

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

PEDRO PALUDETTO SILVA DE PAULA LOPES

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE UMA  
PLATAFORMA SEMISSUBMERSÍVEL NO MOVIMENTO DE *HEAVE***

Joinville, 2015

PEDRO PALUDETTO SILVA DE PAULA LOPES

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE UMA PLATAFORMA  
SEMISSUBMERSÍVEL NO MOVIMENTO DE *HEAVE***

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial  
para obtenção do título de bacharel  
em Engenharia Naval, no curso de  
Engenharia Naval da Universidade  
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin  
TANCREDI

Joinville, 2015

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me proporcionado saúde e persistência para atingir meus objetivos.

A toda minha família que não mediu esforços para que eu conseguisse concluir essa etapa da vida, em especial ao meus pais sempre me proporcionaram o que eu necessitei para essa formação.

A minha namorada Maria Eduarda que de forma excepcional me ensinou o que era importante e impulsionou a minha formação acadêmica, profissional e principalmente pessoal.

A todo corpo docente, diretores e servidores que souberam repassar o conhecimento para minha formação fosse a melhor possível. Agradeço em especial a meu orientador e coordenador de curso professor Thiago Pontin Tancredi que me mostrou a definição do que é ser um orientador durante este ano que me auxiliou neste trabalho.

Por fim agradeço meus amigos que tornaram a minha passagem pela universidade mais alegre e tranquila, em especial a meus amigos do CONEMB que são parte importante da minha vida.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estudar as respostas em *heave* do movimento de uma plataforma semi-submersível. Para isso dois métodos foram utilizados: simulação numérica, utilizando o método dos painéis, e modelagem analítica baseado na literatura. Inicialmente foi verificada a modelagem analítica de uma coluna oscilando na vertical, comparando os resultados com aqueles obtidos na simulação numérica. Em seguida, analisou-se o comportamento em *heave* de uma plataforma semi-submersível. Foram comparados os resultados da simulação numérica e do modelo matemático, e ao fim uma validação experimental baseada na dissertação de Garcia (2014) foi discutida. Foi observado uma aproximação satisfatória entre os resultados analítico, numérico e experimental (baseado na literatura), validando a abordagem utilizada. Ao final do trabalho uma análise paramétrica foi realizada a fim de avaliar a influência de parâmetros geométricos do casco da plataforma no movimento em *heave*.

**Palavras-chave:** plataforma semi-submersível, movimento *heave*, simulação numérica, método analítico.

## ABSTRACT

The objective of the present work is to study the *heave* motion of a semi-submersible platform. Two methods were used: numerical simulation, using the method of panels, and analytical modeling based on the literature. Initially, the analytical method was verified using an analysis of a simple column, comparing with the results obtained in numerical simulations. Afterwards, an analysis of behavior in *heave* motion of a semi-submersible platform was realized. The results of numerical simulation and the mathematical model were compared, and finally an experimental validation based on Garcia's dissertation (2014) was discussed. A satisfactory comparison between the analytical, numerical and experimental results (based on literature) was observed, validating the approach. Finally, a parametric analysis was performed to assess the influence of parameters of the platform in *heave* motion.

Keywords: semi-submersible platform, *heave* motion, Numerical Simulation, Analytical Methods

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da profundidade de extração do petróleo .....	10
Figura 2- Tipos de plataformas em função da profundidade de exploração .....	11
Figura 3 - Esquema de graus de liberdade da embarcação .....	12
Figura 4 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho .....	14
Figura 5 - Fluxograma do sistema hidrodinâmico.....	15
Figura 6 – Forças hidrodinâmicas em uma unidade flutuante .....	16
Figura 7 – Pressão atuante na coluna .....	17
Figura 8 - Simulações da força no domínio do tempo .....	27
Figura 9 - Gráfico de força máxima de Froude Krillof em função da frequência. ....	27
Figura 10 - Gráfico de RAO analítico para uma coluna cilíndrica oscilando em <i>heave</i> .....	28
Figura 11 - Malha gerada computacionalmente.....	30
Figura 12 - Direção da onda passante ao cilindro .....	30
Figura 13 - Gráfico RAO obtido por software numérico .....	31
Figura 14 - Comparação dos métodos analítico e numérico para o RAO .....	32
Figura 15 - Froude-Krylov analítico e numérico .....	33
<b>Figura 16 - Plataforma GVA 4000.....</b>	<b>34</b>
Figura 17 – Circunferência dos Cilindros.....	36
Figura 18 – Cilindros extrudados. ....	36
Figura 19 – Geometrias formando o flutuador. ....	37
Figura 20 – Geometria totalmente extrudada .....	37
Figura 21 – GVA 4000 modelada no ANSYS® .....	38
<b>Figura 22 - Froude-Krylov nas colunas. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 23 - Força de Froude-Krylov nos flutuadores .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 24 - Força de Difração nas colunas. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 25 - Difração nos flutuadores. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 26 – RAO plataforma .....</b>	<b>42</b>
Figura 27 - Esquema de tamanho de onda e comprimento de plataforma em dois pontos de anulamento..	43
Figura 28 - Esquema de tamanho de onda e comprimento de plataforma nos pontos de máximo .....	43
<b>Figura 29 – Tabela de coeficientes de massa adicional para o flutuador. ....</b>	<b>44</b>
Figura 30 – Regressão do coeficiente de massa adicional do flutuador.....	45
<b>Figura 31 – Coeficiente de massa adicional para coluna.....</b>	<b>45</b>
Figura 32 – Regressão do coeficiente de massa adicional da coluna.....	46
<b>Figura 33 - Simulação no domínio do tempo.....</b>	<b>47</b>
Figura 34 - Força de Froude-Krylov nas colunas .....	48
Figura 35 - Froude-Krylov nos flutuadores .....	49

Figura 36 - Froude-Krylov nos Flutuadores (Corrigido) .....	50
Figura 37 - Froude-Krylov nos Flutuadores (Simples) X (Corrigido).....	50
Figura 38 - Difração nas colunas .....	51
Figura 39 - Difração nos Flutuadores .....	52
Figura 40 - Força total.....	53
Figura 41 - RAO da semi-submersível .....	54
Figura 42 - Comparação de Froude-Krylov nas colunas .....	55
Figura 43 - Comparação das forças de Froude-Krylov nos flutuadores. ....	56
<b>Figura 44 - Comparação dos gráficos de RAO nos métodos numérico e analítico .....</b>	<b>57</b>
Figura 45 - Comparação experimental, numérica e analítica da plataforma GVA 4000.....	58
Figura 46 - RAO analítico da semi-submersível variando o raio da coluna.....	59
Figura 47 - Frequência natural em função do raio da coluna. ....	60
Figura 48 - Adimensional do raio pelo deslocamento em função da frequência natural .....	60
Figura 49 - RAO variando com as alturas das colunas. ....	61
Figura 50 - $W_n$ em função de $H_c$ .....	62
Figura 51 - $W_n$ em função de $H_c/(\Delta)^{1/3}$ .....	62
Figura 52 - RAO variando a distância entre os flutuadores .....	63
Figura 53 - RAO para variação de amortecimento.....	64
Figura 54 - Variação da frequência natural com o amortecimento .....	65
Figura 55 - RAO para variação de Razão de Aspecto .....	65
Figura 56 - Variação da frequência natural com a razão de aspecto.....	66
Figura 57 - Comparação numérico analítica para uma coluna ajustando o fator de amortecimento. ....	67
Figura 58 - Composição de uma onda regular.....	72
Figura 59 - Cruzamento Espectral Fonte: .....	74

## LISTA DE SIMBOLOS

Hc	Alltura da Coluna Submersa
Hs	Altura Significativa do Mar
Ac	Área da Secção da Coluna
Awl	Área de Linha d'água
Ap	Área Superior/Inferior do Flutuador Descoberta
H	Calado da Plataforma
Lp	Comprimento do Flutuador
Ld	Comprimento do Flutuador Descoberto
$\Delta$	Deslocamento
$\nabla$	Volume Deslocado
Xn	Distância entre eixos dos Flutuadors
CmC	Fator de Massa Adicional das Colunas
CmA	Fator de Massa Adicional dos Flutuadors
Fa	Força total máxima
Fa	Força total máxima
Wp	Freqüência de Pico
Wf	Freqüência Final
Wi	Freqüência Inicial
Wn	Freqüência Natural
G	Gravidade
B	Largura da Plataforma
Bp	Largura do Flutuador
$\Delta_{ac}$	Massa Adicional Colunas
$\Delta_a$	Massa adicional total
Rho	Massa Especifica da Agua
K	Número de Onda
Sigma	Parametro Sigma
Hp	Profundidade do Flutuador
Rcol	Raio da Coluna
Rx	Raio de Giração - Rx
Ry	Raio de Giração - Ry
Rz	Raio de Giração - Rz
a/b	Razão de Aspecto da Secção do Flutuador
K	Rigidez

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da coluna. ....	21
Tabela 2 - Frequência natural da coluna. ....	22
Tabela 3 - Seleção de Frequências.....	26
Tabela 4 – Parâmetro da coluna. ....	29
Tabela 5 - Tabela de parâmetros geométricos da plataforma GVA4000 .....	34
Tabela 6 - Parâmetros dinâmicos da plataforma GVA 4000. ....	35
Tabela 7 – Massa adicional da semi-submersível.....	46
Tabela 8 – Análise da influência dos parâmetros hidrodinâmicos.....	69

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1. Objetivos</b>	<b>13</b>
1.1.1. Objetivo Geral	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
<b>1.2. Metodologia</b>	<b>13</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Sistema hidrodinâmico</b>	<b>15</b>
2.1.1. Excitação: Espectros padronizados de mar	15
2.1.1. Processamento: Response Amplitude Operator (RAO)	15
2.1.1. Saídas: Espectro de resposta	16
<b>2.2. Modelo Matemático</b>	<b>16</b>
2.2.1. Forças Hidrodinâmicas	16
2.2.1. Forças de Excitação	17
2.2.2. Amortecimento e Massa Adicional	20
<b>2.3. Métodos Computacionais</b>	<b>20</b>
2.3.1. Método dos Painéis	20
<b>3. DESENVOLVIMENTO</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Cilindro</b>	<b>21</b>
3.1.1. Modelo Analítico	21
3.1.2. Método Numérico	29
3.1.3. Comparação entre Modelo Analítico e Numérico	32
<b>3.2. Semissubmersível</b>	<b>33</b>
3.2.1. Estudo de Caso	33
3.2.2. Método Numérico	35
3.2.1. Método Analítico	43
3.2.2. Comparação	54
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>59</b>
<b>4.1. Análise Paramétrica</b>	<b>59</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>67</b>

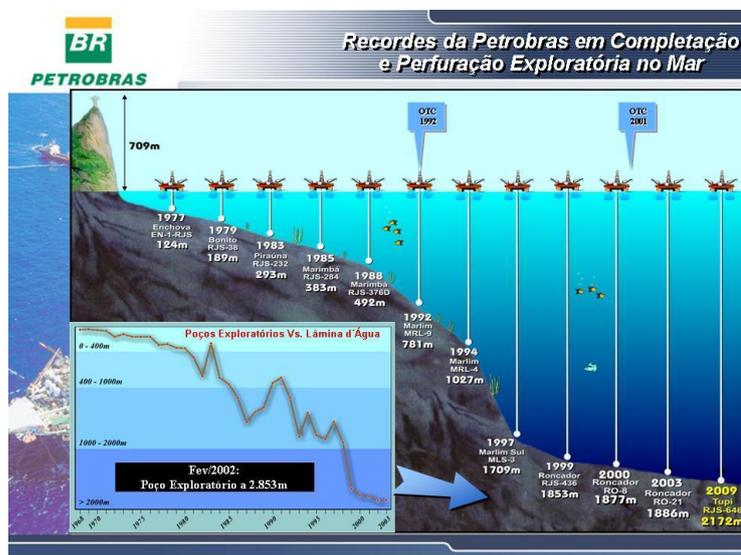
<b>5.1. Análise de uma Coluna .....</b>	<b>67</b>
<b>5.2. Análise de uma Plataforma Semi-submersível GVA 4000 .....</b>	<b>67</b>
<b>5.3. Análise Paramétrica de Uma Semi-submersível.....</b>	<b>68</b>
<b>5.4. Trabalhos Futuros .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>70</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Mais de 90% das reservas de petróleo localizadas em solo brasileiro encontram-se em águas oceânicas. A descoberta de reservas em águas ultra profundas, ou seja, acima de 3000 metros de lâmina d'água, motivam o desenvolvimento de novas pesquisas que viabilizem a exploração desses recursos.

Na Figura 1 é mostrada a evolução histórica da profundidade da lâmina d'água superada para a exploração do petróleo desde 1977. Segundo a revista Portos e Navios (2013) a BG Brasil desenvolveu um programa de pesquisa para viabilizar a exploração de petróleo em águas ultra profunda, no qual irá investir cerca de US\$ 2 bilhões até 2025, ressaltando a importância de estudos nas diversas áreas, dentre elas o estudo de plataformas semissubmersíveis.

Figura 1 - Evolução da profundidade de extração do petróleo



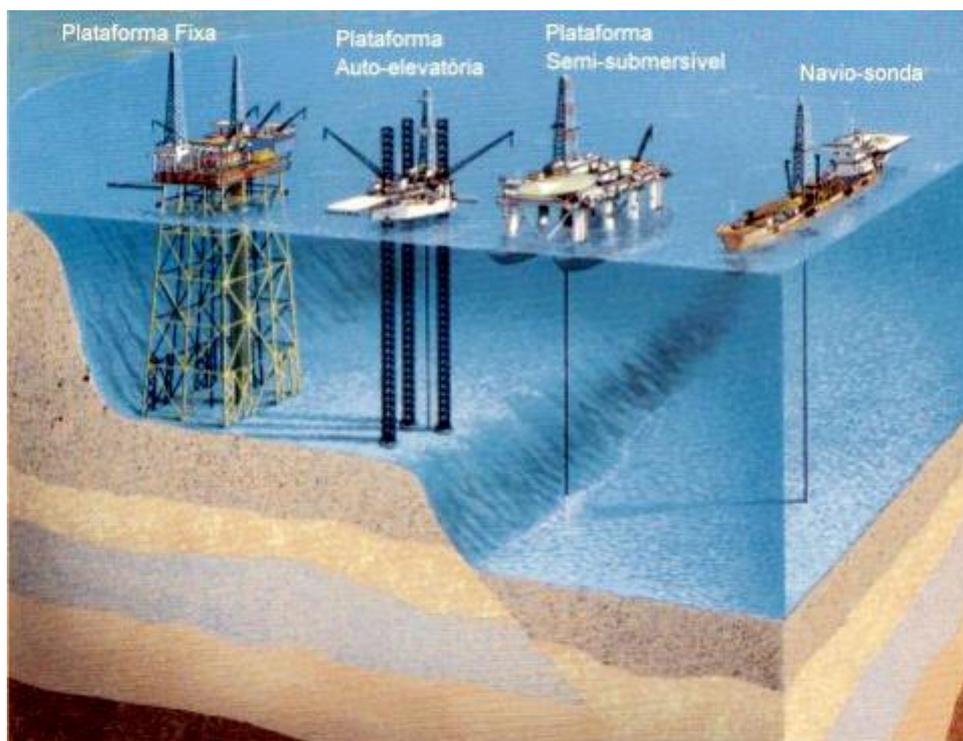
Fonte: Schultz (2011).

Embora o desenvolvimento de sistemas submarinos para exploração e processamento de petróleo esteja em franco desenvolvimento, atualmente toda

exploração marítima de petróleo exige o apoio de uma unidade estacionária na superfície, chamada de plataforma.

A profundidade da lâmina d'água e as condições de onda, vento e corrente, definem o tipo de plataforma mais adequado para cada região de exploração. Na Figura 2 são mostrados alguns tipos de plataforma e as lâminas d'água onde tipicamente operam.

Figura 2- Tipos de plataformas em função da profundidade de exploração



Fonte: ISI Engenharia.

O presente trabalho se dedica a estudar plataformas semissubmersíveis que, segundo Hosaas(2007), representa uma das possíveis escolhas conceituais para exploração de reservas de petróleo na costa brasileira, cujas profundidades inviabilizam o uso de plataformas fixas.

Plataformas semissubmersíveis são estruturas flutuantes utilizadas mais intensamente na exploração do petróleo a partir do ano 2000, conforme mostrado por Winters (2001) em seu estudo sobre a utilização de semissubmersíveis no Reino Unido.

Segundo Chakrabarti(2003), plataformas semi-submersível são formadas por um deck, múltiplos flutuadores e colunas. Sendo que a área de linha d'água das

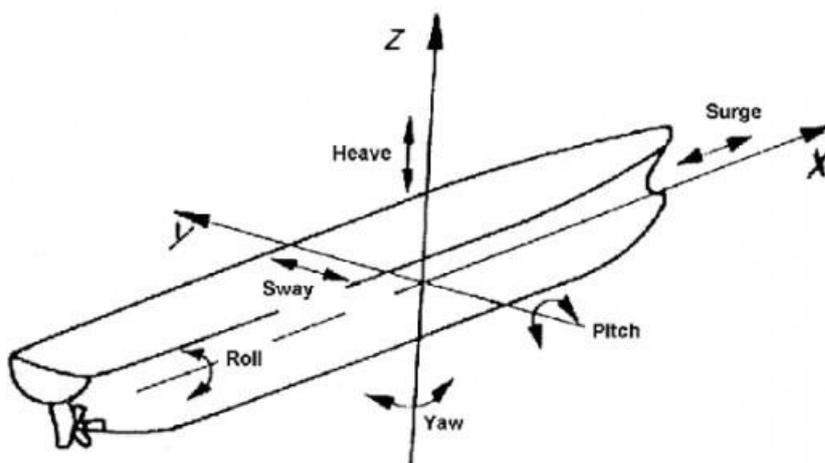
colunas são responsáveis por assegurar a estabilidade da plataforma, cujo projeto deve minimizar a resposta às ondas e permanecer estavelmente submetidas a grandes ondas.

O estudo do comportamento no mar é um dos principais requisitos no projeto de uma semi-submersível. Segundo Chakrabarti(2003), as plataformas semissubmersíveis vêm sendo utilizada desde os anos 50 com a função de perfuração. Hoje elas são empregadas principalmente na perfuração e produção de óleo e gás em poços de grande profundidade.

Ainda segundo Chakrabarti(2005), a análise de *heave* em plataformas flutuantes é o ponto crítico de um projeto, pois a plataforma dá suporte aos *risers*<sup>1</sup>.

Uma plataforma desenvolve movimento em 6 graus de liberdade quando submetida às condições das ondas: *heave*, *surge*, *sway*, *pitch*, *yaw* e *roll* como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Esquema de graus de liberdade da embarcação



Fonte: Subramaniam(2012)

Segundo Fajarra (2009), em um corpo rígido considera-se o movimento em um ponto "P" com coordenadas X, Y e Z sobre o qual deve-se estudar os 6 graus de liberdades. Essa abordagem baseia-se na hipótese de que os movimentos nos 6

---

<sup>1</sup> Tubos flexíveis que ligam a plataforma ao local de extração

graus de liberdade podem ser compostos linearmente e, portanto, desprezam-se as interferências entre os movimentos em diferentes graus de liberdade.

Na análise do movimento de *heave*, um importante parâmetro é o deslocamento vertical da plataforma. Segundo Pereira (2011), análises de viabilidade mostram que o movimento vertical dos *risers* é um parâmetro crítico no projeto de plataformas, esse movimento influencia diretamente no projeto dos tubos flexíveis, visto que movimentos excessivos podem gerar fadiga e acarretar o desacoplamento dos *risers* da árvore de natal<sup>2</sup>, acarretando vazamento de óleo no mar e até incêndios.

Em (Clauss & Birk 1996) mostra-se um estudo para aperfeiçoar o *heave* de uma plataforma semi-submersível através de uma variação paramétrica da geometria das colunas e flutuadores utilizando programação não linear. Em (Chou, 1977) foi apresentado um procedimento analítico para otimizar estruturas *offshore*.

Este trabalho se insere neste contexto e apresenta um estudo desacoplado do movimento em *heave*; contribuindo para o melhor entendimento desse fenômeno associando-o as características geométricas do projeto de plataformas semissubmersíveis. O objetivo é determinar a influência das dimensões principais no comportamento de *heave* de plataformas do tipo semissubmersíveis.

Para alcançar este objetivo serão desenvolvidos modelos analíticos e numéricos para uma geometria simples de um cilindro oscilando na vertical e para uma plataforma semi-submersível a partir do qual será realizada uma análise paramétrica para determinar a influência dos parâmetros geométricos no movimento de *heave* da plataforma.

## 1.1. Metodologia

Conforme mencionado na seção anterior, o trabalho se inicia com a elaboração de um método analítico que permita determinar o comportamento em *heave* de uma plataforma semi-submersível descrita por meio das suas dimensões principais, baseado em (Conti, 2009).

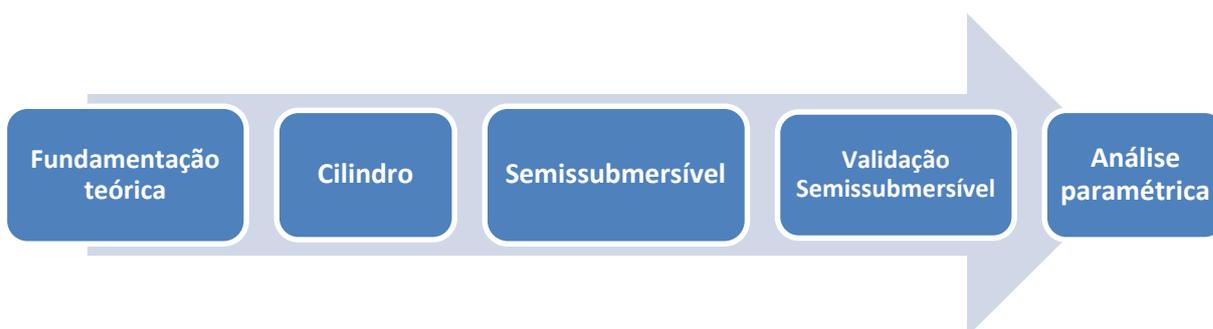
---

<sup>2</sup> Conjunto de válvulas que conecta os *risers* à planta de processamento

Esse modelo analítico será então comparado com resultados obtidos por simulação numérica realizada no programa AQWA usando o Método de Difração. Uma vez verificado o modelo analítico usando simulação computacional, esse modelo será utilizado em um estudo de caso para a determinação da influência das dimensões principais no comportamento em *heave* de uma plataforma semi-submersível.

