

Cheyenne Neves

**Seleção de um conceito de plataforma *offshore*  
para atuação na Bacia de Santos, baseada na  
análise do movimento de *heave***

**Joinville**

**2015**



Cheyenne Neves

**Seleção de um conceito de plataforma *offshore*  
para atuação na Bacia de Santos, baseada na análise do  
movimento de *heave***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Engenharia Naval, da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2015

---

Cheyenne Neves

Seleção de um conceito de plataforma *offshore*  
para atuação na Bacia de Santos, baseada na análise do movimento de *heave*/  
Cheyenne Neves. – Joinville, 2015-

99 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Thiago Pontin Tancredi

Dissertação – , 2015.

1. *Seakeeping*. 2. Bacia de Santos. I. Thiago Pontin Tancredi II. Universidade  
Federal de Santa Catarina III. Engenharia Naval IV. Seleção de um conceito de  
plataforma *offshore* para atuação na Bacia de Santos

CDU 02:141:005.7

---

Cheyenne Neves

**Seleção de um conceito de plataforma *offshore*  
para atuação na Bacia de Santos, baseada na análise do  
movimento de *heave***

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao Programa de Engenharia Naval, da Uni-  
versidade Federal de Santa Catarina, como  
parte dos requisitos necessários à obtenção  
do título de Engenheiro Naval.

Trabalho aprovado. Joinville, 3 de julho de 2015:

---

**Thiago Pontin Tancredi**  
Orientador

---

**Lucas Weihmann**  
Convidado 1

---

**Marcos Alves Rabelo**  
Convidado 2

Joinville  
2015



*Aos meus pais, amigos, familiares e mestres que estiveram me apoiando ao longo de todo o percurso.*





# Agradecimentos

Aos meus pais Otávio e Carla, exemplos da minha vida, responsáveis por tudo o que sou hoje, fontes de inspiração e motivação. Agradeço pelo amor incondicional e preocupação que sempre tiveram comigo. A conclusão de mais esta etapa da minha vida não seria possível sem a presença de vocês.

Às minhas irmãs Mariana e Kharol, pelo apoio incondicional, força, incentivo e amizade sem igual. Vocês são as minhas verdadeiras joias.

Às minhas pequenas Maria Eduarda e Isabella, pelo amor puro à mim dedicado. E que, apesar da pouca idade, trouxeram luz e alegria para a minha vida.

Aos meus avós Marcelino, Ivanda, Otávio e Valdira, que mesmo de longe sempre estiveram presentes ajudando e torcendo para a concretização deste curso. Sem vocês, este sonho não seria possível.

À Aline e às minhas grandes amigas, Arethusa, Evellyn, Flávia, Gabriele e Karla pela dedicação incondicional, por estarem sempre ao meu lado durante os anos de graduação, me apoiando nos momentos difíceis e celebrando comigo as conquistas. Todas vocês foram o meu alicerce enquanto estive em Joinville e me deram todo o carinho de uma verdadeira família.

Ao professor Thiago Pontin Tancredi pela cumplicidade, responsabilidade no desenvolvimento deste trabalho, sua contribuição para o meu crescimento profissional e por ser também um exemplo a ser seguido. Sua participação foi fundamental para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à todos aqueles que mesmo não estando citados aqui fizeram ou fazem parte da minha vida acadêmica e torcem ou contribuem para o meu progresso profissional e pessoal.



*"Grandes realizações não são feitas por impulso, mas por uma soma de pequenas realizações"*

*Vicent Van Gogh*



# Resumo

Uma das mais importantes etapas de seleção de um conceito de unidade flutuante é o estudo do comportamento da plataforma no mar. A resposta do sistema à passagem de ondas afeta a segurança dos passageiros, dos tripulantes, da carga e da própria unidade. Impacta também no conforto dos tripulantes e passageiros, no sistema de amarração e na integridade dos tubos que estabelecem a conexão entre a plataforma e os poços de extração de petróleo, conhecidos como *risers*. Sendo assim, este trabalho tem por finalidade realizar análises para movimento de *heave* em plataformas SPAR, monocoluna, semissubmersível e FPSOs. Utilizando formulações empíricas e semi-empíricas acrescidas de simulações computacionais. O objetivo do trabalho é selecionar um conceito de unidade flutuante para a produção de petróleo na Bacia de Santos, utilizando como critério de escolha a amplitude de deslocamentos verticais.

**Palavras-chaves:** Seakeeping, SPAR, Monocoluna, Semissubmersível, FPSOs, Bacia de Santos.



# Abstract

One of the most important steps of selecting a concept floating unit is the platform of the study of behavior at sea. The system's response to passing waves affect the safety of passengers, crew, cargo and the unit itself. Also impacts the comfort of the crew and passengers, the mooring system and the integrity of the tubes that establish the connection between the platform and the oil extraction wells, known as risers. Thus, this study aims to perform analyzes to heave motion SPAR platforms, monocolumn, semi-submersible and FPSOs. Using empirical and semi-empirical formulations plus simulations computer. The objective is to select a concept of floating unit for oil production in the Santos Basin, using as criteria for choosing the amplitude of vertical displacement.

**Key-words:** Seakeeping, SPAR, monocolumn, semi-submersible, FPSO, Santos Basin.





# Lista de ilustrações

Figura 1 – Produção Mundial de Petróleo (e projeção) 1950 – 2025, em milhões de barris por dia . . . . .	25
Figura 2 – Comparação entre o período de ressonância de diferentes conceitos de plataforma e o espectro de mar de regiões típicas da produção <i>offshore</i> . . . . .	27
Figura 3 – Principais conceitos de plataformas existentes . . . . .	29
Figura 4 – Conceito de Plataforma tipo monocoluna . . . . .	30
Figura 5 – Geometria típica de plataformas Monocolumnas . . . . .	30
Figura 6 – Conceito de Plataforma tipo SPAR . . . . .	30
Figura 7 – Conceito de Plataforma semissubmersível . . . . .	31
Figura 8 – Conceito de Plataforma FPSO . . . . .	32
Figura 9 – Graus de liberdade de uma unidade flutuante . . . . .	32
Figura 10 – Representação da amplitude de deslocamento em função da razão de frequências . . . . .	39
Figura 11 – Sobreposição dos efeitos de difração e radiação . . . . .	40
Figura 12 – Representação do mar como superposição de ondas regulares . . . . .	43
Figura 13 – Representação esquemática da relação entre o espectro de energia e o registro de ondas original . . . . .	44
Figura 14 – Formulação do espectro de energia padrão de Pierson-Moskowitz para diferentes alturas significativas de onda . . . . .	45
Figura 15 – Localização da Bacia de Santos . . . . .	47
Figura 16 – Relação entre a frequência natural e o tempo de simulação com o tamanho, em metros, do maior elemento da malha . . . . .	50
Figura 17 – Comparação entre a modelagem analítica e a numérica . . . . .	52
Figura 18 – Calibração do modelo analítico . . . . .	52
Figura 19 – Etapas calibração do modelo analítico . . . . .	53
Figura 20 – Curva de RAO de <i>roll</i> gerada por modelagem analítica e numérica . . . . .	54
Figura 21 – Dados para estudo de influência da massa adicional no modelo analítico . . . . .	55
Figura 22 – Curva de RAO de <i>roll</i> com incidência de onda de proa ( $0^\circ$ ) e RAO de <i>pitch</i> com incidência de onda de través ( $90^\circ$ ) . . . . .	56
Figura 23 – Design de perfil ( <i>esquerda</i> ) e em perspectiva ( <i>direita</i> ) de uma plataforma semissubmersível contendo quatro colunas e dois <i>pontoons</i> . . . . .	58
Figura 24 – Design clássico de uma plataforma SPAR . . . . .	59
Figura 25 – Deslocamento em função da lâmina d'água das doze plataformas provenientes do banco de dados . . . . .	59
Figura 26 – Adimensionais B/H e L/B advindos das doze plataformas contidas no banco de dados . . . . .	60

Figura 27 – Geração da geometria característica de uma plataforma tipo SPAR . . .	61
Figura 28 – Representação de uma malha com 1500 e 5000 elementos . . . . .	63
Figura 29 – Resultados comparativos de frequência natural analítica X numérica . .	64
Figura 30 – Processo de modelagem em CAD da geometria de uma plataforma semissubmersível . . . . .	66
Figura 31 – Representação dos conjuntos colunas/ <i>pontoon</i> da semissubmersível . .	67
Figura 32 – Dimensões principais, em metros, dos modelos de plataforma semissub- mersível . . . . .	67
Figura 33 – Representação da malha utilizada na Heydar Alyev . . . . .	69
Figura 34 – Localização da frequência natural analítica na curva de RAO gerada através do AQWA . . . . .	71
Figura 35 – Gráficos de atuação das forças de <i>Froude-Kriloff</i> . . . . .	72
Figura 36 – Representação dos pontos principais na análise das forças de <i>Froude-Kriloff</i>	73
Figura 37 – Procedimento de caracterização da geometria . . . . .	75
Figura 38 – Representação da malha utilizada nos modelos de plataforma FPSO . .	76
Figura 39 – Comparação da curva de RAO gerada através da incidência de ondas de proa e través . . . . .	76
Figura 40 – Resultados comparativos de frequência natural analítica X numérica . .	77
Figura 41 – Ilustração do procedimento de caracterização da geometria . . . . .	79
Figura 42 – Representação da malha utilizada na modelagem da monocoluna . . . .	80
Figura 43 – Curva RAO analítico X numérico . . . . .	81
Figura 44 – Comparação entre o período natural de diferentes conceitos de plata- forma e o espectro de mar da Bacia de Santos . . . . .	85

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Formulações da rigidez para cada um dos conceitos de plataformas . . .	35
Tabela 2 – Estudo de convergência do RAO em função da malha utilizada na simulação . . . . .	50
Tabela 3 – Resultados comparativos . . . . .	51
Tabela 4 – Percentual de massa adicional . . . . .	53
Tabela 5 – Resultados comparativos . . . . .	54
Tabela 6 – Dados para estudo de influência da massa adicional no modelo analítico	55
Tabela 7 – Frequências naturais de <i>roll</i> e <i>pitch</i> para ondas de proa, través e popa	55
Tabela 8 – Estudo de influência do centro de gravidade . . . . .	56
Tabela 9 – Estudo de influência do raio de giração . . . . .	56
Tabela 10 – Estudo de influência do centro de gravidade . . . . .	57
Tabela 11 – Estudo de influência do raio de giração mantendo as componentes x e y	57
Tabela 12 – Estudo de influência do raio de giração mantendo distintas as compo- nentes x, y e z . . . . .	57
Tabela 13 – Dimensões principais dos modelos de plataforma SPAR . . . . .	62
Tabela 14 – Principais dados provenientes da planilha de cálculos analíticos . . . .	62
Tabela 15 – Principais dados provenientes da planilha de cálculos analíticos . . . .	63
Tabela 16 – Número de elementos X tempo de simulação . . . . .	64
Tabela 17 – Valores de massa adicional associado aos modelos de plataformas SPAR	65
Tabela 18 – Resultados comparativos . . . . .	65
Tabela 19 – Resultados comparativos de massa adicional . . . . .	68
Tabela 20 – Resultados comparativos de massa adicional . . . . .	68
Tabela 21 – Arranjo dos testes com a divisão do <i>range</i> de frequências . . . . .	69
Tabela 22 – Resultados comparativos de frequência natural analítica X numérica .	70
Tabela 23 – Resultados comparativos de massa adicional . . . . .	70
Tabela 24 – Testes para diferentes fatores de redução de escala . . . . .	74
Tabela 25 – Parâmetros principais do modelo em escala 1:10 . . . . .	75
Tabela 26 – Estimativa da frequência natural . . . . .	77
Tabela 27 – Resultados comparativos de frequência natural analítica X numérica .	77
Tabela 28 – Coleta de dados da monocoluna . . . . .	79
Tabela 29 – Resultados comparativos de frequência natural analítica X numérica .	80
Tabela 30 – Relação entre $m_a/\Delta$ para modelos de plataformas SPAR, FPSO, semis- submersível e monocoluna . . . . .	83
Tabela 31 – Comparação entre a faixa de valores de períodos naturais típicos prove- niente da literatura e os períodos naturais calculados . . . . .	86
Tabela 32 – Principais parâmetros estatísticos provenientes do registros de ondas .	93

Tabela 33 – Banco de dados semissubmersível . . . . .	95
Tabela 34 – Banco de dados de FPSOs - <i>Floating Production Storage and Offloading</i>	97
Tabela 35 – Banco de dados de Plataformas SPARs . . . . .	99

# Lista de símbolos

$GM_t$	Altura metacêntrica transversal
$H_s$	Altura significativa de onda
$S_w$	Área da superfície molhada
$A_{wl}$	Área de linha d'água
$B$	Boca
$H$	Calado
$\zeta$	Coefficiente de amortecimento
$C_{wp}$	Coefficiente de linha d'água
$L$	Comprimento
$c_c$	Constante de amortecimento crítico
$c$	Constante de amortecimento do sistema
$\rho$	Densidade da água
$\Delta$	Deslocamento
$D_{col}$	Diâmetro da coluna
$\xi$	Elevação da superfície do mar
$\lambda$	Fator de escala reduzida
$F_{fk}$	Força de Froude- Krilov
$w$	Frequência de excitação
$w_p$	Frequência de pico
$w_n$	Frequência natural
$g$	Gravidade
$m$	Massa
$m_a$	Massa adicional

$\gamma$	Parâmetro de agudez
$\tau$	Parâmetro de forma do espectro
T	Período de oscilação
$D$	Pontal
p	Pressão da onda não perturbada
k	Rigidez
$U_w$	Velocidade do vento
V	Volume deslocado

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Conceitos de plataforma de produção</b>	<b>29</b>
2.1.1	Monocoluna	29
2.1.2	SPAR Buoy	29
2.1.3	Semissubmersível	31
2.1.4	FPSO – <i>Floating Production Storage Offloading</i>	31
<b>2.2</b>	<b>Movimentos de sistemas flutuantes</b>	<b>32</b>
2.2.1	<i>Response Amplitude Operators</i> - RAO	33
2.2.1.1	Frequência natural	34
2.2.1.2	Rigidez de um sistema dinâmico	34
2.2.1.2.1	<i>Heave</i>	35
2.2.1.3	Amortecimento	36
2.2.1.4	Forças de excitação	37
2.2.1.4.1	Força de Froude-Krilov	37
2.2.1.5	Forças reativas	38
2.2.1.6	Técnicas de obtenção - Método analítico	38
2.2.1.7	Técnicas de obtenção - Simulação computacional	40
2.2.1.7.1	Método das faixas	41
2.2.1.7.2	Método dos painéis	41
2.2.1.7.3	<i>ANSYS</i> <sup>®</sup> – <i>AQWA</i> <sup>™</sup>	41
2.2.1.7.4	<i>WAMIT</i> <sup>®</sup>	41
2.2.1.7.5	<i>WADAM</i> <sup>®</sup>	41
2.2.1.7.6	MAXSURF - Motions	42
2.2.2	Espectro de mar	42
2.2.2.1	Ondas regulares	42
2.2.2.2	Espectro de energia de um mar irregular	42
2.2.2.3	Espectros de energia padrão	43
2.2.2.3.1	Espectro de Pierson-Moskowitz	44
2.2.2.3.2	Espectro JONSWAP	45
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÃO DA PLATAFORMA - BACIA DE SANTOS</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>49</b>

<b>4.1</b>	<b>Análise fundamental: cilindros oscilando verticalmente . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1.1	Escolha da geometria . . . . .	49
4.1.2	Frequência natural analítica . . . . .	49
4.1.3	Estudo de convergência do gráfico de RAO em função da malha . . . . .	49
4.1.4	Frequência natural analítica X numérica para movimentos de <i>heave</i> . . . . .	50
4.1.5	Massa adicional numérica associada ao movimento de <i>heave</i> . . . . .	52
4.1.6	Frequência natural analítica X numérica para movimentos de <i>roll</i> . . . . .	53
4.1.7	Influência da massa adicional no modelo analítico associado ao movimento de <i>roll</i> . . . . .	54
4.1.8	Equivalência entre <i>roll</i> e <i>pitch</i> . . . . .	55
4.1.9	Influência do raio de giração e do centro de gravidade nos gráficos de RAO para movimentos de <i>heave</i> e de <i>roll</i> . . . . .	56
4.1.9.1	<i>Heave</i> . . . . .	56
4.1.9.2	<i>Roll</i> . . . . .	57
<b>4.2</b>	<b>Banco de dados . . . . .</b>	<b>58</b>
4.2.1	Conceito de plataforma Semissubmersível . . . . .	58
4.2.2	Conceito de plataforma FPSO - <i>Floating Production, Storage and Offloading</i> . . . . .	58
4.2.3	Conceito de plataforma SPAR . . . . .	59
4.2.4	Análise do banco de dados . . . . .	59
<b>4.3</b>	<b>Modelagem SPAR . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>4.4</b>	<b>Modelagem semissubmersível . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>4.5</b>	<b>Modelagem FPSO - <i>Floating Production Storage and Offloading</i> . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>4.6</b>	<b>Modelagem monocoluna . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>83</b>
5.1	Relação entre a massa adicional e o deslocamento . . . . .	83
5.2	Estratégias de minimização do tempo de simulação . . . . .	84
5.3	Seleção do conceito de plataforma com menor amplitude no movimento de <i>heave</i> . . . . .	84
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>87</b>
	Referências . . . . .	89
	<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXO A – REGISTRO DE ONDAS DE UM MAR REAL . . . . .</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO B – BANCO DE DADOS SEMISSUBMERSÍVEL . . . . .</b>	<b>95</b>



<b>ANEXO C – BANCO DE DADOS DE FPSOS - <i>FLOATING PRO- DUCTION STORAGE AND OFFLOADING</i> . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO D – BANCO DE DADOS DE PLATAFORMAS SPARS . .</b>	<b>99</b>



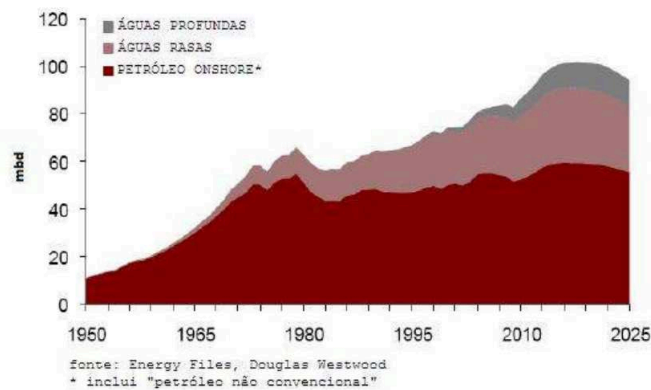
# 1 Introdução

A descoberta de reservas de petróleo e gás nos mares (*offshore*) teve início no pós-guerra e ganhou destaque após os anos 1970, com a produção americana e a emergente produção do Mar do Norte.

Essas novas regiões produtoras se desenvolveram como uma nova alternativa estratégica para oferta de óleo e gás, tanto para os países consumidores quanto para as empresas de petróleo de países centrais (FINOCCHIO JUNIOR, 2009).

A busca por novas fontes de energia após os choques de petróleo e a nacionalização de reservas, acelerou as buscas por novas reservas, aumentando a participação das reservas *offshore* na produção mundial. No início dos anos 1970 a produção *offshore* representava pouco mais de 15%. Na década de 1990 essa produção já representava 26% e, mais recentemente (2009) cerca de 33% (FINOCCHIO JUNIOR, 2009). Esses dados podem ser vistos no gráfico contido na Fig. (1), que também apresenta projeção para os anos seguintes, com contínuo crescimento da referida participação, que atingiria 35% início dos anos de 2020.

Figura 1 – Produção Mundial de Petróleo (e projeção) 1950 – 2025, em milhões de barris por dia



Fonte - Finocchio Junior (2009).

Outro fator importante a ser observado na Fig. (1) é que, a partir dos anos 1990, a exploração *offshore* pode ser particionada em duas categorias: a produção em águas rasas e águas profundas (unidades flutuantes), sendo esta caracterizada por uma lâmina d'água acima de 400 m.

No âmbito nacional, já no final de 1950, devido a análises geográficas, tinha-se o conhecimento de que o país possuía reservas de petróleo em profundidade marítima, mas não se sabia com precisão a localização de tais reservas. O período compreendido entre 1968 e 1975 pode ser considerado como o início da atividade *offshore* no país, devido à

descoberta do primeiro poço *offshore* em 1968, no Campo de Guaricema (SE). (SILVEIRA, 2013). Em seguida, a atividade se estendeu para o sudeste com a primeira perfuração, em 1968, na Bacia de Campos, no campo de Garoupa (RJ).

A partir destas primeiras descobertas, a Petrobras deu início ao desenvolvimento de novas tecnologias associadas a utilização de unidades flutuantes, uma vez que a profundidade média de seus poços era, na época, superior a 1.000 metros.

Atualmente, segundo Zolnerkevic (2012), a Petrobras consegue explorar com segurança os reservatórios da camada pré-sal, na bacia de Santos, em profundidades de até 3 mil metros de lâmina d'água. Esse avanço fez com que o Brasil alcançasse a autossuficiência de petróleo em 2005, com a produção atual chegando a quase 3 milhões de barris por dia, sendo mais de 80% provenientes de reservas marítimas, e com a expectativa de ultrapassar os 6 milhões de barris diários em 2020.

Dentre os conceitos de unidades flutuantes atualmente utilizados na exploração *offshore* destacam-se as plataformas semissubmersíveis, monocoluna, *tension leg platform* – TLP, SPARs e *Floating Production Storage and Offloading* - FPSO.

A caracterização do comportamento no mar de uma embarcação, refere-se ao estudo de previsão dos movimentos que essa embarcação apresentará quando submetida à ação das ondas do mar. Na literatura de língua inglesa, esse tópico é conhecido por *seakeeping*. (SIMOS, 2007)

Por sua vez, os movimentos de uma plataforma podem ser caracterizados como a resposta da unidade flutuante à passagem de uma onda, podendo ocorrer em seis graus de liberdade.

Dentre os motivos pelos quais é desejável limitar os movimentos e acelerações de um sistema oceânico em ondas, pode-se destacar:

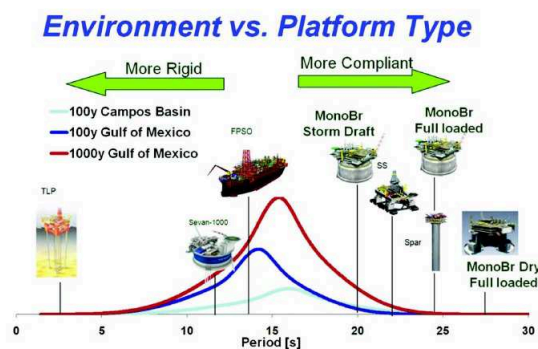
- Conforto e segurança da carga, dos passageiros e da tripulação;
- Problemas relacionados ao sistema de amarração;
- Integridade dos tubos que estabelecem a conexão entre a plataforma e os poços de extração de petróleo, conhecidos como *risers*.

