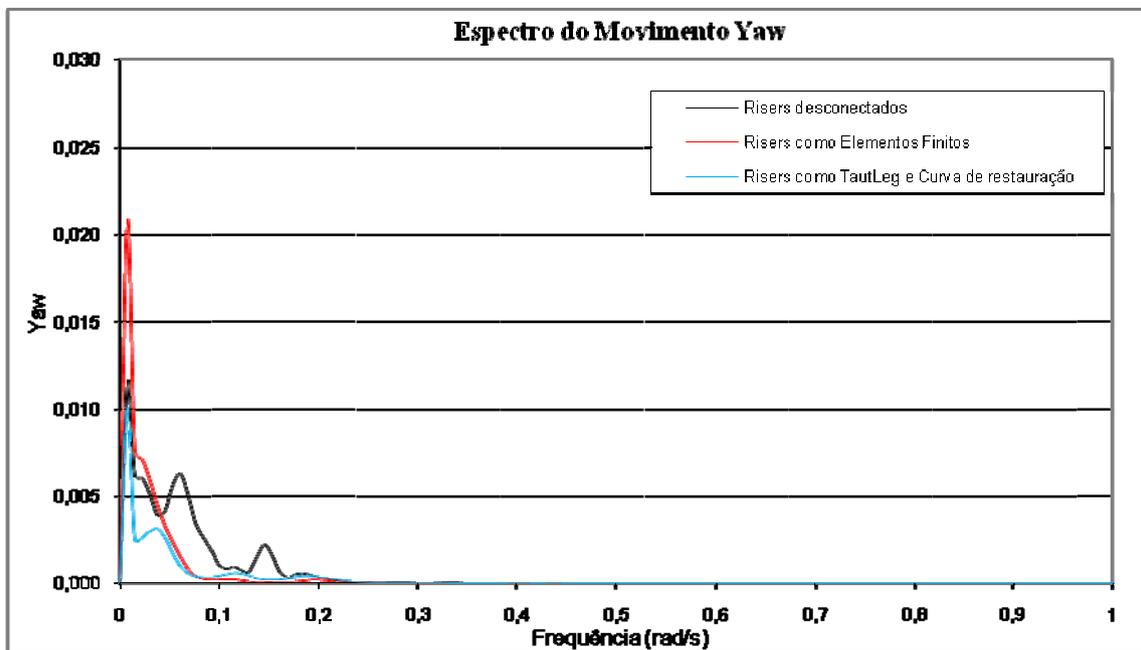


Figura 7.49 Espectro do movimento yaw

Tabela 36 – Dados Estatísticos de surge, heave, roll e pitch com e sem risers

		<i>Surge</i>		<i>Heave</i>		<i>Roll</i>		<i>Pitch</i>	
Risers desconectados	Máximo ¹	79,63	-13%	-1,820	36%	0,36	0%	0,43	0%
	Média	74,04	-15%	-2,195	30%	0	0%	0,033	-49%
	Mínimo ²	69,05	-16%	-2,590	25%	-0,36	-3%	-0,4	-25%
Risers como TautLeg	Máximo ¹	87,87	-4%	-2,390	16%	0,43	19%	0,38	-12%
	Média	83,41	-4%	-2,758	12%	0	0%	-0,006	-109%
	Mínimo ²	78,69	-5%	-3,120	9%	-0,43	-16%	-0,41	-28%
Risers como Elementos Fimnitos	Máximo ¹	91,24	-	-2,840	-	0,36		0,43	-
	Média	87,15	-	-3,150	-	0		0,064	-
	Mínimo ²	82,68	-	-3,440	-	-0,37		-0,32	-

Risers como TautLeg e curva de restauração

Ao analisar as séries temporais dos movimentos da TLP apresentadas, é possível notar já no primeiro gráfico, visualmente, que o *surge* dos modelos com *risers* conectados são maiores do que o *surge* do modelo sem *risers* (desconectados). Este passeio maior nos modelos com *risers* indica que a força hidrodinâmica recebida pelos *risers* (grande parte devida à correnteza), e transmitida à TLP, é maior que sua força de restauração.

Atualmente a contribuição dos risers para o passeio de unidades Semi-submersíveis e FPSOs é consideravelmente conhecida e documentada. CORRÊA [5], por exemplo, mostra como o passeio de um FPSO aumenta com a conexão de 50 *risers* em catenária para várias lâminas d'água.

O resultado obtido indica que no caso desta TLP o mesmo fenômeno ocorre. Isto é, a correnteza gera uma força sobre os *risers* que é transmitida à unidade aumentando o *offset*. A confirmação é importante já que os sistemas contam com significativas diferenças:

- em TLPs a quantidade de risers é substancialmente menor, no caso em estudo considerou-se 20 *risers* enquanto em FPSOs não é difícil encontrar casos com mais de 70 risers.
- a configuração é tipicamente diferente: em FPSOs e Semis são utilizadas linhas flexíveis em catenárias, na TLP em estudo conta com número considerável de risers rígidos verticais.