O trabalho foi dividido em 5 etapas, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica para fundamentar o trabalho, em seguida um modelo analítico será elaborado com o auxílio do programa EXCEL® para um cilindro e compará-lo à simulação numérica utilizando a ferramenta AQWA do programa ANSYS®.

Será então feita a partir dos mesmos procedimentos utilizados no cilindro, a análise de uma plataforma semi-submersível onde serão elaborados método analítico e simulação numérica. Com a tese de mestrado de GARCIA (2014), será feito uma validação experimental do método analítico para na quinta etapa, utilizando o modelo analítico gerado pelo programa EXCEL®, fazer uma variação de parâmetros selecionados da geometria da plataforma e assim gerar uma matriz de influência dos desses parâmetros no movimento de *heave* de uma plataforma semi-submersível.

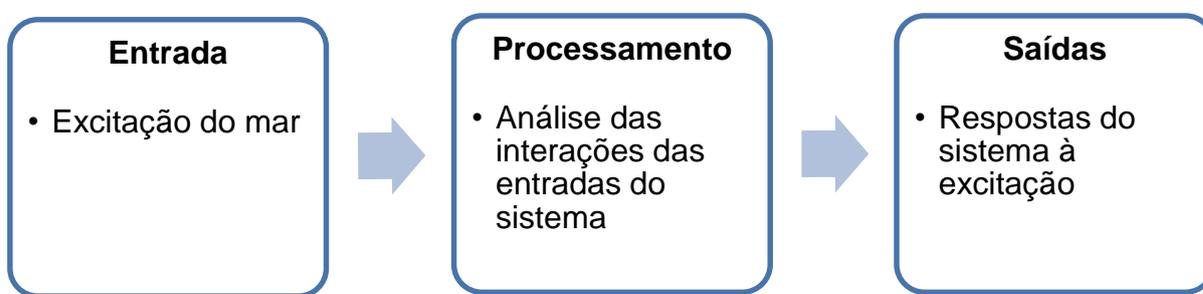
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo serão discutidos os conceitos que fundamentam esta pesquisa, com profundidade compatível com o escopo do trabalho.

### 2.1. Sistema hidrodinâmico

Toda análise de um sistema hidrodinâmico requer o estudo de três grandes blocos: a entrada, o processamento e as saídas como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma do sistema hidrodinâmico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na entrada é analisada a excitação atuante sobre o sistema, que no caso de um mar irregular é descrita por um espectro de energia, cujos fundamentos são apresentados no Anexo 1.

No processamento é onde é determinada a resposta do sistema que somado à entrada gera uma resposta. Este trabalho terá enfoque neste bloco do sistema hidrodinâmico.

A saída é a resposta do sistema à excitação do mar onde é gerado o espectro de resposta a partir do cruzamento espectral, descrito no Anexo 2.

#### 2.1.1. Processamento: Response Amplitude Operator (RAO)

Para a análise de um sistema hidrodinâmico é necessário que haja uma função de transferência correlacionando o espectro de entrada com a resposta do sistema. Na área naval esta função é chamada RAO (*Response Amplitude Operator*).

RAO é um gráfico que mostra para cada frequência de excitação o quanto um corpo se movimenta em determinado grau de liberdade para uma onda de amplitude unitária.

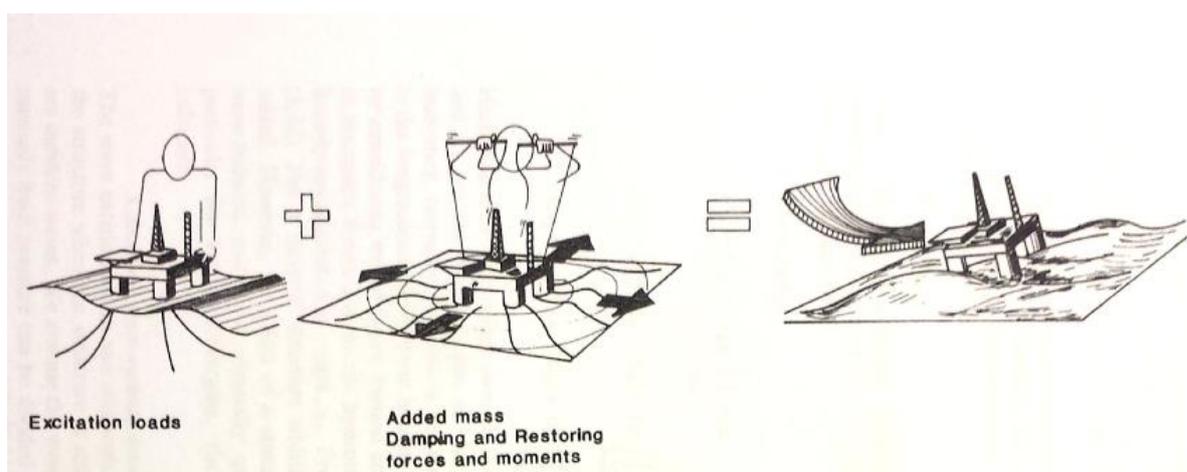
## 2.2. Modelo Matemático

O desenvolvimento de um método para a previsão das respostas de embarcações quando sujeita a ondas inicia-se pela formulação do problema de condição de fronteira apropriada. Comumente é assumido que o fluido é ideal, o que quer dizer que ele é invíscido e irrotacional, de modo utilizar a teoria dos escoamentos potenciais. Esta hipótese pode ser justificada porque o problema é essencialmente dependente de forças gravitacionais e as forças viscosas têm um papel de menor importância, Fonseca (2014).

### 2.2.1. Forças Hidrodinâmicas

As forças hidrodinâmicas atuantes em uma plataforma flutuante são divididas em forças de excitação e forças de radiação como mostra Faltinsen(1990) na Figura 8.

Figura 6 – Forças hidrodinâmicas em uma unidade flutuante



Fonte: Faltinsen (1990).

As forças de excitação são advindas da excitação do corpo por uma onda passante, já as forças de radiação são geradas a partir de ondas radiadas pelo

movimento do corpo, essas radiações são decorrentes da massa adicional, forças restauradoras e amortecimento.

As forças de excitação são compostas pelas parcelas de Morrinson e Froude-Krylov. Já as forças radiantes será apresentadas como forças de difração, que segundo Faltinsen(1990) é nela que encontram as parcelas de massa adicional.

## 2.2.1. Forças de Excitação

### 2.2.1.1. Froude-Krylov

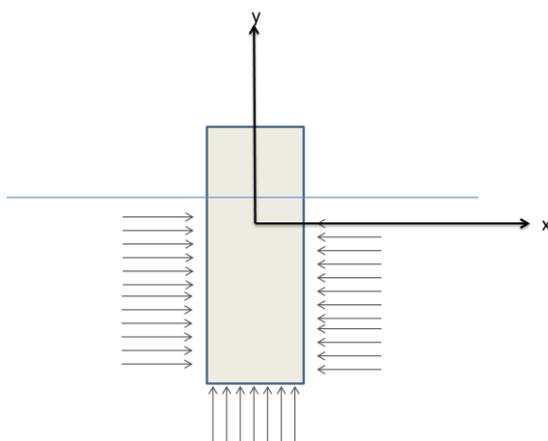
A força de Froude-Krylov nada mais é que a integração do campo de pressões próximo ao corpo (Equação 3).

$$\vec{F} = \iint p \cdot \vec{n} \, ds \quad (3)$$

Onde  $p$  é o campo de pressões em torno do corpo,  $\vec{n}$  é o vetor unitário normal à área e  $dS$  é o elemento diferencial de área.

Para facilitar a modelagem, pode-se fazer uma análise das forças de Froude-Krylov desacopladas para as colunas e outra para os flutuadores, visto que é uma força linear (proporcional a amplitude da onda). Primeiramente será desenvolvida a equação de uma coluna ilustrada na Figura 9.

Figura 7 – Pressão atuante na coluna



Fonte:Elaborada pelo autor.

A Equação 4 mostra a decomposição da força nas 4 faces do cilindro.

$$\vec{F} = \iint \text{face superior} + \iint \text{face inferior} + \iint \text{face esquerda} + \iint \text{face direita} \quad (4)$$

A pressão na face superior é zero, a força na face inferior é descrita pela Equação 5.

$$\iint \text{face inferior} = p^* \cdot \vec{y}^* \iint ds \rightarrow \iint \text{face inferior} = -p^* \cdot \vec{y}^* \pi r^2 \quad (5)$$

Onde o termo  $\pi r^2$  representa a integral da área na face inferior do cilindro. Enquanto  $\vec{y}^*$ , representa o vetor normal vertical, de acordo com o sistema de coordenadas estabelecido na Figura 9.

A face esquerda e direita podem ser descritas pelas equações 6 e 7 respectivamente.

$$\iint \text{face esquerda} = \vec{x}^* \iint p ds \quad (6)$$

$$\iint \text{face direita} = -\vec{x}^* \iint p ds \quad (7)$$

Somando as Equações 6 e 7 chega-se na hipótese descrita pela Equação 8.

$$\vec{F} = \iint \text{face esquerda} + \iint \text{face direita} \cong 0 \quad (8)$$

Substituindo as equações, considerando que a área do fundo é igual à área de linha d'água e considerando que a pressão no fundo é uma função da amplitude e do número de onda, chega-se a Equação 9.

$$F_{c_n}(t) = A_c * A * \rho * g * e^{-kH} * \cos(kx_n - \omega t) \quad (9)$$

Onde  $A_c$  é a área de linha d'água,  $A$  é a amplitude da onda,  $k$  é o número de onda,  $H$  é a profundidade da coluna,  $\omega$  a frequência da onda e  $t$  o tempo.  $X_n$  é o parâmetro que diferencia uma coluna da outra e é a distância longitudinal entre o centroide da coluna e o centroide da plataforma.

A Equação 10 mostra a força de Froude-Krylov nos flutuadores segundo Faltinsen(1990).

$$F_{pn} = -\omega^2 * A * e^{k * \left(h - \frac{h_p}{2}\right)} * \rho * A_p * h_p * \cos(kX_n - \omega t) \quad (10)$$

Onde  $w$  é a frequência de excitação,  $A$  a amplitude da onda,  $k$  é o número de onda<sup>3</sup>,  $h$  é o calado da plataforma,  $h_p$  é a altura do flutuador,  $A_p$  é a área do pontoon,  $t$  é o tempo e  $X_n$  é a distancia longitudinal entre o centro geométrico do flutuador e o centro geométrico da plataforma.

#### 2.2.1.1. Força de Difração

A força de difração segundo Mattos(2012), é o fenômeno que ocorre quando as ondas contornam objetos de mesma ordem de grandeza de seu comprimento. Faltinsen (1990) enxerga a força de difração como a força gerada pelo campo de pressões distante do corpo. Desta forma ele considera os termos de massa adicional no cálculo.

$$F_{pn} = -\omega^2 * A * e^{k * h} * C_m * H_p * \sin(\omega t - kX_n) \quad (11)$$

Onde  $C_m$  é coeficiente de massa adicional. Esta função será utilizada tanto no cálculo da força das colunas quanto no dos flutuadores, o que diferenciara será o coeficiente de massa adicional. Caso seja do flutuador será representado por  $C_m A$  e para as colunas por  $C_m C$ .

---

<sup>3</sup> Adimensional que correlaciona velocidade da partícula com gravidade.

### 2.2.2. Amortecimento e Massa Adicional

O amortecimento em um sistema hidrodinâmico pode ser potencial ou viscoso. Neste trabalho, ao assumir a hipótese de escoamento invíscido, será considerado apenas o amortecimento potencial.

Não existe uma única definição sobre amortecimento hidrodinâmico. Amortecimento potencial pode ser explicado como uma dissipação da energia devido a geometria do corpo, já o amortecimento viscoso é a dissipação da energia devido o atrito do fluido com o corpo.

A massa adicional é o fenômeno de deslocamento de água que um corpo desloca ao realizar algum movimento. Segundo Mattos(2012), as matrizes de massa adicional e de amortecimento são ambas  $6 \times 6$ , ou seja, possuem 36 coeficientes para amortecimento e 36 para massa adicional. Como nesse trabalho será considerado apenas o movimento em *heave*, essa matriz resultará em apenas um coeficiente de cada.

### 2.3. Métodos Computacionais

Na grande maioria dos casos, a resolução analítica do problema hidrodinâmico é por demais complexa e laboriosa para ser realizada. Por essa razão, a determinação do comportamento no mar é usualmente feita utilizando-se métodos numéricos.

Mesmo utilizando a hipótese de o fluido ser invíscido, incompressível e de que o movimento é irrotacional, para geometrias complexas (como a de cascos de navios), esse problema deve ser simplificado até ao ponto em que tenha solução numérica possível com um esforço computacional aceitável.

Existem diferentes técnicas para simplificar a resolução numérica do problema, cuja escolha depende das hipóteses e características do problema a ser analisado, Fonseca (2014).

Segundo Chaves (2012), o método dos painéis foi uma das primeiras implementações de mecânica dos fluidos computacional. O método consiste na resolução de equações diferenciais que regem a interação de fluidos em superfícies através de métodos numéricos a partir da discretização da superfície em malhas.

### 3. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento será dividido em duas partes. Primeiramente será desenvolvido um modelo analítico, com o programa EXCEL®, de uma simples coluna para confrontá-lo com uma simulação numérica, com auxílio da ferramenta AQWA do programa ANSYS®. Em seguida da mesma forma será feito também um modelo matemático para uma plataforma semi-submersível conhecida e uma simulação numérica para verificar o modelo analítico. Vale ressaltar que tanto para o cilindro quanto para a plataforma o método analítico será o mesmo, variando apenas as formulações matemáticas para cada tipo de força.

#### 3.1. Cilindro

Neste capítulo será mostrado o desenvolvimento do modelo analítico que descreve o comportamento em *heave* de uma coluna cilíndrica oscilando na vertical seguido de uma verificação utilizando simulação computacional realizada na ferramenta AQWA.

##### 3.1.1. Modelo Analítico

Nesta seção será apresentado o desenvolvimento do modelo analítico que descreve o comportamento em *heave* de uma coluna cilíndrica oscilando na vertical, cujos parâmetros são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros da coluna.

Parâmetros		
Rcol	6	m
Hc	25	m
Wn	0,626	rad/s
Ac	113	m <sup>2</sup>
$\Delta$	2898,12	t

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.1.1. Frequência Natural

A determinação da frequência natural foi feita através da Equação 12.

$$Wn_{heave,col} = \sqrt{\frac{\text{Rigidez}}{\text{Inércia}}} = \sqrt{\frac{Rcol^2 * \pi * g * \rho}{(\nabla + \nabla_a) * \rho}} \quad (12)$$

Onde  $Rcol$  é o raio da coluna,  $\nabla$  o volume deslocado e  $\nabla_a$  o volume deslocado adicional.

O numerador refere-se a rigidez da estrutura no grau de liberdade analisado, enquanto que o denominador refere-se a inércia do sistema. No modelo analítico da coluna não será considerado a força de difração, ao fim da modelagem será feito um ajuste de frequência natural de acordo com o gerado pela ferramenta AQWA, assim  $\nabla_a$  será incluído nos resultados gerados.

Com esses dados chegou-se ao resultado mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Frequência natural da coluna.

Cilindro vertical		
$Wn_{heave}$	0,626	rads/s

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.1.2. Frequências Utilizadas na Análise

Para a análise do comportamento de *heave* da coluna cilíndrica, fez-se um refinamento de pontos próximo a frequência natural. Foram selecionados três intervalos: o primeiro é para baixas frequências, variando de 0,1 a 0,6 rad/s; o segundo para frequências próximas a frequência natural, variando de 0,6 a 0,7 rad/s; e o terceiro para altas frequências, variando de 0,7 a 1,4 rad/s.

Na Tabela 3 são mostrados 3 intervalos de frequências e suas densidades de pontos de análises.

Tabela 3 - Seleção de Frequências

Intervalo	Frequência Mínima[rad/s]	Frequência Máxim[rad/s]	n° de Intermediários
1	0,01	0,6	8
2	0,6	0,7	13
3	0,7	1,4	11

Fonte: Elaborada pelo autor.

Escolheu-se uma maior densidade próxima a frequência natural onde foram inseridos 13 pontos de análise para um intervalo de 0,1 rad/s. Já nos demais intervalos foram inseridos 8 pontos em um intervalo de 0,59 rad/s e 0,7 rad/s.

### 3.1.1.3. Força de Froude-Krillof

Para gerar o gráfico de RAO de *heave* é necessário o cálculo da força resultante da interação da onda com a estrutura. O cálculo da componente de Foude-Krylov é descrito pela seguinte Equação 9 já apresentada no tópico anterior:

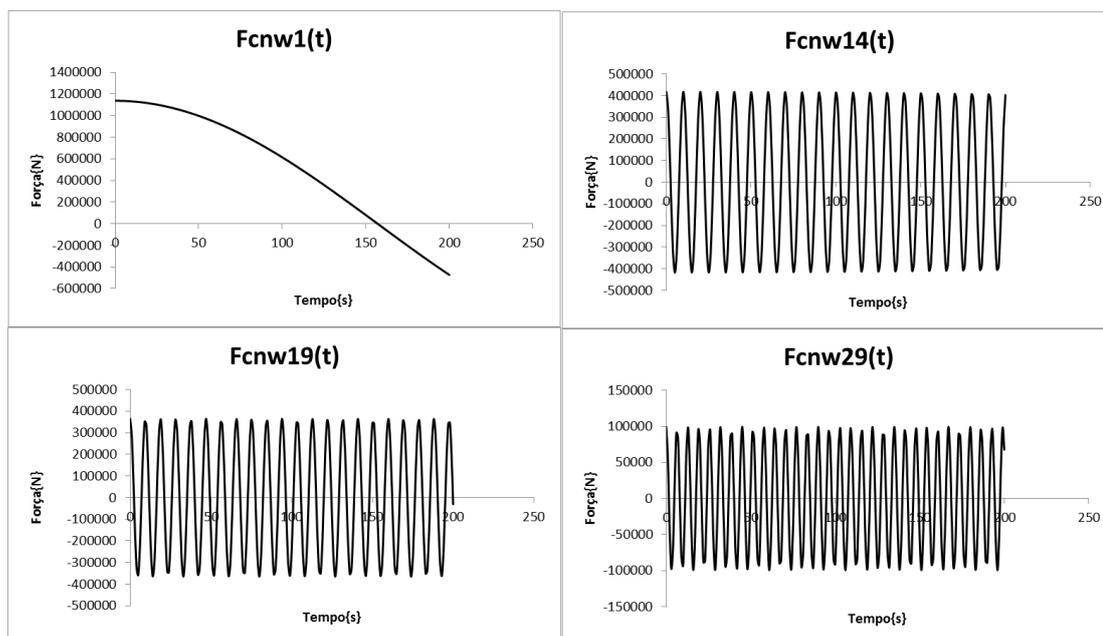
$$F_{cn}(t) = A_C * A * \rho * g * e^{-k * H} * \cos(k * X_n - \omega * t) \quad (9)$$

Como o foco do trabalho será na análise de RAO na modelagem matemática o termo da amplitude será unitário conforme definido na fundamentação.

O cálculo da força foi feita num tempo de 0 a 200 s com variação de 1 segundo para cada uma das 29 frequências de onda. A Figura 10 mostra quatro simulações no tempo para 4 diferentes frequências de ondas regulares.

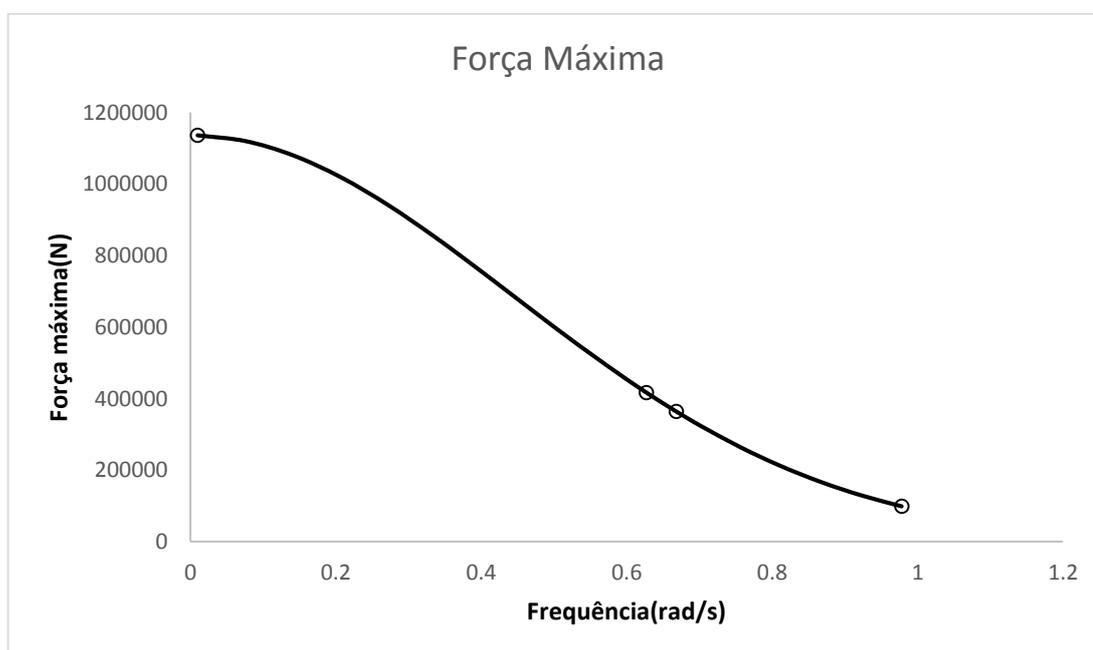
Como resultado foi gerado o gráfico de força máxima em função do tempo como mostrado na Figura 10. Os quatro gráficos de força no tempo se transformam em 4 pontos no gráfico no domínio da frequência, serão as forças máximas de cada simulação. A Figura. 11 mostra os quatro pontos analisados anteriormente no gráfico força máxima por frequência.