Os *risers* podem ser considerados como uma das partes críticas de um sistema de produção (ou perfuração) *offshore*, já que, estando continuamente sujeitos a severas condições ambientais e ações dinâmicas, podem ter seu comportamento afetado pelo grande número de solicitações variáveis a que estão submetidos, gerando prejuízo por hora parada de produção, além do prejuízo ao ambiente marinho. A que se destacar também os custos envolvidos no reparo deste tipo de estrutura, que por sua vez necessitaria de mão de obra especializada e equipamentos sofisticados.

Objetivando avançar neste tema, o presente trabalho se propõe a selecionar um conceito de unidade flutuante para a produção de petróleo na Bacia de Santos, tal que o período de oscilação de *heave* esteja localizado o mais longe possível do pico da curva do espectro de energia desta região, a fim de evitar níveis elevados de movimento vertical.

Abaixo, na Fig. (2), ilustra-se o gráfico que representa o período de ressonância em *heave* dos principais conceitos de plataforma e a sua localização no espectro de mar das principais regiões de produção *offshore*.

Figura 2 – Comparação entre o período de ressonância de diferentes conceitos de plataforma e o espectro de mar de regiões típicas da produção *offshore*



Fonte - Adaptado de Gonçalves et al. (2010)

Para tanto, serão seguidas as seguintes etapas:

- I Elencar os conceitos de plataforma existentes para análise comparativa, sendo eles: Spar Buoy, monocoluna, semissubmersível, FPSOs e Tension-Leg – TLP. Dentre essas cinco, descartou-se a TLP para não envolver critérios de ancoragem que complicariam excessivamente a análise, fugindo ao escopo do presente trabalho;
- II Escolha da localização de operação da plataforma com base na disponibilidade de dados para a caracterização do mar da região;
- III Concepção dos quatro conceitos de plataforma. Esta etapa originou-se da estimativa do deslocamento, objetivando satisfazer um requisito de projeto exigido para uma planta de processo destinada a extração de petróleo. Depois foram coletados dados de cada um dos conceitos de plataformas já em operação, desenvolvendo desta maneira um banco de dados que possibilite a extração de uma geometria típica dos quatro conceitos de plataforma;
- IV Estimativa da frequência natural no grau de liberdade de *Heave*, e sob o efeito de ondas de proa, través e oblíquas, por meio de abordagem analítica, utilizando, para este fim, fórmulas empíricas e semi-empíricas segundo Subrata (2005). Para verificação foram utilizados modelos numéricos através de ferramentas de simulação

disponíveis. Algumas dessas ferramentas são: ANSYS (AQWA), WAMIT, WADAM e MAXSURF. Dentre eles foi escolhido o módulo AQWA do ANSYS devido à utilização do método dos painéis e também devido à disponibilidade do software em relação ao WAMIT e ao WADAM.

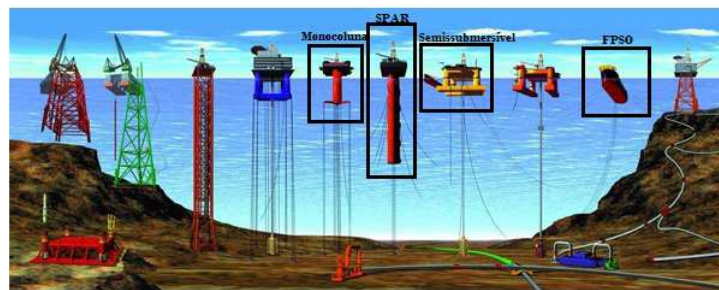
- V Determinação dos períodos naturais de oscilação dos conceitos de plataforma SPAR, FPSO semissubmersível e monocoluna, e situou-se estes períodos no espectro de mar da Bacia de Santos, de forma a obter uma representação semelhante ao que está contido na Fig. (2);
- VI Realização da seleção do conceito de plataforma para atuação na Bacia de Santos, utilizando como critério o conceito mais distante do pico da curva de espectro de mar desta região, ou seja, com menor amplitude de movimento em *heave*.

## 2 Fundamentação teórica

### 2.1 Conceitos de plataforma de produção

Neste trabalho serão abordados quatro conceitos de plataformas de produção de petróleo, conforme representado na Fig. (3), as quais serão descritas nesta seção.

Figura 3 – Principais conceitos de plataformas existentes



Fonte - Adaptado de <http://oceanexplorer.noaa.gov>, destacando os conceitos abordados pelo presente trabalho. (2014).

#### 2.1.1 Monocoluna

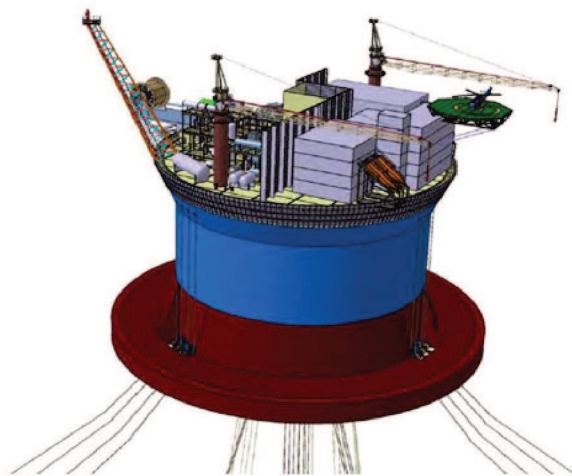
A Monocoluna é um conceito de plataforma inovador que vem sendo estudado em alguns centros de desenvolvimento ao redor do mundo. Esse conceito de plataforma tem como característica marcante a utilização de um casco com apenas uma coluna de grande diâmetro. Neste sentido, o conceito assemelha-se às plataformas do tipo Spar, porém com calado menor (SÁ, 2006), conforme pode ser visto na Fig. (4)

Apesar do seu formato cilíndrico, a monocoluna possui dispositivos singulares, como *moonpools*, saias e praias, que tem como principal função introduzir amortecimento e modificar a frequência do sistema, facilitando o seu emprego em regiões adversas.

#### 2.1.2 SPAR Buoy

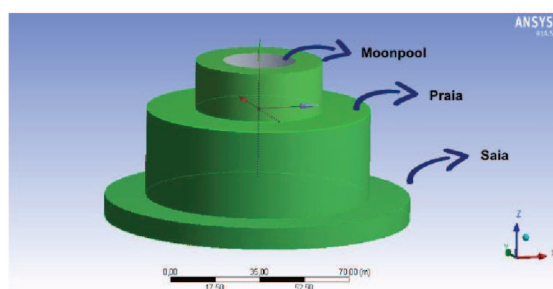
O conceito da plataforma SPAR Buoy foi uma evolução das bóias oceanográficas que desde 1965 vem sendo utilizadas. Na indústria *offshore*, este conceito foi utilizado pela primeira vez na década de 70, quando a Shell instalou em Brent uma plataforma deste tipo para armazenamento de petróleo. Em 1993, a Shell instalou uma Spar em Drogen, para receber a produção de óleo de campos vizinhos (GROVE; CONCEIÇÃO; SCHACHTER, 2003). Este conceito de plataforma consiste em um cilindro vertical de grande diâmetro

Figura 4 – Conceito de Plataforma tipo monocoluna



Fonte - <http://www.offshoreenergytoday.com> (2015).

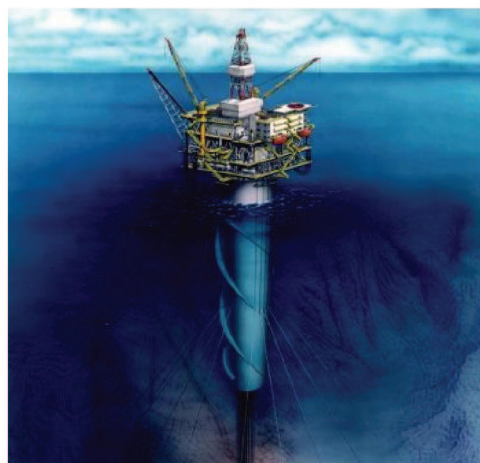
Figura 5 – Geometria típica de plataformas Monocolunas



Fonte - Autor.

com aproximadamente 90% da sua estrutura abaixo da lâmina d'água, conforme pode ser visto na Fig. (6).

Figura 6 – Conceito de Plataforma tipo SPAR



Fonte - <http://marineinsight.com>. (2014).



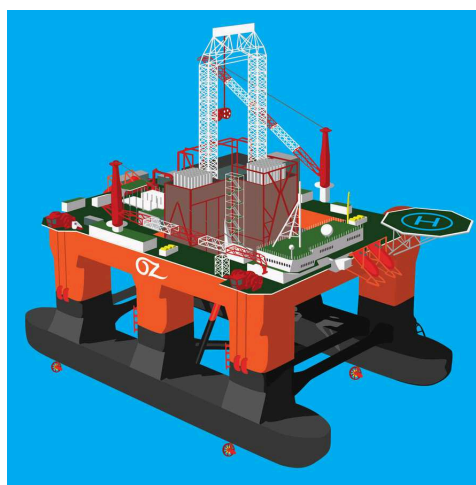
### 2.1.3 Semissubmersível

Plataformas semissubmersíveis são estruturas flutuantes, de calado regulado por lastro. Estas unidades são caracterizadas por possuírem pequena área de flutuação e pequeno deslocamento, se comparadas a navios. A inércia da área de flutuação é fornecida por colunas verticais, enquanto que seu deslocamento é garantido por colunas e flutuadores horizontais (*pontoons*) localizados nos extremos inferiores das colunas (CAMPOS, 2008).

Os *pontoons* são responsáveis pela maior parte do empuxo, garantindo a flutuabilidade da plataforma, e por se localizarem abaixo da linha d'água, também minimizam os movimentos decorrentes da ação das ondas na plataforma. Já as colunas são responsáveis pela estabilidade da plataforma não deixando que ela emborque (AMORIM, 2010).

O escoamento do óleo produzido pode ser feito por dutos, porém, dependendo da profundidade que é instalada a plataforma, são utilizados navios de armazenamento em conjunto com a unidade de produção (AMORIM, 2010), visto que o baixo deslocamento impede o armazenamento na própria unidade de produção.

Figura 7 – Conceito de Plataforma semissubmersível



Fonte - <http://marineinsight.com>. (2015).

### 2.1.4 FPSO – *Floating Production Storage Offloading*

As plataformas FPSOs são unidades estacionárias flutuantes que produzem, armazenam e escoam o petróleo. Surgiram devido à necessidade de exploração em águas profundas e a oferta de cascos decorrentes do término de vida útil de navios petroleiros. Inicialmente eram utilizados cascos de navios petroleiros desativados para a construção deste tipo de plataforma. A reutilização de antigos cascos de petroleiros não só era mais barato, representando um exemplo deste conceito de unidade, como também era mais rápido (AMORIM, 2010).

No geral, este tipo de plataforma possui equipamentos de processamento de hidrocarbonetos para a separação e tratamento de petróleo, água e gases. Abaixo, na Fig. (8) está representado um exemplo deste conceito de unidade.

Figura 8 – Conceito de Plataforma FPSO



Fonte - <http://gardyon.com>. (2015).

## 2.2 Movimentos de sistemas flutuantes

Segundo Faltinsen (1998), o movimento de estruturas flutuantes é composto por seis graus de liberdade, sendo três destes referente ao movimento de translação (*surge*, *sway* e *heave*) e três de rotação em torno de um eixo (*roll*, *pitch* e *yaw*). Na Fig. (9) estão representados os movimentos nos seis graus de liberdade de uma unidade flutuante.

Figura 9 – Graus de liberdade de uma unidade flutuante

MOVIMENTO	ÍND.	DESCRIÇÃO	FORÇAS E MOMENTOS	VELOCIDADES	POSIÇÃO	VISUALIZAÇÃO
Avanço ( <i>surge</i> )	1	Translação longitudinal	$X$	$u$	$x$	
Deriva ( <i>sway</i> )	2	Translação lateral	$Y$	$v$	$y$	
Afundamento ( <i>heave</i> )	3	Translação vertical	$Z$	$w$	$z$	
Jogo/balanço ( <i>roll</i> )	4	Rotação em torno do eixo longitudinal	$K$	$p$	$\phi$	
Caturro/arfagem ( <i>pitch</i> )	5	Rotação em torno do eixo transversal	$M$	$q$	$\theta$	
Guinada ( <i>yaw</i> )	6	Rotação em torno do eixo vertical	$N$	$r$	$\psi$	

Fonte - Zolnerkevic (2012).

Segundo Alves (2006), os deslocamentos lineares e angulares de uma plataforma

são causados basicamente pela ação dos ventos e ondas e podem ser divididos em dois grupos:

- I Avanço (*surge*), deriva (*sway*) e guinada (*yaw*): estes movimentos sofrem restrição do sistema de ancoragem da unidade que deve ser projetado para restringi-los a valores aceitáveis;
- II Balanço (*roll*), arfagem (*pitch*) e afundamento (*heave*): estes movimentos sofrem pouca influência do sistema de ancoragem e são limitantes para a operação da unidade. Os parâmetros determinantes para que a unidade apresente movimentos de *roll*, *pitch* e *heave* dentro dos limites operacionais especificados, considerando as condições de vento e onda do local onde irá operar, são a área de linha d'água e a distribuição de massa.

Segundo Faltinsen (1998), referente as operações de extração de petróleo, os movimentos de *heave*, *roll* e *pitch* são fatores limitantes. Isto porque, eles influenciam tanto no sistema de amarração da unidade flutuante quanto na integridade dos *risers*.

Em se tratando dos *risers*, o movimento vertical excessivo pode causar danos estruturais, gerando prejuízo por hora parada de produção, custos envolvidos no reparo, devido a necessidade de mão de obra especializada e equipamentos sofisticados e prejuízo ao ambiente marinho.

### 2.2.1 *Response Amplitude Operators - RAO*

Segundo Brebbia e Walker (1979), a resposta de estruturas *offshore* ao carregamento imposto por ondas é de fundamental importância no processo de seleção de um conceito para operação em determinada região.

Em sistemas navais e oceânicos, a estimativa dos efeitos provocados por um mar irregular se faz através das funções de transferência dos movimentos, também conhecidas como RAOs – *Response Amplitude Operators*.(SIMOS, 2007)

Em linhas gerais, os RAOs de um sistema oceânico normalmente são obtidos a partir de modelos em escala reduzida ensaiados em tanques de prova (método experimental), a partir de códigos numéricos específicos (método numérico) ou/e de formulações empíricas, (método analítico).

Nos tópicos posteriores são apresentados conceitos fundamentais no que se refere a caracterização do RAO de uma unidade flutuante e em seguida são abordados dois dos três métodos de obtenção do RAO (numérico e analítico) ambos aplicados no desenvolvimento do presente trabalho

### 2.2.1.1 Frequência natural

A frequência natural,  $w_n$ , de um sistema dinâmico pode ser descrita como sendo a frequência na qual o sistema vibra livremente sem ação de forças excitadoras. Ela pode ser obtida experimentalmente ou através da Eq. (2.1), que relaciona rigidez ( $k$ ) e a inércia do sistema. Esta, por sua vez, pode ser representada pela massa do sistema ( $m$ ) mais a massa adicional ( $m_a$ ), gerada pelo movimento do corpo em meio fluido.

A massa adicional, pode ser descrita como sendo a inércia adicional do sistema, gerada devido à massa de fluido deslocado ao mover um objeto sólido. Esta parcela torna-se significativa, quando o gasto energético torna-se relevante, como será visto nos tópicos posteriores de desenvolvimento.

$$W_n = \sqrt{\frac{k}{m + m_a}} \quad (2.1)$$

onde:

$k$  - Rigidez do sistema dinâmico [N/m];

$m$  - Massa [kg];

$m_a$  - Massa adicional [kg]

### 2.2.1.2 Rigidez de um sistema dinâmico

De forma simplificada, todos os sistemas hidrodinâmicos podem ser modelados por meio de um sistema massa-mola-amortecedor (forçado), isto porque esse tipo de abordagem reúne todos os componentes de um sistema dinâmico, sendo eles: inércia, força restauradora e amortecimento. Cada componente de um sistema hidrodinâmico pode ser descrito por meio de um desses três componentes, como por exemplo:

- Ondas do mar- força excitadora;
- Ondas provocadas pelo movimento do sistema - amortecimento potencial;
- Interação viscosa com o mar - amortecimento viscoso;
- Massa da embarcação - inércia;
- Restauração hidrostática - força restauradora;
- Restauração do sistema de ancoragem e *risers* - força restauradora;
- Massa adicional - inércia.

Desta forma, a rigidez de um sistema oscilatório pode ser descrita como sendo a força restauradora que surge ao deslocar o sistema em uma unidade de posição. No tópico seguinte esta descrita a rigidez para o movimento de *heave*, sendo este limitante para a operação da unidade flutuante.

### 2.2.1.2.1 Heave

A rigidez de *heave* pode ser representada pela Eq. (2.2).

$$k = \frac{F}{d} \quad (2.2)$$

Considerando  $d$  uma unidade de medida em metro e  $F$  como sendo a força contrária ao movimento de oscilação em *heave*, pode-se reescrever a equação:

$$k = \frac{\Delta V \cdot \rho \cdot g}{d} \quad (2.3)$$

onde:

$\Delta V$  - Variação do volume deslocado [ $m^3$ ]

$d$  - Deslocamento unitário [m]

$$k = \frac{A_{wl} \cdot d \cdot \rho \cdot g}{d} \quad (2.4)$$

$$k = A_{wl} \cdot \rho \cdot g \quad (2.5)$$

onde:

$A_{wl}$  - Área de linha d'água [ $m^2$ ]

Através da Eq. (2.5) pode-se entender que a rigidez de *heave* é diretamente proporcional à área de linha d'água. Sendo assim, é possível conceber a rigidez para o movimento de *heave* referente a cada um dos conceitos de plataforma envolvidos no escopo do presente trabalho, conforme apresentado na Tab. (1)<sup>1</sup>.

Tabela 1 – Formulações da rigidez para cada um dos conceitos de plataformas

	<b>SPAR Buoy</b>	<b>Monocoluna</b>	<b>Semissubmersível<sup>2</sup></b>	<b>FPSO</b>
<b>Área de linha d'água</b>	$A_{wl} = \frac{D_{col}^2 \cdot \pi}{4}$	$A_{wl} = \frac{D_{col}^2 \cdot \pi}{4}$	$A_{wl} = D_{col}^2$	$A_{wl} = C_{wp} \cdot L \cdot B$
<b>Rigidez</b>	$k = \frac{D_{col}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \rho \cdot g$	$k = \frac{D_{col}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \rho \cdot g$	$k = D_{col}^2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot g$	$k = C_{wp} \cdot L \cdot B \cdot \rho \cdot g$

<sup>1</sup> Todos os símbolos utilizados nas formulações estão contidos na lista de símbolos

onde:

$D_{col}$  - Diâmetro da coluna [m];

$C_{wp}$  - Coeficiente de linha d'água.

### 2.2.1.3 Amortecimento

O amortecimento representa a capacidade do sistema em dissipar energia, ele é responsável por atenuar a amplitude do movimento oscilatório, principalmente na região próxima a ressonância, onde as amplitudes do sistema são bastante elevadas. Em projetos hidrodinâmicos a dois tipos principais de amortecimento, sendo estes o amortecimento potencial, proveniente da formação das ondas, e o amortecimento viscoso, proveniente da interação entre o meio fluido e a estrutura submersa.

A força de amortecimento viscoso tem como característica principal ser proporcional à velocidade relativa ao deslocamento da estrutura, sendo representada pela Eq. (2.6).

$$F_a = -c.\dot{x} \quad (2.6)$$

onde:

$c$  - Constante de amortecimento do sistema [ $\frac{N.s}{m}$ ];

$\dot{x} = \frac{dx}{dt}$  - é a velocidade da massa  $m$  na direção do movimento [ $\frac{m}{s}$ ]

A constante de amortecimento  $c$  contida na Eq. (2.6) fornece uma indicação da relação entre a força de amortecimento e a velocidade relativa da estrutura. Porém, ela não proporciona uma visão da quantidade de amortecimento que atua sobre o sistema real, uma vez que uma força de amortecimento pode ser grande para um sistema e pequena para outro, dependendo fundamentalmente das massas envolvidas e da rigidez. Define-se, então o fator de amortecimento,  $\zeta$ , que é uma quantidade adimensional e não depende da ordem de grandeza dos parâmetros do sistema, indicando expressamente o quanto o sistema está sendo amortecido. O fator de amortecimento é definido como a relação entre a constante de amortecimento do sistema e a constante de amortecimento crítica, conforme contido na Eq. (2.7). Sendo, a constante de amortecimento crítica definida através da Eq. (2.8).

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (2.7)$$

$$c_c = 2mw_n \quad (2.8)$$

onde:

$c$  - Constante de amortecimento do sistema [ $\frac{N.s}{m}$ ];

$c_c$  - Constante de amortecimento crítico [ $\frac{N.s}{m}$ ];

$m$  - massa do sistema [kg];

$w_n$  - frequência natural do sistema [rad/s];

Para  $\zeta > 1$ , o sistema é superamortecido (não há oscilação);

Para  $\zeta = 1$ , o sistema é criticamente amortecido (não há oscilação);

Para  $\zeta < 1$ , o sistema é subamortecido.

#### 2.2.1.4 Forças de excitação

Segundo Chakrabarti (2005), as forças de excitação atuantes sobre uma estrutura submersa sujeita ao efeito de ondas aparecem a partir da distribuição de pressão sobre a superfície da estrutura. Estas forças podem ser classificadas em dois grupos:

- 1º ordem - Forças relacionadas à elevação da onda, de mesma frequência e proporcional a amplitude da onda (linear). Sendo estas: A força de Froude- Krilov,  $F_{fk}$ , que considera a pressão devido à ação da onda não perturbada, e a força de difração, que considera a modificação da pressão da onda devido à presença do corpo;
- 2º ordem - Forças pequenas, de baixa frequência e proporcional ao quadrado da amplitude da onda, sendo esta a força de Morison, que considera a parte viscosa da força.

Ainda segundo Chakrabarti (2005), para estruturas de pequenas dimensões quando comparadas ao comprimento das ondas de excitação, as distribuições de pressão sob a superfície são difíceis de serem mensuradas, isto ocorre devido ao escoamento complexo no entorno da estrutura e a formação de vórtices na vizinhança. Por este motivo, utiliza-se a formulação da força de Morison para caracterizar a força de excitação atuante sobre a estrutura.