¹ Máximo Extremo Esperado. Estatística de extremo. Ajuste por Weibull

² Mínimo Extremo Esperado. Estatística de extremo. Ajuste por Weibull

Em relação à diferença entre metodologias acoplada e desacoplada (*risers* modelados de forma acoplada e desacoplada) é possível notar que houve ligeiro aumento em relação à diferença obtida entre modelos desacoplados e acoplados com os *risers* desconectados (modelos do item anterior 7.4.1.3). Consequência do maior número de linhas simplificadas, tratadas de forma desacoplada.

As principais diferenças, com o auxílio da Tabela 36, podem então ser resumidas em:

- Passeio médio do modelo com os *risers* TautLeg e Curva de Restauração 96% do passeio médio com os *risers* Elementos Finitos.
- O *setdown* de cada modelo segue o resultado do *surge*, isto é, o modelo com maior *surge* também possui maior *setdown*. Por isso, novamente, o modelo de *risers* acoplados possui maior *setdown* (100%) seguido do modelo com *risers* desacoplados (88%).
- Os valores máximos e mínimos de *roll* com os *risers* tratados de forma desacoplada, TautLeg e Curva de Restauração, se situaram a 19% e 16% dos valores obtidos com os *risers* tratados de forma acoplada, Elementos Finitos, é aproximadamente a mesma distância observada entre a análise desacoplada e acoplada do item anterior 7.4.1.3 (modelos com *risers* desconectados).
- Os valores de *pitch* com os *risers* tratados de forma desacoplada, TautLeg e Curva de Restauração, se situaram a -12%, -109% e -28% (máximo, média e mínimo) dos valores obtidos com os *risers* tratados de forma acoplada, Elementos Finitos, aproximadamente a mesma distância observada entre a análise desacoplada e acoplada do item anterior 7.4.1.3 (modelos com *risers* desconectados), exceto pelo valor mínimo que neste caso ocorreu um aumento. A grande diferença no valor médio pode ser atribuída, em grande parte, à aproximação da correnteza como força concentrada no CG conforme já discutido no item anterior 7.4.1.3.

Risers como Elementos Finitos

Quando as linhas são modeladas por malhas de elementos finitos, percebe-se o maior *offset*. O modelo com Risers representados por Elementos Finitos possui um passeio maior que o modelo com Risers por TautLeg e Curva de restauração. Esta tendência já havia sido constatada no item anterior 7.4.1, quando se considerou apenas tendões e o modelo acoplado também resultou em passeio maior do que o desacoplado. As simplificações adotadas quando consideramos as linhas por escalares levam a uma superestimativa da rigidez horizontal.

O maior passeio deste modelo também o levou a apresentar o maior *setdown*.

Quanto ao *pitch* é possível identificar uma tendência de maior amplitude no modelo com risers acoplados (Elementos Finitos), isto é, este modelo possui valores máximos maiores e valores mínimos menores que os outros dois modelos. Tal fato decorre principalmente do amortecimento viscoso (hidrodinâmico) devido ao movimento dos risers no meio fluido, efeito representado apenas neste modelo por causa da sua formulação, que considera as forças hidrodinâmicas nas linhas.

7.4.2.2 Trações

A Figura 7.50 adiante mostra a série temporal de tração para um tendão.

As tabelas: Tabela 37, Tabela 38, Tabela 39, Tabela 40 , e a Figura 7.51 em seguida apresentam os dados estatísticos para a tração no topo dos tendões.