Figura 8 - Simulações da força no domínio do tempo



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 9 - Gráfico de força máxima de Froude Krillof em função da frequência.



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 3.1.1.4. RAO

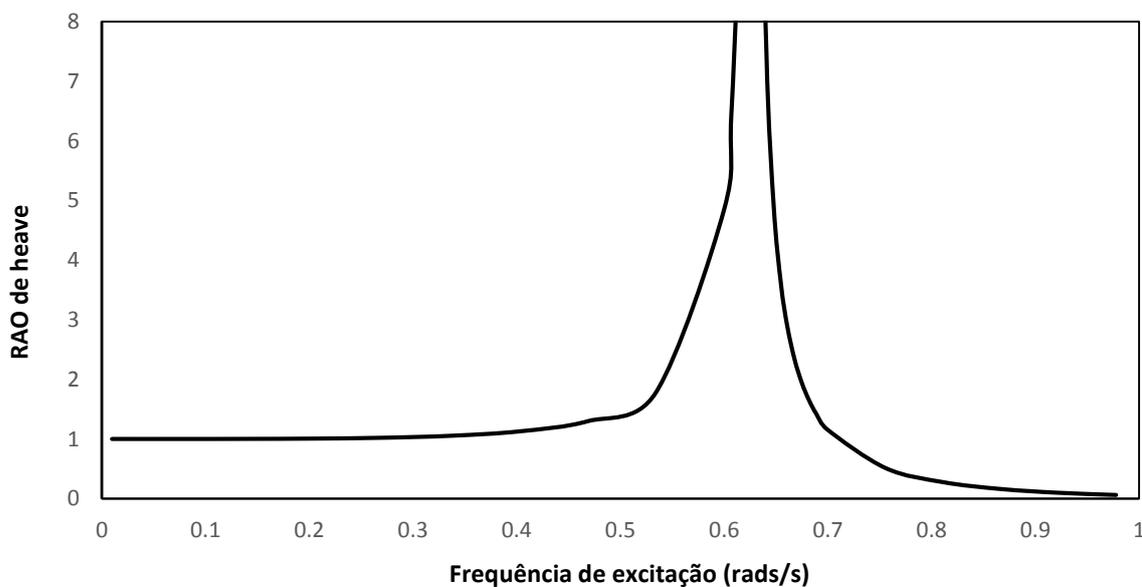
Para gerar o gráfico RAO *heave* de uma coluna foi utilizado a Equação 13.

$$\text{RAO}(\omega) = \frac{F_a}{k} * \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2 * \zeta * \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (13)$$

Onde  $\omega$  é a frequência,  $\omega_n$  a frequência natural,  $F_a$  é a máxima força de Froude-Krylov,  $k$  é a rigidez da coluna na água e  $\zeta$  é o fator de amortecimento do sistema.

Gerou-se então o gráfico de RAO de *heave* pelo método analítico, o qual é mostrado na Figura 12.

Figura 10 - Gráfico de RAO analítico para uma coluna cilíndrica oscilando em *heave*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que este gráfico tende ao infinito na frequência natural ( $\omega_n=0,626\text{rad/s}$ ), pois está sendo considerado um fator de amortecimento  $\zeta$  igual a zero neste caso. O gráfico parte de 1, pois a baixas frequências a coluna se movimenta junto com a onda, já a altas frequências o gráfico tende a zero pois as como em altas frequências os períodos são baixos (inversamente proporcionais), a alta inércia do sistema não permite a geração de movimento para estas oscilações.

### 3.1.2. Método Numérico

Nesta seção é apresentada a simulação computacional desenvolvida utilizando o método dos painéis, para a mesma coluna cilíndrica oscilando na vertical analisada analiticamente na seção anterior.

A análise numérica foi realizada com o auxílio da ferramenta AQWA, onde foi modelada a geometria do cilindro a partir dos dados da Tabela 1. Em seguida, com o auxílio do programa Rhinoceros® foram determinadas as propriedades associadas a distribuição de massa: raio de giração nos três graus de liberdade e a posição do centro de massa, como mostrados na tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetro da coluna.

Parâmetros Coluna		
Rcol	6	m
Hc	25	m
Ac	113,0973	m <sup>2</sup>
Kxx	25	m
Kyy	25	m
Kzz	28	m

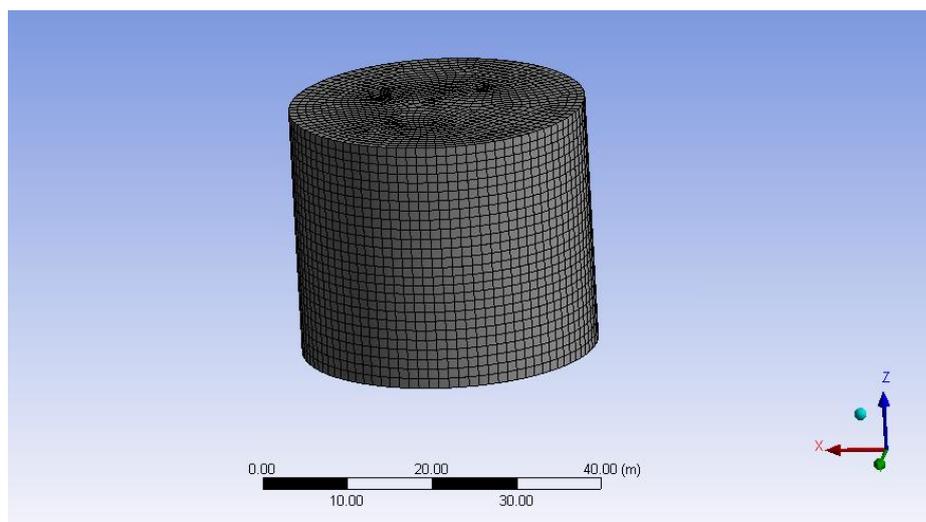
Fonte: Elaborada pelo autor.

Onde Kxx, Kyy e Kzz são os raios de giração do sistema.

#### 3.1.2.1. Malha

Em seguida foi gerado uma malha com 5095 elementos retangulares. Cada elemento representa 0,42% da área superficial da coluna. A Figura13 mostra a malha gerada usando as configurações automáticas de geração de malha sugeridas pelo programa.

Figura 11 - Malha gerada computacionalmente



Fonte: Elaborado pelo autor

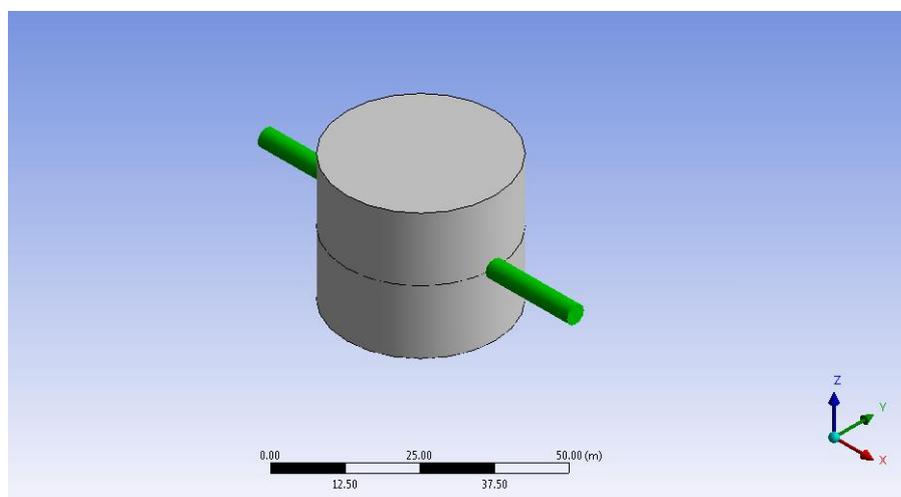
### 3.1.2.1. Frequências

As frequências utilizadas na análise numérica foram as mesmas utilizadas no modelo analítico, concentrando a maior quantidade de frequências próximo à região da frequência natural.

### 3.1.2.2. Direção de onda

Em virtude da axissimetria do corpo, escolheu-se apenas uma direção de onda, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 12 - Direção da onda passante ao cilindro



Fonte: Elaborada pelo autor.

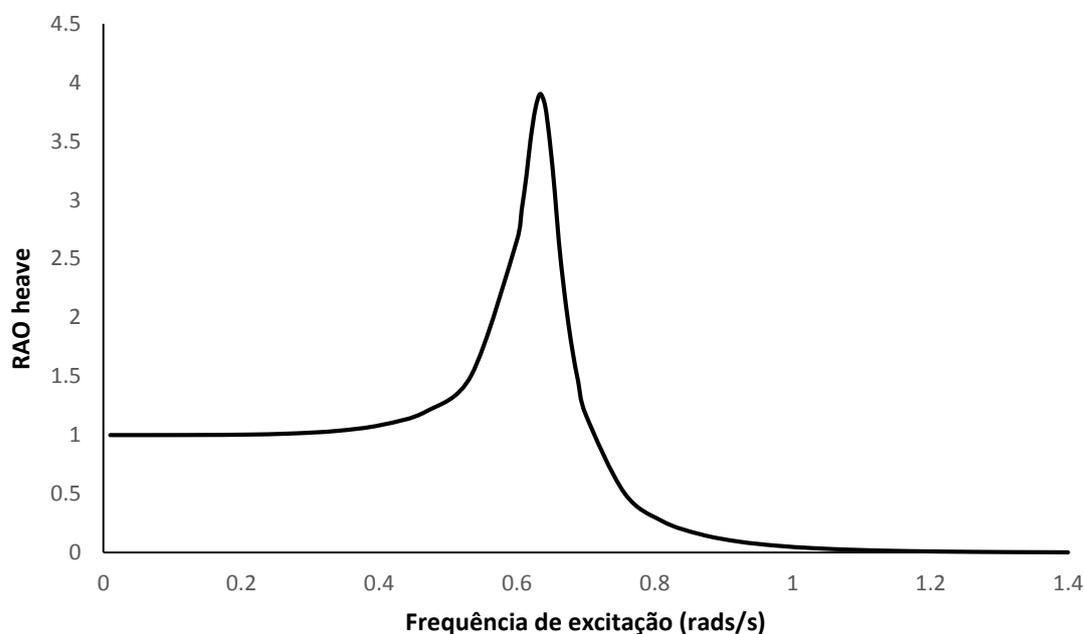
### 3.1.2.3. RAO

Por meio de um processo de integração numérica, a simulação computacional determina a distribuição do campo de pressões resultante da interação da onda com a estrutura.

Uma vez determinado o campo de pressões, é realizada a integração da pressão atuante nos elementos que estão na superfície submersa do corpo, determinando assim, a força de Foude-Krylov aplicada sobre ele. Por outro lado, a integração da modificação no campo de pressões na região no entorno do corpo resulta nas forças inerciais sobre o corpo.

Uma vez determinadas as forças que atuam sobre o corpo, determina-se o RAO da embarcação no grau de liberdade desejado para que posteriormente seja comparado ao RAO analítico. A Figura 15 mostra o gráfico obtido, na simulação numérica.

Figura 13 - Gráfico RAO obtido por software numérico



Fonte: Elaborada pelo autor.

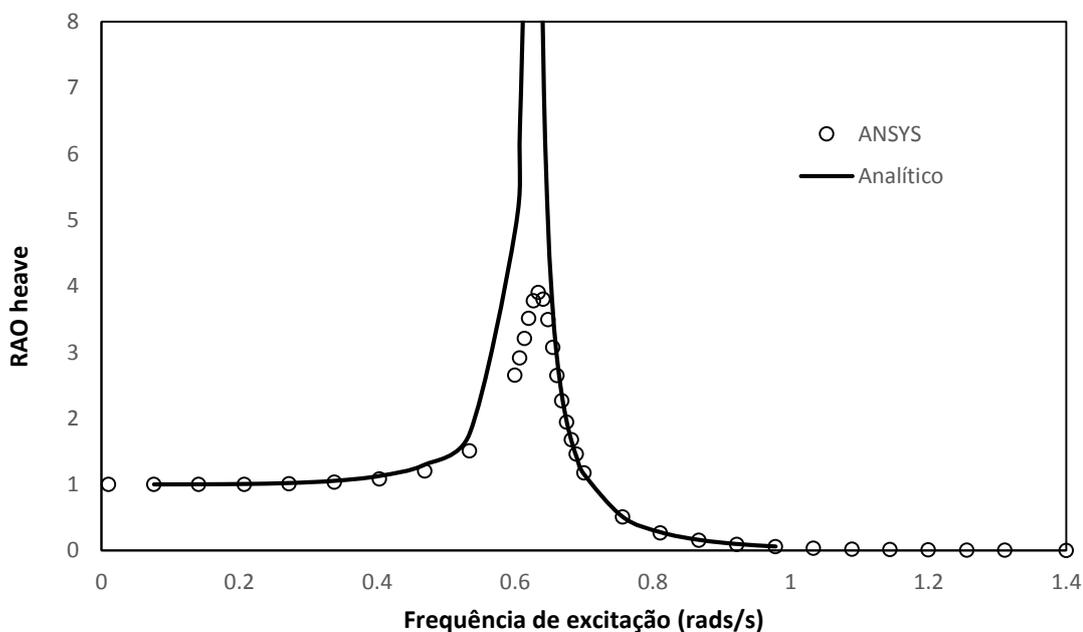
Novamente o gráfico obtido é coerente para o movimento vertical de uma coluna cilíndrica. Para baixas frequências o movimento da coluna acompanha o

movimento da onda enquanto em altas frequências o movimento tende a zero como já fo explicado. Por fim, próximo à frequência natural existe um pico devido o fenômeno da ressonância, que não é infinito em função do amortecimento potencial considerado pelo programa.

### 3.1.3. Comparação entre Modelo Analítico e Numérico

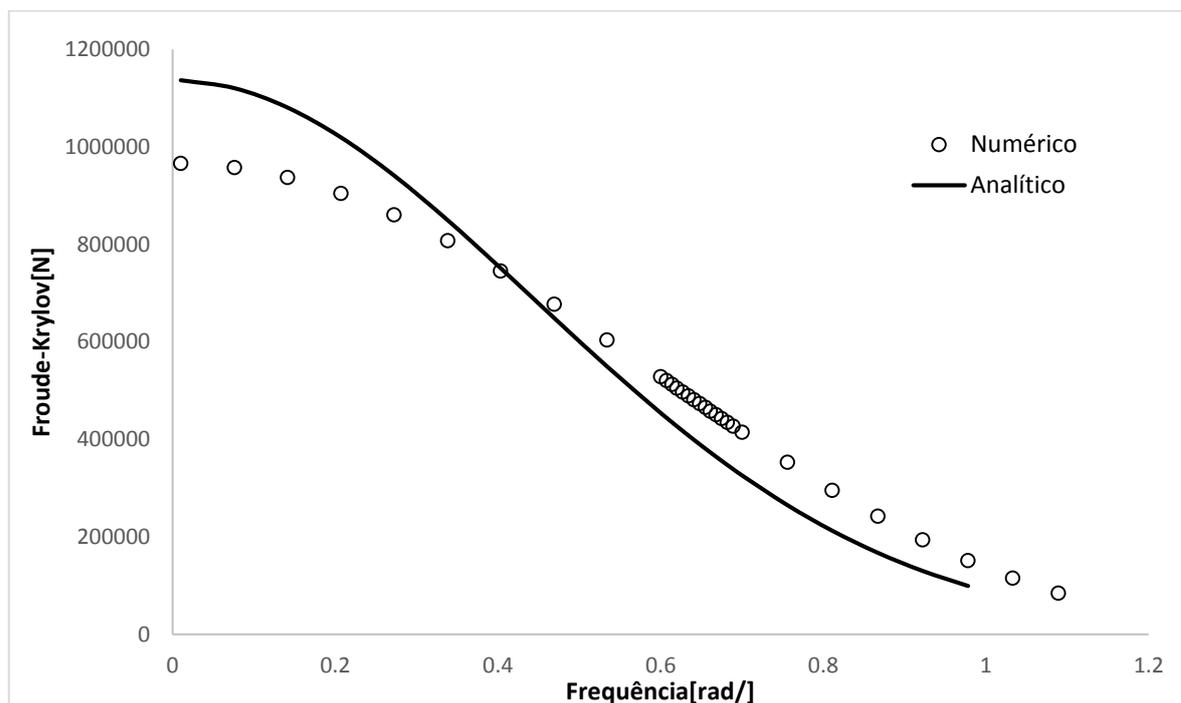
A fim de verificar o modelo analítico desenvolvido na Figura 10, será mostrada a sobreposição de gráficos de RAO e Froude-Krylov obtidos por meio da simulação numérica e modelo analítico. As Figuras 16 e 17 mostram os gráficos sobrepostos.

Figura 14 - Comparação dos métodos analítico e numérico para o RAO



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 - Froude-Krylov analítico e numérico



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2. Semissubmersível

De maneira análoga ao desenvolvimento apresentado no capítulo anterior, será apresentado o desenvolvimento do modelo analítico e simulação numérica de uma plataforma semi-submersível, visando construir um modelo paramétrico que permita avaliar a influência dos parâmetros dimensionais da plataforma na resposta de *heave*.

É importante observar que neste caso, os resultados de ambos os modelos serão confrontados com dados experimentais para validação do modelo.

O modelo analítico apresentado nesta seção será utilizado no estudo paramétrico apresentado no capítulo a seguir.

#### 3.2.1. Estudo de Caso

Para o estudo de caso foi escolhida a plataforma GVA 4000, cujas características de projeto foram retiradas da literatura. Na Figura 18 é mostrada uma imagem da plataforma GVA 4000.

Figura 16 - Plataforma GVA 4000



Fonte: GVA (2015).

Na Tabela 5 são mostrados os dados geométricos da plataforma utilizada no estudo de caso apresentado neste capítulo. Os dados foram retirados da dissertação de mestrado de Garcia (2014).

Tabela 5 - Tabela de parâmetros geométricos da plataforma GVA4000

<b>Característica</b>	<b>Sigla</b>	<b>Valor</b>
Largura do Flutuador	Bp	16 m
Profundidade do Flutuador	Hp	7.5 m
Área da Seção da Coluna	Ac	130.7 m <sup>2</sup>
Raio da Coluna	Rcol	6.45 m
Comprimento do Flutuador	Lp	85.6 m
Largura da Plataforma	B	76.8 m
Calado da Plataforma	H	20.5 m
Deslocamento	$\Delta$	25942750 kg
Distância entre eixos dos Flutuadores	Xn	54.72 m
Comprimento do Flutuador Descoberto	Ld	41.82 m
Área de Linha d'água	Awl	522.79 m <sup>2</sup>
Área Superior/Inferior do Flutuador	-	1234.0 m <sup>2</sup>
Área Superior/Inferior do Flutuador Descoberta	Ap	972.6 m <sup>2</sup>
Altura da Coluna Submersa	Hc	13.0 m

Fonte: Adaptado de Garcia (2014).

A Tabela 6 mostra os parâmetros dinâmicos da plataforma.

Tabela 6 - Parâmetros dinâmicos da plataforma GVA 4000.

<b>Característica</b>	<b>Sigla</b>	<b>Valor</b>
Massa adicional total	$\nabla a$	36915316 Kg
Raio de Giração – Rx	Rx	29.6 m <sup>4</sup>
Raio de Giração – Ry	Ry	27.3 m <sup>4</sup>
Raio de Giração – Rz	Rz	31.2 m <sup>4</sup>
Frequência Natural	Wn	0.289 rad/s
Fator de Amortecimento	Z	0

Fonte: Adaptado de Garcia (2014).

### 3.2.1.1. Frequência Natural

A determinação da frequência natural para a plataforma semi-submersível foi feita de maneira análoga ao método utilizado na análise da coluna. Neste caso o que diferenciou foi a inclusão das parcelas dos flutuadores nos cálculos dos deslocamento e massa adicional, como visto anteriormente.

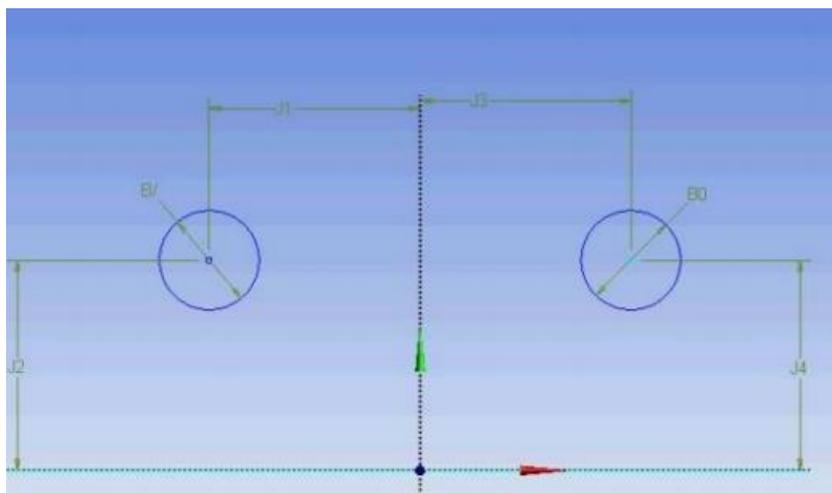
### 3.2.2. Método Numérico

Assim como no cilindro feito uma análise numérica da plataforma semi-submersível para posteriormente contrapor os resultados numéricos e analíticos e verificar o estudo. No método numérico foram gerados gráficos de Froude-Krylov para colunas e para flutuadores, força de difração para colunas e flutuadores, força total da semi-submersível e RAO da plataforma.