Entretanto, quando a estrutura é grande o suficiente para que o fluxo permaneça essencialmente ligado à superfície, é possível mensurar o campo de pressão atuante na estrutura.

Por isso, as forças de Froude-Krilov, juntamente com as forças de difração, compõe a parcela referente as forças de excitação atuante nos conceitos de plataformas abordados no presente trabalho.

##### 2.2.1.4.1 Força de Froude-Krilov

Segundo Zolnerkevic (2012), a força de Froude-Krilov é definida como sendo a força induzida pelo campo de pressões gerado pelas ondas não perturbadas pelo corpo,

admitindo que o corpo é suficientemente pequeno para não influenciar as ondas. Ela é a integração do campo de pressões atuante na estrutura, conforme representado na Eq. (2.9).

$$\vec{F}_{fk} = - \int \int_{S_w} p \vec{n} ds \quad (2.9)$$

onde:

$F_{fk}$  - Força de Froude-Krilov [N];

$S_w$  - Área da superfície molhada do corpo flutuante [ $m^2$ ];

$p$  - Pressão da onda não perturbada [kPa];

$n$  - Vetor normal ao corpo, apontando para a direção da água.

#### 2.2.1.5 Forças reativas

Segundo Zolnerkevic (2012), as forças reativas oriundas da passagem de ondas sobre a estrutura correspondem a restauração hidrostática, ao termo de massa adicional e ao termo de energia potencial, oriundo da geração de ondas decorrentes do movimento da estrutura

Para o caso do movimento de *heave*, a força de restauração hidrostática equivale ao peso do volume deslocado pela própria estrutura.

#### 2.2.1.6 Técnicas de obtenção - Método analítico

Segundo Chakrabarti (2005), o deslocamento de uma estrutura oscilatória na direção da força de excitação pode ser descrito conforme a Eq. (2.10).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_o \cos(\omega t) \quad (2.10)$$

onde:

$F_o$  - Amplitude da força de excitação [N];

$\omega$  - Frequência de excitação [ $\frac{rad}{s}$ ];

$m$  - Massa da estrutura [kg];

$k$  - Constante linear da mola correspondente à rigidez da estrutura [ $\frac{N}{m}$ ];

$c$  - Coeficiente linear de amortecimento [ $\frac{N.s}{m}$ ].

A solução da Eq. (2.10) fornece o deslocamento do sistema em função da frequência de excitação, ou seja, o RAO correspondente do sistema flutuante, sendo representado pela (Eq. (2.11)).



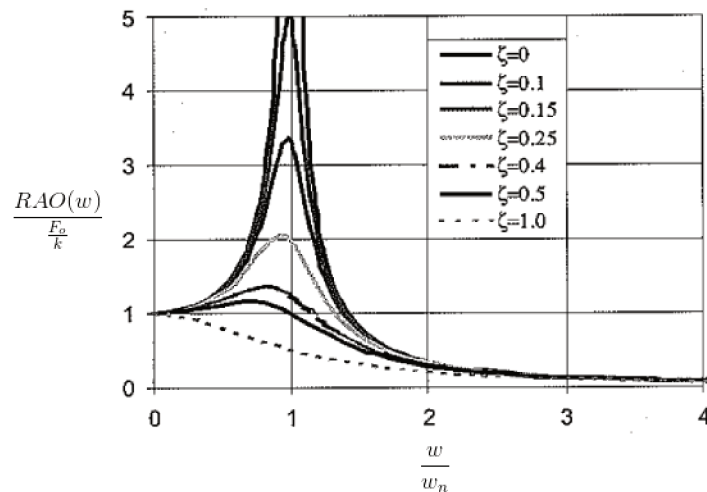
$$RAO(w) = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{(1 - \frac{w^2}{w_n^2})^2 + (\frac{2\zeta w}{w_n})^2}} \quad (2.11)$$

onde:

$\zeta$  - Coeficiente de amortecimento

Na Fig. (10) representa-se a relação entre a amplitude de deslocamento,  $\frac{RAO(w)}{\frac{F_0}{k}}$ , e a razão de frequências,  $\frac{w}{w_n}$ , de uma unidade flutuante.

Figura 10 – Representação da amplitude de deslocamento em função da razão de frequências



Fonte - Adaptado de Chakrabarti (2005).

É de fundamental importância salientar alguns aspectos principais do gráfico contido na Fig. (10), sendo eles:

- I Intervalo de ressonância, no qual a frequência natural da estrutura coincide com a frequência de excitação. Neste ponto a amplitude de oscilação do sistema é máxima;
- II Quanto maior o coeficiente de amortecimento,  $\zeta$ , menor a amplitude de movimento da estrutura e levemente deslocado à esquerda se encontra o intervalo de ressonância;
- III Todas as curvas partem de uma amplitude de deslocamentos equivalente a um, isto porque para pequenos valores de frequência, o tamanho da onda é muito maior que a estrutura, por isto a elevação da estrutura se torna a mesma da onda.
- IV Para ondas de alta frequência, a marola existente não provoca movimentos verticais significativos.

Outro aspecto importante que cabe ressaltar é o de que, como a plataforma possui seis graus de liberdade, obviamente ela terá seis gráficos de RAO para caracterizar a

resposta do sistema a passagem de uma onda regular. Porém, o escopo deste trabalho dará maior ênfase ao RAO correspondente ao movimento de *heave*, o qual será utilizado como critério de seleção de um conceito de plataforma para atuação na Bacia de Santos.

### 2.2.1.7 Técnicas de obtenção - Simulação computacional

Segundo Fuarra (2005), quando se pretende calcular a resposta em ondas de sistemas oceânicos, normalmente é possível negligenciar efeitos devido à viscosidade do meio fluido. Sendo assim, a estratégia adotada para a modelagem do movimento hidrodinâmico de uma unidade flutuante é a decomposição deste movimento em duas componentes, difração e radiação. A Fig. (11) abaixo ilustra esse procedimento.

Figura 11 – Sobreposição dos efeitos de difração e radiação



Fonte - Adaptado de Faltinsen (1998).

Separar estes dois movimentos de onda ajuda a simplificar a análise da interação entre o mar e a estrutura. Na primeira parcela da Fig. (11), a plataforma é suposta fixa, enquanto a passagem da onda sobre a plataforma modifica o campo de pressões sobre a estrutura, produzindo forças excitadoras de movimento.

Na segunda parcela, considera-se que a plataforma se movimenta em um mar calmo. As ondas irradiadas e a interação viscosa entre a plataforma e o mar produzem forças reativas.

Por fim, a sobreposição dos efeitos, contidos na Fig. (11), modela o fenômeno real da interação entre o mar e a estrutura.

É importante salientar que a estratégia de sobreposição só pode ser realizada devido a hipótese de linearidade, através da qual os carregamentos e respostas em um mar irregular podem ser obtidos pela combinação linear das suas respostas ao conjunto de ondas regulares.

Nos tópicos posteriores são descritos dois métodos principais de obtenção do RAO, sendo eles o método das faixas e dos painéis, bem como os principais software disponíveis para a realização de análises de *seakeeping*.

#### 2.2.1.7.1 Método das faixas

Segundo Chakrabarti (2005), o método das faixas é utilizado para corpos esbeltos, onde o problema pode ser modelado como 2D e a variação do fluxo no plano transversal da embarcação é muito superior a variação na direção longitudinal. Sendo assim, os coeficientes para a massa adicional e a integral do campo de pressões podem ser calculados para cada fatia e, então, integrados ao longo do comprimento para a obtenção dos coeficientes 3D.

#### 2.2.1.7.2 Método dos painéis

Segundo Chakrabarti (2005), o método dos painéis é utilizado para o cálculo do escoamento potencial em torno de um corpo, onde o potencial de velocidades é representado por uma distribuição de singularidades (fontes-dipolos) sobre a superfície molhada do corpo. O método dos painéis divide a superfície do navio e do fluido ao redor em elementos discretos (painéis). Em cada elemento uma distribuição de fontes e sumidouros é definida, satisfazendo a equação de Laplace. Os resultados globais são obtidos resolvendo o problema de equilíbrio entre os diferentes painéis considerados, integrando o resultado ao longo de toda a superfície do corpo.

#### 2.2.1.7.3 ANSYS<sup>®</sup> – AQWA<sup>™</sup>

O AQWA<sup>™</sup> é um pacote de ferramentas de análise de engenharia para a investigação de efeito hidrodinâmicos, incluindo efeitos de onda, vento e correntes aplicado a estruturas *offshore* fixas ou flutuantes, podendo estas ser do tipo SPARs, *floating production storage and offloading* (FPSO), semissubmersíveis, *tension leg platform* (TLP), navios, plataformas de gravidade e quebra-mares.

#### 2.2.1.7.4 WAMIT<sup>®</sup>

É um dos mais avançados programas disponíveis para a análise das interações de ondas com plataformas e outras estruturas navais. Desenvolvido pelo MIT e lançado em 1987, o programa já foi licenciado para mais de 100 organizações industriais e de pesquisa em todo o mundo e entre as suas funcionalidades está a possibilidade do uso do método de ordem mais elevada para a solução do problema, a possibilidade de utilizar várias opções para definição da geometria e a capacidade de análise dos problemas de segunda ordem não linear em ondas bicromáticas e bidirecionais.

#### 2.2.1.7.5 WADAM<sup>®</sup>

É um programa de análise hidrodinâmica no domínio da frequência utilizada pela DNV. Ele é baseado na teoria de refração-radiação 3D utilizando método dos painéis e a

equação de Morison linearizada. A equação de Morison é utilizada principalmente para obtenção das forças de arrasto em estruturas delgadas, mas ambas as formulações podem ser combinadas.

#### 2.2.1.7.6 MAXSURF - Motions

O pacote Motions do Maxsurf proporciona análise hidrodinâmica e de *seakeeping* para embarcações em uma variedade de estados de mar, utilizando o método das faixas.

### 2.2.2 Espectro de mar

#### 2.2.2.1 Ondas regulares

Uma onda regular pode ser descrita como aquela caracterizada por uma única frequência angular,  $\omega$  (rad/s). Sendo esta descrita segundo a Eq. (2.12), tal que haja reciprocidade entre períodos e frequências, permitindo assim, a relação direta entre os domínios de tempo e frequência.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.12)$$

onde:

T - período de oscilação [s].

Segundo Simos (2007), a elevação da superfície do mar,  $\xi$ , para uma onda regular, pode ser descrita segundo a Eq. (2.13).

$$\xi(x, t) = A \cdot \cos(kx - \omega t + \varepsilon) \quad (2.13)$$

onde:

A - Amplitude de uma onda regular [m];

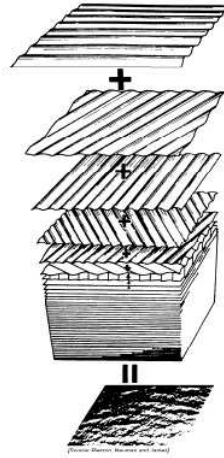
$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega^2}{g}$  - número de onda;

$\varepsilon$  - representa a fase da onda para o instante de tempo  $t=0$ .

#### 2.2.2.2 Espectro de energia de um mar irregular

Segundo Simos (2007), a ação do vento sobre a superfície do mar é o principal fenômeno físico responsável por induzir efeitos ondulatórios no ambiente marítimo. Estas ondas podem ser representadas através da superposição de ondas regulares de diferentes amplitudes e frequências. Representando assim uma determinada condição do mar através da superposição de ondas elementares, cada qual com frequência, amplitude e direção de propagação própria, como ilustra a Fig. (12).

Figura 12 – Representação do mar como superposição de ondas regulares



Fonte - Simos (2007),

Sendo assim, a variação no tempo da elevação da superfície do mar irregular pode ser aproximada pela Eq. (2.14), que relaciona o mar irregular como sendo a soma das ondas regulares que o compõem.

$$\xi(t) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \cdot \cos(w_j t + \varepsilon_j) \quad (2.14)$$

onde:

$A_j$  - representa a amplitude de cada uma das componentes harmônicas  $j$ ;

$\varepsilon_j$  - fase das componentes harmônicas  $j$ ;

Ainda segundo Simos (2007), a energia das ondas do mar, em torno de uma dada frequência  $w_n$ , é dada segundo a Eq. (2.15).

$$S_{\xi}(w_j) = \frac{1}{2} \cdot A_j^2 \quad (2.15)$$

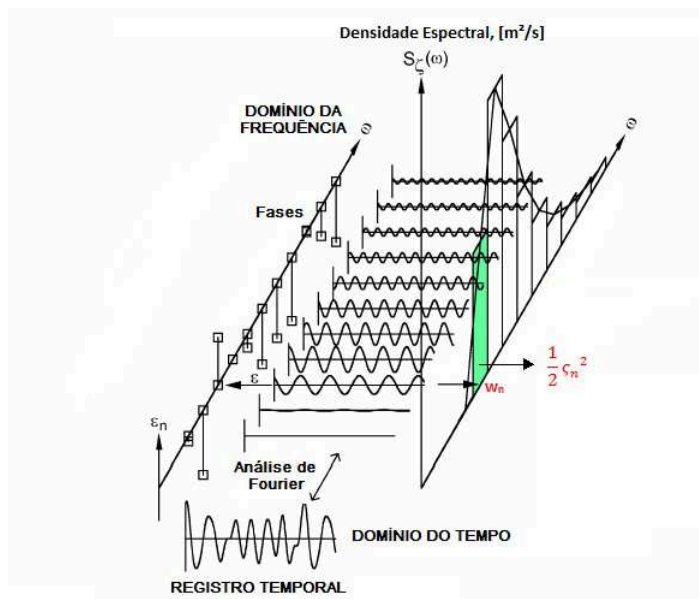
A Fig. (13) traz uma representação gráfica para o processo de transcrição de um registro de mar, tomado no domínio do tempo, para o respectivo espectro,  $S_{\xi}(w)$ , no domínio da frequência.

### 2.2.2.3 Espectros de energia padrão

Segundo Chakrabarti (2005), um espectro padrão de energia é uma função matemática que tenta descrever o espectro de energia de mares obtidos empiricamente.

A seguir são descritos dois dos principais espectros utilizados em aplicações navais e oceânicas, sendo eles o de Pierson-Moskowitz e JONSWAP.

Figura 13 – Representação esquemática da relação entre o espectro de energia e o registro de ondas original



Fonte - Adaptado de Simos (2007).

### 2.2.2.3.1 Espectro de Pierson-Moskowitz

De acordo com Chakrabarti (2005), em 1964 Pierson e Moskowitz propuseram uma fórmula para a distribuição das densidades espectrais de energia, baseada na teoria de similaridade proposta por Kitaigorodskii, bem como em uma base de registros de elevação de mar mais precisa.

Segundo Fajarra (2005), trata-se de um espectro padronizado bastante difundido e ainda utilizado em projetos navais e oceânicos por sua grande generalidade. Em linhas gerais é definido com base na velocidade do vento,  $U_w$ , que caracteriza uma condição de mar plenamente desenvolvida (pista e duração são consideradas infinitas).

Apesar desta hipótese, esta formulação também é bastante representativa em condições de projeto de tempestades severas.

Matematicamente o espectro de Pierson-Moskowitz pode ser escrito a partir da Eq. (2.16).

$$S_{\xi}(w) = 0,0081g^2w^{-5} \exp\left[-0,74\left(\frac{wU_w}{g}\right)^{-4}\right] \quad (2.16)$$

onde:

$U_w$  - Velocidade do vento [ $\frac{m}{s}$ ];

$w$  - Frequência de excitação [ $\frac{rad}{s}$ ].

Alternativamente, também pode ser apresentado como função da frequência de pico do espectro,  $w_p$ , conforme contido na Eq. (2.17)

$$S_{\xi}(w) = 0,0081g^2w^{-5}exp-1,25\left(\frac{w}{w_p}\right)^{-4} \quad (2.17)$$

$w_p$  - Frequência de pico [ $\frac{rad}{s}$ ].

A frequência de pico, por sua vez, pode ser representada seguindo a relação contida na Eq. (2.18).

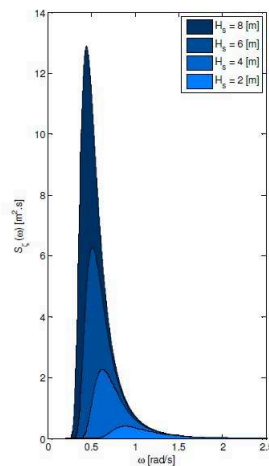
$$w_p = \sqrt{\frac{0,161.g}{H_s}} \quad (2.18)$$

onde:

$H_s$  - Altura significativa de onda [m].

Abaixo, na Fig. (14), está representada a formulação do espectro de energia padrão de Pierson-Moskowitz para diferentes alturas significativas de onda,  $H_s$ .

Figura 14 – Formulação do espectro de energia padrão de Pierson-Moskowitz para diferentes alturas significativas de onda



Fonte - Adaptado de Fujarra (2005).

#### 2.2.2.3.2 Espectro JONSWAP

Segundo Fujarra (2005), buscando aprimorar a distribuição das densidades de energia definida pelo espectro de Pierson-Moskowitz, entre 1968 e 1973, um extenso programa de medições no Mar do Norte, denominado de JONSWAP – *Joint North Sea Wave Project*, deu origem à proposição matemática para os espectros de mar contida na Eq. (2.19)

$$S_{\xi}(w) = \alpha g^2 w^{-5} \exp\left[-1,25\left(\frac{w}{w_p}\right)^{-4} \gamma^{\exp\left(\frac{(w-w_p)^2}{2\tau^2 w_p^2}\right)}\right] \quad (2.19)$$

onde:

$w_p$  - Frequência de pico  $\left[\frac{rad}{s}\right]$ ;

$\gamma$  - parâmetro de agudez, podendo variar de 1 a 7;

$\tau$ - parâmetro de forma do espectro, sendo  $\tau = 0,07$  para  $w \leq w_p$  e  $\tau = 0,09$  para  $w > w_p$ , considerando um vento predominante com velocidade de vento  $U_w$  agindo sobre uma pista de comprimento  $X_o$ ;

$\alpha = 0,076 X_o^{-0,22}$  ou  $\alpha = 0,0081$  quando  $X_o$  for desconhecido.

Porém, ainda Segundo Fuarra (2005), em 1979, Goda derivou uma expressão aproximada para o espectro de JONSWAP em função apenas da altura significativa e da frequência de pico, conforme Eq. (2.20) abaixo.

$$S_{\xi}(w) = \alpha^* H_s^2 \frac{w^{-5}}{w_p^{-4}} \exp\left[-1,25\left(\frac{w}{w_p}\right)^{-4} \gamma^{\exp\left(\frac{(w-w_p)^2}{2\tau^2 w_p^2}\right)}\right] \quad (2.20)$$

onde:

$H_s$  - Altura significativa de onda [m];

$w_p$  - Frequência de pico  $\left[\frac{rad}{s}\right]$ .

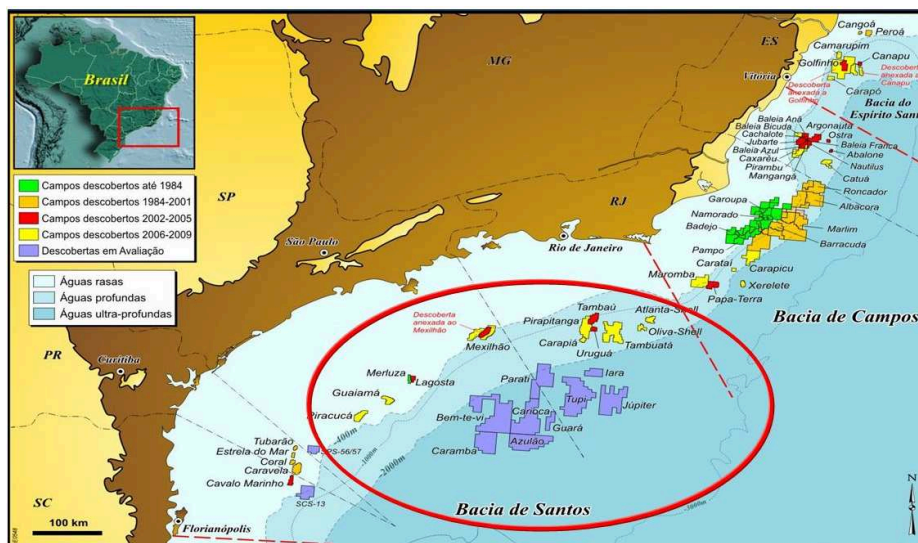
$$\alpha^* = \frac{0,0624}{0,230 + 0,336\gamma - 0,185(1,9 + \gamma)^{-1}} \quad (2.21)$$



### 3 Caracterização da localização de instalação da plataforma - Bacia de Santos

A Bacia de Santos é a maior bacia sedimentar *offshore* do país, com uma área total de mais de 350 mil quilômetros quadrados e que se estende de Cabo Frio (RJ) a Florianópolis (SC). Abaixo, na Fig. (15) representa-se a localização da Bacia de Santos.

Figura 15 – Localização da Bacia de Santos



Fonte - III Seminário de direito portuário – Petrobras. (2014).

Segundo Bagni (2014), nesta bacia localizam-se campos petrolíferos em produção, dentre eles destacam-se o campo de Lula, Merluza, Lagosta, Mexilhão, Uruguá, Tambaú, entre outros. Dentre estes, o campo de Lula, na Bacia de Santos, foi a primeira grande reserva descoberta em águas profundas. O campo está em produção desde 2010, sendo o principal campo produtor do pré-sal no País, responsável por 44,7% de todo o volume extraído na região.

Desde 2007 a Petrobras descobriu importantes acumulações de petróleo e gás natural em águas profundas, sendo estes reservatórios pós-salíferos. A expectativa da Petrobras é a de que a Bacia de Santos deva proporcionar, somente em gás natural, uma produção diária de 15 milhões de metros cúbicos/dia somente no Campo de Mexilhão - o correspondente a 50% da capacidade de importação do Gasbol, o gasoduto que viabiliza a importação de gás natural boliviano.



## 4 Desenvolvimento

### 4.1 Análise fundamental: cilindros oscilando verticalmente

#### 4.1.1 Escolha da geometria

Previamente ao processo de modelagem é necessário determinar a geometria que será avaliada, de forma a realizar o mesmo procedimento de análise para todas as etapas do processo de verificação do software. Objetivando simplificar a modelagem no AQWA e os cálculos no Excel, optou-se por utilizar um cilindro homogêneo com raio igual a 10m e altura imersa e emersa iguais e equivalentes a 20m.