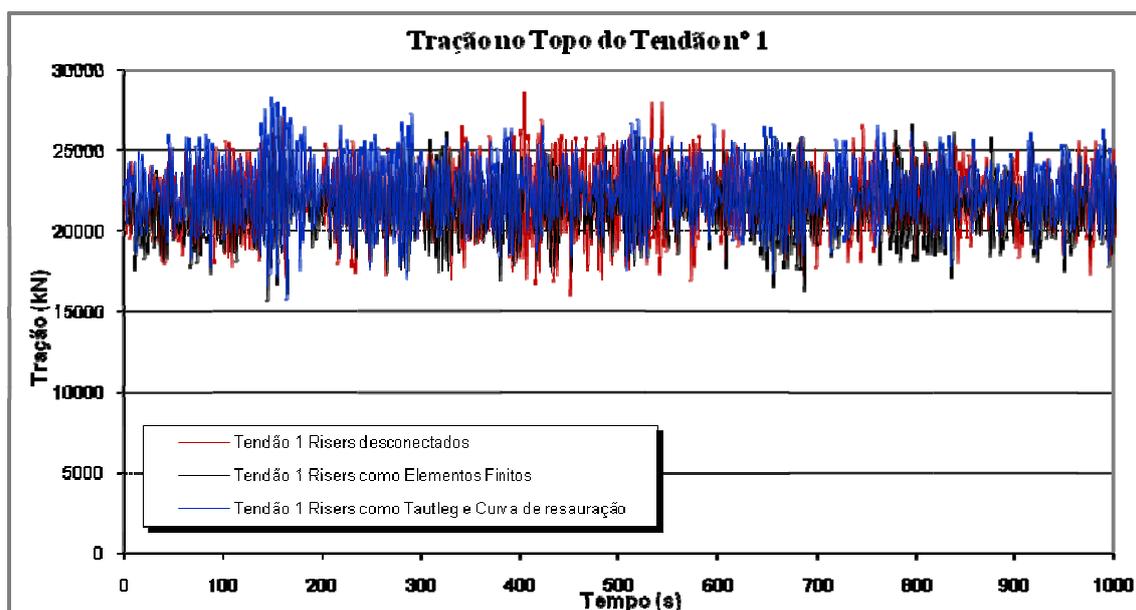


Figura 7.50 Tração no topo do Tendão nº1.

Tabela 37 – Trações nos tendões com e sem risers

		Tendão 1	Tendão 2	Tendão 3	Tendão 4	Tendão 5	Tendão 6	Tendão 7	Tendão 8
Risers desconnectados	Máxima ¹	28203	28196	26670	26588	26545	26512	27448	27531
	Média	22043	22013	21358	21329	21328	21357	22013	22044
	Mínima ¹	16021	16014	16060	15895	15752	15701	16583	16686
Risers como TautLeg e Curva de restauração	Máxima ¹	27741	27842	27172	27185	27217	27217	27527	27530
	Média	22234	22237	22314	22318	22318	22314	22236	22234
	Mínima ¹	16453	16504	16786	16715	16517	16564	17241	17247
Risers como Elementos Finitos	Máxima ¹	26537	26405	25860	25843	25314	25292	26589	26697
	Média	21701	21642	20381	20325	20326	20382	21642	21701
	Mínima ¹	16447	16476	15356	15233	15220	15320	16637	16571

¹ Valor Extremo Esperado obtido utilizando estatística de extremos. Ajuste por Weibull

Tabela 38 – Variação da Tração nos tendões com e sem risers, em relação ao modelo de referência (Modelo de Elementos Finitos)

		<i>Tendão 1</i>	<i>Tendão 2</i>	<i>Tendão 3</i>	<i>Tendão 4</i>	<i>Tendão 5</i>	<i>Tendão 6</i>	<i>Tendão 7</i>	<i>Tendão 8</i>
Risers desconectados	Máxima ¹	6,28%	6,78%	3,13%	2,88%	4,86%	4,82%	3,23%	3,12%
	Média	1,58%	1,71%	4,79%	4,94%	4,93%	4,78%	1,72%	1,58%
	Mínima ¹	-2,59%	-2,80%	4,58%	4,35%	3,50%	2,49%	-0,32%	0,69%
Risers como TautLeg e Curva de restauração	Máxima ¹	4,54%	5,44%	5,07%	5,19%	7,52%	7,61%	3,53%	3,12%
	Média	2,45%	2,75%	9,48%	9,81%	9,80%	9,48%	2,75%	2,46%
	Mínima ¹	0,04%	0,17%	9,31%	9,73%	8,52%	8,12%	3,63%	4,08%

Tabela 39 – Variação da tração, parcela dinâmica, atuante no topo das linhas (máximos e mínimos descontados da média)

		<i>Tendão 1</i>	<i>Tendão 2</i>	<i>Tendão 3</i>	<i>Tendão 4</i>	<i>Tendão 5</i>	<i>Tendão 6</i>	<i>Tendão 7</i>	<i>Tendão 8</i>
Risers desconectados	Máxima ¹	6159	6183	5311	5259	5218	5156	5436	5487
	Mínima ¹	-6023	-5999	-5299	-5434	-5575	-5655	-5429	-5358
Risers como TautLeg e Curva de restauração	Máxima ¹	5507	5605	4858	4867	4899	4903	5291	5296
	Mínima ¹	-5781	-5733	-5528	-5603	-5801	-5750	-4995	-4987
Risers como Elementos Finitos	Máxima ¹	4836	4763	5479	5518	4988	4910	4947	4996
	Mínima ¹	-5254	-5166	-5025	-5092	-5106	-5062	-5005	-5130

Tabela 40 – Comparação da parcela dinâmica em relação ao modelo de referência (Modelo de Elementos Finitos)

		<i>Tendão 1</i>	<i>Tendão 2</i>	<i>Tendão 3</i>	<i>Tendão 4</i>	<i>Tendão 5</i>	<i>Tendão 6</i>	<i>Tendão 7</i>	<i>Tendão 8</i>
Risers desconectados	Máxima ¹	27,4%	29,8%	-3,0%	-4,7%	4,6%	5,0%	9,9%	9,8%
	Mínima ¹	-14,6%	-16,1%	-5,4%	-6,7%	-9,2%	-11,7%	-8,5%	-4,5%
Risers como TautLeg e Curva de restauração	Máxima ¹	13,9%	17,7%	-11,3%	-11,8%	-1,8%	-0,1%	6,9%	6,0%
	Mínima ¹	-10,0%	-11,0%	-10,0%	-10,0%	-13,6%	-13,6%	0,2%	2,8%