#### 3.2.2.1. Modelagem Geométrica

A modelagem da plataforma foi feita utilizando o próprio modelador geométrico do ANSYS®. Inicialmente foram geradas as circunferências relativas as colunas e foram feitas duas circunferências, como mostra a Figura 19.

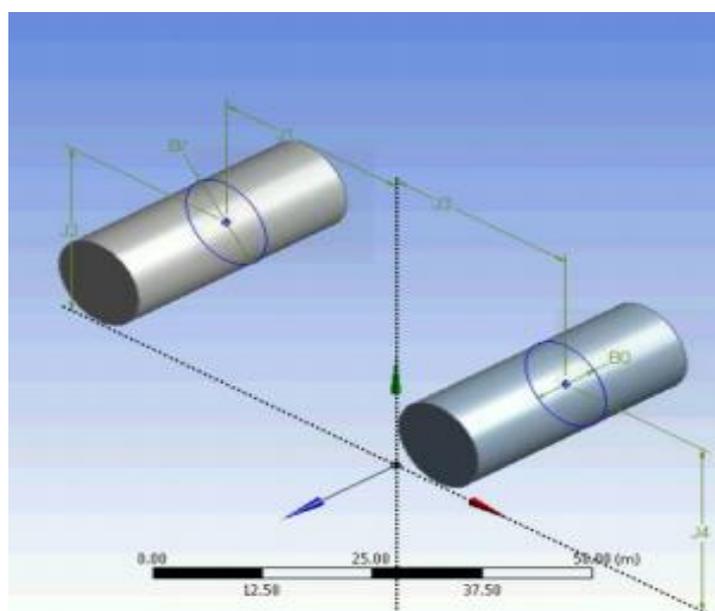
Figura 17 – Circunferência dos Cilindros



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta fase foi definida a boca e o comprimento da plataforma. Em seguida foram extrudados os círculos para gerar as colunas, como mostra a Figura 20.

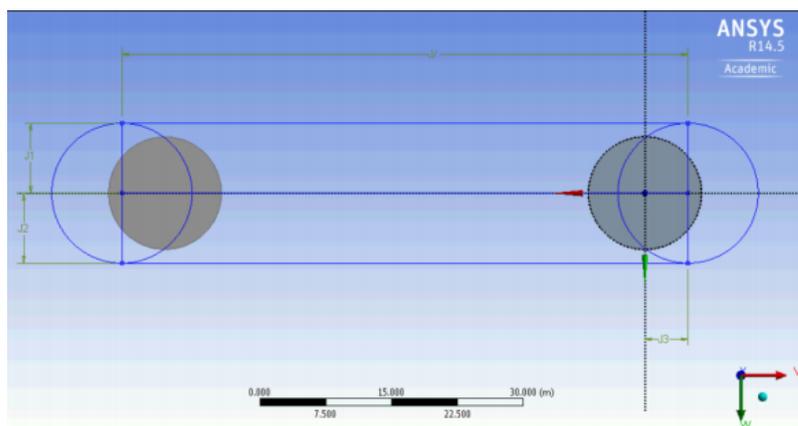
Figura 18 – Cilindros extrudados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao extrudar os cilindros inicia-se a modelagem dos flutuadores. Para sua modelagem utilizou-se o plano da extremidade do cilindro como base para o corpo. Foram então feitos dois retângulos com dois círculos nas pontas como mostra a Figura 21.

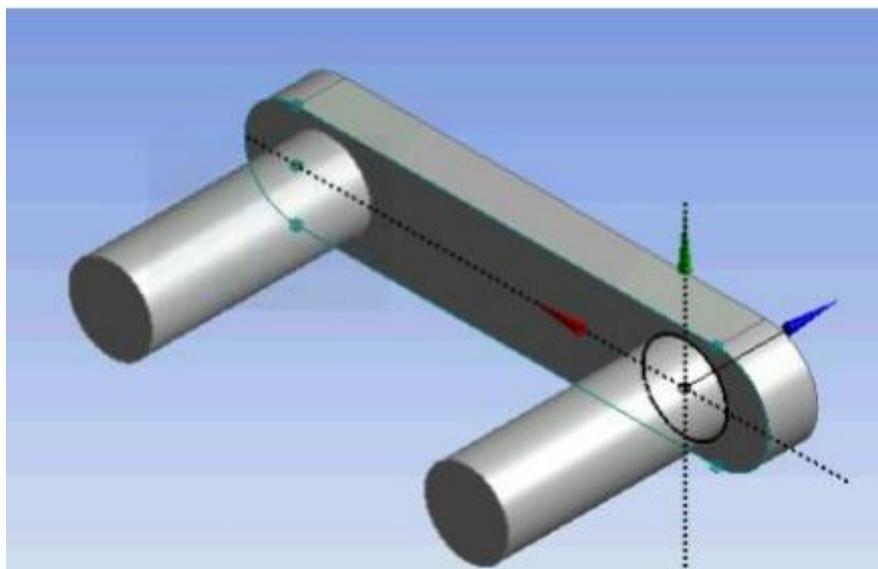
Figura 19 – Geometrias formando o flutuador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta fase foi definido o comprimento dos flutuadores, foram apagadas as linhas sobressalentes e extrudadas (Figura 22).

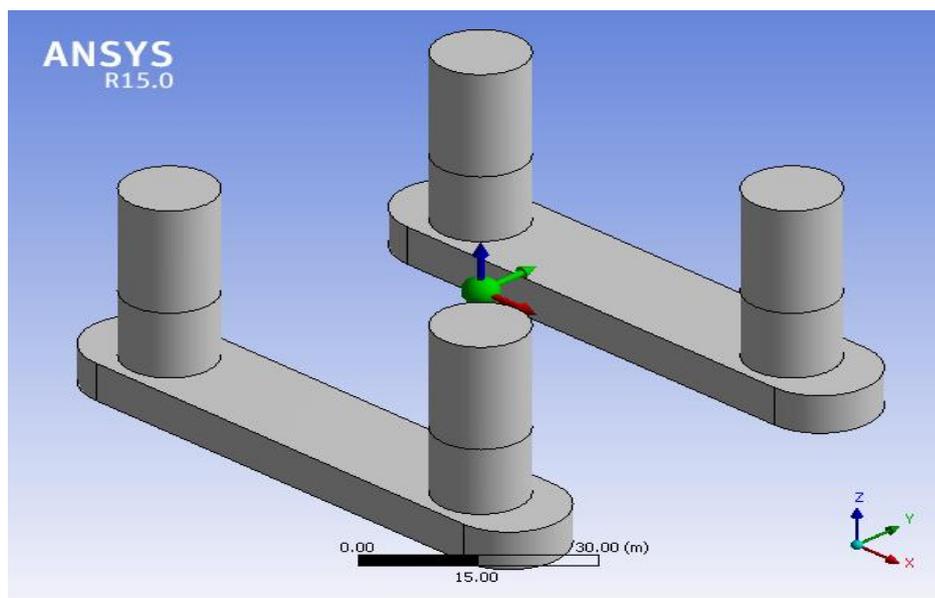
Figura 20 – Geometria totalmente extrudada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Emfim foi espelhada a geometria e finalizado a modelagem geométrica da GVA 4000. Mostrado na Figura 23

Figura 21 – GVA 4000 modelada no ANSYS®



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 3.2.2.2. Malha

A malha foi gerada usando as configurações padrões do programa. Com 5587 elementos de  $6,25\text{m}^2$  cada, representando 0,057% da área superficial total do modelo.

#### 3.2.2.3. Direção da Onda

Todo o método se baseia na onda entrando de través na plataforma, ou seja, perpendicular ao comprimento dos flutuadores, essa escolha foi feita com base na simplificação dos cálculos no modelo analítico. Para um modelo de onda com incidência longitudinal deve ser considerado a variação de pressões ao longo do comprimento dos flutuadores, o que dificulta a modelagem, e foge ao proposto deste trabalho.

#### 3.2.2.4. Frequências de Análise

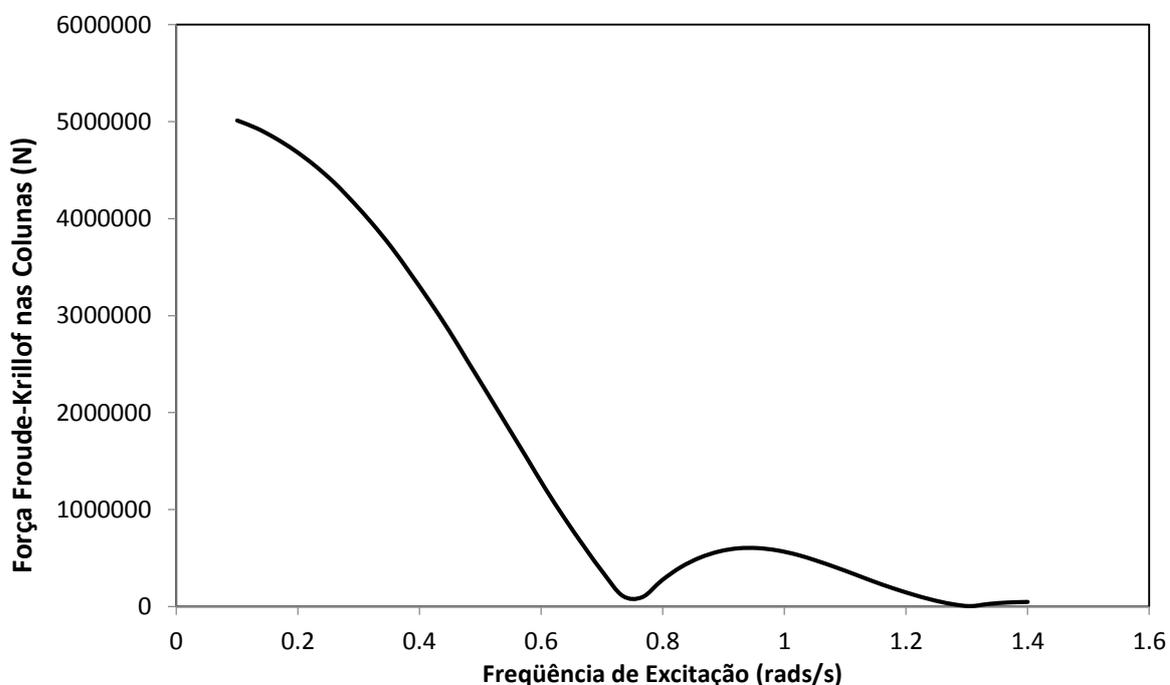
Para a simulação da semi-submersível não foi feito refinamento nas frequências. Foram consideradas 40 frequências espaçadas igualmente num intervalo de 0,1 à 1,4 rad/s.

Para facilitar a análise e verificação, as forças resultantes da interação das ondas com a estrutura da plataforma serão desacopladas entre os flutuadores e as colunas para posteriormente uni-los novamente.

### 3.2.2.5. Força de Froude-Krylov

Para gerar os gráficos de Froude-Krylov das colunas foi feito um estudo das colunas separadas dos flutuadores. Essa análise gerou o gráfico mostrado na Figura 24.

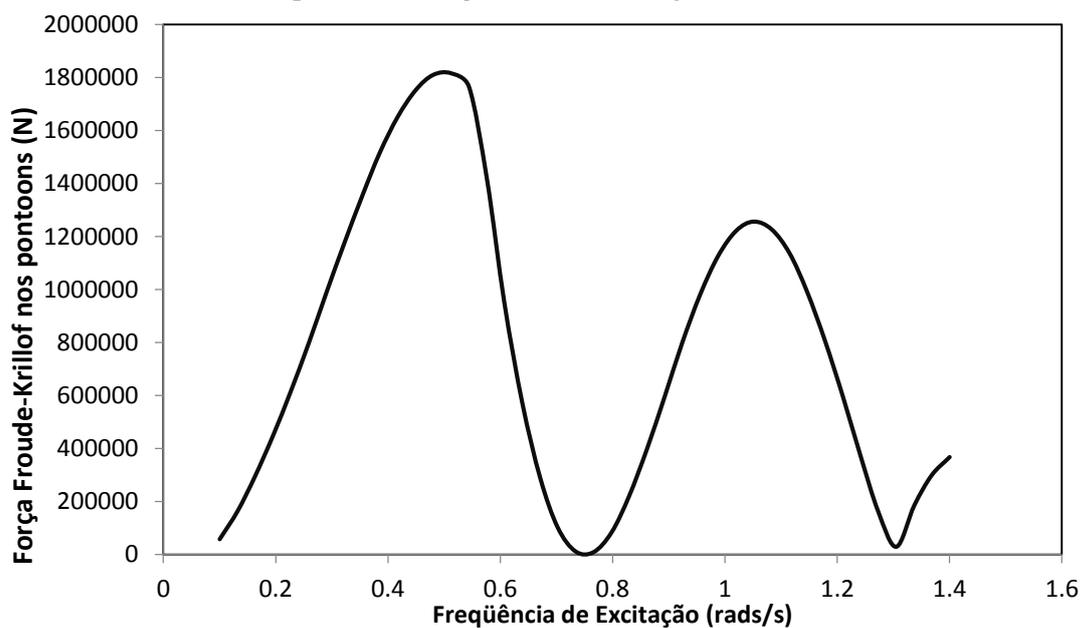
Figura 22 - Froude-Krylov nas colunas.



Fonte: Elaborada pelo autor

Na simulação dos flutuadores, inicialmente foi feito a simulação da plataforma semissubmersível completa e foi subtraído a parcela das forças nas colunas para cada frequência. Assim chegou-se na força de Froude-Krylov nos flutuadores. A Figura 25 mostra o gráfico gerado para os flutuadores.

Figura 23 - Força de Froude-Krylov nos flutuadores

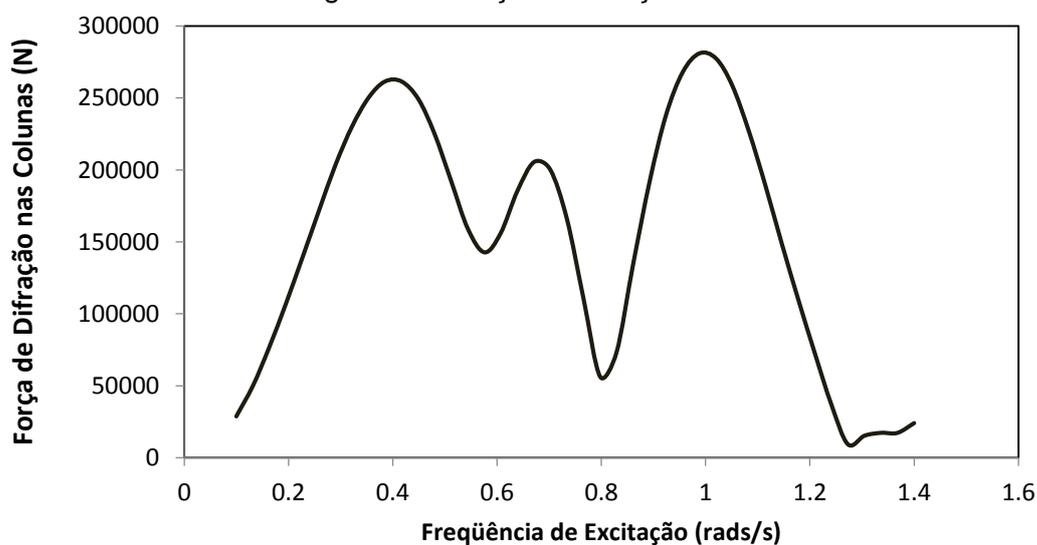


Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.2.6. Força de Difração

A Figura 26 mostra o gráfico de força de difração nas colunas.

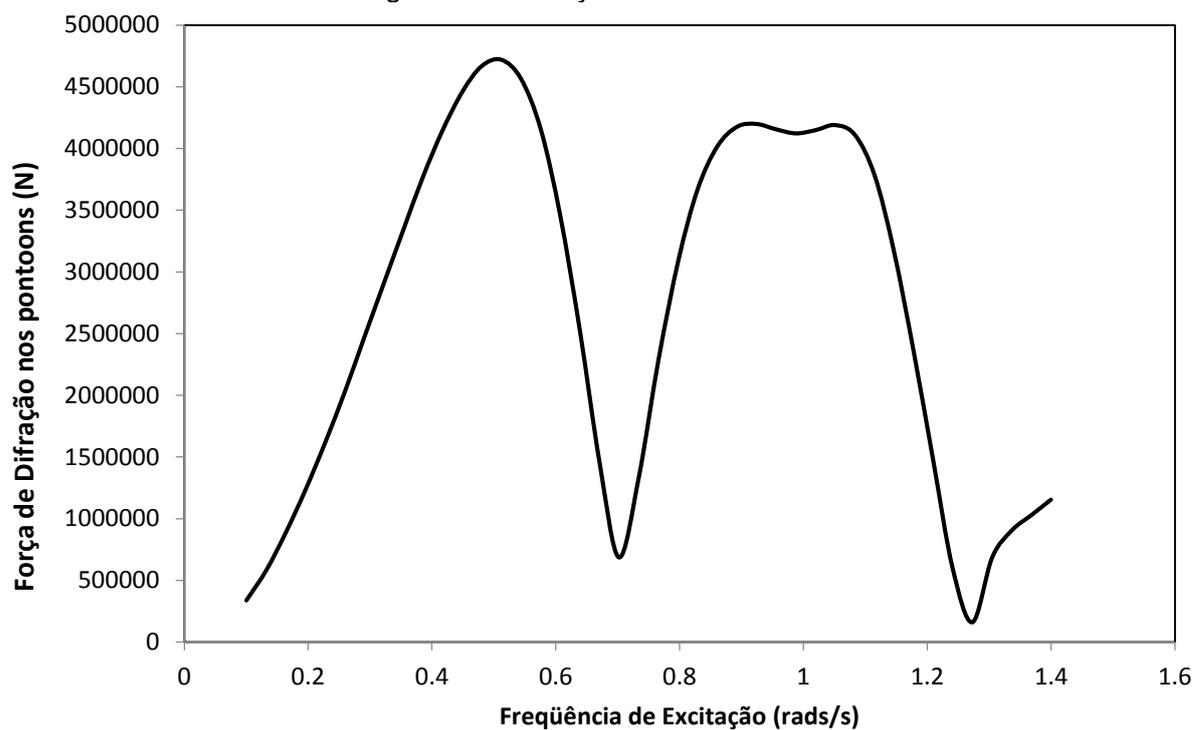
Figura 24 - Força de Difração nas colunas.



Fonte: Elaborada pelo autor

A força gerada nos flutuadores devido à massa adicional é mostrada na Figura 27.

Figura 25 - Difração nos flutuadores.



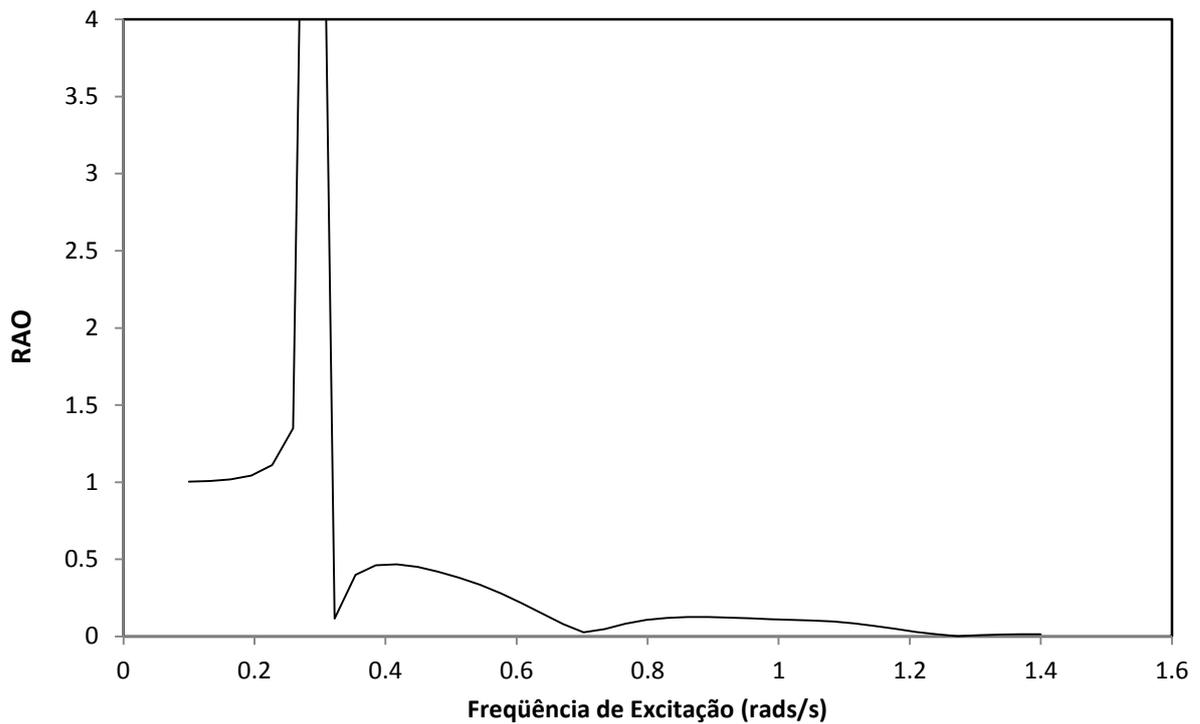
Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que a ordem de grandeza das forças devido à massa adicional nos flutuadores é cerca de quinze vezes maior do que nas colunas.