#### 4.1.2 Frequência natural analítica

A partir das dimensões do cilindro é possível obter a sua respectiva massa por meio do Princípio de Arquimedes, através do qual para que um corpo flutue é necessário que o seu peso seja igual ao empuxo produzido pelo volume deslocado do próprio corpo. Sendo assim, obteve-se o valor de 6.440 t de massa. Em seguida, realizou-se o cálculo da rigidez, obtendo  $3,16 \cdot 10^6$  N/m. Conhecidos os valores de massa e rigidez do corpo e considerando a massa adicional inicialmente igual a zero obteve-se a frequência natural de 0,7 rad/s.

#### 4.1.3 Estudo de convergência do gráfico de RAO em função da malha

Primeiramente ajustou-se o intervalo de frequências a ser analisada pelo AQWA, de 0,5 rad/s até 0,8 rad/s, e o número de frequências intermediárias, sendo um total de quarenta e oito frequências intermediárias. Em seguida foram geradas nove malhas distintas, variando entre elas o tamanho do maior elemento contido na malha, partindo de 14 m até 2,5 m. Na Tab. (2), seguem os dados obtidos na simulação das nove malhas.

A partir dos resultados contidos na Tab. (2) é possível verificar a convergência da frequência natural para o valor de 0,616 rad/s em função da diminuição do tamanho do maior elemento na malha. Observou-se também que a frequência natural aumenta progressivamente até a malha 6, a partir desta malha a frequência natural se mantém constante, aumentando somente o tempo de simulação.

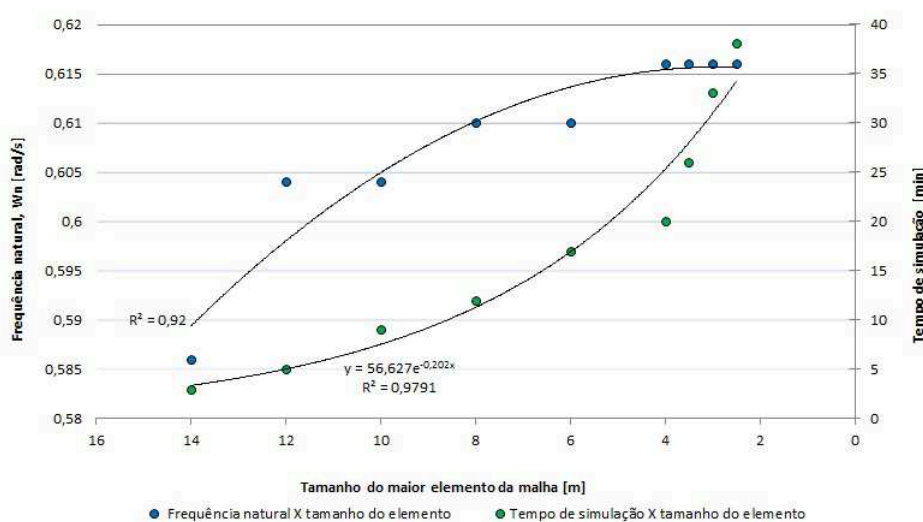
O gráfico contido na Fig. (16) demonstra a relação entre a frequência natural e a diminuição do tamanho da malha (pontos azuis) e a relação entre o tempo de simulação e a diminuição do tamanho da malha (pontos verdes).

No gráfico da Fig. (16) é possível perceber a dependência exponencial entre o tempo

Tabela 2 – Estudo de convergência do RAO em função da malha utilizada na simulação

Malha	Tamanho maior elemento da malha [m]	Nº de elementos	Frequência natural, $W_n$ [rad/s]	Tempo de simulação [min]
1	14	58	0.586	3
2	12	110	0.604	5
3	10	134	0.604	9
4	8	218	0.610	12
5	6	320	0.610	17
6	4	678	0.616	20
7	3.5	834	0.616	26
8	3	1102	0.616	33
9	2.5	1596	0.616	38

Figura 16 – Relação entre a frequência natural e o tempo de simulação com o tamanho, em metros, do maior elemento da malha



de simulação e o tamanho do maior elemento da malha, conforme indicado pelos pontos em verde. Isto ocorre devido ao tempo demandado pelo *software* durante a simulação para geração de malhas mais refinadas. É possível observar também que a frequência natural aumenta com a diminuição do tamanho do maior elemento da malha até o momento em que este corresponde a 4 m, conforme verificado nos pontos em azul. Sendo assim, a partir de 4 m, o refino da malha não influencia no valor da frequência natural, impactando somente no aumento do tempo de simulação.

#### 4.1.4 Frequência natural analítica X numérica para movimentos de *heave*

Para a geração do gráfico RAO no ANSYS utilizou-se a malha 6 contendo 678 elementos, e para a geração do RAO teórico, foi utilizada a Eq. (4.1) conforme descrita abaixo.

$$RAO(w) = \frac{Fa}{k} * \frac{1}{\sqrt{((1 - (\frac{w}{w_n})^2)^2 + (2 * \zeta * \frac{w}{w_n})^2)}} \quad (4.1)$$

onde:

$F_a$  – Força total no cilindro vertical [N];

$k$  – Rigidez da plataforma ao movimento vertical [ $\frac{N}{m}$ ];

$w_n$  – Frequência natural de movimento vertical do cilindro [ $\frac{rad}{s}$ ];

$\zeta$  – Fator de amortecimento.

Inicialmente considerou-se o fator de amortecimento igual à zero, obtendo a Eq. (4.2). Esta simplificação não impacta de maneira significativa no calculo analítico da frequência natural e geração da curva de RAO, podendo ser utilizada para obtenção de resultados analíticos aproximados.

$$RAO(w) = \frac{Fa}{k} * \frac{1}{(1 - (\frac{w}{w_n})^2)^2} \quad (4.2)$$

Para um cilindro vertical a rigidez de *heave* da plataforma ao movimento vertical pode ser representada pela Eq. (4.3).

$$k = \rho * g * \pi * r^2 \quad (4.3)$$

onde:

$r$  – Raio do cilindro [m].

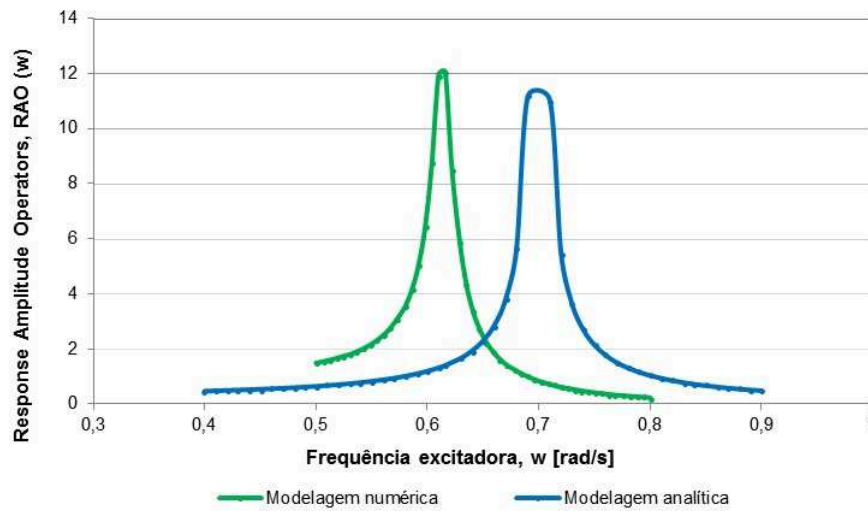
Na Tab. (3) são apresentados os resultados numéricos, enquanto que no gráfico contido na Fig. (17) é possível comparar ambas as modelagens graficamente.

Tabela 3 – Resultados comparativos

Frequência natural teórica ( $Wn_t$ )	0,700 rad/s
Frequência natural numérica ( $Wn_{num}$ )	0,616 rad/s
Diferença percentual (%)	12,0%

A partir do gráfico contido na Fig. (17) é possível perceber que o RAO gerado na modelagem analítica se encontra deslocado para a direita em relação ao gerado na modelagem numérica. Esse deslocamento de uma curva em relação à outra gerou uma diferença percentual de 12 % entre os respectivos valores de frequência natural de cada uma das modelagens. Este fato pode ser atribuído à estimativa inicial de massa adicional igual a zero, utilizada nos cálculos referentes à modelagem analítica, a qual é inversamente proporcional à frequência natural.

Figura 17 – Comparação entre a modelagem analítica e a numérica

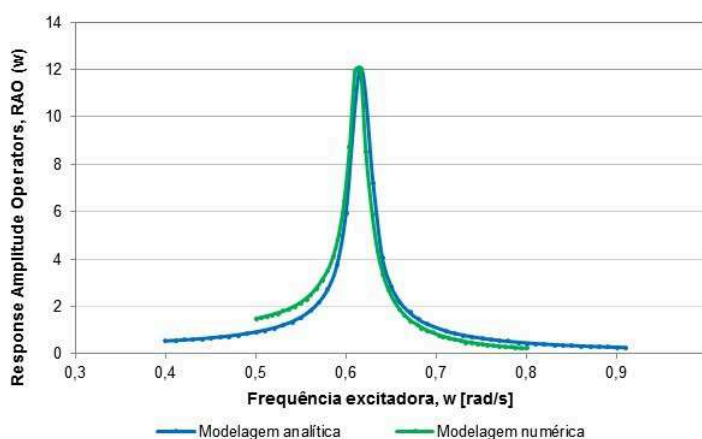


#### 4.1.5 Massa adicional numérica associada ao movimento de *heave*

Neste tópico foi feita a calibração do modelo analítico simplificado através de simulação computacional. Para este fim, obteve-se a massa adicional necessária para tornar a frequência natural analítica igual à numérica, através de incrementos no valor da massa adicional até que estes valores coincidissem. Sendo assim, obteve-se  $1,86 \cdot 10^6$  kg de massa adicional.

Na Fig. (18) é possível perceber que introduzindo  $1,86 \cdot 10^6$  kg de massa adicional ao cálculo da frequência natural teórica, obteve-se uma curva de RAO bastante semelhante à curva de RAO gerada pelo AQWA.

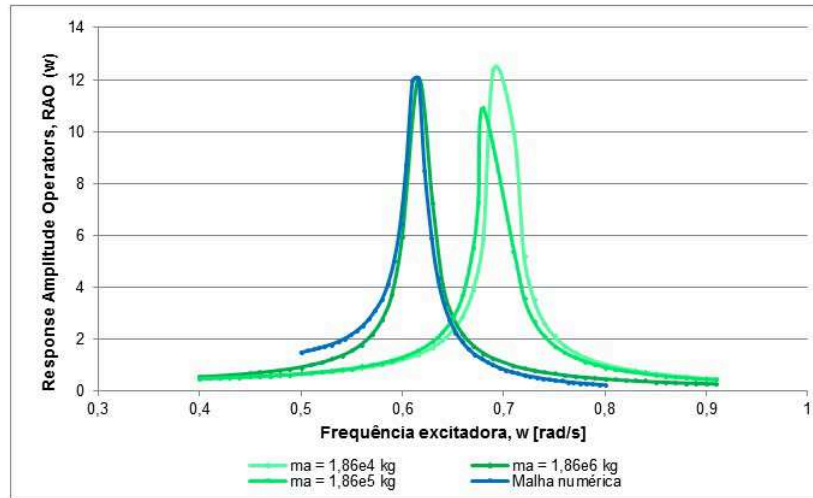
Figura 18 – Calibração do modelo analítico



Na Fig. (19) é possível observar convergência do RAO de *heave* caminhando na direção do RAO de *heave* numérico para diferentes valores de massa adicional.

A seguir, na Tab. (4), apresenta-se a diferença percentual entre a massa inicial do

Figura 19 – Etapas calibração do modelo analítico



corpo e a massa adicional gerada pelo movimento de *heave*.

Tabela 4 – Percentual de massa adicional

Massa do cilindro (M)	$6,44 \times 10^6 \text{ kg}$
Massa adicional ( $M_a$ )	$1,86 \times 10^6 \text{ kg}$
Percentual de massa adicional <sup>1</sup> (%)	28,9%

Por meio da Tab. (4) observa-se que a massa adicional representa aproximadamente 28% da massa inicial do cilindro.

#### 4.1.6 Frequência natural analítica X numérica para movimentos de *roll*

Para a geração da curva analítica de RAO de roll foi utilizada a Eq. (4.2) e a formulação de rigidez de roll para um cilindro vertical contida na Eq. (4.4), conforme descrita abaixo.

$$k = \rho * g * \nabla * GM_t \quad (4.4)$$

onde:

$\Delta$  - Deslocamento [kg];

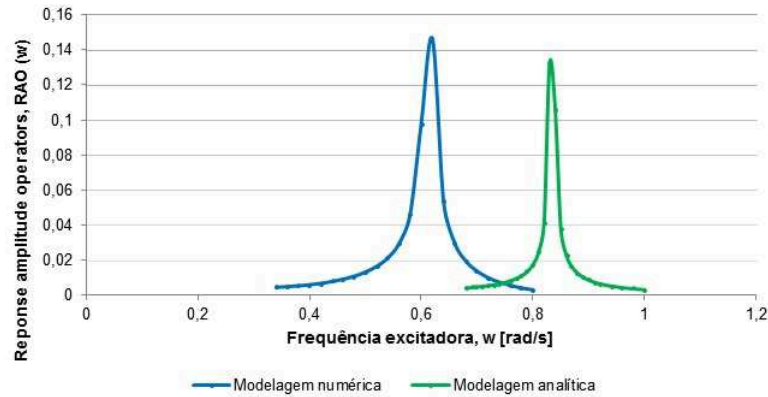
$GM_t$  - Altura metacêntrica transversal [m].

Na Tab. (5) são apresentados os resultados comparativos entre a modelagem analítica e a numérica e na Fig. (19) é possível comparar ambas as modelagens graficamente.

A partir do gráfico contido na Fig. (20) é possível perceber que o RAO gerado na modelagem analítica se encontra deslocado para a direita em relação ao gerado na

Tabela 5 – Resultados comparativos

Frequência natural teórica ( $Wn_t$ )	0,834 rad/s
Frequência natural numérica ( $Wn_{num}$ )	0,620 rad/s
Diferença percentual (%)	25,6 %

Figura 20 – Curva de RAO de *roll* gerada por modelagem analítica e numérica

modelagem numérica. Esse deslocamento de uma curva em relação à outra gerou uma diferença percentual de 25,6% entre os respectivos valores de frequência natural de cada uma das modelagens. Este fato pode ser atribuído à estimativa inicial de massa adicional igual a zero, utilizada nos cálculos referentes à modelagem analítica, a qual é inversamente proporcional à frequência natural.

#### 4.1.7 Influência da massa adicional no modelo analítico associado ao movimento de *roll*

Neste tópico foi realizado o estudo de convergência do RAO de *roll* na direção do RAO de *roll* numérico para diferentes valores de massa adicional. Para este fim foram calculados os dados contidos na Tab. (6), na qual a parcela de massa adicional foi obtida através da Eq. (4.5).

$$m_a = m * (1 + k_{roll}) \quad (4.5)$$

onde:

$m$  – massa do corpo

$k_{roll}$  – coeficiente de massa adicional

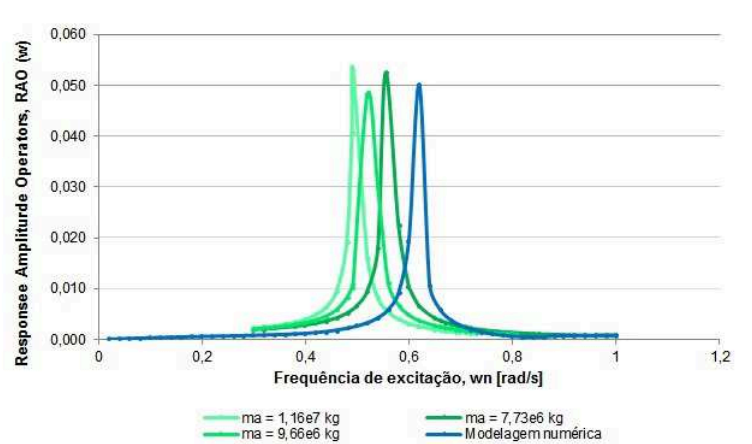
Em seguida, com dados contidos da Tab. (6), foram geradas três curvas de RAO obtidas analiticamente, conforme demonstrado na Fig. (21).



Tabela 6 – Dados para estudo de influência da massa adicional no modelo analítico

Coefficiente de $m_a$	Massa adicional, $m_a$ [kg]	Volume deslocado total, $V_t^2$ [m <sup>3</sup> ]	Inércia de rotação total, $I_{roll}$ [m <sup>4</sup> ]	Frequência natural, $W_n$ [rad/s]
0,8	1,16E+07	17592,5	2,86E+09	0,499
0,5	9,66E+06	15707,6	2,55E+09	0,528
0,2	7,73E+06	13822,7	2,24E+09	0,563

Figura 21 – Dados para estudo de influência da massa adicional no modelo analítico



A partir da Fig. (21) é possível observar a convergência do RAO de *roll* na direção do RAO de *roll* numérico para diferentes valores de massa adicional.

#### 4.1.8 Equivalência entre *roll* e *pitch*

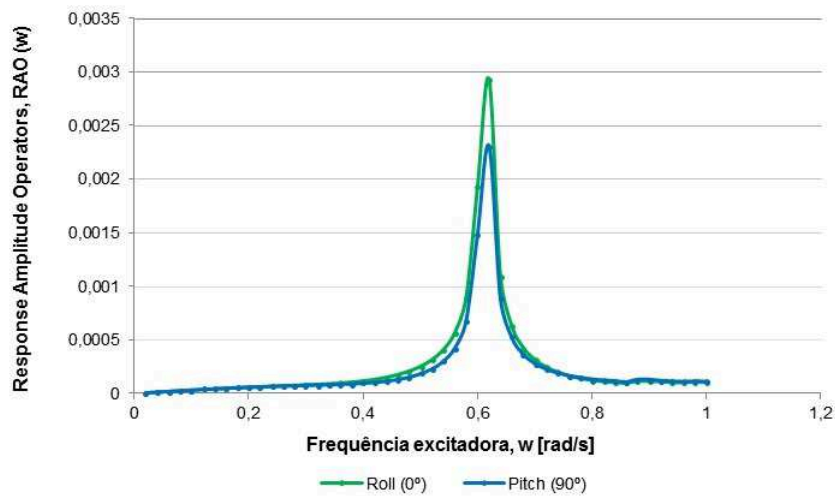
A fim de verificar a equivalência entre as curvas de RAO de *roll* e *pitch* foram testadas três condições de incidência de onda, sendo elas ondas de proa (0°), de través (90°) e ondas de popa (180°). Para cada uma destas condições foram extraídos os respectivos valores de frequência natural obtidos, conforme demonstrado na Tab. (7), e as curvas de RAO contidas na Fig. (22).

Tabela 7 – Frequências naturais de *roll* e *pitch* para ondas de proa, través e popa

	Onda proa (0°)	Onda través (90°)	Onda popa (180°)
Frequência natural de <i>roll</i> , $w_n$	0,620	0,600	0,620
Frequência natural de <i>pitch</i> , $w_n$	0,600	0,620	0,600

A partir da Fig. (22) é possível observar a equivalência entre das curvas de RAO de *roll* e de *pitch*. Esta equivalência pode ser atribuída à forma cilíndrica da geometria escolhida para a simulação. Sendo assim o cilindro possui a mesma inércia de giro em relação ao eixo que passa pelo seu centro tanto para movimentos de *roll* quanto para movimentos de *pitch*.

Figura 22 – Curva de RAO de *roll* com incidência de onda de proa ( $0^\circ$ ) e RAO de *pitch* com incidência de onda de través ( $90^\circ$ )



#### 4.1.9 Influência do raio de giração e do centro de gravidade nos gráficos de RAO para movimentos de *heave* e de *roll*

##### 4.1.9.1 *Heave*

Na Tab. (8) são apresentados os dados referentes ao estudo de influência da posição vertical do centro de gravidade nas curvas de RAO de *heave* e na Tab. (9) são apresentados os dados referentes ao estudo de influência do raio de giração nas curvas de RAO de *heave*.

Tabela 8 – Estudo de influência do centro de gravidade

Posição x [m],	Posição y, [m]	Posição z, [m]	Frequência natural, $W_n$ [rad/s]
0	0	0	0,616
0	0	-2	0,616
0	0	-4	0,616
0	0	-6	0,616
0	0	-8	0,616

Tabela 9 – Estudo de influência do raio de giração

$K_{xx}$ , [m]	$K_{yy}$ , [m]	$K_{zz}$ , [m]	Frequência natural, $W_n$ [rad/s]
8	8	3	0,616
10	10	5	0,616
12	12	7	0,616
14	14	9	0,616
16	16	11	0,616

A partir das Tabelas Tab. (8) e Tab. (9) é possível observar que tanto a posição vertical do centro de gravidade quanto do raio de giração não influenciam no valor da frequência natural de *Heave*.

#### 4.1.9.2 Roll

Para estudar a influencia da posição vertical do centro de gravidade e do raio de giração nas curvas de RAO do movimento de *roll*, realizaram-se simulações variando tanto o centro de gravidade quanto o raio de giração a fim de verificar a influência de ambas as grandezas nas curvas de RAO. Nas Tab. (10), Tab. (11) e Tab. (12) estão contidos os dados referentes à estas simulações.

Tabela 10 – Estudo de influência do centro de gravidade

Posição x, [m]	Posição y, [m]	Posição z, [m]	Frequência natural, $W_n$ [rad/s] ; (0°)	Frequência natural, $W_n$ [rad/s] ; (90°)
0	0	0	0,620	0,600
0	0	-2	0,620	0,560
0	0	-4	0,620	0,520
0	0	-6	0,620	0,420

Tabela 11 – Estudo de influência do raio de giração mantendo as componentes x e y

Kxx, [m]	Kyy, [m]	Kzz, [m]	Frequência natural, $W_n$ [rad/s] ; (0°)	Frequência natural, $W_n$ [rad/s] ; (90°)
8	8	3	0,620	0,660
10	10	5	0,620	0,640
12	12	7	0,620	0,600
14	14	9	0,620	0,580
16	16	11	0,620	0,560

Tabela 12 – Estudo de influência do raio de giração mantendo distintas as componentes x, y e z

Kxx, [m]	Kyy, [m]	Kzz, [m]	Frequência natural, $W_n$ [rad/s] ; (0°)	Frequência natural, $W_n$ [rad/s] ; (90°)
8	10	3	0,620	0,660
10	12	5	0,620	0,640
12	14	7	0,620	0,600
14	16	9	0,620	0,580
16	18	11	0,620	0,560

A partir das Tab. (10), Tab. (11) e Tab. (12) observa-se que tanto a posição vertical do centro de gravidade quanto o raio de giração não influenciaram nas curvas de RAO com incidência de ondas de proa. Entretanto, por meio da Tab. (10), verifica-se que, para ondas de través, houve diminuição da frequência natural, em relação à linha d'água, à medida que o KG diminui. Esta diminuição pode ser atribuída quantitativamente à diminuição do GM que, conseqüentemente, diminui também a rigidez e a frequência natural progressivamente.