¹ Valor Extremo Esperado obtido utilizando estatística de extremos. Ajuste por Weibull

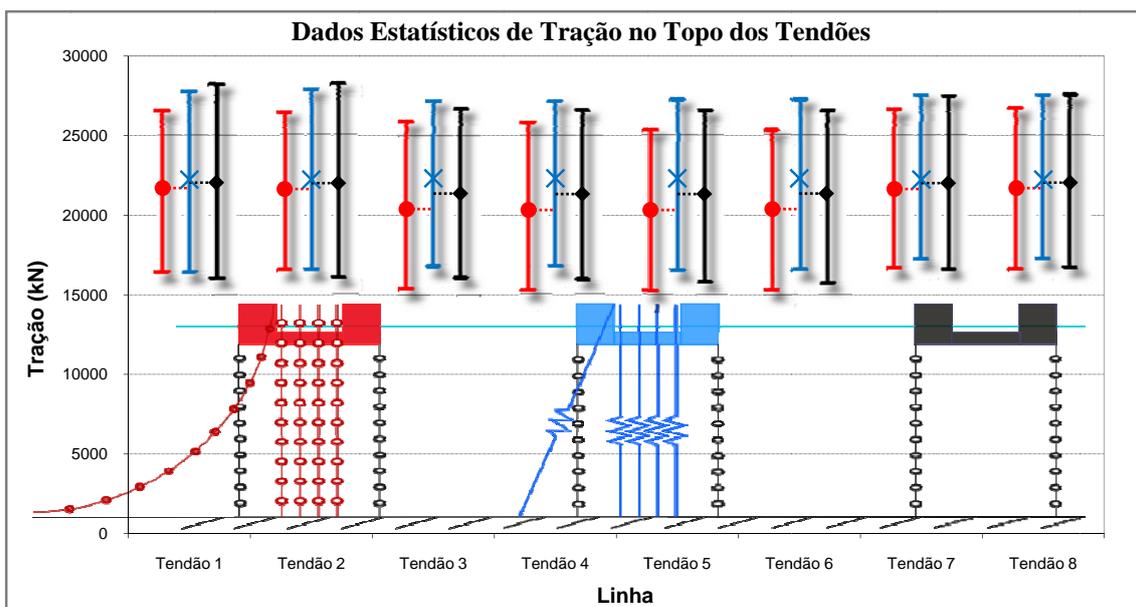


Figura 7.51 Representação da Tabela 37. Comparativo das trações médias, máximas e mínimas nos tendões

Risers como TautLeg e curva de restauração

Com auxílio da Tabela 37 à Tabela 40 e da Figura 7.51 apresentados, é possível notar que neste modelo os valores de trações em cada tendão são razoavelmente próximos, isto é, os valores médios, máximos e mínimos independem do tendão considerado.

A variação total de tração, diferença entre máximo e mínimo, é ligeiramente menor neste modelo em relação ao modelo com risers desconectados. O que indica que os risers promoveram uma pequena mudança no comportamento através de um aumento da rigidez do sistema e absorção de carga ambiental.

Comparando-se os valores de tração (média, máximo e mínimo) deste modelo com os outros modelos é possível constatar que em apenas dois tendões, tendão nº1 e tendão nº2, os valores são ligeiramente mais próximos do modelo de referência (risers como Elementos Finitos) do que o modelo que não possui os risers (risers desconectados). Nos demais tendões é o modelo que não possui risers que tem valores mais próximos do modelo de referência. Ou seja, esta observação sugere que a representação dos risers de forma desacoplada traz poucos ganhos para a resposta em termos de trações, ao ignorar os risers (risers desconectados) obteve-se praticamente a mesma resposta.

Risers como Elementos Finitos

O modelo de referência, modelo acoplado com todos os risers modelados por elementos finitos é o que apresentou menor variação nas trações, quando comparado aos outros modelos. Este efeito decorre diretamente da introdução de um amortecimento viscoso atuante nas linhas, não considerado na formulação dos outros modelos.

Com a Figura 7.51 percebe-se diferença considerável nas trações médias entre este modelo e o modelo com risers representados por TautLeg e Curva de Restauração. Neste modelo alguns tendões (Tendão 1, Tendão 2, Tendão 7 e Tendão 8) permaneceram mais carregados que outros, enquanto no modelo com risers TautLeg e Curva de Restauração os tendões permaneceram mais igualmente carregados. Novamente, a exemplo do que ocorreu no item anterior 7.4.1.3, supõe-se que grande parte desta diferença provém da forma simplificada com a qual a correnteza é representada no modelo com risers TautLeg e Curva de Restauração, através de uma força concentrada no CG – uma aproximação mais rigorosa também deveria contar com um momento no CG.