### 3.2.2.1. RAO

A Figura 28 mostra o gráfico gerado pelo ANSYS do RAO da plataforma semi-submersível.

Figura 26 – RAO plataforma



Fonte: Elaborada pelo autor.

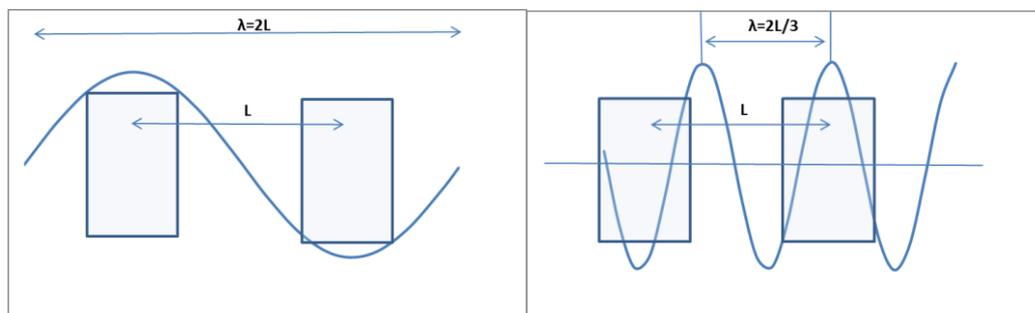
Assim como no cilindro o RAO da semi-submersível parte de um, para altas frequências tende a zero e na frequência de excitação igual a frequência natural surge o pico.

O gráfico possui ainda dois pontos de anulamento, que para o movimento em *heave* irá ocorrer quando o comprimento da onda for duas vezes a distância das colunas e que satisfaça a condição mostrado na Equação 14.

$$\lambda = \frac{2L}{K} \quad (14)$$

Onde K deve ser um número inteiro e ímpar. A Figura 29 esquematiza a onda interagindo com as colunas para os dois primeiros pontos de anulamento.

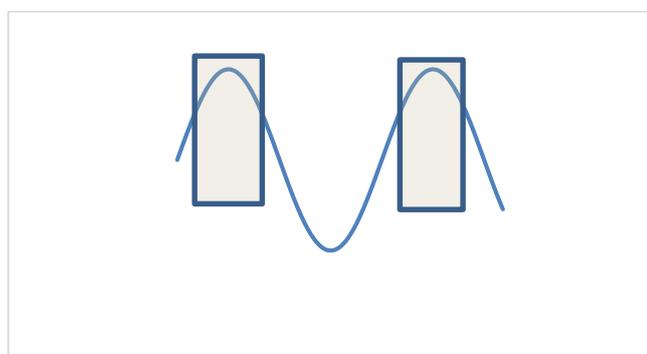
Figura 27 - Esquema de tamanho de onda e comprimento de plataforma em dois pontos de anulamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

O primeiro ponto de anulamento ocorre quando as forças de Froude-Krylov e de difração se anulam. O ponto de máximo ocorre quando os picos das ondas coincidem com os centros geométricos dos pares de colunas como mostrado na Figura 30.

Figura 28 - Esquema de tamanho de onda e comprimento de plataforma nos pontos de máximo



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.1. Método Analítico

A abordagem para o método analítico de uma semi-submersível é uma continuação da abordagem da coluna simples, pois é necessário considerar a ação dos flutuadores no movimento de *heave*.

Segundo Faltinsen(1990), para o cálculo da força resultante que age na plataforma, diferentemente do modo como foi calculado para uma simples coluna,

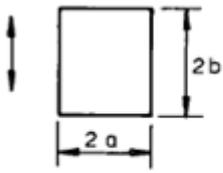
deve-se considerar as componentes de Foude-Krylovf nas colunas e nos flutuadores, difração nas colunas e nos flutuadores e forças de Morison para coluna e flutuadores.

### 3.2.1.1. Massa adicional

Neste tópico será discutido o cálculo dos coeficientes de massa adicional dos flutuadores e das colunas.

Primeiramente foi encontrado a razão de aspecto da seção do flutuador, que foi calculada dividindo a largura pela profundidade do flutuador. Em seguida foi feito uma regressão utilizando a seguinte tabela retirada da DNV mostrado na Figura 31.

Figura 29 – Tabela de coeficientes de massa adicional para o flutuador.

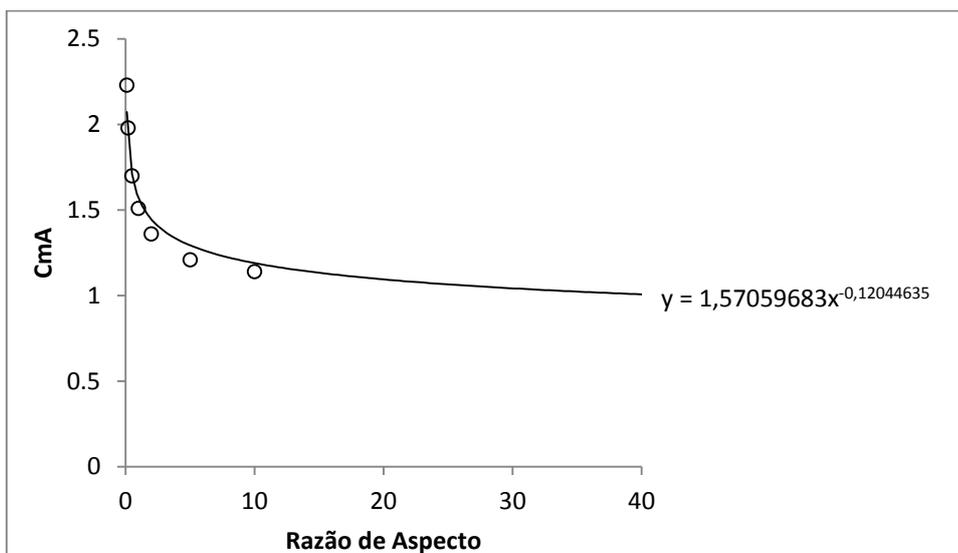
	$a/b = \infty$	Vertical	1.0
	$a/b = 10$		1.14
	$a/b = 5$		1.21
	$a/b = 2$		1.36
	$a/b = 1$		1.51
	$a/b = 0.5$		1.70
	$a/b = 0.2$		1.98
	$a/b = 0.1$		2.23

Fonte: DNV (2010)

Com base na Figura 29 foi feito a regressão mostrada na Figura 30. Nesta regressão chegou-se em uma expressão que aproxima o valor do fator de massa adicional dos flutuadores ( $C_{mA}$ ). Com este fator encontrou-se a massa adicional nos flutuadores multiplicando o deslocamento dos flutuadores pelo coeficiente  $C_{mA}$ .

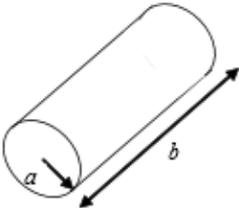
Para a massa adicional nas colunas realizou-se o mesmo procedimento. A regressão foi realizada utilizando a tabela também retirada da DNV como mostra a Figura 33.

Figura 30 – Regressão do coeficiente de massa adicional do flutuador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

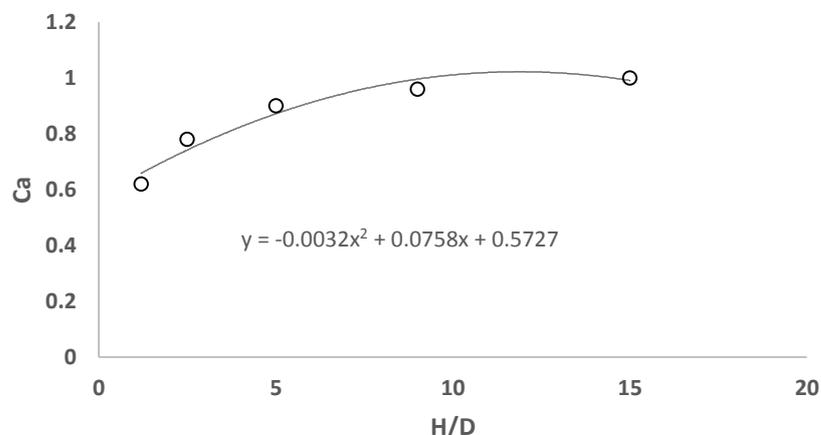
Figura 31 – Coeficiente de massa adicional para coluna.

	Vertical	$b/2a$	$C_A$
		1.2	0.62
2.5	0.78		
5.0	0.90		
9.0	0.96		
$\infty$	1.00		

Fonte: DNV(2010)

A regressão da tabela da DNV resultou no gráfico da Figura 34.

Figura 32 – Regressão do coeficiente de massa adicional da coluna



Fonte: Elaborada pelo autor.

Deve-se ressaltar que estas regressões são válidas apenas para o intervalo presente nas tabelas das figuras 31 e 33, visto que fora destes intervalos acumulam um erro considerável.

Chegou-se em uma função quadrática dependente da razão de aspecto do cilindro (coluna sobre diâmetro) que descreve o fator de massa adicional das colunas, que neste estudo foi chamado de “CmC”. Em seguida multiplicou-se esse fator pelo deslocamento das colunas e encontrou a massa adicional das colunas.

A Tabela 7 mostra os valores encontrados de massa adicional.

Tabela 7 – Massa adicional da semi-submersível

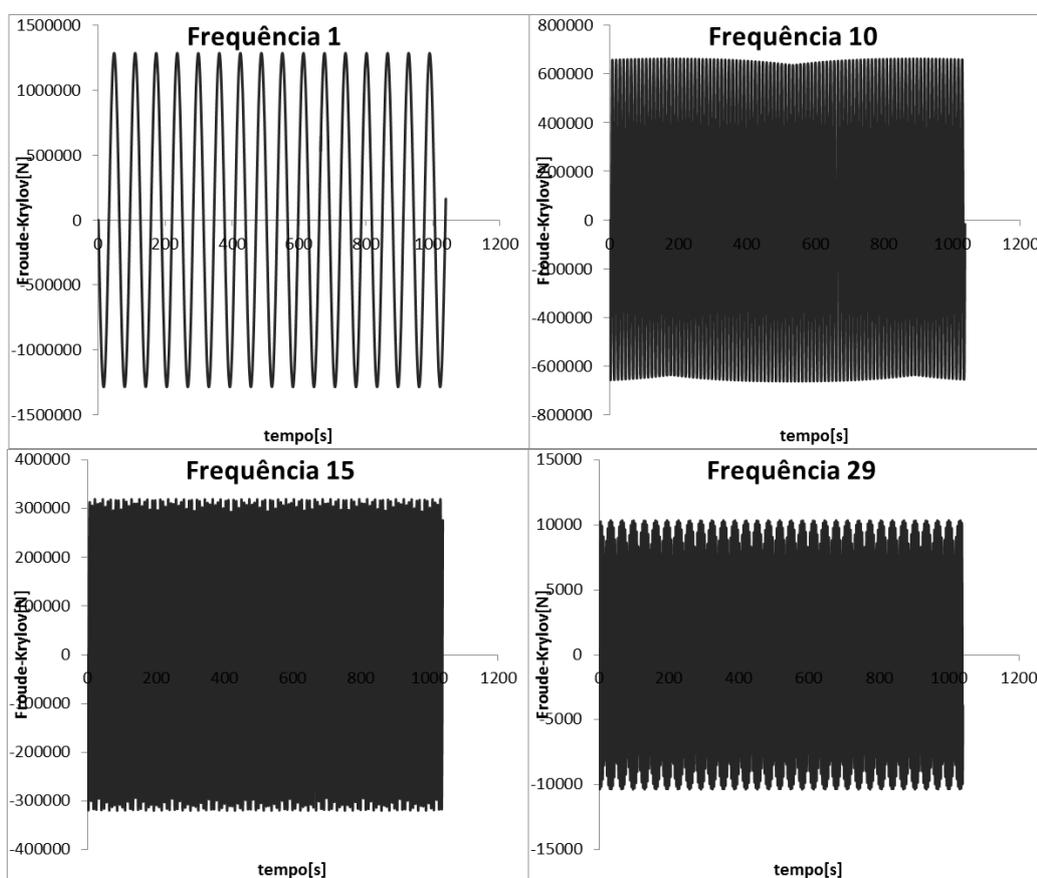
Massa Adicional		
Razão de Aspecto da Seção do Flutuador	a/b	2,13
Fator de Massa Adicional dos Flutuadores	CmA	1,43
Deslocamento das Colunas		6966209 kg
Deslocamento dos Flutuadores		18973087 kg
Massa Adicional Flutuadores Descoberto	-	27199993 kg
Massa Adicional Colunas	-	2226766 kg
Fator de Massa Adicional das Colunas	CmC	0,32
Razão de Aspcto da Coluna		0,50

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.1.2. Froude-Krilloff

O modelo analítico para determinar as forças de Froude-Krylov atuantes na plataforma é semelhante ao utilizado no cilindro. As principais diferenças ocorrem nas formulações matemática, para a força de Froude-Krylov nas colunas utiliza-se a Equação 9, e nos flutuadores a Equação 10 como já apresentadas na fundamentação.

Figura 33 - Simulação no domínio do tempo

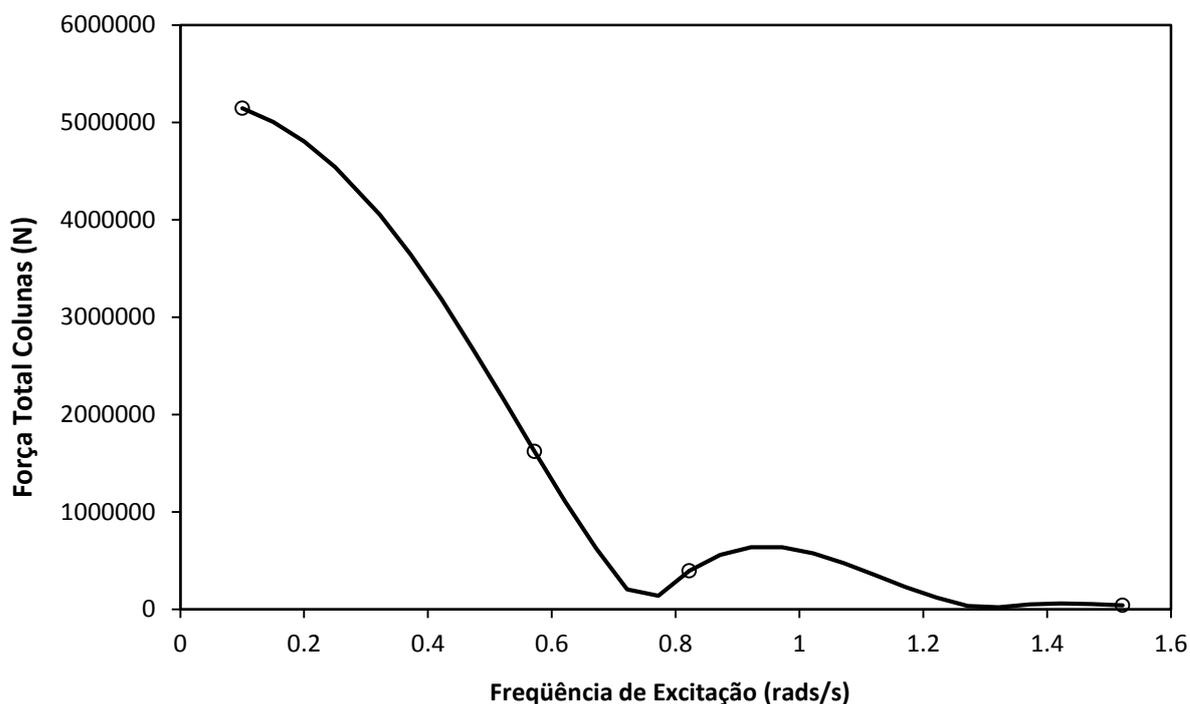


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 35 mostra 4 simulações no domínio do tempo para exemplificar o método

Em seguida foi feito a soma da força de cada coluna para um mesmo instante de tempo e frequência – variando os 1038 segundos e 29 frequências – formando assim uma matriz de 1038 x 29. Foi plotado um gráfico de Força x Frequência, no qual para cada frequência plota-se a força máxima. A Figura 36 mostra o gráfico de Froude-Krylov das colunas

Figura 34 - Força de Froude-Krylov nas colunas



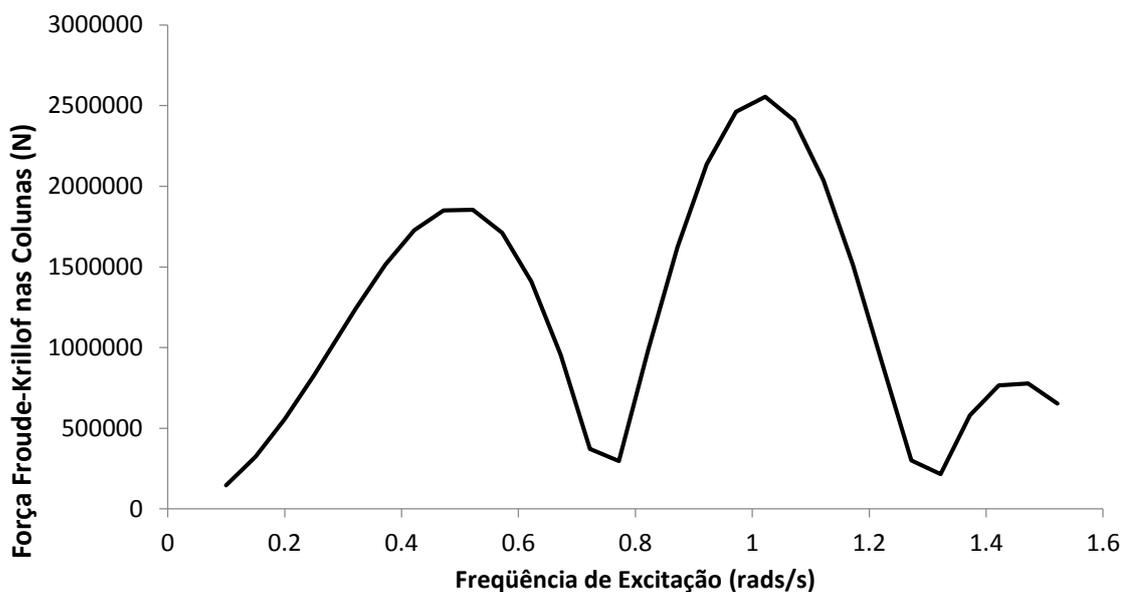
Fonte: Elaborada pelo autor

Pode-se ver os quatro pontos em destaque exemplificando onde estão os pontos da figura anterior.

Assim como na coluna deve ser calculado as forças para cada flutuador onde o parâmetro  $X_n$  varia. Além disso, foi variado no domínio do tempo, 1038 segundos e no da frequência, 29 frequências assim como nas colunas.

Para calcular a força total dos flutuadores, foi feito uma soma de todas as forças para o mesmo tempo e frequência, gerando uma matriz de 29 x 1038 onde para plotar o gráfico de força máxima em função da frequência que é mostrado na Figura 37.

Figura 35 - Froude-Krylov nos flutuadores

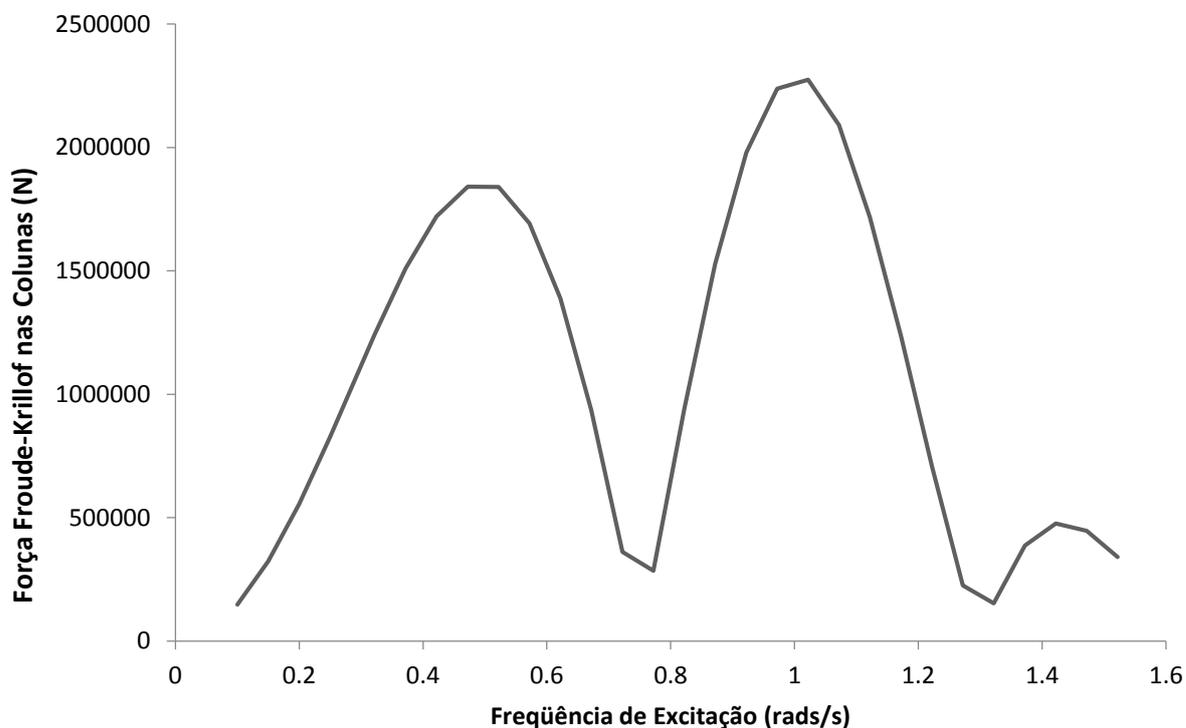


Fonte: Elaborada pelo autor.