Adicionalmente aos fatores citados acima, para o movimento de *roll* com incidência de ondas de través, observou-se, que o aumento do raio de giração impactou de forma a diminuir progressivamente o valor da frequência natural (Tab. (11) e Tab. (12)). Quanto maior for o raio de giração, maior será a inércia de giro associada ao movimento de *roll* e, conseqüentemente, menor será a frequência de oscilação do corpo submetido a este movimento.

## 4.2 Banco de dados

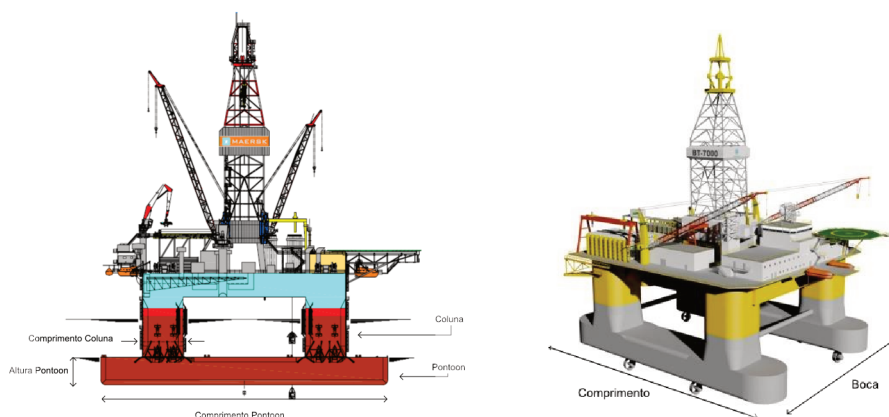
O objetivo deste capítulo recai em apresentar as principais plataformas *offshore* existentes em três dos quatro conceitos abordados no presente trabalho. O conceito de plataforma monocoluna não será abordado neste capítulo, pois, assim como já foi abordado no capítulo de fundamentação teórica, este é um conceito de unidade *offshore* ainda em desenvolvimento e com uma gama bastante restrita de unidades em operação.

Como ferramenta de pesquisa foram consultados sites das principais empresas atuantes no mercado *offshore*, selecionando as plataformas de acordo com a disponibilidade de dados.

### 4.2.1 Conceito de plataforma Semissubmersível

São apresentados no Anexo B, os dados referentes ao conceito de plataforma semissubmersível e, na Fig. (23), o design típico de uma plataforma semissubmersível contendo quatro colunas e dois *pontoons*.

Figura 23 – Design de perfil (*esquerda*) e em perspectiva (*direita*) de uma plataforma semissubmersível contendo quatro colunas e dois *pontoons*



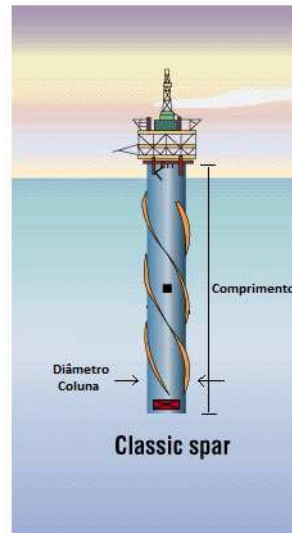
### 4.2.2 Conceito de plataforma FPSO - *Floating Production, Storage and Offloading*

São apresentados no Anexo C, os dados referentes ao conceito de plataforma FPSO.

### 4.2.3 Conceito de plataforma SPAR

No Anexo D, são apresentados os dados referentes ao conceito de plataforma SPAR e na Fig. (24) o design típico deste tipo de plataforma.

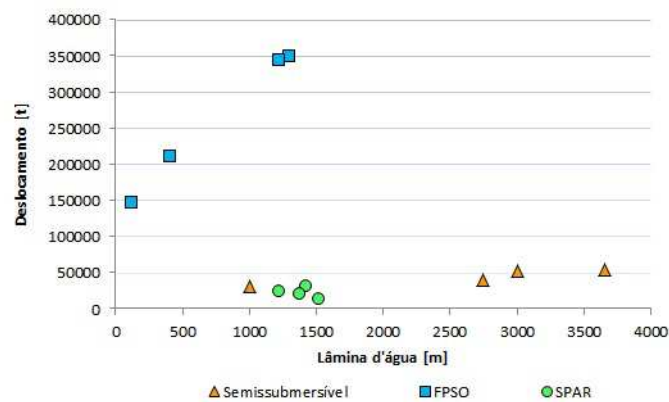
Figura 24 – Design clássico de uma plataforma SPAR



### 4.2.4 Análise do banco de dados

O gráfico contido na Fig. (25) representa o deslocamento como função da lâmina d'água de operação para os diferentes conceitos abordados no presente trabalho, com exceção da monocoluna por ainda não possuir unidades operantes.

Figura 25 – Deslocamento em função da lâmina d'água das doze plataformas provenientes do banco de dados



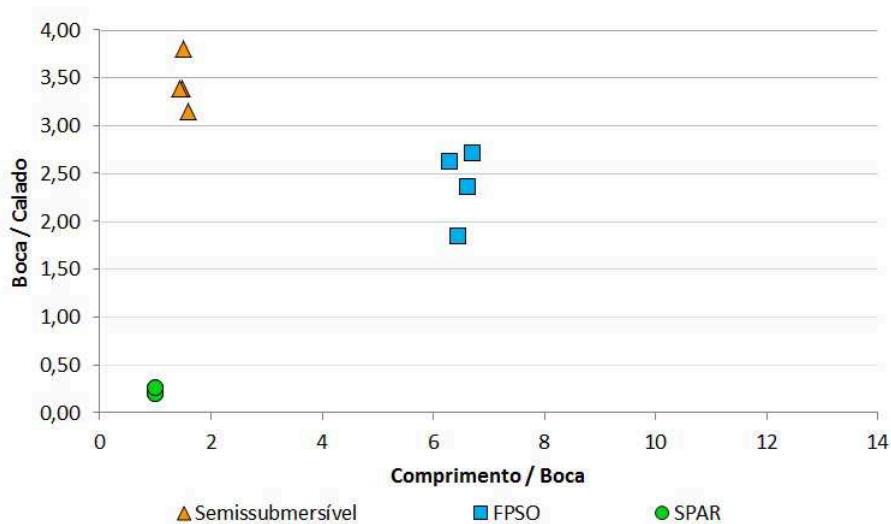
Da Fig. (25) é possível visualizar a região de operação das plataformas SPAR, FPSO e semissubmersível. Em relação ao intervalo de operação, observou-se que todos os modelos contemplados no banco de dados se mantiveram em um intervalo de lâmina d'água de 122 m (semissubmersível) até 3.650 m (semissubmersível) com faixa de deslocamento

de 12.891 t (SPAR) até o máximo de 348.177 t (FPSO). De maneira geral, o conceito de plataforma semissubmersível localizou-se em uma região de maior lâmina d'água em relação às demais.

É possível perceber também que ambos os conceitos, SPAR e semissubmersível, possuem deslocamento máximo de 50.000 t. Já as plataformas FPSOs possuem deslocamento de no mínimo de 150.000 t. Baseado nestes dados, é possível afirmar que, neste caso, as plataformas SPAR e semissubmersível possuem deslocamento menor do que plataformas FPSO.

Na Fig. (26), estão representados os adimensionais Boca/Calado (B/H) e Comprimento/Boca (L/B) para as doze plataformas contidas no banco de dados.

Figura 26 – Adimensionais B/H e L/B advindos das doze plataformas contidas no banco de dados



Da Fig. (26) observa-se que as plataformas SPAR se situaram no extremo inferior do gráfico, possuindo baixos valores de L/B e B/H. Os baixos valores de B/H podem ser associados a característica da SPAR de ser uma plataforma bastante profunda quando comparado aos demais conceitos, possuindo cerca de 90% do seu comprimento vertical localizado abaixo da linha d'água. Quanto aos valores de L/B, eles são constantes e iguais a uma unidade devido a concepção cilíndrica da geometria.

Da Fig. (26) também é possível perceber que as plataformas FPSO apresentaram os maiores valores associados a relação L/B. Este fato pode ser associado a dimensão de comprimento ser razoavelmente maior do que a dimensão de boca.

Ainda em relação a Fig. (26), é possível perceber que as semissubmersíveis se mantiveram no topo do gráfico, obtendo os maiores valores da relação de B/H em comparação aos demais conceitos.

Uma peculiaridade da semissubmersível de quatro colunas é de que, por ela ser tipi-

camente quadrada, ela possui estabilidade longitudinal bastante semelhante à estabilidade transversal. Isto também pode ser observado na ordem de grandeza dos adimensionais  $L/B$  e  $B/H$ , os quais na semissubmersível são da mesma ordem de grandeza e muito semelhantes. Este fato também ocorre em plataformas SPAR.

### 4.3 Modelagem SPAR

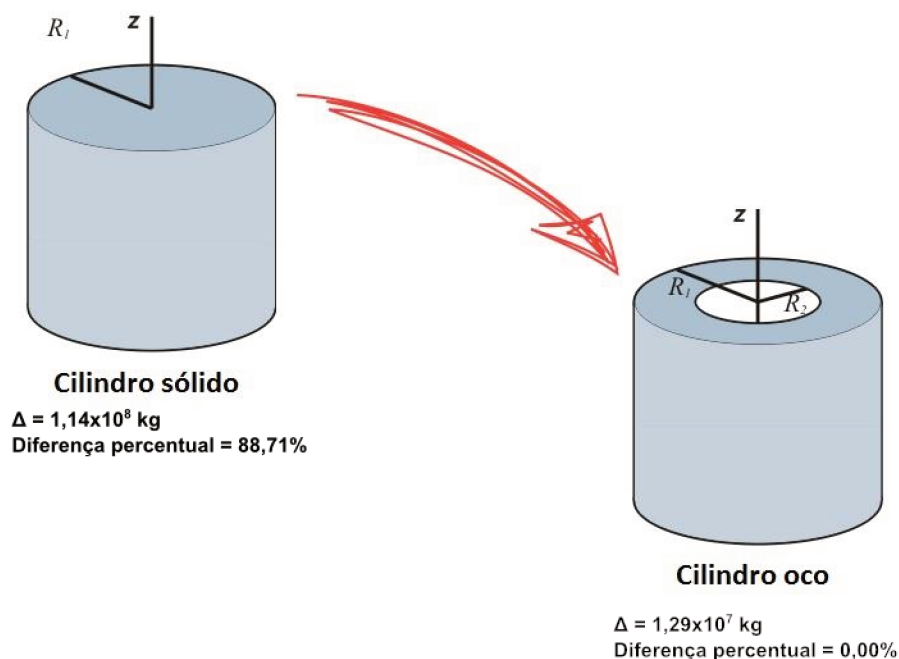
O conceito de plataforma SPAR é caracterizado por uma geometria de forma cilíndrica, com 90% do seu comprimento submerso.

Inicialmente, optou-se por caracterizar a geometria através de um corpo cilíndrico sólido. Porém, ao transpor as dimensões principais do banco de dados para a planilha de cálculos analíticos, percebeu-se que o deslocamento contido no banco de dados divergia consideravelmente do deslocamento obtido analiticamente.

Objetivando encontrar uma geometria que melhor caracterizasse o modelo real, optou-se por utilizar um corpo cilindro oco de deslocamento correspondente ao contido no banco de dados.

A Fig. (27) representa a diferença percentual de deslocamento presente em uma geometria composta por um corpo cilíndrico sólido e, posteriormente, por um corpo cilíndrico oco de um mesmo modelo de plataforma SPAR contido do banco de dados.

Figura 27 – Geração da geometria característica de uma plataforma tipo SPAR



A partir da Fig. (27) é possível observar que, ao utilizar uma geometria composta por um cilindro sólido, a diferença percentual do deslocamento em relação ao modelo real é bastante significativa, aproximadamente 89%. Já para uma geometria composta por um

o cilindro oco, essa diferença percentual cai para 0%, salientando assim, a importância da utilização de procedimentos adequados na etapa de caracterização da geometria, previamente ao processo de modelagem.

Sendo assim, para a geração da geometria dos quatro modelos contidos no banco de dados, o procedimento foi bastante semelhante. Primeiramente trasladou-se as respectivas dimensões principais do modelo real contido no banco de dados para a planilha de cálculos analíticos. Depois, utilizou-se a ferramenta de Solver, presente no Excel, para encontrar o raio interno que tornasse o deslocamento do corpo cilíndrico oco igual ao deslocamento do modelo real. De posse destes parâmetros, gerou-se as quatro geometrias que irão compor a modelagem dos quatro *cases* de plataformas reais no AQWA.

Utilizando o procedimento de obtenção dos parâmetros do corpo cilíndrico, descrito anteriormente, gerou-se as geometrias dos modelos de plataforma SPAR, baseadas nas dimensões contidas na Tab. (13).

Tabela 13 – Dimensões principais dos modelos de plataforma SPAR

Modelo	Raio interno [m]	Raio externo [m]	Calado, H [m]	Pontal, D [m]
Constitution	14,32	15,20	153,50	17,05
Diana	17,55	18,90	196,70	21,85
Mag Dog Field	18,36	19,50	150,80	16,76
Tahiti	18,62	19,90	154,8	17,2

Em seguida foram feitos os cálculos analíticos de estimativa da frequência natural para cada um dos modelos através de uma planilha no *Excel*, Tab. (14).

Tabela 14 – Principais dados provenientes da planilha de cálculos analíticos

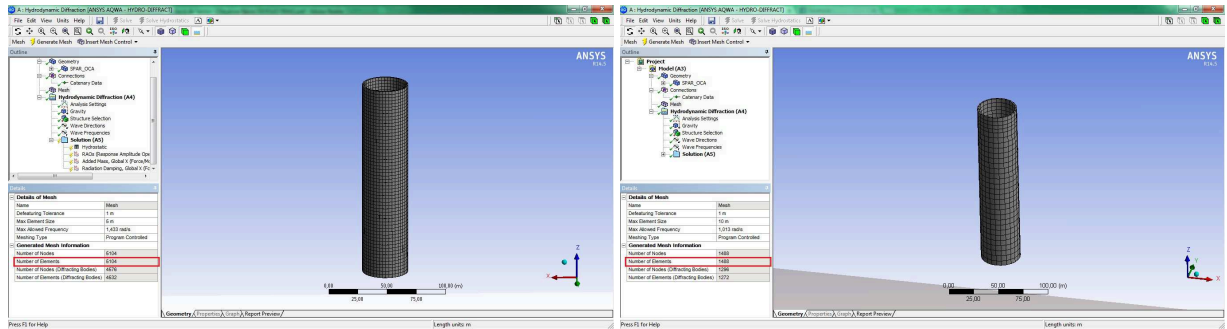
Modelo	Calado, H [m]	Deslocamento total da plataforma, $\Delta$ [t]	Rigidez, k [N/m]	Frequência natural, $w_n$ [rad/s]
Constitution	153,5	12.891	$8,23 \times 10^5$	0,253
Diana	196,7	31.224	$1,56 \times 10^6$	0,223
Mag Dog Field	167,6	21.000	$1,36 \times 10^6$	0,255
Tahiti	154,8	23.500	$1,49 \times 10^6$	0,252

De posse da geometria, ajustou-se os parâmetros de simulação no AQWA, utilizando, inicialmente, uma malha com *Max element Size* de 10m e *defeaturing tolerance* de 1m, aproximadamente 1500 elementos, para as plataformas Constitution, Diana e Tahiti, e uma malha com *Max element Size* de 5m e *defeaturing tolerance* de 1m, aproximadamente 5000 elementos, para a Mag Dog Field.

Ajustada a malha, o passo seguinte foi ajustar o range de frequências. A abordagem escolhida para tal procedimento foi gerar um range capaz de rodear a frequência natural



Figura 28 – Representação de uma malha com 1500 e 5000 elementos



(a) Geometria com aprox. 1500 elementos

(b) Geometria com aprox. 5000 elementos

analítica partindo de um valor 10% menor, 0,15 rad/s, até um valor 10 % maior, 0,35 rad/s.

Na Tab. (15) estão apresentados os resultados comparativos entre a frequência natural analítica e numérica para cada um dos modelos de plataforma SPAR e, na Fig. (29), as curvas de RAO de ambas as quatro análises.

Tabela 15 – Principais dados provenientes da planilha de cálculos analíticos

Modelo	Constitution	Diana	Mag Dog Field	Tahiti
Frequência natural teórica, $w_{nt}$ [rad/s]	0,253	0,223	0,255	0,252
Frequência natural numérica, $w_{nnum}$ [rad/s]	0,248	0,219	0,254	0,252
Diferença percentual [%]	1,98	1,79	0,39	0

A partir da Fig. (29) é possível observar que, para os modelos Constitution e Diana, a curva analítica se encontra levemente deslocada à direita da curva numérica, representando a diferença de 1,98% e 1,79% contidas na Tab. (15), respectivamente.

É importante salientar que a diferença percentual da Mag Dog Field apresentou-se nesta magnitude devido principalmente ao refino realizado na malha, extinguindo assim, o passo seguinte de calibração do modelo, relacionado ao ajuste de massa adicional. Porém, a que se lembrar que, como demonstrado na etapa de validação de dados, o tempo de simulação pode ser aproximado à um comportamento regido por uma função exponencial. Sendo assim, o tempo aumenta exponencialmente com o aumento do número de elementos contidos na malha.

Na Tab. (16), realizou-se uma comparação do tempo, em minutos, entre duas análises utilizando duas geometrias, uma delas com aproximadamente 1500 elementos, mesmo valor utilizado nas modelagens da Constitution, Diana e Tahiti, e uma segunda análise, utilizando aproximadamente 5000 elementos, mesmo valor utilizado para Mag Dog Field.

Figura 29 – Resultados comparativos de frequência natural analítica X numérica

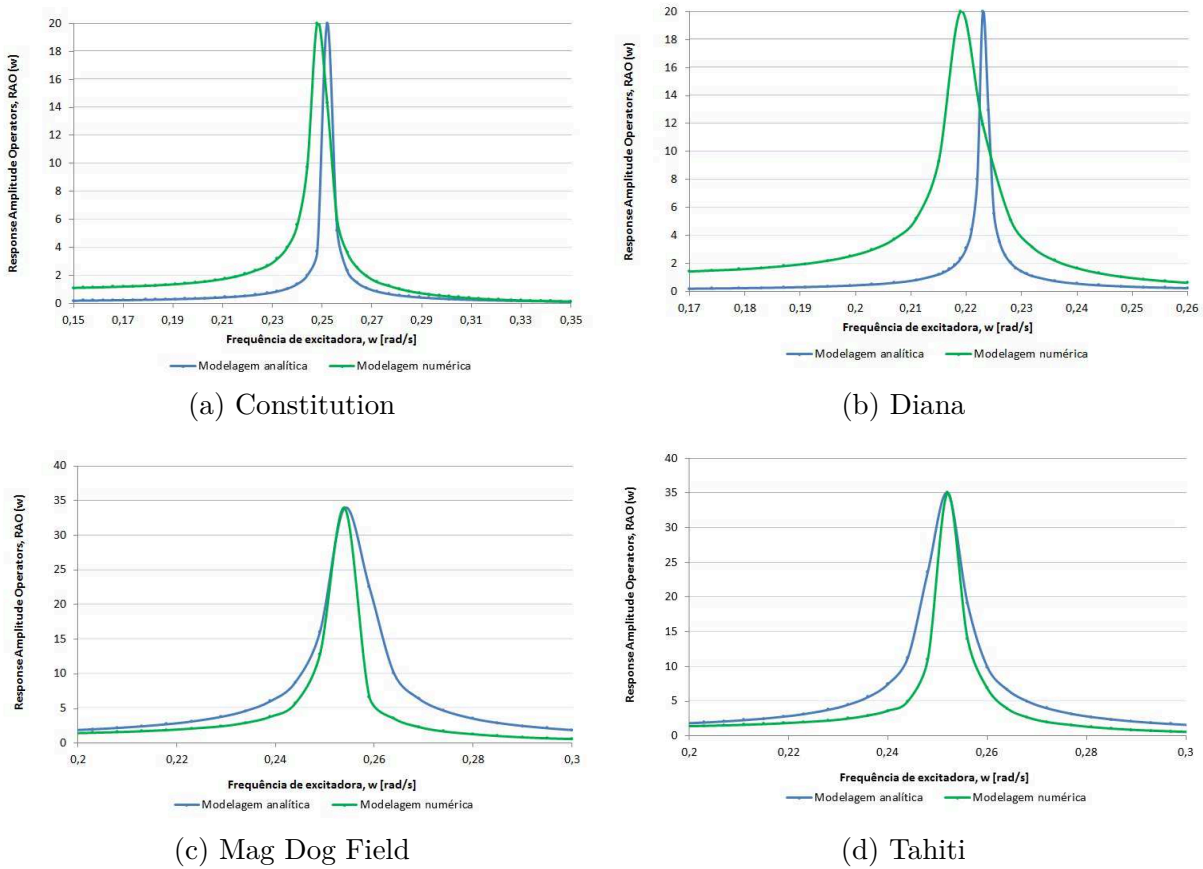


Tabela 16 – Número de elementos X tempo de simulação

Número de elementos	Tempo, t
1500 elementos	20 min
5000 elementos	400 min $\approx$ 7 horas

A partir da Tab. (16), é possível perceber que houve um acréscimo de quase duzentas vezes no tempo de simulação requerido na análise.

Por este motivo, neste caso, é mais viável, em relação ao tempo de simulação, rodar uma análise de 20 min, fazer o ajuste de massa adicional no cálculo analítico e conviver com uma diferença percentual de aproximadamente 1,2% do que rodar uma análise de quase 7 horas para reduzir a diferença percentual para 0,39%.

Em relação ao modelo Tahiti, como as curvas de RAO analítica e numérica se apresentaram coincidentes, não foi necessário executar o passo de ajuste do valor de massa adicional para calibração do modelo analítico.

Finalmente, objetivando minimizar a diferença entre as curvas de RAO numérico e analítico das plataformas Constitution e Diana, realizou-se o ajuste na curva de RAO

analítico impondo os valores de massa adicional provenientes da modelagem numérica no AQWA, estando estes valores contidos na Tab. (17).

Tabela 17 – Valores de massa adicional associado aos modelos de plataformas SPAR

Modelo	Massa adicional, $M_a$
Constitution	125,7 t
Diana	265,2 t

Na Tab. (18), estão contidas as frequências naturais analíticas com e sem o ajuste de massa adicional, as reduções percentuais da frequência natural em relação ao emprego do ajuste de massa adicional, as frequências naturais obtidas numericamente e as diferenças percentuais associadas a frequência natural numérica e a analítica com o ajuste de massa adicional.