7.5 TEMPOS DE PROCESSAMENTO

A Tabela 41 apresenta os tempos de processamento conforme o intervalo de integração adotado para os modelos que não compreendem dos risers; simulações do item 7.2.

Tabela 41 – Tempo de processamento em função do intervalo de integração adotado.

<i>Intervalo de integração (s)</i>		<i>Tempo de Processamento (hh:mm:ss)</i>
<i>casco</i>	<i>linhas</i>	
0,05	0,025	20:13
	0,0125	35:13
	0,005	01:44:39
	0,0025	02:45:41
0,1	0,05	11:46
	0,025	22:07
	0,01	52:32
	0,005	01:21:47
0,25	0,125	05:08
	0,0625	09:10
	0,025	21:33
	0,01	02:50
0,5	0,25	02:50
	0,125	04:52
	0,05	11:00

A Tabela 42, apresenta uma comparação de custo computacional (em função da malha) utilizando-se o modelo que não considera os risers (risers desconectados); simulações do item 7.3.

Tabela 42 Tempo de processamento em função do tamanho da malha do tendão

<i>Tamanho da malha (nós) (metros) (%Lâmina)</i>	<i>Tempo de processamento (hh:mm:ss)</i>
20 (62 m) (5,2%)	01:45:00
30 (40 m) (3,3%)	02:37:00
40 (30 m) (2,5%)	03:32:00
50 (24 m) (2,0%)	04:22:00
60 (20 m) (1,7%)	05:14:00
70 (17 m) (1,4%)	06:11:00
80 (15 m) (1,3%)	06:58:00
90 (13,2 m) (1,1%)	07:50:00

A Tabela 43 traz uma comparação dos tempos de processamento para cada modelo de tendão nas simulações que desconsideram a correnteza nas linhas; simulações do item 7.4.1.2.

Tabela 43 – Comparação do tempo de processamento sem considerar os risers e sem a correnteza nos tendões.

	<i>Tempo</i>	
	(hora:min:seg)	(Variação) ¹
Mola Linear	00:03:31	-
TV e TautLeg	00:03:34	-
Elementos Finitos	02:09:07	36,7 vezes

A Tabela 44 traz uma comparação dos tempos de processamento para cada modelo de tendão nas simulações que desconsideram a correnteza nas linhas; simulações do item 7.4.1.3.

Tabela 44 – Comparação do tempo de processamento sem considerar os risers e com a correnteza nos tendões.

	<i>Tempo</i>	
	(hora:min:seg)	(Variação) ¹
Mola Linear	00:03:31	-
TV e TautLeg	00:03:34	-
Elementos Finitos	02:10:01	37 vezes

A Tabela 45 traz uma comparação dos tempos de processamento para os diferentes modelos de risers; simulações do item 7.4.2.

Tabela 45 – Comparação do tempo de processamento considerando os diversos modelos de risers .

	<i>Tempo</i>	
	(hora:min:seg)	(Variação) ¹
TautLeg e Curva de Restauração	02:13:17	-
Elementos Finitos	09:21:56	4,22 vezes

Os tempos foram obtidos através do Prosim versão 3.1 em um equipamento com a seguinte configuração: Notebook Intel Core 2 Duo CPU T5750 (2,0GHz), memória 2,0 GB.

¹ Variação em relação ao menor valor

8 COMENTÁRIOS FINAIS

8.1 CONCLUSÕES

Conforme exposto no princípio, o presente trabalho consistiu em essência de um estudo comparativo que foca em dois importantes resultados de uma análise global: os movimentos da unidade e a tração no topo dos tendões. Estes resultados estão dispostos da mesma forma que estariam em uma etapa de projeto típica, que procura facilitar a comparação dos valores obtidos com as limitantes de projetos. Para as conclusões deste estudo será dada ênfase para valores relacionados com as seguintes limitantes: as trações no topo dos tendões associadas com a tração máxima admissível, a mínima admissível e a variação de tração admissível (valor máximo ou mínimo descontado da média); o passeio da unidade obtido é normalmente comparado com o passeio máximo admissível.

A fim de avaliar o efeito de alguns parâmetros na diferença entre as análises acopladas e desacopladas, os modelos e simulações numéricas foram divididos em três grupos:

- modelos com risers e sem risers para a avaliação do efeito dos risers
- subdivisão do grupo de modelos sem risers entre modelos que não consideram o efeito da correnteza sobre os tendões e modelos que consideram para avaliação do efeito da correnteza nas linhas.

As análises desacopladas estão associadas aos modelos de linhas designados nesta dissertação por: Mola Linear, TV, TautLeg e Curva de Restauração. As análises acopladas são representadas por simulações com linhas modeladas por Elementos Finitos.

Os itens seguintes resumem as conclusões mais importantes para os três grupos.