Diferentemente da coluna, no flutuador a consideração de que a força atuante é constante em toda sua extensão irá acumular erro, dado que o comprimento do flutuador é muito maior que o diâmetro da coluna. Para corrigir esta aproximação grosseira foi feita uma discretização maior dos flutuadores. Foi dividido cada flutuador em quatro partes. Calculou-se então a força para cada uma das oito partes (quatro para cada flutuador) onde o que variou na formulação matemática foi o  $X_n$ .

A seguir foi feito novamente a soma de todos os termos que tinham tempo e frequência iguais. Somando os oito termos, chegou-se novamente na matriz  $29 \times 1038$  e foi plotado o gráfico de força máxima para cada frequência, mostrado na Figura 38.

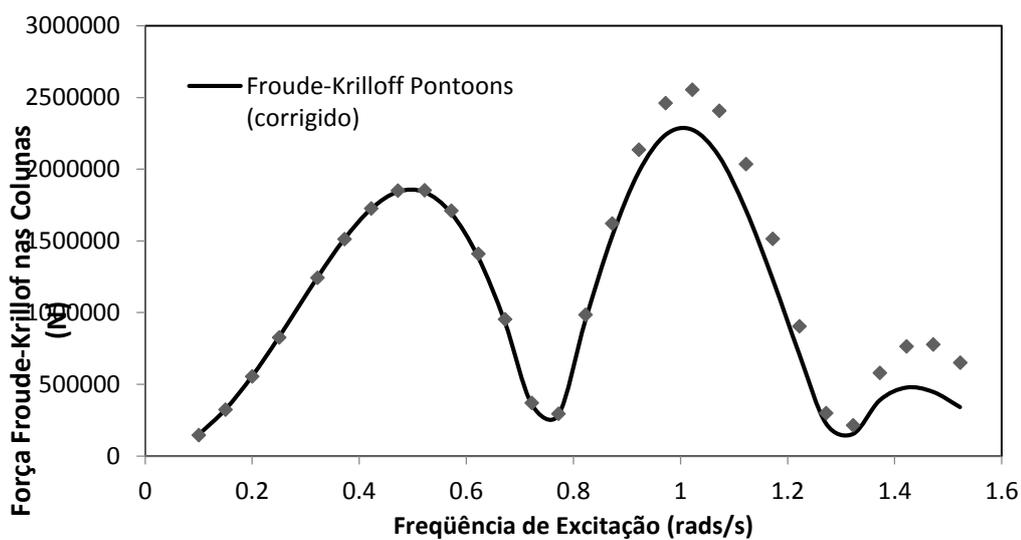
Figura 36 - Froude-Krylov nos Flutuadores (Corrigido)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A fim de analisar se a correção foi válida, foram confrontados os gráficos da força de Froude-Krylov não corrigidos e corrigidos. A Figura 39 mostra os gráficos.

Figura 37 - Froude-Krylov nos Flutuadores (Simples) X (Corrigido)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se ver que para frequências altas acima de 1 rad/s, onde a força é máxima, ocorre um erro de aproximadamente 12%.

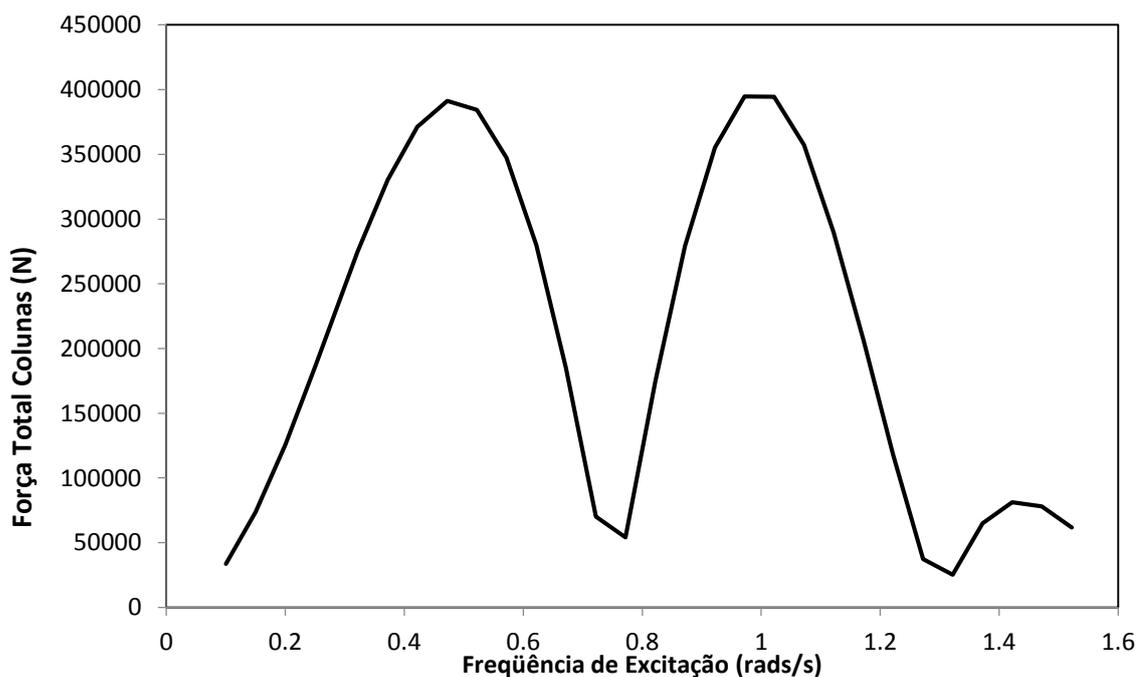
### 3.2.1.3. Força de Difração

Para a parcela da difração da força atuante na plataforma foi utilizado à formulação de Faltinsen(1990). A Equação 15 mostra a equação

$$F_{pn} = -\omega^2 * A * e^{k*(h)} * C_m C * \rho p * \sin(\omega t - k X_n) \quad (15)$$

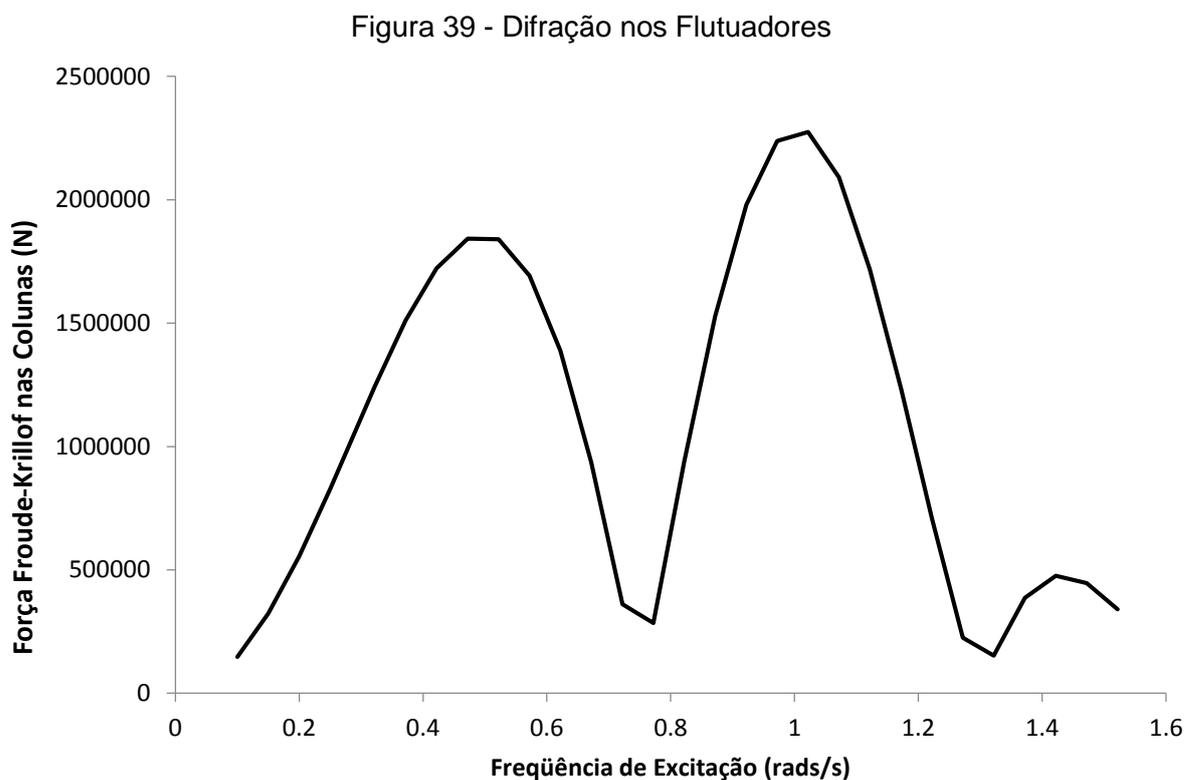
Na difração, considera-se o efeito da massa adicional do sistema, representado na Equação 15 por  $C_m C$ , fator da massa adicional nas colunas. O cálculo da difração das colunas foi feito variando a Equação 25 no domínio do tempo e da frequência para cada coluna. Construindo quatro matrizes 29 X 1038 onde nas linhas varia a frequência de excitação e nas colunas o tempo. Somou-se as quatro matrizes que foram diferenciadas entre si com a variação do parâmetro  $X_n$ . Novamente foi plotado um gráfico de força em função da frequência. Utilizando a força máxima para cada frequência. A Figura 40 mostra o gráfico de difração.

Figura 38 - Difração nas colunas



Fonte: Elaborada pelo autor.

O cálculo da força de difração nos flutuadores foi feito multiplicando a força de Froude-Krylov nos flutuadores pelo fator de massa adicional dos flutuadores,  $C_m A$ . O gráfico da difração nos flutuadores é mostrado pela Figura 41.

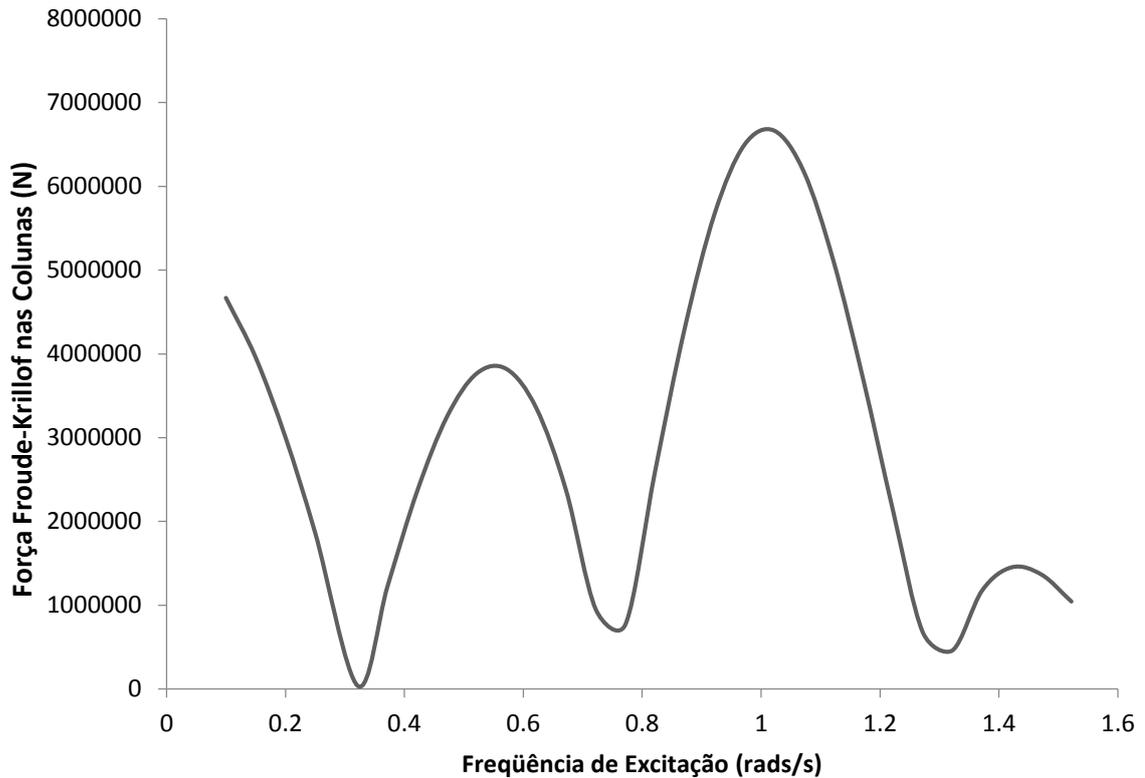


Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 3.2.1.4. Força Total

Por fim, uniram-se as forças de Froude-Krylov e difração para as colunas e flutuadores. Para isso foram somadas as quatro matrizes de força que variam com o tempo e a frequência. A Figura 42 mostra o gráfico de força total.

Figura 40 - Força total



Fonte: Elaborada pelo autor.

Deve-se ressaltar que as forças de Froude-Krylov e difração não estão no mesmo período de tempo, para corrigir isso deve-se ser feito um ajuste de fase, mostrado na Equação 16.

$$F_t = F_{\max} \text{FK} * \cos(\omega t_1) + F_{\max} \text{Difr} * \cos(\omega t_2) \quad (16)$$

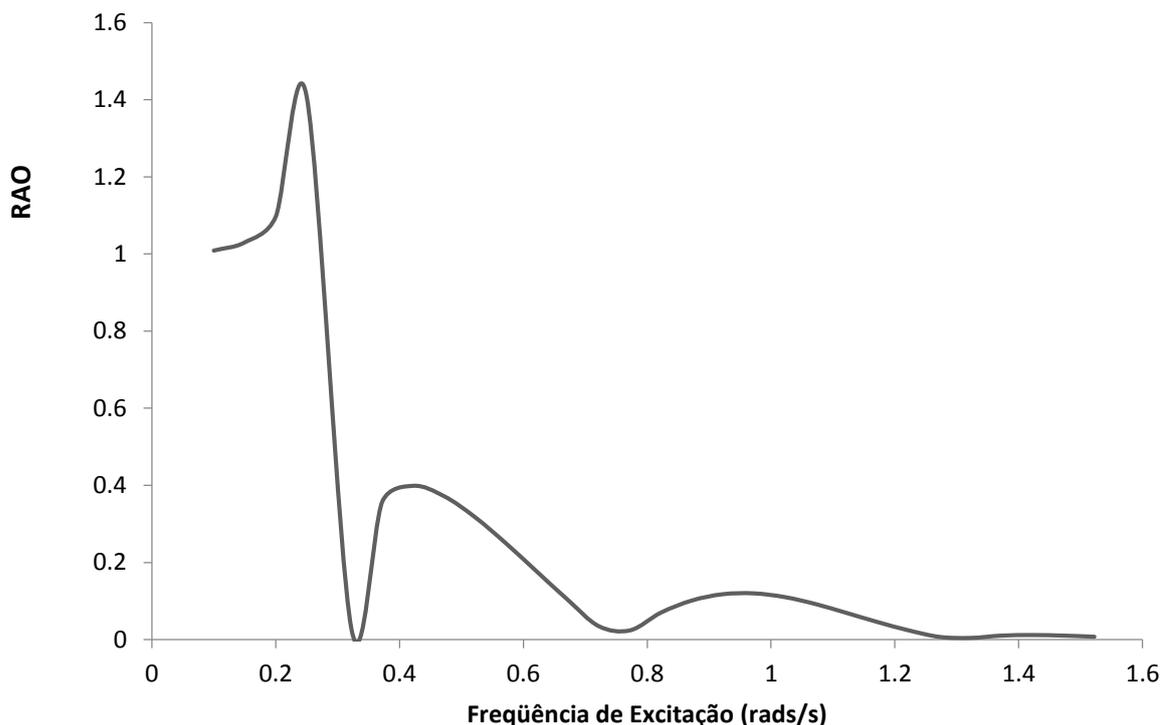
Onde  $t_1$  é o tempo em que a força de froude-kryov é máxima e  $t_2$  é o tempo onde as forças de difração são máximas.

### 3.2.1.5. RAO

Para determinar o RAO foi utilizado a mesma formulação usada no RAO de uma coluna. A principal diferença para a plataforma é a força  $F_a$  que, como visto até agora, é a soma das parcelas de Froude-Krylov e da difração.

A Figura 43 mostra o gráfico de RAO para uma semi-submersível.

Figura 41 - RAO da semi-submersível



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se ver como explicado anteriormente que este gráfico tem todas as características de um RAO de semi-submersível, dado o ponto de partida, pico, pontos de máximos, pontos de anulamento e tendendo a zero para altas frequências.

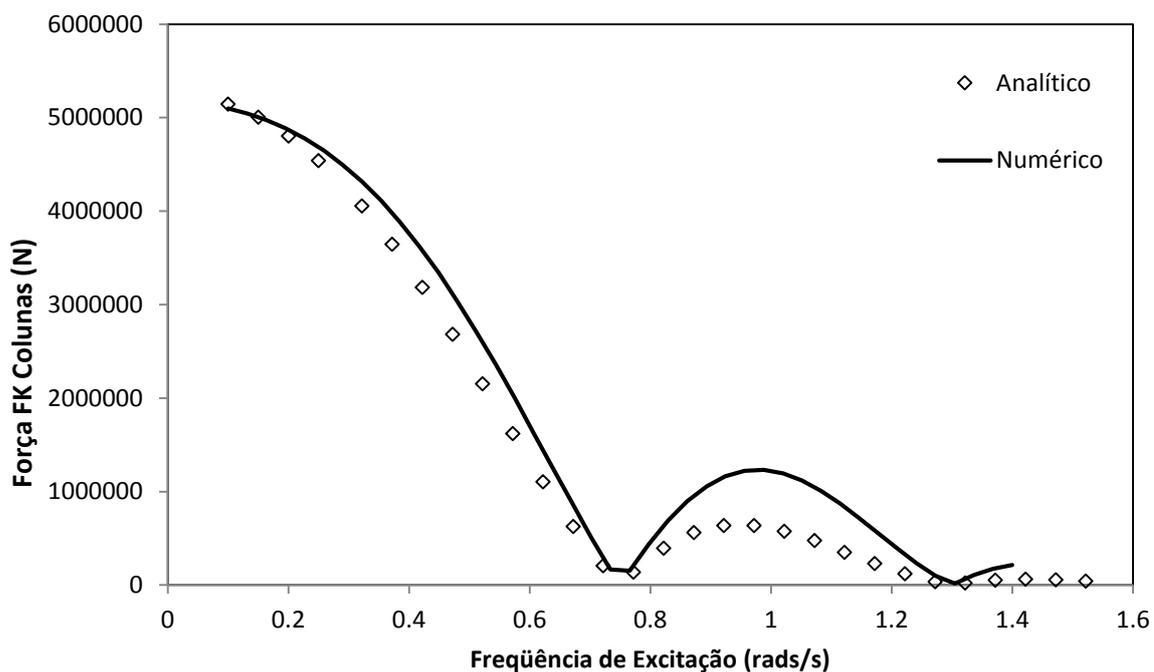
### 3.2.2. Comparação

Neste tópico será realizada uma comparação dos métodos numérico e analítico. Também será feita uma validação dos estudos com base na dissertação de mestrado de Garcia (2014) que realizou ensaios em tanques de prova com um modelo em escala reduzida da plataforma GVA 4000.

#### 3.2.2.1. Froude-Krylov Colunas

A Figura 44 mostra os gráficos de força de Froude-Krylov nas colunas da plataforma.

Figura 42 - Comparação de Froude-Krylov nas colunas



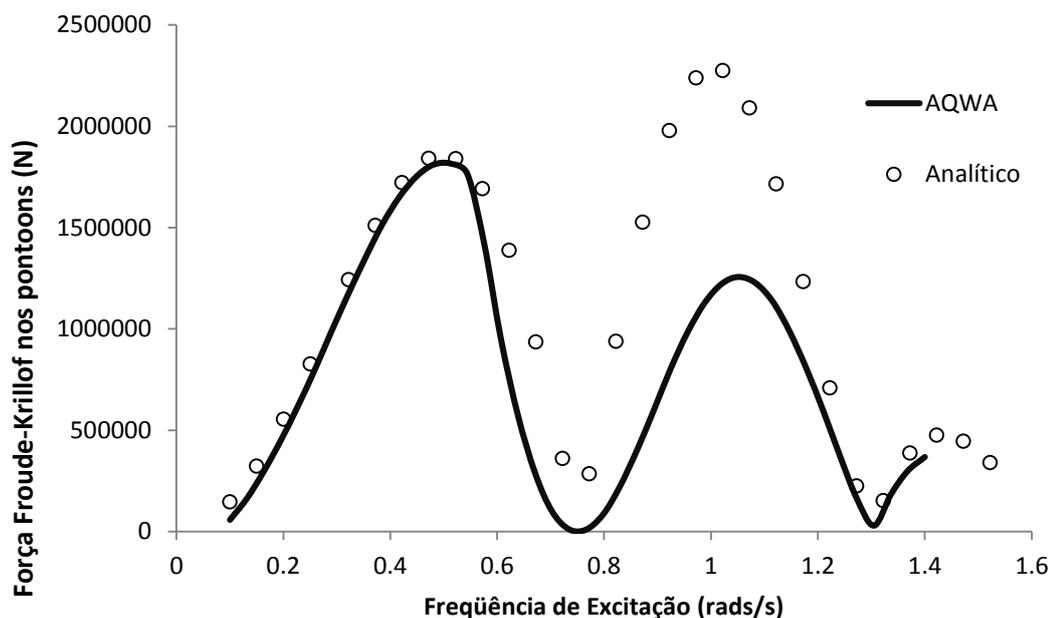
Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar a partir da frequência 0,8 rad/s que há uma certa discrepância no ponto de máximo. Os pontos de zero continuam constantes.