Tabela 18 – Resultados comparativos

Modelo	Constitution	Diana
Frequência natural teórica s/ ajuste de massa adicional ( $Wn_t$ )	0,253 rad/s	0,223 rad/s
Frequência natural teórica c/ ajuste de massa adicional ( $Wn_t$ )	0,251 rad/s	0,222 rad/s
Redução percentual (%)	0,8%	0,4%
Frequência natural numérica ( $Wn_{num}$ )	0,248 rad/s	0,219 rad/s
Diferença percentual (%)	1,20%	1,35%

Por meio da Tab. (18) é possível perceber que, para a Constitution, com o emprego do valor de massa adicional na análise analítica, houve diminuição na diferença percentual entre as frequências naturais analítica e numérica, de 1,98%, obtida sem o ajuste de massa adicional, para 1,20%, obtida com o ajuste de massa adicional. Sendo, neste caso, a massa adicional responsável pelo decréscimo de 0,78% na diferença percentual entre estas frequências. A que se destacar também que, como esperado, este valor de 0,78% praticamente coincide com a redução percentual de 0,8% no valor da frequência natural analítica com e sem o ajuste de massa adicional.

Para a o modelo de plataforma Diana, com o emprego do valor de massa adicional na análise analítica, houve diminuição na diferença percentual entre as frequências naturais analítica e numérica, de 1,79%, obtida sem o ajuste de massa adicional, para 1,35%, obtida com o ajuste de massa adicional. Sendo, neste caso, a massa adicional responsável pelo decréscimo de 0,44% na diferença percentual entre estas frequências. E, como esperado, este valor de 0,44% praticamente coincide com a redução percentual de 0,4% no valor da frequência natural analítica com e sem o ajuste de massa adicional.

A diferença percentual restante em ambos os casos pode ser atribuída ao fator de amortecimento que, nos cálculos analíticos, foi desconsiderado, e, também, a uma possível

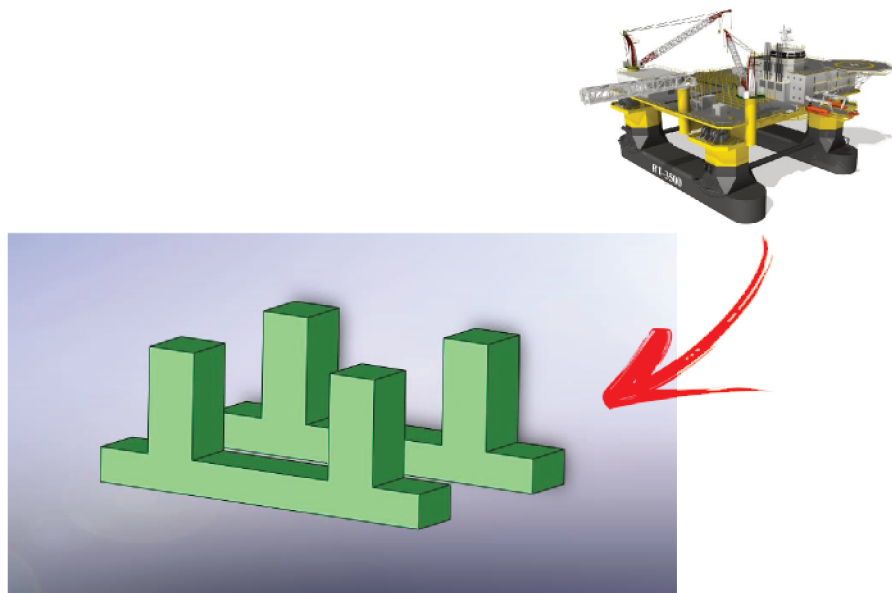
variação da frequência natural numérica associada ao número de elementos utilizados na análise.

#### 4.4 Modelagem semissubmersível

Previamente ao processo de modelagem é necessário determinar a geometria que será avaliada, de forma a realizar o mesmo procedimento de análise para os quatro modelos de plataforma semissubmersível previamente coletados na etapa de geração do banco de dados.

Sendo assim, as geometrias foram geradas através da interface do *SolidWorks* e representadas por dois *pontoons* e quatro colunas, ambos com área de seção quadrada bem como representado na Fig. (30). É importante observar que a geometria gerada em CAD deve equilibrar a necessidade de simplificar a geometria real sem acarretar perdas no entendimento dos fenômenos estudados. No caso do presente trabalho, como o estudo está voltado para os fenômenos gerados abaixo da linha d'água, toda a superestrutura da plataforma foi retirada da modelagem em CAD.

Figura 30 – Processo de modelagem em CAD da geometria de uma plataforma semissubmersível

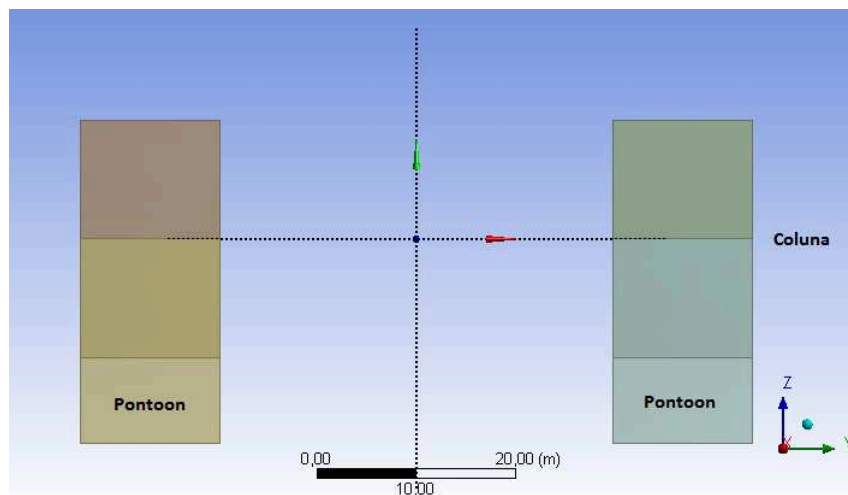


A sutileza nos cálculos analíticos da plataforma semissubmersível em relação ao conceito de plataformas SPAR e monocoluna recai sobre a quantificação da massa adicional relacionada à geometria. No capítulo de modelagem da SPAR, o passo do cálculo da massa adicional foi apenas ao final da modelagem na etapa de calibração do modelo, já na modelagem da semissubmersível este cálculo passa a ser realizado na etapa inicial de estimativa do valor da frequência natural. Isto porque as plataformas semissubmersíveis, diferentemente das plataformas SPAR e monocoluna, possuem dois flutuadores (*pontoons*)

e, estes flutuadores, quando se movimentam transversalmente ao seu eixo longitudinal, geram uma quantidade de massa adicional de magnitude igual à massa do volume deslocado pelo próprio *pontoon*. Também, relacionado ao cálculo da massa adicional, foi utilizado um termo multiplicativo no cálculo da massa adicional para cada modelo separadamente. Este coeficiente provém de dados empíricos para o cálculo de massa adicional relacionados colunas retangulares.

Outro fator importante na análise deste tipo de conceito de plataforma é a caracterização das forças de *Froude-Kriloff* atuantes nos dois conjuntos de colunas/*pontoon* existentes. Elas representam as forças de excitação atuantes em cada coluna da plataforma, porém, como o movimento do conjunto colunas/*pontoon* é acoplado, ele pode ser analisado como sendo um corpo único, representado na Fig. (31).

Figura 31 – Representação dos conjuntos colunas/*pontoon* da semissubmersível

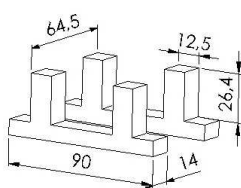


O passo inicial da modelagem dos modelos de plataforma semissubmersível caracterizou-se por transladar as respectivas dimensões principais do banco de dados para o CAD gerado no *SolidWorks*, conforme demonstrado na Fig. (32).

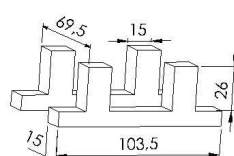
Em seguida foram feitos os cálculos analíticos de estimativa da frequência natural através de uma planilha no *Excel*, Tab. (19).

Da Tab. (20) é possível verificar a magnitude da massa adicional gerada por uma plataforma semissubmersível com as dimensões representadas na Fig. (32d). Neste caso a

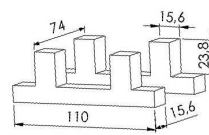
Figura 32 – Dimensões principais, em metros, dos modelos de plataforma semissubmersível



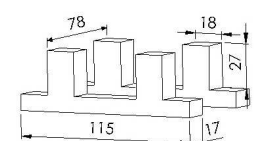
(a) Heydar Aliyev



(b) Gold Star



(c) Scarabeo 9



(d) Maersk Deliverer

Tabela 19 – Resultados comparativos de massa adicional

Modelo	Heydar Aliyev	Gold Star	Scarabeo 9	Maersk Deliverer
Calado, H [m]	20,5	20,5	23,6	20,5
Volume deslocado pelas colunas, $V_{colunas}$ [ $m^3$ ]	14.350	18.450	22.973	25.092
Volume deslocado pelos <i>pontoons</i> , $V_{ponton}$ [ $m^3$ ]	21.672	27.945	40.832	41.400
Deslocamento total da plataforma, $\Delta$ [t]	30.752	39.252	53.826	53.251
Massa adicional, $m_a$ [t]	31.987	43.794	50.223	60.517
Rigidez, k [N/m]	$7,03 \times 10^6$	$9,04 \times 10^6$	$9,78 \times 10^6$	$1,23 \times 10^7$
Frequência natural, $w_n$ [rad/s]	0,335	0,330	0,307	0,329

Tabela 20 – Resultados comparativos de massa adicional

Modelo	Heydar Aliyev	Gold Star	Scarabeo 9	Maersk Deliverer
$\left(\frac{m_a}{\Delta}\right) \cdot 100$	104	110	93	113
Erro associado à plataforma real (%)	0,8	0,2	0,05	0,5

massa adicional representa em média aproximadamente 105% do valor do deslocamento da plataforma, salientando a sua importância na determinação prévia da frequência natural.

Outra informação importante é do deslocamento analítico total da plataforma, o qual apresentou um erro médio de aproximadamente 0,34% em relação à plataforma real, caracterizando um resultado satisfatório de calibração do modelo. Quanto menor o erro associado ao deslocamento do modelo, mais próximo ao comportamento real da plataforma está à modelagem.

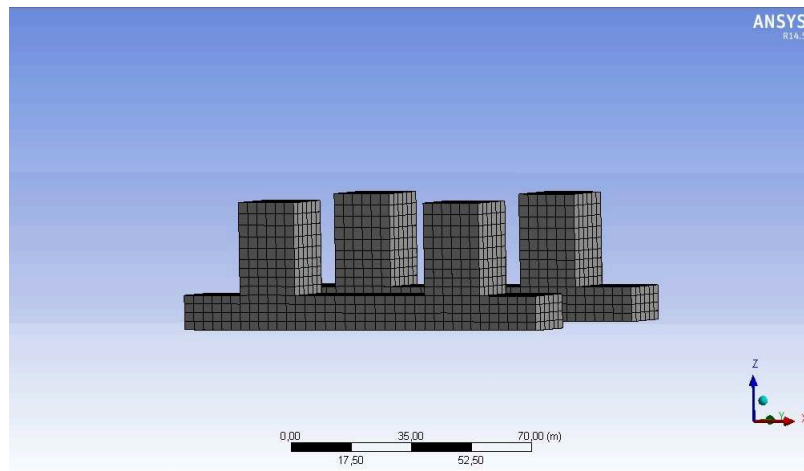
O passo seguinte foi importar as geometrias geradas no CAD para o AQWA e ajustar os parâmetros da simulação.

Inicialmente, na modelagem da Heydar Alyev, optou-se por utilizar uma malha com *Max element Size* de 4m e *defeaturing tolerance* de 0,9m, porém com algumas interações, procedimento semelhante ao adotado no capítulo de validação do software, foi possível observar que a partir de uma malha com *Max element Size* de 5,5m e *defeaturing tolerance* de 0,9m, totalizando 1688 elementos, o valor da frequência natural se mantinha constante, aumentando somente o gasto computacional. Na Figura Fig. (33) está contida a representação de malha utilizada na modelagem da Heydar Alyev.

Ajustada a malha, o passo seguinte foi ajustar o range de frequências. A abordagem escolhida para tal procedimento foi de iniciar a simulação com um *range* controlado pelo *software*, indicando somente o número de frequências e, em seguida, estreitar o intervalo de frequências até a obtenção de um valor próximo ao obtido no cálculo analítico.

A primeira simulação, para um *range* de 50 frequências, rodou bem e gerou um *report*. Porém ao introduzir no *software* um *range* controlado de frequências o AQWA acusou um erro associado à distorção gerada na malha durante a simulação. Sendo assim, iniciou-se uma investigação com duas hipóteses iniciais, uma de que o estreitamento do

Figura 33 – Representação da malha utilizada na Heydar Alyev



*range* de frequências em torno da frequência natural estaria causando distorção na malha e outra de que uma frequência em específico estaria causando este erro.

Primeiramente dividiu-se o *range* de frequências de forma a cercar a frequência natural estimada inicialmente no cálculo analítico ( simulações 1 e 2) e, na simulação 3, excluiu-se o segundo *range* de frequências da simulação 2 a fim de testar a hipótese no erro associado ao estreitamento do *range*.

Tabela 21 – Arranjo dos testes com a divisão do *range* de frequências

Simulação 1	0,1 - 0,3 0,6 - 0,8
Resultado	<i>Report</i> gerado
Simulação 2	0,15 - 0,35 0,55 - 0,75
Resultado	<i>Report</i> gerado
Simulação 3	0,15 - 0,35
Resultado	<i>Report</i> gerado

Através dos resultados contidos na Tab. (21) foi possível descartar a hipótese de que o estreitamento no *range* de frequências poderia estaria causando distorção na malha. Com a análise dos *reports* gerados, verificou-se também que em ambas as três simulações a frequência natural era da ordem de 0,3 rad/s, descartando também a possibilidade de erro associado unicamente a presença da frequência natural.

Rodando mais alguns testes pode-se perceber que as frequências problemáticas, para este modelo de plataforma, estavam contidas no intervalo de 0,6 rad/s a 0,7 rad/s e que, analisando o primeiro *report* gerado sem controle de *range* para 50 frequências, é exatamente neste intervalo que o gráfico das forças de *Froude-Krillof* apresentou anomalia.

Esta anomalia está ligada à um efeito de segunda ordem. Sendo assim, o erro estava associado a este intervalo anômalo contido no gráfico das forças de *Froude - Krillof*.

Com o objetivo de evitar o erro de distorção de malha discutido acima, a modelagem no AQWA foi elaborada da seguinte forma:

- Simulação com *range* de frequências controlado pelo *software*;
- Identificação das frequências problemáticas no gráfico de *Froude-Krillof*;
- Simulação com *range* introduzido pelo usuário evitando as frequências problemáticas.

Diferentemente da modelagem de um cilindro, a geração do gráfico de RAO analítico de uma plataforma semissubmersível sai do escopo a que se propõe este trabalho por envolver efeitos adicionais provenientes da interação das forças de *Froude-krillof* nos dois conjuntos colunas/*pontoon*. Sendo assim, na Tab. (22) são apresentados os resultados comparativos entre as frequências naturais analíticas e a numéricas de cada um dos modelos de plataforma semissubmersível e na Fig. (34) é possível identificar a localização destas frequências naturais nos gráficos de RAO gerados no AQWA.

Tabela 22 – Resultados comparativos de frequência natural analítica X numérica

Modelo	Heydar Aliyev	Gold Star	Scarabeo 9	Maersk Deliverer
Frequência natural teórica, ( $W_{nt}$ ) [rad/s]	0,335	0,330	0,307	0,329
Frequência natural numérica, ( $W_{nnum}$ ) [rad/s]	0,335	0,329	0,304	0,327
Diferença percentual (%)	0,0	0,4	0,8	0,5

A partir da Tab. (22) é possível perceber que, em média, a diferença entre o valor da frequência natural analítica e numérica se manteve em 0,4%, isto pode ser observado também nos gráficos contidos na Fig. (34), nos quais a localização das frequências naturais analíticas praticamente coincidem com o ponto de máximo dos gráficos de RAO gerados na modelagem numérica.

No passo seguinte comparou-se os valores de massa adicional encontrados analiticamente com os obtidos numericamente. Na Tab. (23) estão descritos os resultados comparativos destes valores.

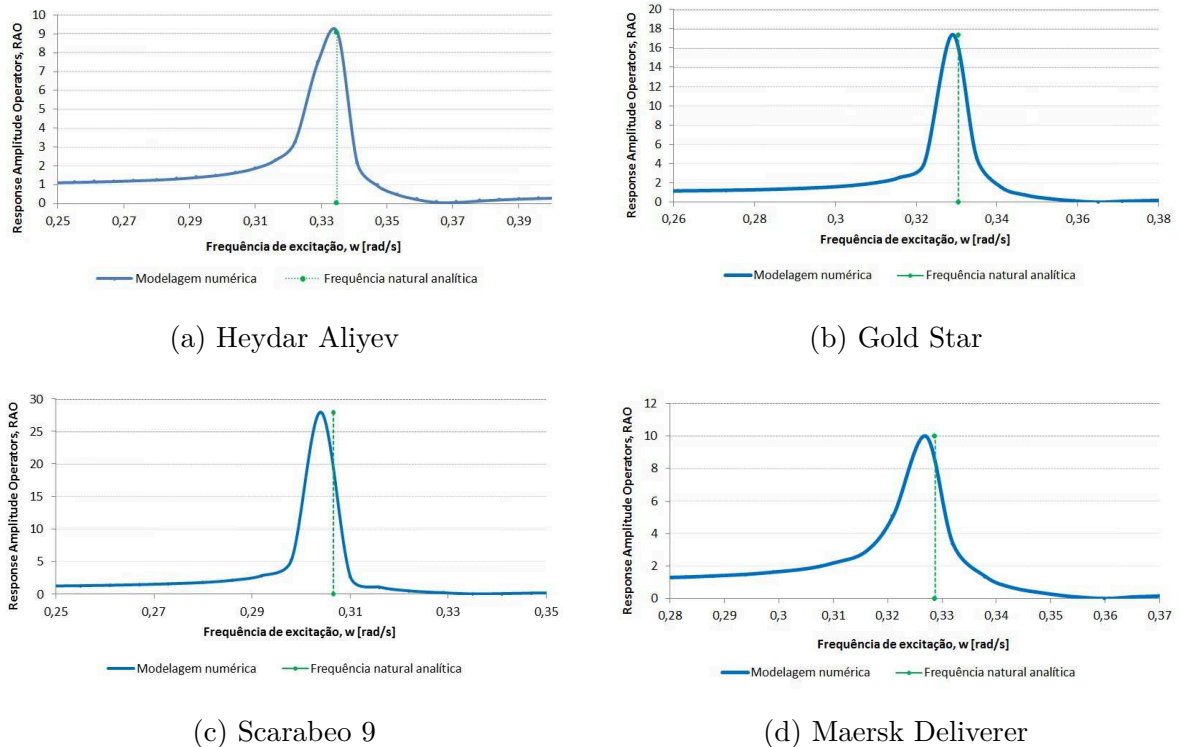
Tabela 23 – Resultados comparativos de massa adicional

Modelo	Heydar Aliyev	Gold Star	Scarabeo 9	Maersk Deliverer
Massa adicional analítica, $Ma_t$ [t]	31.988	43.538	50.223	60.517
Massa adicional numérica, $Ma_{num}$ [t]	33.025	43.794	52.565	61.841
Diferença percentual (%)	3,14	0,6	4,7	2,1

A partir da Tab. (23) observa-se que o erro associado ao cálculo da massa adicional analítica resultou em um intervalo de diferença percentual de 0,6% até 4,7%, em relação



Figura 34 – Localização da frequência natural analítica na curva de RAO gerada através do AQWA

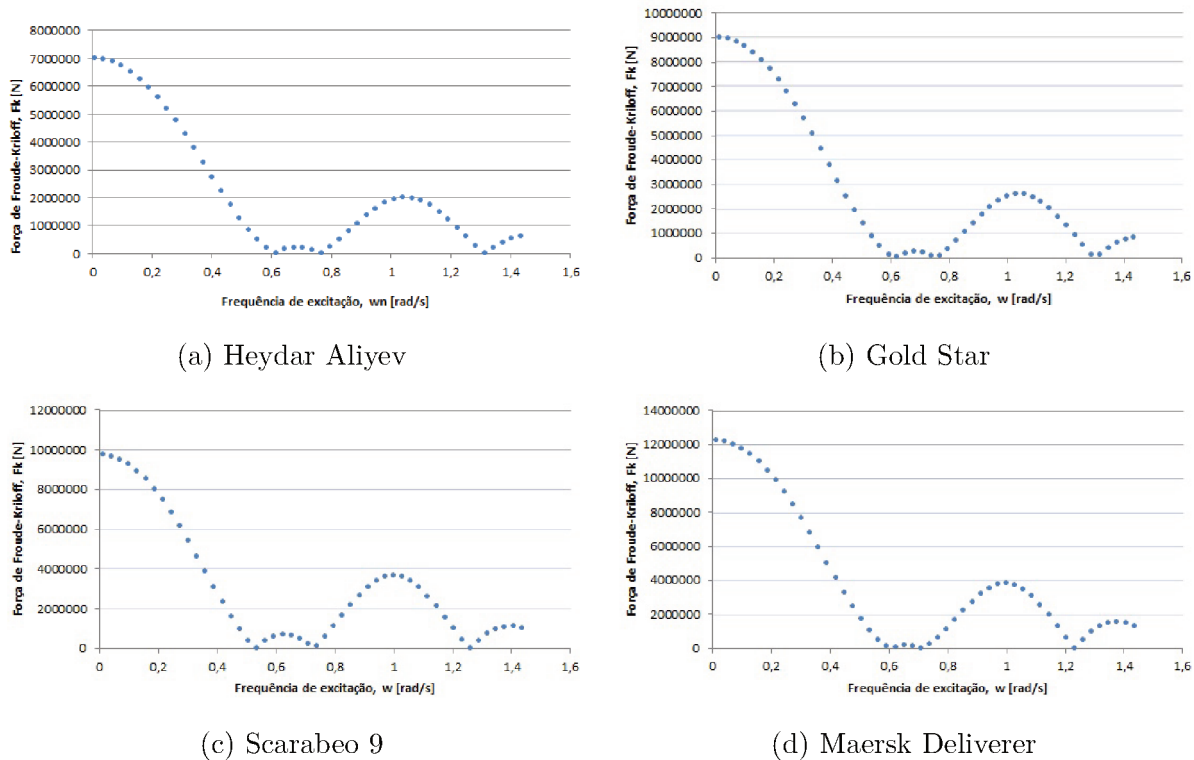


ao valor obtido numericamente. Essas diferenças podem ser atribuídas ao próprio cálculo analítico, no qual utilizou-se de um coeficiente empírico multiplicativo no cálculo de massa adicional de um retângulo. E também ao fator de amortecimento que, nos cálculos analíticos, foi desconsiderado.