8.1.1 Modelos sem risers e sem o efeito da correnteza nas linhas

- O passeio máximo dos modelos desacoplados resultaram em valores ligeiramente maiores (3,1% e 8,9%) que o obtido através do modelo acoplado.
- Os modelos desacoplados apresentaram trações máximas até 5,1% menores que o modelo acoplado. As trações mínimas foram até 13,4% menores. A parcela dinâmica – máximo ou mínimo descontado da média – apresentou diferenças de 31,1% em relação ao modelo de elementos finitos.

8.1.2 Modelos sem risers e com o efeito da correnteza nas linhas

- Os modelos desacoplados apresentaram comportamentos distintos quanto ao passeio máximo: o modelo Mola Linear apresentou passeio máximo 17% maior, enquanto os modelos TV e TautLeg apresentaram valor 0,9% abaixo do modelo acoplado.
- Quanto às trações os modelos desacoplados apresentaram trações máximas até 5,8% maior e trações mínimas até 13,8% menor que o modelo acoplado. A variação de tração ou parcela dinâmica apresentou diferença de até 22,2% em relação ao modelo acoplado.
- A correnteza aumentou as diferenças entre o modelo Mola Linear (modelo de linha mais simples) e o modelo Elementos Finitos. Entretanto, para os modelos TV e TautLeg não houve mudanças significativas nas diferenças em relação ao modelo acoplado.

8.1.3 Modelos com risers

- O modelo que trata os risers de forma desacoplada, modelo TautLeg e Curva de restauração apresentou passeio máximo 4% menor que o modelo acoplado.
- Quanto às trações o modelo TautLeg e Curva de Restauração apresenta: trações máximas até 7,2% maior e trações mínimas até 9,7% também maior que os valores obtidos com o modelo acoplado. A diferença na variação de tração foi até 17,7 %.

- Os modelos que contaram com risers apresentaram passeios maiores que os modelos sem risers (risers desconectados), pois contam com mais linhas que recebem força hidrodinâmica da correnteza e transmitem à unidade. Com respeito às trações o modelo TautLeg e Curva de restauração apresenta resultados próximos ao modelo com risers desconectados, diferenças significativas são notadas apenas quando os risers são tratados de forma acoplada.

8.1.4 Considerações gerais

Um aspecto importante dos resultados diz respeito à aplicabilidade dos modelos desacoplados e dos modelos acoplados. Se os modelos desacoplados apresentassem resultados “conservadores” poderiam ter seu uso mais disseminado nas várias etapas de projeto. Resultados “conservadores” significam que o atendimento às limitantes de projeto pelos modelos desacoplados implica no atendimento pelos modelos acoplados. Contudo, tal condição não foi verificada em todas as limitantes:

- Verificando o passeio máximo, os modelos desacoplados apresentam valores conservadores (valores maiores que o modelo acoplado) apenas nos modelos com os risers desconectados. Ainda assim, o modelo TV e TauLeg tornam-se conservador apenas quando não há correnteza. Já o modelo Mola Linear possui passeios maiores também na condição com correnteza, entretanto apresenta diferenças muito grandes em todos os movimentos, tornado sua utilidade bastante reduzida.
- Verificando a tração máxima, os modelos desacoplados apresentam valores maiores que os apresentados por modelos acoplados, com exceção do modelo que não possui os risers e não considera a correnteza nas linhas, condição muito difícil de ser verificada na prática, por isso para este parâmetro pode ser considerados conservadores.
- Verificando a tração mínima os modelos desacoplados apresentaram trações mínimas maiores quando os risers são conectados, sendo portanto não-conservadores.
- A variação de tração nos modelos desacoplados é maior, tornando-os portanto conservadores neste parâmetro, muitas vezes utilizado para a verificação da

fadiga no tendão. A variação dos modelos acoplados é menor devido à presença do amortecimento hidrodinâmico considerado através da formulação do modelo de Elementos Finitos.

Os modelos desacoplados apresentam, portanto, vários parâmetros importantes com diferenças significativas de modo não-conservador.

As observações reforçam a importância da utilização de modelos que considerem os risers conectados à unidade e de forma acoplada, torna indispensável o uso de ferramentas de análise acoplada e restringe a aplicabilidade das metodologias desacopladas para situações específicas, por exemplo utilização nas primeiras fases do projeto.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir algumas propostas de trabalhos a serem realizados nesta mesma área, alguns com a possibilidade de utilizar o presente trabalho como recurso ou ponto de partida:

- estudo paramétrico ou “análise de sensibilidade” de outros parâmetros que não foram considerados neste trabalho, tendo como objetivo verificar a influência na resposta global do sistema ou a influência na diferença entre metodologias como realizado neste trabalho. Alguns parâmetros de interesse:
 - lâmina d’água. Seguindo a tendência atual de exploração em profundidades cada vez maiores torna-se importante estudos de variação de lâmina que abranja grandes profundidades.
 - perfil da correnteza. Foi adotado para este trabalho perfil de correnteza triangular. Com um detalhamento cada vez maior dos perfis de correnteza uma abordagem mais realística demandaria um estudo com perfis “irregulares”, intensidade e direção da velocidade com bruscas variações ao longo da profundidade.
 - tendões. Em grandes profundidades a concepção tradicional de tendões leva a elevados custos de construção e instalação. Por isso estão sendo estudadas novas concepções, por exemplo, tendões com seção variável ou com novos materiais.
- há uma tendência cada vez maior de se adotar critérios baseados na filosofia LFRD (*Load and Resistance Factor Design*) cada vez mais comum, por exemplo, na análise de semi-submersíveis. Nas últimas décadas [11] houve esforços significativos com o objetivo de incorporar a filosofia LFRD para as TLPs. Trabalhos nessa área terminaram por ser abandonados devido à natureza da resposta de uma TLP. Entretanto, ainda com o objetivo de uniformizar os níveis de confiabilidade, a API[11] incorpora os conceitos de “*response-based criteria*” ou , em tradução livre, critério baseado na resposta. Um importante trabalho seria a comparação entre um projeto utilizando os critérios tradicionais e um utilizando o conceito *response-based*. Como a utilização do *response-*

based requer custo computacional elevado, a avaliação da metodologia desacoplada neste contexto torna-se mais importante.

- como já mencionado na formulação utilizada para o cálculo da força devido à onda, alguns efeitos de segunda ordem, especificamente o efeito de *springing*/e *ringing*, foram ignorados. Espera-se, entretanto, devido à natureza dinâmica de uma TLP que estes efeitos tenham um importante papel na resposta da unidade, torna-se então valioso um trabalho que avalie a influência destes efeitos.
- o estudo realizado considerou condições extremas. Espera-se que para condições mais brandas, como condições de fadiga, as diferenças entre as análises diminua. Para uma análise de fadiga, particularmente, em que há um uso intensivo de ferramentas estatísticas e maiores incertezas, um estudo comparativo de metodologias, como o realizado nesta dissertação, pode levar a conclusões diferentes das obtidas.
- outro ponto importante para avaliação é a configuração do sistema. Neste trabalho foi considerada a TLP na configuração intacta (sem avarias), deve-se investigar também o comportamento do sistema em situações de avaria ou adversas como no caso de alagamento de uma coluna. Tais configurações adicionam outras variáveis e tornam o modelo mais complexo, como no caso da perda de um tendão durante a simulação (representando a ruptura deste tendão).

9 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, Brazil, 2004
- [2] SENRA, S. F., CORREA, F. N., JACOB, B. P., et al., “Towards the Integration of Analysis and Design of Mooring and Risers, Part I: Studies on a Semisubmersible Platform”, *Offshore Mechanics and Artic Engineering*, OMAE28046, Oslo, Norway, June 2002.
- [3] SENRA, S. F., CORREA, F. N., JACOB, B. P., et al., “Towards the Integration of Analysis and Design of Mooring and Risers, Part II: Studies on a Dicas System”, *Offshore Mechanics and Artic Engineering*, OMAE28151, Oslo, Norway, June 2002
- [4] LIMA, A. L., *Avaliação de Metodologias de Análise de Unidades Estacionárias de Produção de Petróleo Offshore*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2006.
- [5] CORRÊA, F. N., *Aplicação de Metodologias Híbridas em Estudos Paramétricos sobre o Comportamento de Sistemas Offshore*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2003.
- [6] CONNAIRE, A., KAVANAGH, K., AHILAN, R. V., et al., “Integrated Mooring and Riser Design: Analysis Methodology”, *Offshore Technology Conference OTC 10810*, Houston, Texas, USA, May 1999.
- [7] SIRCAR, S., KLEINHANS, J. W., PRASAD, J., “Impact of Coupled Analysis on Global Performance of Deep Water TLP’s”, *Offshore Technology Conference*, OTC 7145, Houston, Texas, USA, Maio 1993
- [8] JACOB, B. P., *Programa Prosim: Simulação Numérica do Comportamento de Sistemas para Exploração de Petróleo Offshore, Manual Teórico*, COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, 2006
- [9] *Mexilhão Gas Field, Santos Basin, Brazil*. Disponível em: <http://www.offshore-technology.com/projects/mexilhao/>. Acesso em: 5 ago. 2009