### 3.2.2.2. Froude-Krylov nos *Pontoons*

A Figura 45 mostra os gráficos sobrepostos de força de Froude-Krylov aplicadas nos flutuadores.

Figura 43 - Comparação das forças de Froude-Krylov nos flutuadores.



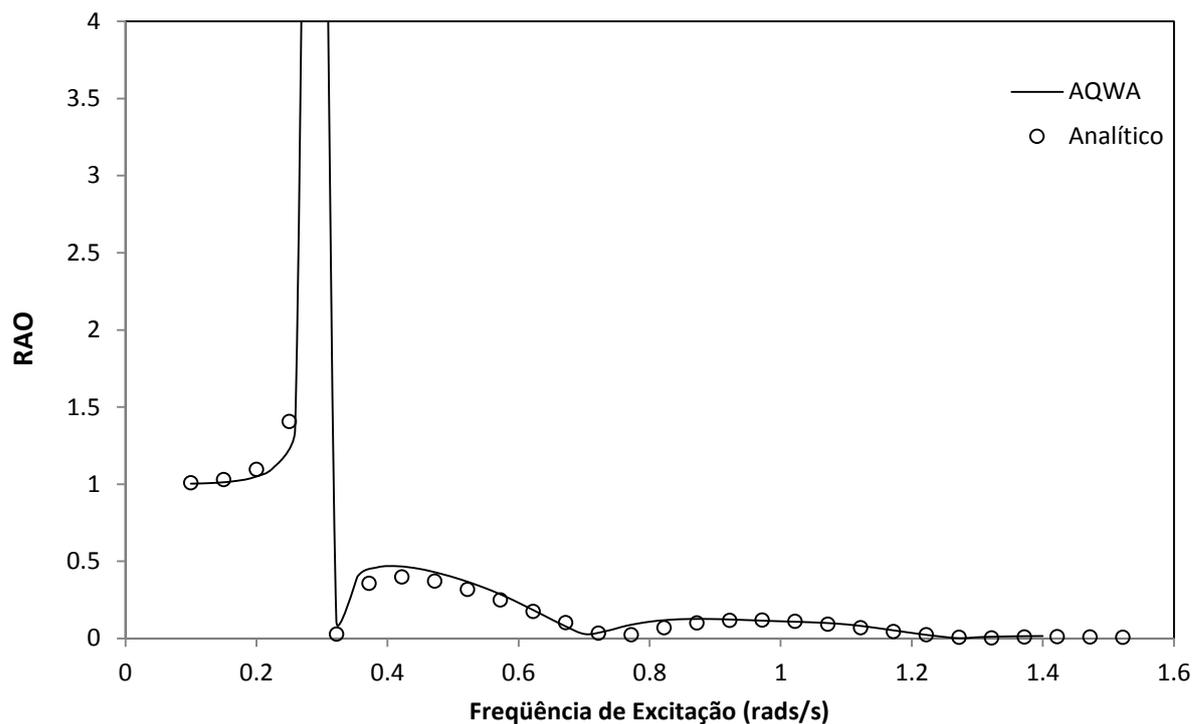
Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste caso existe certa discrepância nos gráficos, a ordem de grandeza das forças nos flutuadores é cerca de 30 vezes menor do que nas colunas. Esse erro ocorre devido as simplificações da geometria da plataforma, no modelo matemático não são considerados os abaulamentos nos flutuadores.

### 3.2.2.3. RAO

A Figura 46 mostra os gráficos de RAO para ambos os métodos.

Figura 44 - Comparação dos gráficos de RAO nos métodos numérico e analítico



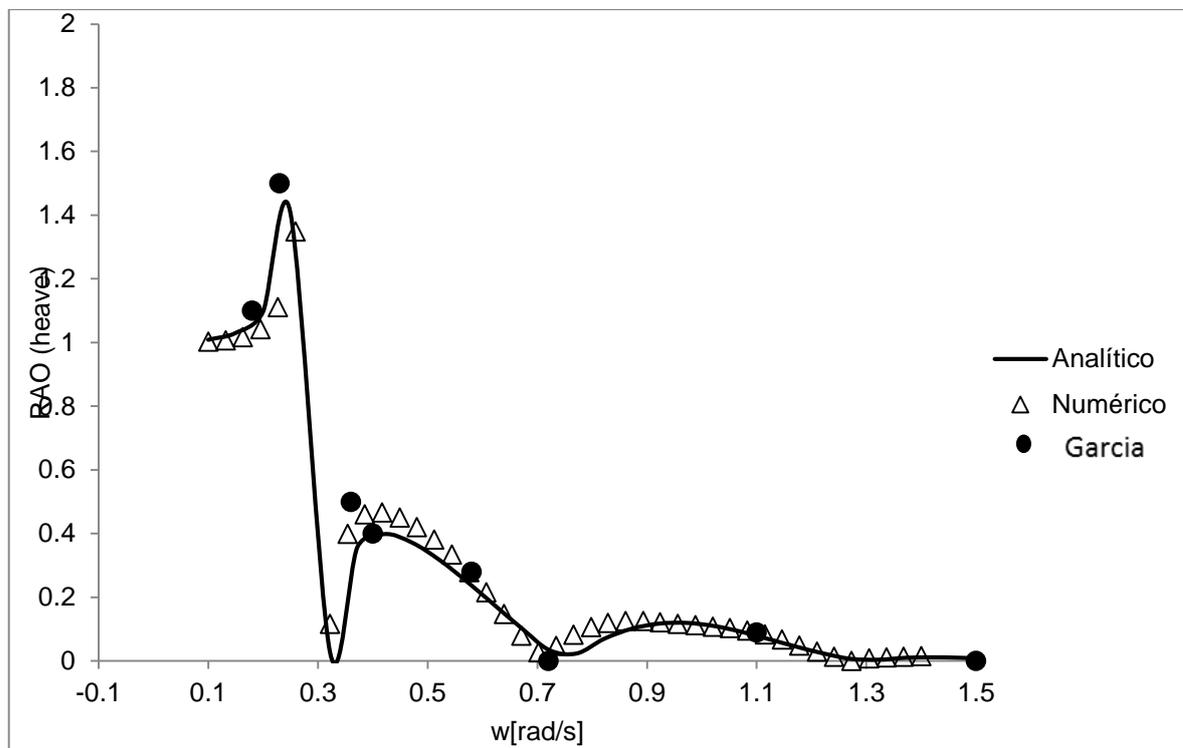
Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a análise destes gráficos pode-se dizer que o método matemático aderiu bem à simulação numérica.

#### 3.2.2.4. Validação Experimental

A fim de validar os métodos será feita uma comparação dos estudos com base na dissertação de mestrado de Garcia (2014) que realizou ensaios com um modelo em escala reduzida da plataforma GVA4000 em um tanque de provas. A Figura 47 mostra os gráficos analítico, numérico e experimental sobrepostos.

Figura 45 - Comparação experimental, numérica e analítica da plataforma GVA 4000.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se constatar que a modelagem analítica proposta foi validada. Os pontos experimentais de Garcia aderiram bem ao gráfico. Faz-se uma ressalva para o segundo ponto de anulamento, que teve uma ótima aderência.

O experimento de Garcia (2014) já considera os resultados do modelo em escala reduzida extrapolados para o tamanho real.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Análise Paramétrica

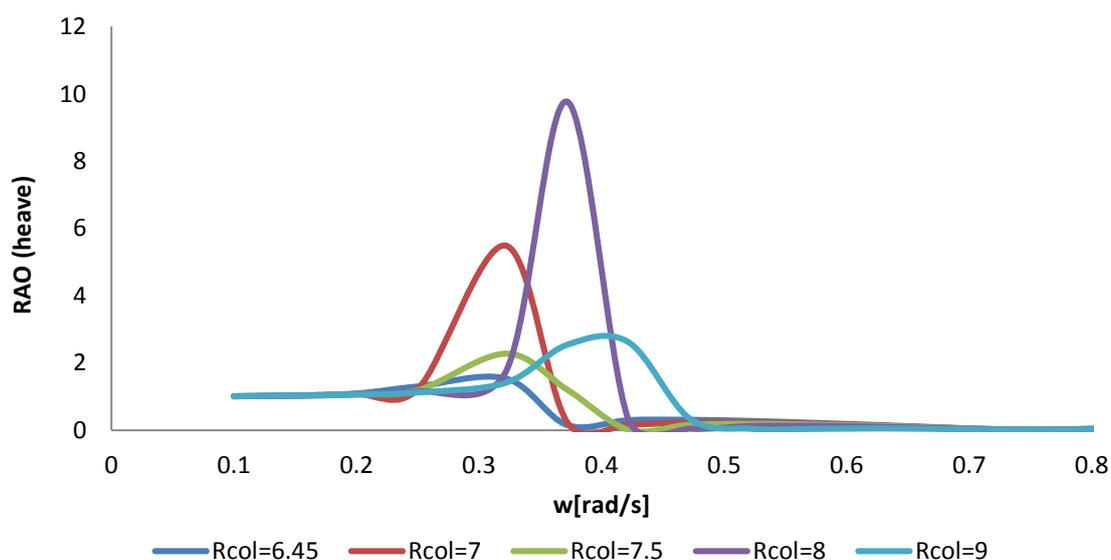
Neste capítulo será apresentada a análise paramétrica do movimento de *heave* em função do raio das colunas, altura da coluna submersa, razão de aspecto da seção dos flutuadores, amortecimento potencial do sistema e da distância entre flutuadores.

É importante observar que a variação dos parâmetros foi realizada de maneira sistemática no entorno do valor de referência apresentado no capítulo anterior.

#### 4.1.1.1. Raio da Coluna

A Figura 48 mostra a variação do RAO para a o aumento do raio da coluna. Pode-se analisar que a frequência natural do sistema desloca-se para a direita, isso ocorre pois a proporção em que a rigidez (numerador) aumenta com o raio da coluna é maior do que a inércia (denominador) aumenta, acarretando um aumento.

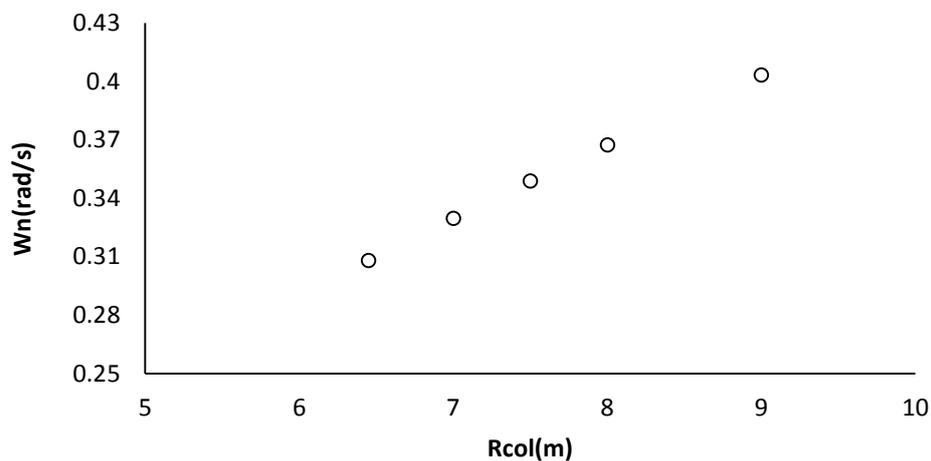
Figura 46 - RAO analítico da semi-submersível variando o raio da coluna



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 49 mostra o gráfico de como a frequência natural varia com o raio da coluna.

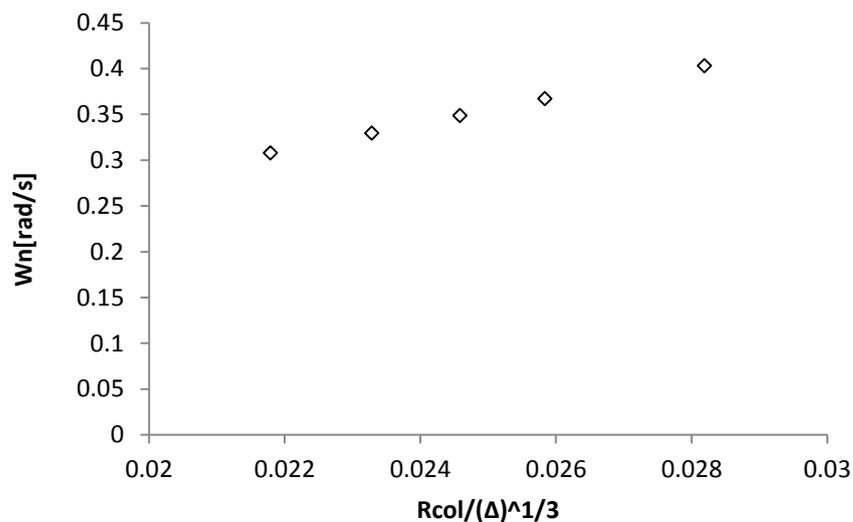
Figura 47 - Frequência natural em função do raio da coluna.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 50 mostra o quanto o raio tem uma taxa de variação maior que o deslocamento resultando em uma crescente linear da frequência natural.

Figura 48 - Adimensional do raio pelo deslocamento em função da frequência natural

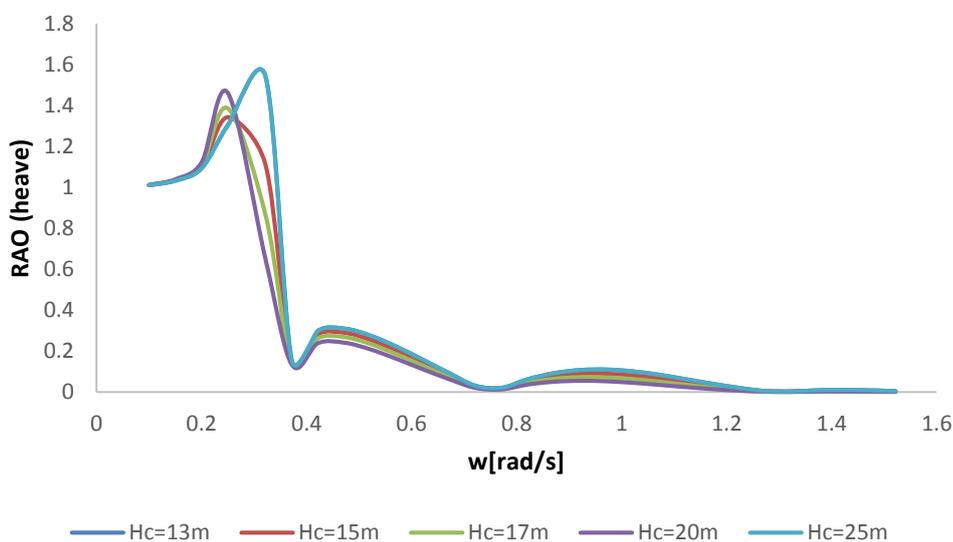


Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.1.2. Altura das Colunas

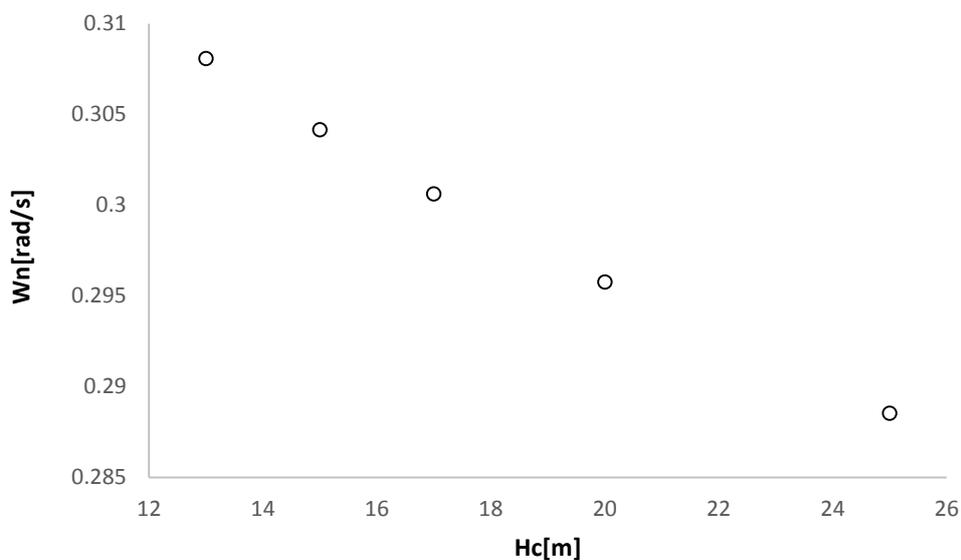
Outro parâmetro variado foi o de comprimento submerso das colunas. Neste caso percebeu-se que a variação do comprimento das colunas deslocou os picos do RAO para a esquerda, diminuindo a frequência natural dos sistemas (Figura 51). Esse comportamento condiz com a fundamentação teórica, visto que o aumento da altura submersa das colunas aumenta a massa do sistema sem aumentar a rigidez ao movimento de *heave*, reduzindo, portanto, a frequência natural deste grau de liberdade.

Figura 49 - RAO variando com as alturas das colunas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

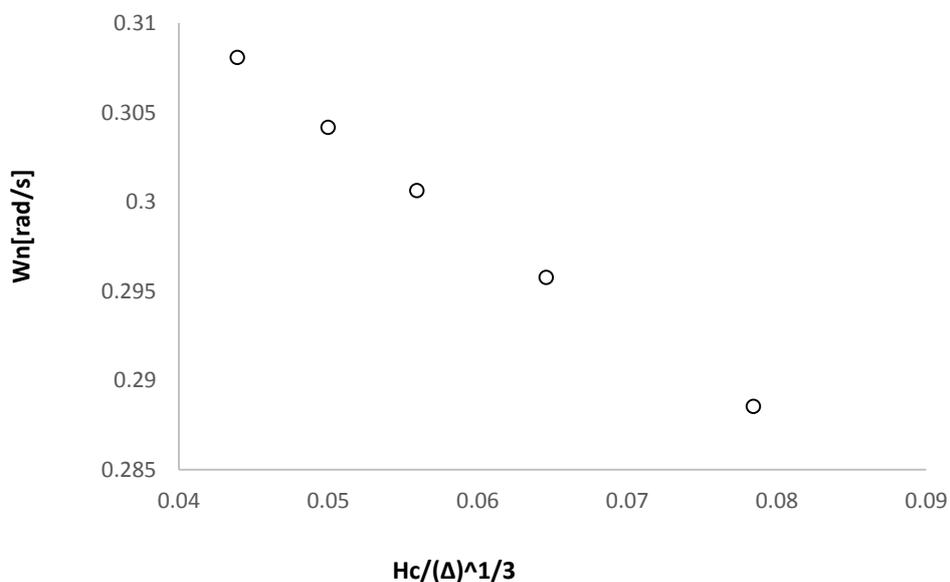
A Figura 52 mostra a variação da frequência natural em função da altura submersa da coluna.

Figura 50 -  $W_n$  em função de  $H_c$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se notar que a frequência natural decresce linearmente no domínio estudado de variação da altura da coluna submersa. Como pode ser visto também no gráfico de RAO.

A correlação adimensional de  $H_c$  e deslocamento também demonstrou um comportamento de decréscimo linear (Figura 53).

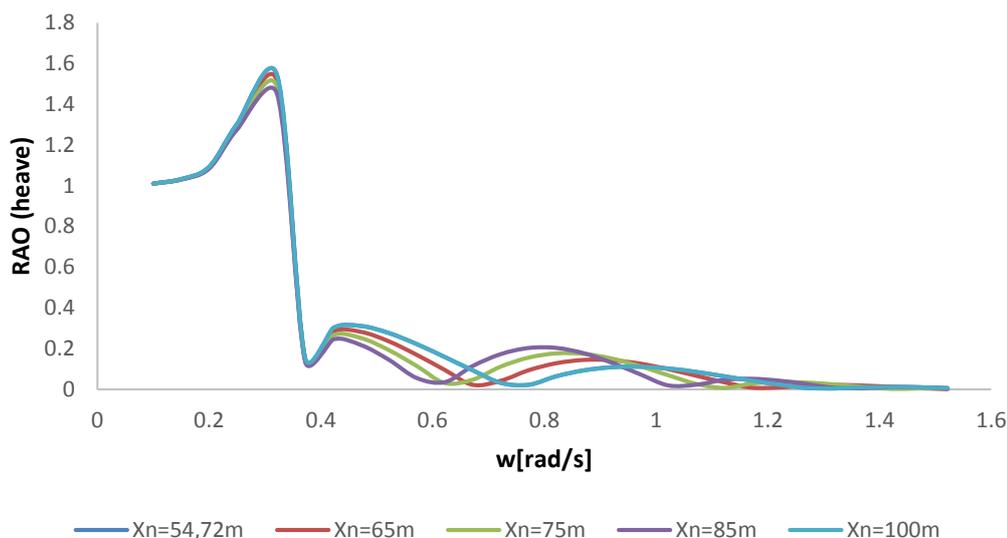
Figura 51 -  $W_n$  em função de  $H_c/(\Delta)^{1/3}$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.1.3. Distância entre Flutuadores

Nesta análise foram gerados cinco gráficos variando a distância entre colunas de 54,72m até 100 metros. A Figura 54 mostra o quanto varia o RAO em função de da variação deste parâmetro.

Figura 52 - RAO variando a distância entre os flutuadores



Fonte: Elaborada pelo autor.