Por fim, foi gerado o gráfico das forças de *Froude-Kriloff* para a caracterização desta força de excitação atuante nas colunas. Na Fig. (35) estão contidos os gráficos das forças de *Froude-Kriloff* para os modelos de plataforma semissubmersível.

A partir dos gráficos contidos na Fig. (35) é possível perceber que o intervalo de máxima força de *Froude-Kriloff* resultante sobre a estrutura corresponde aos valores de baixa frequência. Este intervalo parte de um máximo, onde o comprimento da onda é tão grande em relação a distância entre *pontoons* que a onda provoca o mesmo campo de pressões em ambos os conjuntos colunas/*pontoon* e, à medida que a frequência desta onda aumenta, o comprimento dela diminui e conseqüentemente o campo de pressões em cada conjunto vai diferindo até chegar ao ponto de anulamento, no qual a resultante de um conjunto vai ser de igual módulo e sentido oposto ao outro.

Este raciocínio se aplica também aos pontos de máximo, nos quais há uma crista em cada conjunto colunas/*pontoon*. Porém a medida que a frequência da onda vai aumentando, o comprimento de onda vai diminuindo ao ponto que, em ondas com comprimento muito

Figura 35 – Gráficos de atuação das forças de *Froude-Kriloff*

superior à distância entre *pontoons*, a força de excitação nas colunas são insignificantes não gerando modificação no campo de pressão atuante sobre elas.

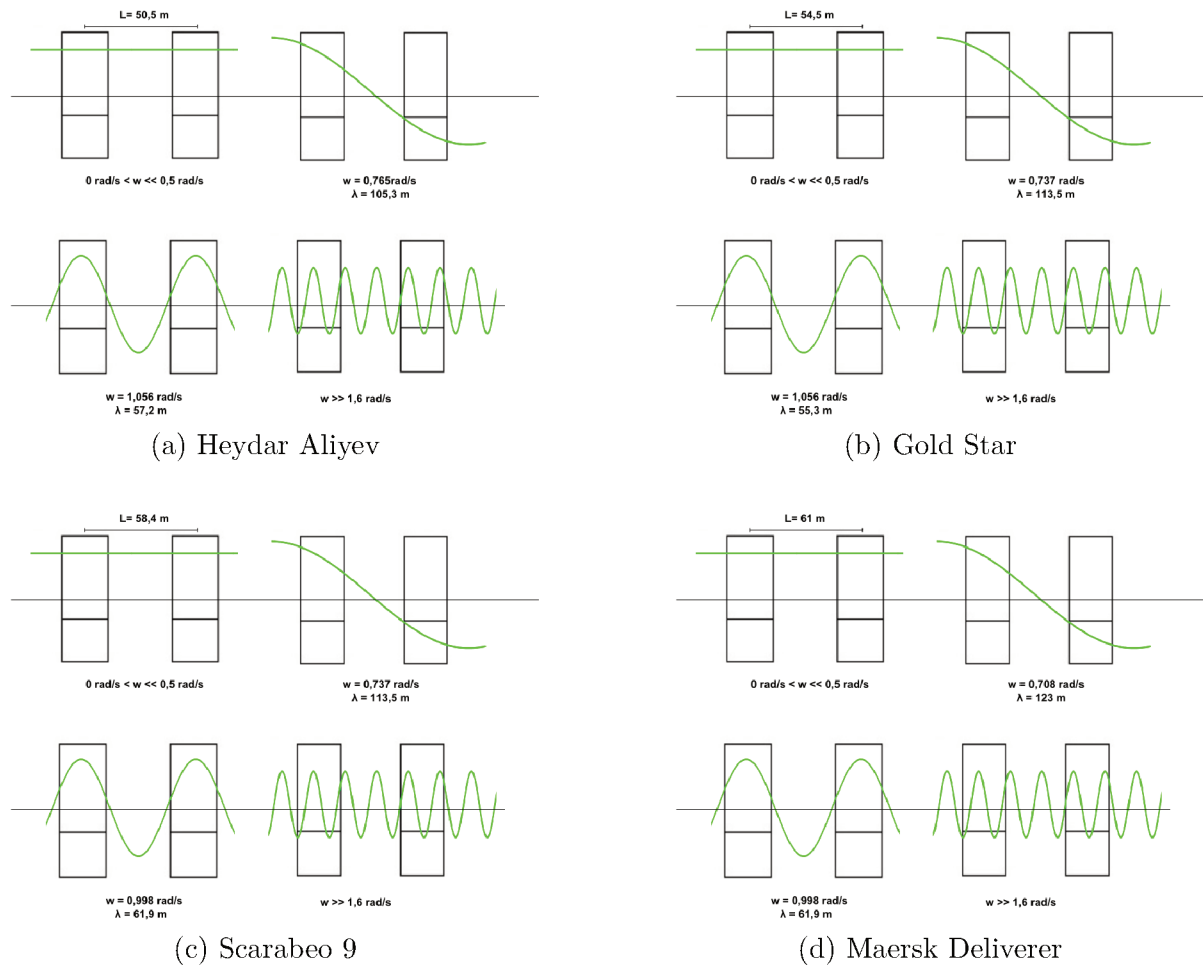
Na Fig. (35) também é possível identificar o intervalo de comportamento anômalo nos gráficos das forças de Froude-Kriloff, estando estes contido aproximadamente entre as frequências 0,5 e 0,8 rad/s. E, devido a dificuldade de caracterizar este intervalo, ele foi desconsiderado da análise, utilizando o primeiro ponto de anulamento como sendo o ponto de anulamento seguido deste.

Na Fig. (36), estão representados os principais pontos do gráfico das forças de Froude-Kriloff para os modelos de plataforma semissubmersível, bem como as frequências ou intervalo de frequências nos quais eles ocorrem.

Na Fig. (36), a primeira ilustração, da esquerda para a direita, de ambos os modelos de plataforma representam uma onda de baixa frequência, na qual a resultante em cada um dos conjuntos colunas/*pontoon* é igual, sendo assim, os modelos de plataforma possuem deslocamentos máximos para ondas contidas neste intervalo.

As ilustrações à direita e acima de (a), (b), (c) e (d), na Fig. (36), representam o primeiro ponto de anulamento da força de *Froude-Kriloff* para os modelos de plataforma, nos quais a resultante de um conjunto possui mesmo módulo e sentido oposto ao outro.

As ilustrações abaixo e à esquerda, representam o primeiro ponto de máximo, no qual o comprimento de onda gera uma crista em ambos conjuntos colunas/*pontoon*,

Figura 36 – Representação dos pontos principais na análise das forças de *Froude-Kriloff*

Por fim, as ilustrações abaixo e à direita, representam ondas de alta frequência, a quais não geram modificações no campo de pressão atuante na coluna da plataforma. Sendo assim, a estrutura é praticamente transparente a passagem de ondas contidas neste intervalo.

## 4.5 Modelagem FPSO - *Floating Production Storage and Offloading*

De maneira semelhante ao que vinha sendo feito nos conceitos de plataforma anteriores, o passo inicial de modelagem de plataformas FPSOs consiste na caracterização da geometria.

Nesta etapa, primeiramente optou-se por reduzir os modelos contidos no banco de dados aplicando a eles um fator de escala, minimizando assim o tempo de simulação requerido.

Para escolha de um fator de escala adequado, foram realizadas três simulações. Nestas simulações utilizou-se um mesmo modelo de plataforma FPSO, variando o fator de escala e mantendo constante os parâmetros de construção de malha, *Max element size* e *Defeaturing tolerance*.

Por fim, realizou-se a estimativa do tempo destinado à simulação do modelo em escala real, 1:1, mantendo constante os parâmetros de construção de malha. Essa estimativa foi feita baseado na dependência exponencial entre o número de elementos e o tempo de simulação.

Na Tab. (24) abaixo estão contidos os resultados provenientes das simulações.

Tabela 24 – Testes para diferentes fatores de redução de escala

Fator de escala	Frequência natural, $w_n [rad/s]^3$	Diferença percentual, %	Nº de elementos	Tempo de simulação
1:10	0,566	1,23	1.200	15 min
1:5	0,565	1,03	2.400	37 min
1:2	0,562	0,49	6.000	549 min $\approx$ 9 horas
1:1	0,559	0	12.000	49.417 min $\approx$ 34 dias

Através da Tab. (24) é possível visualizar que apesar de a escala 1:10 apresentar a menor diferença percentual em relação as demais escalas, o ganho de tempo em simulação compensa a sua utilização. Outro aspecto é que a diferença percentual de 1,23% é aceitável, visto que nos conceitos anteriores conviveu-se com diferenças percentuais de mesma ordem de grandeza.

Um fator importante a ser destacado é de que, para efeitos de calibração e validação do modelo analítico, em relação aos resultados numéricos, não é necessário realizar uma etapa adicional de adequação da frequência natural de escala 1:10 para uma escala de 1:1. Futuramente, se necessário, esta adequação pode ser feita multiplicando a frequência natural de escala 1:10 por um coeficiente  $\sqrt{\lambda}$ , onde  $\lambda$ , representa o fator de escala reduzida.

Por fim, importou-se a geometria de casco da Série 60, contida na biblioteca do Maxsurf, e, a partir desta geometria, realizou-se a etapa transformação paramétrica utilizando as dimensões de escala 1:10 em cada um dos quatro modelos contidos no banco de dados.

Abaixo, na Fig. (37), ilustra-se o procedimento de caracterização da geometria aplicado ao conceito de plataforma FPSO.

Utilizando o procedimento de redução da escala do modelo real descrito anteriormente, obtiveram-se os parâmetros respectivos aos modelos de plataforma FPSO, conforme contido na Tab. (25).

De posse dos parâmetros em escala 1:10, contidos na Tab. (25), executou-se a etapa de transformação paramétrica na geometria de casco da Série 60, resultando nas

Figura 37 – Procedimento de caracterização da geometria

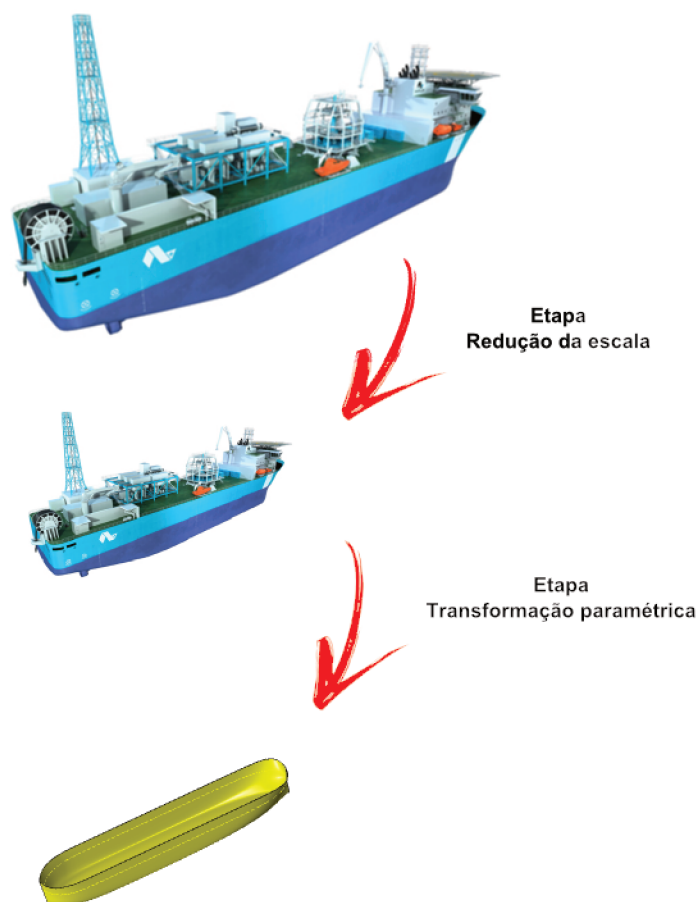


Tabela 25 – Parâmetros principais do modelo em escala 1:10

Modelo	Perisai Kamelia	Armada Perdana	Capixaba	Cidade Anchieta
Comprimento, LOA [m]	26,37	30,8	34,60	34,40
Comprimento linha d'água, Lwl [m]	23,73	27,72	31,10	34,40
Boca, B [m]	4,08	4,60	5,50	5,20
Calado, H [m]	2,22	1,70	2,10	2,22
Deslocamento, $\Delta$ [t]	187,3	188,9	313,4	308,6
Coefficiente de bloco, Cb	0,85	0,85	0,85	0,85

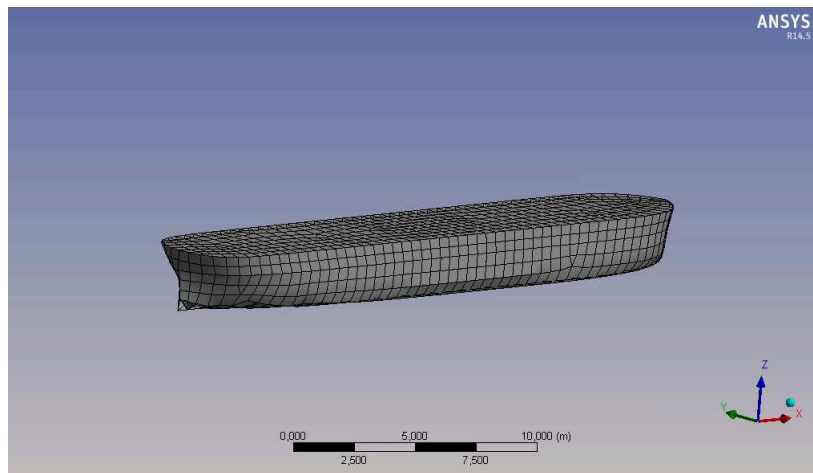
geometrias de casco dos modelos FPSO em escala 1:10.

Na etapa seguinte, transladou-se cada uma das geometrias de casco, em escala 1:10, separadamente, do Maxsurf para a interface de modelagem do AQWA.

Importada a geometria, ajustou-se os parâmetros de simulação no AQWA, utilizando uma malha com *Max element Size* de 0,9m e *defeaturing tolerance* de 0,3m. Na Fig. (38) representa-se a malha utilizada nos modelos de plataforma FPSO.

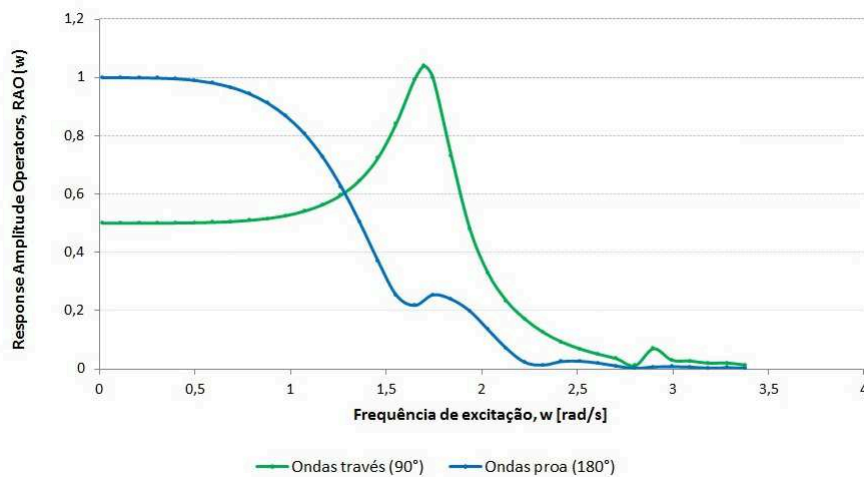
Um passo importante da simulação, para o caso do conceito de plataforma FPSO, foi a escolha adequada da direção de incidência da onda para simulação do AQWA. Isto

Figura 38 – Representação da malha utilizada nos modelos de plataforma FPSO



porque, como foi visto no capítulo de análise de banco de dados, o conceito de FPSO possui uma diferença significativa entre as dimensões de comprimento e boca. Na Fig. (39) segue a comparação da curva de RAO gerada através da incidência de ondas de proa ( $180^\circ$ ) e través ( $90^\circ$ ).

Figura 39 – Comparação da curva de RAO gerada através da incidência de ondas de proa e través



A partir da Fig. (39) é possível perceber que o movimento de *heave* gerado por ondas de proa possui muito amortecimento associado, por este motivo, este mesmo movimento gerado por ondas de través é muito mais significativos quando comparado ao gerado devido à incidência de ondas de proa.

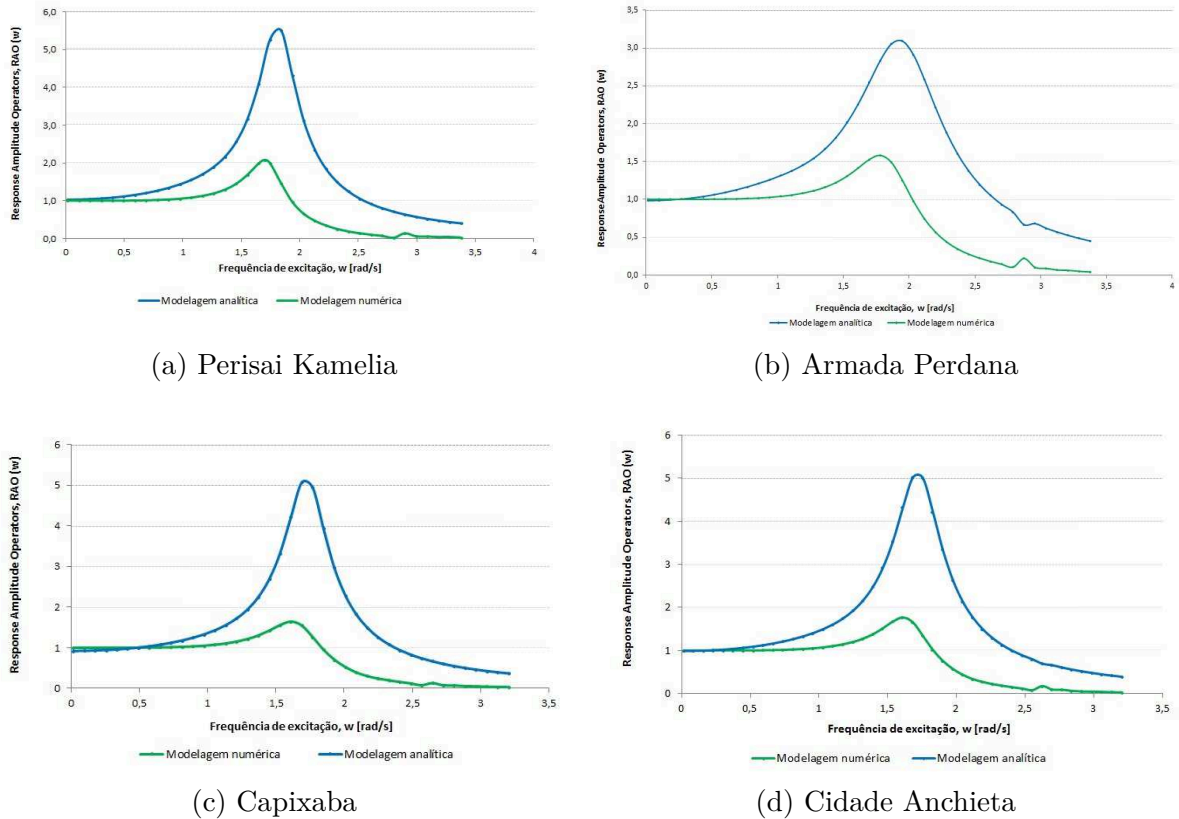
Em seguida foram feitos os cálculos analíticos de estimativa da frequência natural, através de uma planilha no *Excel*, utilizando o valor de massa adicional proveniente da simulação no AQWA, conforme apresentado na Tab. (26).

Abaixo, na Tab. (27), estão apresentados os resultados comparativos entre a

Tabela 26 – Estimativa da frequência natural

Modelo	Perisai Kamelia	Armada Perdana	Capixaba	Cidade Anchieta
Massa adicional, $M_a$ [t]	116,2	168,8	272,5	241,7
Rigidez, $k$ [N/m]	$9,73 \times 10^5$	$1,28 \times 10^6$	$1,72 \times 10^6$	$1,60 \times 10^6$
Frequência natural, $W_n$ [rad/s]	1,79	1,89	1,71	1,71

Figura 40 – Resultados comparativos de frequência natural analítica X numérica



frequência natural analítica e numérica dos modelos de plataforma FPSO e, na Fig. (40), as curvas de RAO de ambas as análises.

Tabela 27 – Resultados comparativos de frequência natural analítica X numérica

Modelo	Perisai Kamelia	Armada Perdana	Capixaba	Cidade Anchieta
Frequência natural teórica, ( $W_{nt}$ ) [rad/s]	1,79	1,89	1,714	1,707
Frequência natural numérica, ( $W_{num}$ ) [rad/s]	1,70	1,78	1,610	1,610
Diferença percentual (%)	5,04	5,89	6,05	5,66

A partir da Fig. (40) é possível observar que a frequência natural analítica se manteve deslocada levemente a direita do gráfico, representando a diferença percentual, proveniente da Tab. (27), de, em média, 5,66% em relação a frequência natural numérica.

A que se destacar que o valores de diferença percentual encontrados, mesmo incluindo os valores de massa adicional, provenientes do AQWA, nos cálculos analíticos,

são relativamente maiores do que os valores encontrados nas modelagens dos conceitos SPAR e semissubmersível, vistos anteriormente. Isto porque, embora apresente ressonância, o movimento de *heave* em plataformas FPSO é bastante amortecido, principalmente porque quando o casco se move verticalmente ele gera muitas ondas, dissipando assim boa parte da energia. Esta parcela de amortecimento fica evidente quando comparada a magnitude do pico no ponto de ressonância da curva analítica em relação a curva numérica.



## 4.6 Modelagem monocoluna

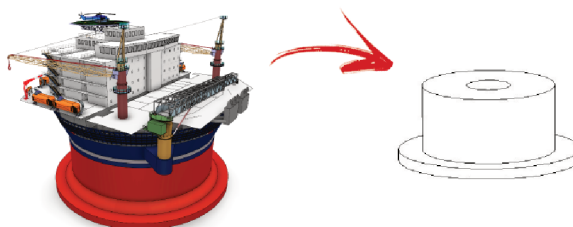
Conforme abordado no capítulo de fundamentação teórica, a monocoluna é um conceito de plataforma ainda em desenvolvimento. Por este motivo, a etapa de concepção de geometria se restringe à uma unidade em operação no Campo Piranema - Brasil. Abaixo, na Tab. (28), seguem os dados coletados deste modelo.