- [10] *Deepwater Concept Selection & Record Poster*. Disponível em: <http://www.offshore-mag.com/index/maps-posters.html>. Acesso em: 5 ago 2009
- [11] API, *Planning, Designing, and Constructing Tension Leg Platforms*. API RP 2T. 3 ed., American Petroleum Institute, July 2007
- [12] KIBBEE, S. E., . SNELL, D. C, “New Directions in TLP Technology”, *Offshore Technology Conference*, OTC 14175, Houston, Texas, USA, Maio 2002
- [13] FINES, S., STOVE, O.J., GULDBERG, F., “Snorre TLP Tethers and Foudantion” *Offshore Technology Conference*, OTC 6623, Houston, Texas, USA, Maio 1991
- [14] HORNING, M.R., HANNA, S.Y., ROWAN, D., et al., “The Heidrun Field – Heidrun TLP Tether System”, *Offshore Technology Conference*, OTC 8100, Houston, Texas, USA, Maio 1996
- [15] ALVES, L. H. M. , *Análise Dinâmica dos Tendões de uma Plataforma de Pernas Atirantadas*, Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 1996
- [16] API, *Design of Risers for Floating Producing Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs)* . API RP 2RD. 1ª ed., American Petroleum Institute, May 2006
- [17] JORDAN, R., OTTEN, J., TRENT, D., et al., “Matterhorn TLP Dry-Tree Production Risers”, *Offshore Technology Conference* OTC 16608, Houston, Texas, USA, Maio 2004.
- [18] MACPHAIDEN, F. H., ABBOT, J. P., “Riser Tensioners for a TLP Application”, *Offshore Technology Conference* OTC 4985, Houston, Texas, USA, Maio 1985.
- [19] MYERS, R. J., ADAM, L. J., HARVEY, D. W., “High Reliability Riser Tensioners For The Hutton TLP”, *Society of Petroleum Engineers* SPE 14028, Aberdeen, Setembro 1985
- [20] FUCATU, C. H., *Desenvolvimento de um Simulador Dinâmico para Análise de Navios Amarrados*, Dissertação de M. Sc, USP, São Paulo, SP, 1998

- [21] ANFLEX – *Análise Não-Linear de Risers e Linhas de Ancoragem (Versão 3.0) – Manual de Entrada de Dados*”, DIPREX/SEDEM/CENPES/PETROBRAS, 1996.
- [22] ORCINA SOFTWARE Ltd. *Visual Orcaflex User Manual*, North Lonsdale Road, Ulverston Cumbria LA 12 9 DL, UK.
- [23] RIFLEX. Disponível em : <http://www.sintef.no/Home/Marine/MARINTEK/Software-developed-at-MARINTEK> . Acesso em : 02 set. 2009
- [24] BAHIENSE, R. A., *Implementação e Avaliação de uma Metodologia Fortemente Acoplada para Análise de Sistemas Flutuantes Offshore*, Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, 2007
- [25] CHAUDHURY, G., “A New Method for Coupled Dynamic Analysis of Platforms”, ISOPE June 2001
- [26] BELYTSCHKO, T., “An Overview of Semidcretization and Time Integration Procedures, Computational Methods for Transient Analysis”. Eds. 1983, Amsterdam: Elsevier Science Publishers
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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
- [30] BATHE, K. J., *Finite Element Procedures* .New Jersey, Prentice-Hall, 1996.
- [31] BOSSAK, M., E ZIENKIEWICZ, O. C., WOOD, W. L., “An Alpha Modification of Newmark’s Method”, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, vol 15 pp. 1562-1566, 1980.
- [32] JACOB, B. P., EBECKEN, N. F. F., “An Optimized Implementation of the Newmark/Newton-Raphson Algorithm for the Integration of Nonlinear

- Problems”, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 10 pp.983-992 John Wiley & Sons, UK/USA, 1994
- [33] JACOB BP, Integração na Rede Galileu dos Simuladores de Análise Dinâmica da Petrobras: Segundo Relatório de Atividades LAMCSO, COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, Maio de 2009.
- [34] CHAKRABARTI, S. K., “Hydrodynamics of offshore Structures”. *Computational Mechanics Publication / Springer-Verlag*, 1987
- [35] NEWMAN, J.N., “Marine Hydrodynamics”, MIT Press, Cambridge, 1977
- [36] WHEELER, J. D., “Method for Calculating Forces Procedure by Irregular Waves”, *Offshore Technology Conference*, Houston, 1969.
- [37] HOOFT, J. P., *Advanced Dynamics of Marine Structures*, John Wiley & Sons, USA, 1982.
- [38] PAULING, J. R., *TDSIM6 – Time Domain Platform Motion Simulation with Six Degrees of Freedom*, Theory and User Guide, 1992.
- [39] API, *Recommended Practice for Planning, Designing and Construction Fixed Offshore Platforms*, WSD, API RP 2A, American Petroleum Institute, July, 1993
- [40] DENISON, E. B., HOWELL, C. T., JU, G. T., et al., “Mars TLP Drilling and Production Riser Systems”, *Offshore Technology Conference OTC 8514*, 1997
- [41] CARMINATI, J. R., EATON, L. F., FOLSE, K. A., et al., “Ursa TLP Well Systems”, *Offshore Technology Conference OTC 10758*, 1999
- [42] DNV –Rules for Mobile Offshore Units, 1998.
- [43] CHOU, F. S. F., GHOSH, S., HUANG, E. W., “Conceptual Design Process of a Tension Leg Platform”, *SNAME Transactions*, Vol.91 pp275-305, 1983.
- [44] API, *Recommended Practice for Design of Stationkeeping Systems for Floating Structures*, API RP 2SK, American Petroleum Institute, July, 1993

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](#)