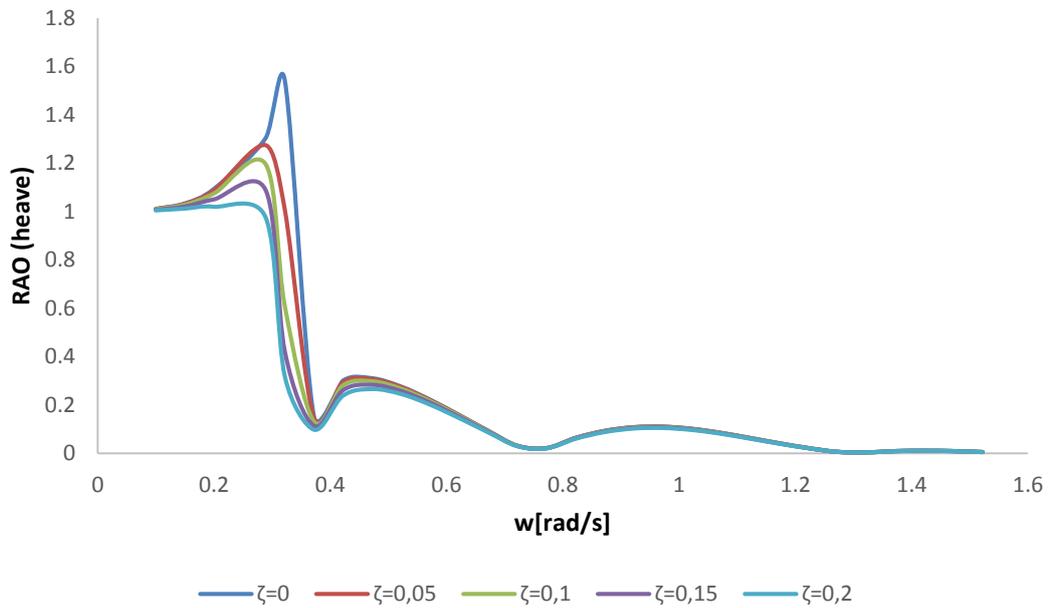
A partir dos gráficos pôde-se constatar que a frequência natural não se altera, isto ocorre, pois a frequência natural depende da inércia e da rigidez, o aumento da distancia entre flutuadores não acarretará em aumento da massa do sistema fazendo com que as frequências naturais permaneçam constantes.

A principal influência que a distância entre os flutuadores gera é nos pontos de anulamento do gráfico. Isto ocorre, pois o comprimento da plataforma varia e assim, para cada plataforma o anulamento do movimento em *heave* irá ocorrer em uma frequência diferente.

#### 4.1.1.4. Amortecimento

O amortecimento no gráfico de RAO mostra o quanto o pico do gráfico decai com o seu aumento. A Figura 55 mostra esses gráficos.

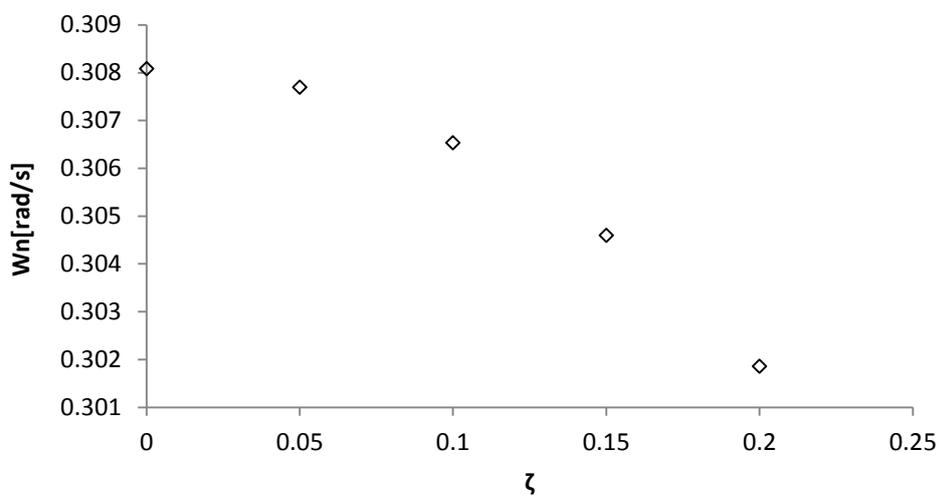
Figura 53 - RAO para variação de amortecimento



Com esse abaulamento do pico, ocasionado pelo amortecimento, a tendência é que a frequência natural desloque para esquerda no gráfico. Pois um maior amortecimento pode ser interpretado como um maior gasto de energia para mover a mesma massa, ou movendo menos massa com a mesma energia. Dentro dessa analogia, ao se aumentar a massa do sistema, sem modificar a rigidez, ocorre a redução da frequência natural.

A Figura 56 mostra como a frequência natural decai com o aumento do coeficiente de amortecimento. Pode-se perceber que, diferentemente dos outros casos, neste o decaimento é parabólico.

Figura 54 – Variação da frequência natural com o amortecimento

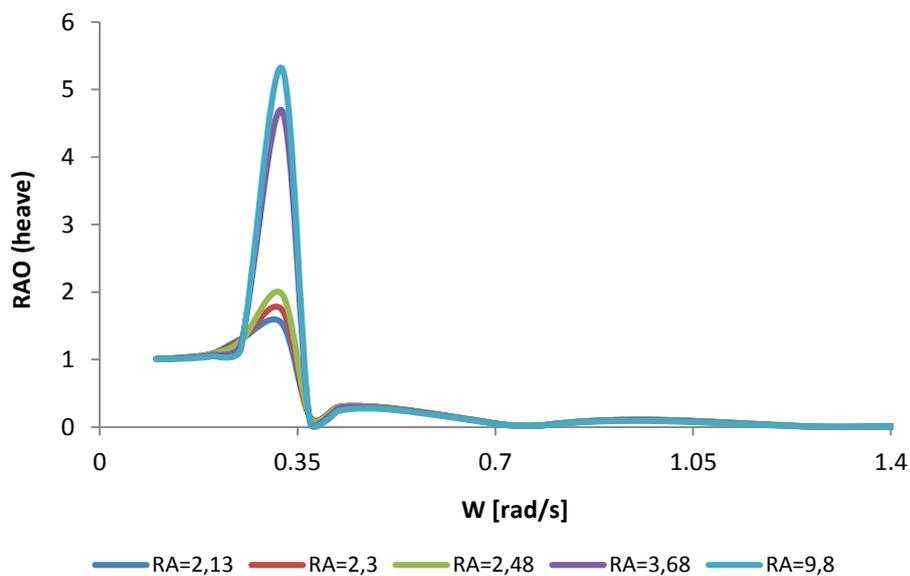


Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.1.5. Razão de Aspecto

Para finalizar as análises paramétricas foi feito uma análise da geometria do flutuador, o parâmetro variado neste caso foi a razão de aspecto que é a razão entre a largura e a altura da secção do flutuador. A variação da razão de aspecto foi feita de tal forma que o deslocamento se conservasse em todas as variações. Como resultado disso foram gerados os seguintes gráficos RAO mostrados na Figura 57.

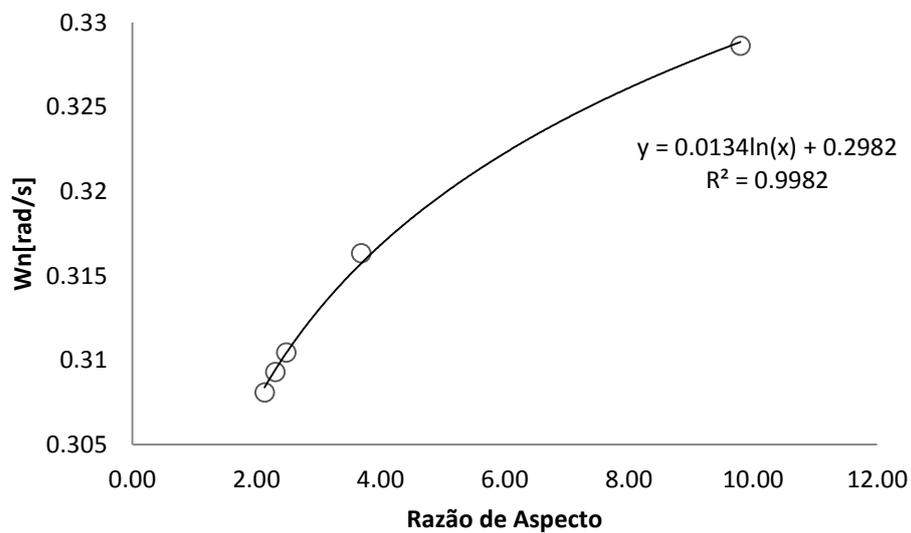
Figura 55 - RAO para variação de Razão de Aspecto



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pôde-se perceber que a variação da frequência natural com a razão de aspecto ocorre de forma logarítmica, como mostra a Figura 58, pois a geometria do flutuador afeta apenas a massa adicional e o amortecimento da plataforma.

Figura 56 - Variação da frequência natural com a razão de aspecto



Fonte: Elaborada pelo autor.

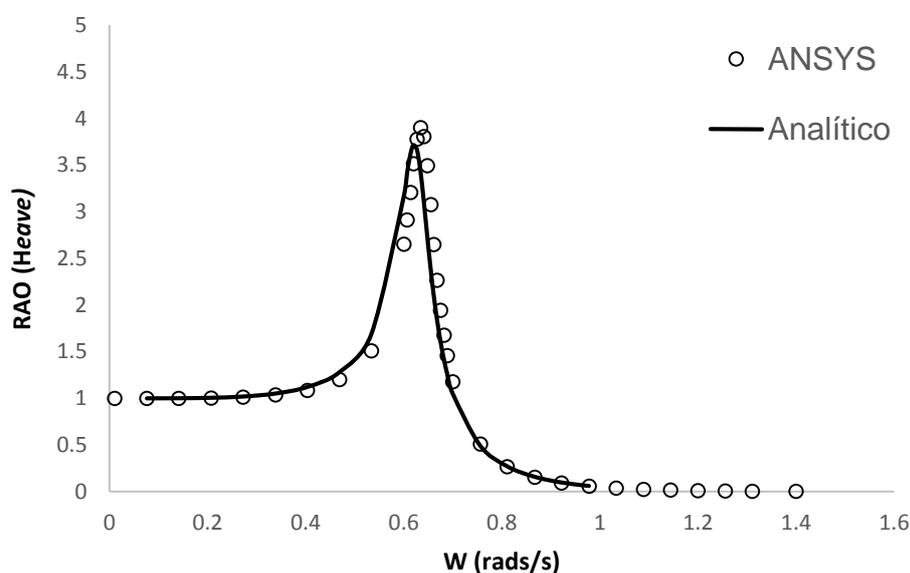
## 5. CONCLUSÕES

Neste capítulo será feito uma breve discussão sobre as conclusões das análises da coluna, plataforma e sobre o modelo paramétrico da plataforma.

### 5.1. Análise de uma Coluna

Ao comparar os métodos numérico e analítico para a simulação de uma coluna oscilando verticalmente, foi constatado que o método analítico foi bem fundamentado aderindo-se bem aos resultados obtidos por simulação numérica, especialmente quando foi ajustada a massa adicional e o fator de amortecimento utilizado no método analítico (Figura 59).

Figura 57 - Comparação numérico analítica para uma coluna ajustando o fator de amortecimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.2. Análise de uma Plataforma Semi-submersível GVA 4000

Neste estudo pôde-se constatar que os métodos analíticos aderiram bem a simulação numérica experimental para o movimento em *heave* para a plataforma estudada.

Com o auxílio da dissertação de Garcia pôde ser validado o método analítico para que o estudo de variação paramétrica pudesse ser realizado e concluir assim o objetivo geral deste trabalho.

### **5.3. Análise Paramétrica de Uma Semi-submersível**

As análises paramétricas mostraram as influências de certos parâmetros no comportamento de *heave* de uma plataforma semi-submersível. Pôde-se ver a influência que os parâmetros importantes como: raio e altura submersa das colunas, razão de aspectos da secção dos flutuadores, distância entre os flutuadores e amortecimento. Pôde-se notar que a variação de cada parâmetro teve uma influência no movimento de *heave* da plataforma.

O raio das colunas mostrou uma grande influência na frequência natural da plataforma. O aumento do raio das colunas aumenta a rigidez mais rapidamente do que a inércia, resultando em um aumento da frequência natural.

Por outro lado, a altura submersa das colunas mostrou-se inversamente proporcional à frequência natural. Isso ocorreu pois ao aumentar a altura das colunas aumenta-se o deslocamento e massa adicional do sistema, os quais são inversamente proporcionais à frequência natural. Conclui-se também que a frequência natural não decai para o aumento da altura como cresce para o aumento do raio das colunas, isso se dá pois o raio da coluna é elevado a quatro enquanto a altura é elevado à potencia 1, ambos dentro da raiz.

O parâmetro distância entre os flutuadores mostrou-se determinante para os pontos de anulamento do sistema, o que pôde ser visto nos gráficos de RAO da análise paramétrica. Em um projeto de plataforma este parâmetro pode ser um fator a se considerar dependendo do local de operação.

Tanto a razão de aspecto quanto o amortecimento apresentaram uma tendência semelhante de diminuir o pico do sistema. Porém a altura de pico não é um parâmetro de grande importância no projeto destes sistemas, que em geral, trabalham fora da região de ressonância.

A conclusão final deste trabalho foi a geração de uma matriz de influência dos parâmetros geométricos de uma plataforma semi-submersível, mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 – Análise da influência dos parâmetros hidrodinâmicos

	Rigidez	$\Delta$	$\Delta a$	$W_n$	Pico do RAO
<b>Rcol</b> ↑	Alta↑	Alta↑	Alta↑	Alta↑	Baixa↑
<b>Hc</b> ↑	Nula	Média↑	Média↑	Média↓	Baixa↑
<b>Xn</b> ↑	Nula	Nula	Nula	Nula	Baixa↓
<b><math>\zeta</math></b> ↑	Nula	Nula	Nula	Média↓	Alta↓
<b>RA</b> ↑	Nula	Alta↑	Nula	Média↓	Alta↓

Fonte: Elaborada pelo autor.

\* As setas indicam a variação positiva ou negativa do parâmetro analisado.

#### 5.4. Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros sugere-se a validação experimental dos resultados aqui obtidos, além de estudos mais aprofundados considerando-se os movimentos de *pitch* e *roll*, e para diferentes ângulos de incidência de onda

Um dos tópicos de maior abrangência em trabalhos futuros é o de análise paramétrica. Poderá ser feito um estudo de otimização visando reduzir os movimentos de uma plataforma com geometrias complexas, como aquelas proposta por Birk (2008).

## REFERENCIAS

BIRK, Lothar. On the Shape Optimizations of Semisubmersibles: Schiffstechnik. Ship Technology Research. New Orleans, p. 166-176, 2008.

CHAKRABARTI, S. et al., 2007, Design Analysis of a Truss Flutuador Semi-Submersible Concept in Deep Water. Ocean Engineering, v. 34, p. 621-629.

CHAKRABARTI, S. 2003 "Hydrodynamics of Offshore Structures", WIT Press, Southampton, UK.

De CONTI, M B; ANDRADE, B L. R.; BIRK, Lothar. Differentiation Between the Lower and Upper Parts of Columns of Semi-Submersibles for *Heave* Response Improvement. Marine Systems Ocean Technology. São Paulo, p. 63-72. 2009.

DNV OCEAN: Environmental Conditions And Environmental Loads. (2008), Det Norske Veritas. p.128.Appendix D.

FALTINSEN, O.M. (1990) "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", Cambridge University Press, Cambridge, UK

Fujarra, A. (2009). Dinâmica de Sistemas : Módulo 2 – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

GARCIA, Edgard Enrique Mulford. Procedimento para determinação experimental de carregamentos externos para o projeto estrutural de uma plataforma Semi-Submersível. 2014. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Engenharia Naval, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

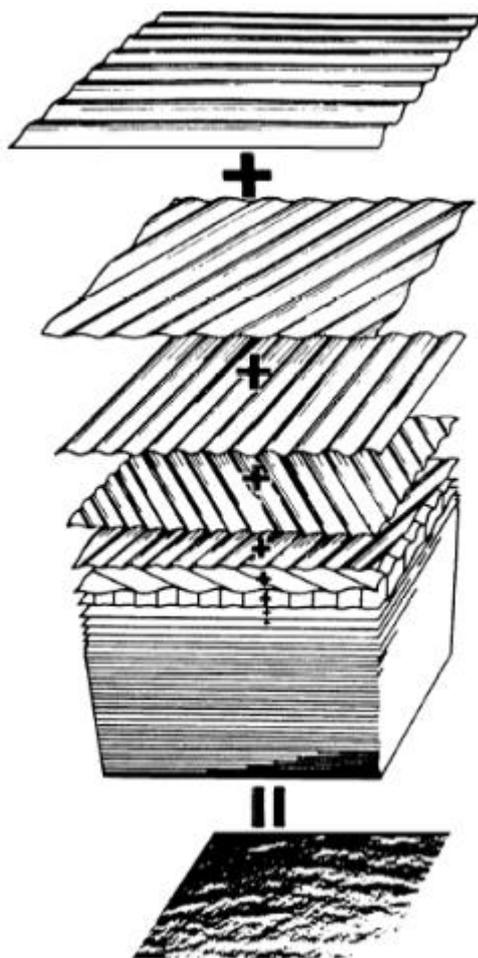
HOSAAS, A. Concepção Otimizada De Semi-submersível Visando Oscilações Verticais Mínimas Sob Excitação De Ondas. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Naval, Departamento de Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PEREIRA, V.M.S. Análise Da Resposta Dinâmica Do Tubo Vertical Do Sistema De *Riser* Suspenso E Ancorado Por Amarras (RSAA). 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Naval, Departamento de Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

## Anexo 1 - Excitação: Espectros padronizados de mar

As entradas do sistema hidrodinâmico são ondas irregulares. Para a análise da resposta de excitação das ondas é necessário decompor uma onda irregular em infinitas ondas regulares, a Figura 6 mostra a composição de uma onda irregular.

Figura 58 - Composição de uma onda regular



Fonte: Fajarra (2009).

Nessa abordagem, o espectro de mar representa a distribuição de energia do mar em função das diferentes frequências de excitação que fazem parte do mar irregular.

Espectros padronizados são modelos empíricos que representam o espectro do mar, formulados a partir de medições reais realizadas durante longos períodos de tempo.

Segundo Venzon (2012), um dos modelos mais comuns de espectro para mares plenamente desenvolvidos é o de Pierson-Moskowitz (Equação 1).

$$S(w) = 5 * \frac{\sigma^2}{w_p} * \frac{1}{K_{SI}^5} * e^{\frac{-1,25}{K_{SI}^4}} \quad (1)$$

Onde  $\sigma$  representa o quanto o mar varia e é aproximado por 25% da altura significativa,  $K_{SI}$  que é a razão entre a frequência de excitação e a frequência de pico,  $w_p$  é a frequência de pico de mar na região a ser analisada e segundo Venzon(2012) pode ser calculada através da Equação 2 que se baseia em análises experimentais.

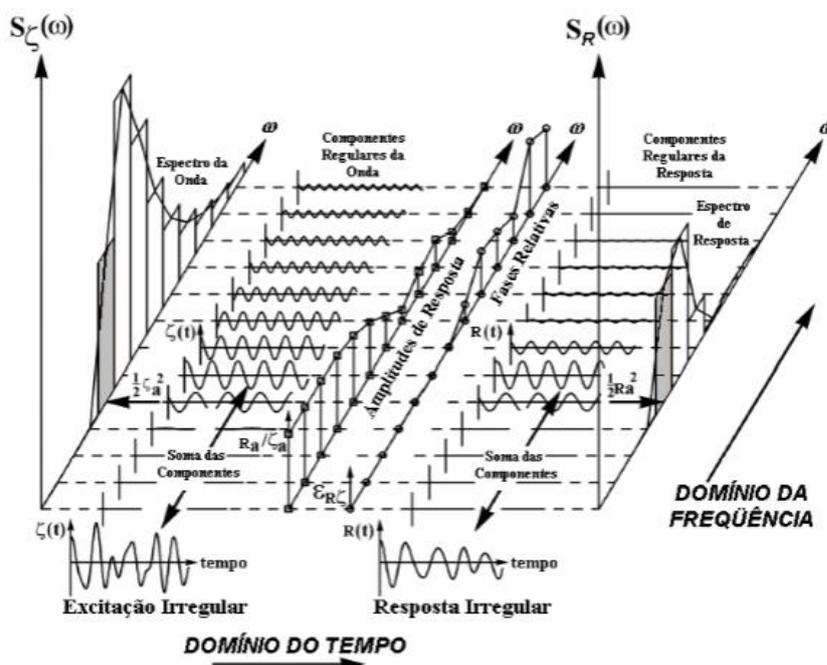
$$w_p = \left( 0,24 * \frac{g}{H_s} \right) \quad (2)$$

Onde  $g$  é a gravidade e  $H_s$  a altura significativa.

## Anexo 2 - Sidas: Espectro de resposta

Com o quadrado do espectro de resposta (RAO) e o espectro de mar para a altura significativa é então analisado o cruzamento espectral. A Figura 7 mostra o cruzamento espectral nos domínios do tempo e da frequência retirado de (Journée,2001).

Figura 59 – Cruzamento Espectral Fonte:



Fonte: Journée (2001)

À esquerda da imagem está a excitação irregular, onde no domínio do tempo está decomposta em infinitas ondas regulares. Com a transformada de Fourier transforma-se o domínio do tempo para o domínio da frequência. A parte central da figura mostra espectro de resposta do sistema.

Por fim à direita da figura está a resposta do sistema a um mar irregular, que nada mais é que a multiplicação do espectro de mar pelo RAO, que deve ser elevado ao quadrado por uma questão de unidades.