Tabela 28 – Coleta de dados da monocoluna

Nome	SSP-300 SEVAN PIRANEMA
Lâmina d'água	2.500 m
Local de operação	Campo Piranema
Diâmetro na linha d'água	88 m
Diâmetro do corpo principal	88 m
Diâmetro da saia	120 m
Largura do <i>Moonpool</i>	28,91 m
Calado de operação	39,5 m
Altura da saia	7,9 m
Altura do corpo principal	31,6 m
Air-Gap de operação	17,5 m
Deslocamento	262.000 t

O processo de caracterização da geometria foi realizado de maneira bastante similar ao procedimento adotado nos conceitos anteriores. Sendo assim, buscou-se simplificar ao máximo a geometria, de forma que fossem preservados apenas os componentes que tivessem influência na representação do fenômeno de interesse. Abaixo, na Fig. (41), segue a ilustração do procedimento de caracterização da geometria.

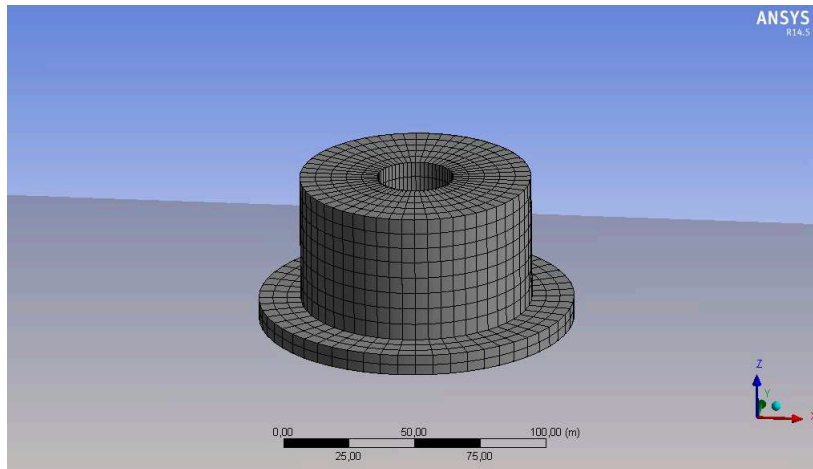
Figura 41 – Ilustração do procedimento de caracterização da geometria



De posse da geometria do modelo, ajustou-se os parâmetros de simulação no AQWA, utilizando, inicialmente, uma malha com *Max element Size* de 12m e *defeaturing tolerance* de 2m, totalizando 2048 elementos. Na Fig. (42) representa-se a malha utilizada na modelagem da monocoluna.

Em seguida realizou-se o cálculo da frequência natural analítica, através de uma planilha *Excel*.

Figura 42 – Representação da malha utilizada na modelagem da monocoluna



É importante salientar que, para o conceito de plataforma monocoluna, é de fundamental importância a calibração do valor da frequência natural analítica através da massa adicional, pois esta desempenha papel importante na concepção dos componentes constituintes da geometria da plataforma.

Sendo assim, utilizou-se o valor de 359.000 t de massa adicional, proveniente do AQWA, para o cálculo da frequência natural analítica.

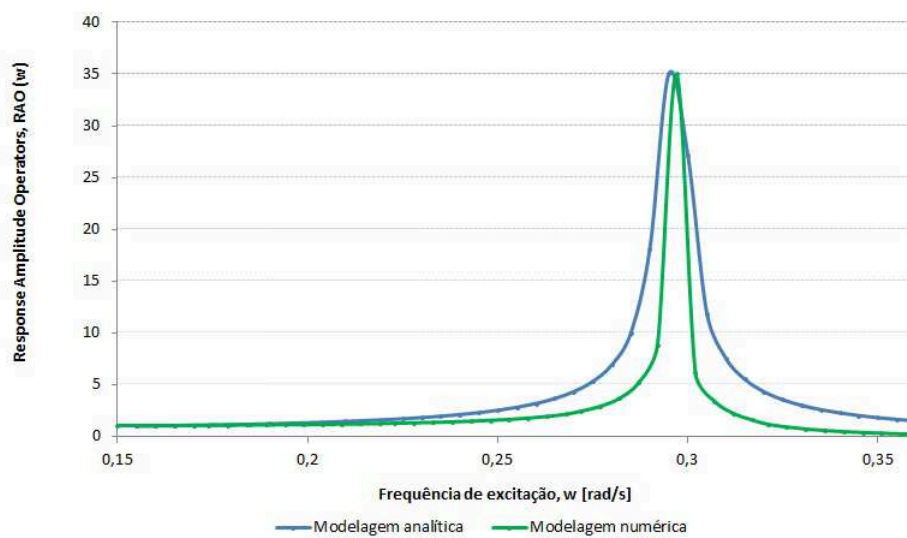
Na Tab. (29) estão apresentados os resultados comparativos entre a frequência natural analítica e numérica e, na Fig. (43), as curvas de RAO de ambas as análises.

Tabela 29 – Resultados comparativos de frequência natural analítica X numérica

Frequência natural teórica ( $W_{nt}$ )	0,296 rad/s
Frequência natural numérica ( $W_{n_{num}}$ )	0,297 rad/s
Diferença percentual (%)	0,32%

A partir da Fig. (43) é possível visualizar que a curva analítica praticamente coincide com a curva numérica, representando a diferença percentual de 0,32% contida na Tab. (29).

Figura 43 – Curva RAO analítico X numérico





## 5 Resultados e discussões

Neste capítulo estão sintetizados os principais resultados referentes às análises realizadas no decorrer do presente trabalho.

### 5.1 Relação entre a massa adicional e o deslocamento

Abaixo, na Tab. (30), estão representadas as relações entre a massa adicional e deslocamento alcançadas por cada um dos modelos abordados no presente trabalho.

Tabela 30 – Relação entre  $m_a/\Delta$  para modelos de plataformas SPAR, FPSO, semissubmersível e monocoluna

Nome do modelo de plataforma	Conceito	Relação de $m_a/\Delta$
Constitution	SPAR	0,009
Diana	SPAR	0,008
Perisai Kamelia	FPSO ( <i>Escala1</i> : 10)	0,62
Armada Perdana	FPSO ( <i>Escala1</i> : 10)	0,89
Capixaba	FPSO ( <i>Escala1</i> : 10)	0,87
Cidade Anchieta	FPSO ( <i>Escala1</i> : 10)	0,72
Heyday Aliyev	Semissubmersível	1,04
Gold Star	Semissubmersível	1,11
Scarabeo 9	Semissubmersível	0,93
Maersk Deliverer	Semissubmersível	1,13
Sevan Piranema	Monocoluna	1,37

A partir da Tab. (30) é possível observar que, para o conceito de plataforma SPAR, a massa adicional é um parâmetro pouco relevante para uma estimativa da frequência natural em *heave*. Isto pode ser justificado, principalmente, devido a sua disposição verticalizada na água, a qual favorece a redução da inércia adicional da estrutura.

Em relação ao conceito de FPSO, a massa adicional apresentou-se como um parâmetro bastante relevante para uma estimativa da frequência natural em *heave*, assumindo um valor, em média, equivalente a 78% do deslocamento.

Em relação as semissubmersíveis, a massa adicional é, em média, equivalente ao deslocamento total da plataforma. Isto porque os *pontoons*, os quais são os principais responsáveis pelo deslocamento da plataforma, são também fonte de grande inércia adicional devido a sua disposição horizontalizada na água.

Ainda referente à Tab. (30), o conceito de monocoluna foi o que apresentou maior relação entre a massa adicional e o deslocamento total da plataforma. Isto pode ser justificado devido a utilização de dispositivos hidrodinâmicos que proporcionam aumento da inércia adicional e do amortecimento da plataforma, possibilitando o emprego deste conceito em diferentes regiões de interesse.

## 5.2 Estratégias de minimização do tempo de simulação

Uma estratégia de minimização do tempo de simulação, foi a redução de escala nos modelos de FPSO. Essa estratégia foi responsável pela diminuição do tempo de simulação de cada modelo de 34 dias para 15 min, agregando em um percentual de diferença de 1% em relação a escala 1:1.

Isso é possível porque o método utilizado baseia-se na teoria de escoamento potencial, a qual não leva em conta efeitos viscosos, fazendo com que a simulação em similaridade de Froude represente 100% do fenômeno. Ao contrário, por exemplo, de uma simulação de resistência ao avanço.

Outra estratégia de mesma natureza foi aplicada na modelagem das plataformas SPAR, nesta optou-se por utilizar uma malha menos refinada, de forma que a malha utilizada fosse capaz de representar o movimento de *heave* sem agregar excessivamente o custo computacional. Esta estratégia retornou ao trabalho a redução do custo computacional, por modelo de plataforma SPAR, de 7 horas para 20 min.

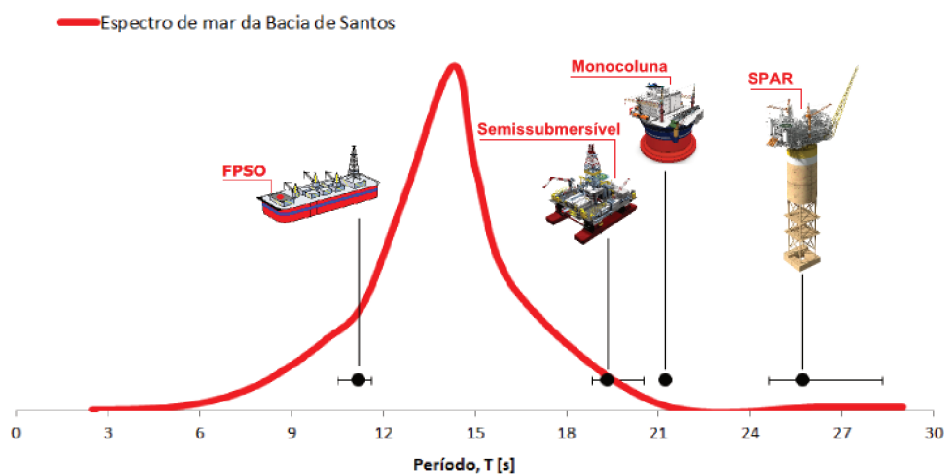
## 5.3 Seleção do conceito de plataforma com menor amplitude no movimento de *heave*

Como objetivo principal, o presente trabalho se propôs a selecionar um conceito de plataforma com menor amplitude no movimento de *heave*. Baseado nisto, foram feitas modelagens de diferentes modelos de unidades flutuantes. Destas modelagens, foram extraídos os períodos naturais dos modelos testados. Estes períodos, juntamente com o espectro de mar da Bacia de Santos, encontram-se representados no gráfico contido na Fig. (44).

A partir da Fig. (44) observa-se que o conceito de plataforma SPAR se manteve na região mais afastada do pico do gráfico do espectro de mar da Bacia de Santos, caracterizando assim, o conceito com menor amplitude de movimento de *heave* para operação nesta região.

Através da Fig. (44), observa-se também que o conceito de plataforma FPSO concentrou-se em uma região próxima ao pico do espectro de mar da Bacia de Santos,

Figura 44 – Comparação entre o período natural de diferentes conceitos de plataforma e o espectro de mar da Bacia de Santos



não sendo um conceito de plataforma ideal para atuação nesta região, no que se refere à amplitude do movimento de *heave*.

Apesar dos resultados terem sido conclusivos, grande parte dos investimentos da Petrobras para aquela região recai na utilização de FPSO como plataformas *offshore*. Isto pode ser devido à inclusão de critérios adicionais de seleção, os quais não estão inseridos no escopo do presente trabalho. E, também, aos custos logísticos envolvidos na utilização de uma plataforma FPSO.

As plataformas FPSO são capazes de realizar o armazenamento do petróleo extraído, sendo assim, o custo em viagens entre a costa e a Bacia de Santos caem consideravelmente, visto que essas bacias se localizam a mais de 300 km da costa.

Além disso, tanto as plataformas SPAR, monocoluna e semissubmersível necessitariam de navios aliviadores para auxiliar nesse processo de retirada e armazenagem do petróleo.

Por fim, verificou-se a acuracidade dos dados encontrados para cada um dos conceitos de plataforma abordados ao longo do desenvolvimento do presente trabalho. Na Tab. (31) encontram-se as faixas de valores típicos de período natural provenientes da literatura e a comparação destas faixas de valores com os períodos naturais encontrados no presente trabalho.

Vale ressaltar que, como o conceito de plataforma monocoluna ainda está em fase de desenvolvimento, não foi possível encontrar dados típicos bem estabelecidos na literatura.

A partir da Tab. (31), é possível perceber que ambos os modelos FPSO e SPAR encontram-se dentro da faixa de valores de períodos naturais de oscilação típicos. Também é possível observar que o período natural médio calculado da plataforma semissubmersível

Tabela 31 – Comparação entre a faixa de valores de períodos naturais típicos proveniente da literatura e os períodos naturais calculados

Conceito	Períodos naturais de oscilação típicos [s]	Período natural médio calculado [s]
FPSO	5 - 12	11,2
SPAR	20 - 35	25,7
Semissubmersível	20 - 50	19,3

se manteve bastante próximo à faixa de valores proveniente da literatura. Isto pode ser justificado devido a possível diferença entre os deslocamentos dos modelos contidos no banco de dados e os utilizados para caracterizar o período típico deste conceito na literatura. Sendo assim, o período natural médio calculado se encontra dentro da faixa de valores aceitáveis de períodos naturais para o conceito de plataforma semissubmersível.



## 6 Conclusão

Neste trabalho buscou-se selecionar um conceito de plataforma para atuação na Bacia de Santos. Sendo assim, foram realizadas análises de movimento de *heave* para os conceitos de plataforma SPAR, monocolumna, FPSO e semissubmersível.

O resultado encontrado foi a seleção do conceito de plataforma tipo SPAR, para atuação na Bacia de Santos. Sendo este um conceito que, se em operação na Bacia de Santos, possivelmente apresentará menores amplitudes para o movimento de *heave* em comparação com os demais conceitos.

Como resultados, obteve-se ainda a minimização considerável do tempo de simulação, fazendo uso de estratégias de refino de malha e caracterização adequada da geometria.

Outro resultado bastante relevante foi a relação de massa adicional e deslocamento de cada um dos modelos testados. A partir desta relação, é possível prever quando a massa adicional é ou não relevante para cálculos preliminares de frequência natural.

Como recomendação futura, busca-se incluir o conceito de plataforma *tension leg* (TLP) nas análises e realizar o mesmo procedimento executado em *heave*, para movimentos de *roll*, abrangendo, desta forma, os principais graus de liberdade limitantes de plataformas *offshore*.



# Referências

ALVES, Guilherme Tavares Malizia. **Projeto Integrado de Estabilidade de Unidades Flutuantes**. 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

AMORIM, Tailand Oliveira de. **Plataformas Offshore: Uma breve análise desde a construção ao descomissionamento**. 2010. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Construção Naval, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2010.

BAGNI, Orivaldo. **Quarta rodada de licitações**: Rio de Janeiro: Agência Nacional do Petróleo, 2014. Color.

BREBBIA, Carlos Alberto; WALKER, Stephen. **Dynamic analysis of offshore structures**. Londres: Butterworth, 1979.

CAMPOS, Felipe Cruz Rodrigues de. **Análise dos critérios de estabilidade para projetos de plataforma do tipo monocolumna**. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Naval, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CHAKRABARTI, Subatra K.. **Handbook of offshore engineering**. Plainfield: Elsevier, 2005.

FALTINSEN, O M. **Sea loads on ships and offshore structures**. New York: Cambridge University Press, 1998.

FINOCCHIO JUNIOR, José. **Programação de parada de plataforma marítima utilizando o método da corrente crítica**. 2009. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FUJARRA, André Luís Condino. **Dinâmica de sistemas II**. São Paulo: USP, 2009. Color.

GONÇALVES, Rodolfo T. et al. Evolution of the MPSO (monocolumn production, storage and offloading system). **Marine Systems & Ocean Technology**. p. 43-51. jun. 2010.

GROVE, Marcio de Abreu; CONCEIÇÃO, Carlos Antonio Levi da; SCHACHTER, Ri-

chard David. A Concept Design and Hydrodynamic Behavior of a Spar Platform. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING. **Proceedings**. Cancun: ASME, 2003.

MATTOS, João Henrique Volpini. **Análise de carregamento hidrodinâmico em estruturas flutuantes**. São Paulo: Det Norske Veritas, 2012. Color.

SÁ, Fabio Moreira de. **Estudos comparativos e concepção de alternativas de plataformas do tipo mono-coluna para águas profundas e ultra profundas: Metodologia de projeto e comportamento hidrodinâmico**. 2006. 151 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SILVEIRA, Marcos Machado da. **Introdução ao apoio marítimo**. Niterói: Edição do Autor, 2013.

SIMOS, Alexandre Nicolaos. **Especialização em engenharia naval**: Recife: UPE, 2007. Color.

ZOLNERKEVIC, Igor. Desafios em águas profundas. **Pesquisa: FAPESP**, São Paulo, v. 68, maio 2012.

# Anexos



# ANEXO A – Registro de ondas de um mar real

O procedimento experimental de levantamento de um registro de ondas de um mar real normalmente é realizado por meio de boias com um acelerômetro, a qual é posicionada no local onde se deseja fazer o levantamento. O acelerômetro irá registrar a aceleração em função do tempo. Uma vez determinada a aceleração ao longo do tempo, é possível determinar o movimento vertical, e com ele, a elevação do mar em cada instante de tempo.

O registro de ondas de um mar real é descrito através de parâmetros estatísticos, estando alguns destes contidos na Tab. (32).

Tabela 32 – Principais parâmetros estatísticos provenientes do registros de ondas

Parâmetro	Símbolo	Descrição
Altura máxima	$H_{max}$	Altura da máxima onda no registro
Período máximo	$T_{max}$	Período correspondente à máxima onda no registro
Período significativo	$T_{\frac{1}{3}} = T_s$	Média dos períodos do terço das ondas mais altas
Altura significativa	$H_{\frac{1}{3}} = H_s$	Média das alturas do terço das ondas mais altas
Altura média	$\bar{H}$	Altura média de todas as ondas do registro
Período médio	$\bar{T}$	Período médio de todas as ondas do registro
	$H_{rms}$	Raiz quadrada da média dos quadrados das alturas de um registro de onda
Frequência de pico	$w_p$	Frequência da onda de maior altura
Frequência significativa de onda	$w_s$	Média das frequências do terço das ondas mais altas
Frequência média	$\bar{w}$	Média das frequências contidas no registro de onda




É importante salientar que o tempo de aquisição para levantamento do registro de ondas de um mar real não deve ser muito pequeno para não prejudicar a captura de ondas de baixa frequência e nem tão grande para não incluir no registro efeitos indesejáveis, como por exemplo, o movimento de marés. Em relação a taxa de amostragem, ela não deve ser muito grande a fim de evitar a perda de ondas de alta frequência. Sendo assim, o período típico de aquisição de dados sugerido na literatura normalmente é em torno de 20 min. (ZOLNERKEVIC, 2012).





# ANEXO B – Banco de dados semissubmersível




Tabela 33 – Banco de dados semissubmersível

				
Ano de início de operação	2003	2010	2011	2011
Lâmina d'água	1.000 m	2.743 m	3.658 m	3.000 m
Local de atuação	Mar Cáspio	Golfo do México, Brasil, África Ocidental, Sudeste Asiático	África Ocidental	Brasil, Golfo do México, África Ocidental
Comprimento plataforma	101,8 m	103,5 m	115 m	117 m
Boca	64,5 m	69,5 m	80 m	78 m
Calado de operação	20,5 m	20,5 m	23,6	20,5 m
<i>Pontoons (Comprimento x Largura x Altura)</i>	90m x14m x8,6m	103,5m x15m x9m	110m x15,6m x11,6m	115m x17m x10m
Volume deslocado <i>pontoons</i>	21.672 m <sup>3</sup>	27.946 m <sup>3</sup>	40.832 m <sup>3</sup>	41.400 m <sup>3</sup>
Deslocamento de operação	30.500 t	39.327 t	53.800 t	53.000 t
Volume total deslocado	30.002 m <sup>3</sup>	38.295 m <sup>3</sup>	52.513 m <sup>3</sup>	54.252 m <sup>3</sup>
Colunas ( <i>Largura x Comprimento</i> )	4x (12,5m x14m)	4x(15m x15m)	4x(15,6m x15,6m)	4x (17m x18m)
Volume Pontoon/Volume deslocado	0,72	0,73	0,78	0,76
Comprimento/Boca	1,58	1,49	1,44	1,50
Raio da coluna <sup>1</sup> /Calado	0,92	1,03	0,93	1,21
Área do <i>deck</i>	4.096 m <sup>2</sup>	4.830 m <sup>2</sup>	–	5.887 m <sup>2</sup>
Pontal	35 m	35 m	35,4 m	37 m



# ANEXO C – Banco de dados de FPSOs - Floating Production Storage and Offloading

Tabela 34 – Banco de dados de FPSOs - *Floating Production Storage and Offloading*

				
Ano de início de operação	2008	2009	2010	2012
Lâmina d'água	122 m	410 m	1.300 m	1.221 m
Local de atuação	Malaysia	Costa da Nigéria	Bacia de Campos	Bacia de Campos
Comprimento	263,7 m	308 m	346 m	344 m
Boca	40,8 m	46 m	55 m	52 m
Calado de operação	22,2 m	17 m	21 m	22 m
Deslocamento de operação	146.201 t	209.846 t	348.178 t	342.868 t
Comprimento/Boca	6,46	6,70	6,29	6,62
Boca/Calado	1,84	2,71	2,62	2,36
Pontal	–	23 m	27 m	28 m



# ANEXO D – Banco de dados de Plataformas SPARs

Tabela 35 – Banco de dados de Plataformas SPARs

				
Ano de início de operação	1999	2005	2005	2007
Lâmina d'água	1.419 m	1.372 m	1.515 m	1.219 m
Local de atuação	Golfo do México	Louisiana	Golfo do México	Golfo do México
Diâmetro do casco	37,8 m	39 m	30,4 m	39,7 m
Comprimento Vertical	218,5 m	167,6 m	170,5 m	172 m
Comprimento/Raio	11,5	8,6	11,2	8,7
Deslocamento	31.224 t	21.000 t	12.891 t	23.500 t
Raio da coluna/Calado	0,10	0,13	0,10	0,13
Borda livre	–	15,2 m	–	–