

INSTITUTOS SUPERIORES DE ENSINO DO CENSA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS E DA SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA EMBARCAÇÃO SUBMETIDA A
DIFERENTES ESPECTROS DE FREQUÊNCIA DE ONDA

Por

Claudio Matheus Rangel Pessanha

Campos dos Goytacazes – RJ

Junho/2021

INSTITUTOS SUPERIORES DE ENSINO DO CENSA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS E DA SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA EMBARCAÇÃO SUBMETIDA A
DIFERENTES ESPECTROS DE FREQUÊNCIA DE ONDA

Por

Claudio Matheus Rangel Pessanha

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado em cumprimento às
exigências para a obtenção do grau no
Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica nos Institutos Superiores de
Ensino do CENSA.

Orientador: Silvio Eduardo Teixeira Pinto da Silva, MSc em Ciências e Engenharia
dos Materiais.

Campos dos Goytacazes – RJ

Junho/2021

Pessanha, Claudio Matheus Rangel
Análise da estabilidade de uma embarcação submetida a diferentes
espectros de frequência de onda./ Claudio Matheus Rangel Pessanha.
- Campos dos Goytacazes (RJ), 2021.

106 f.: il.

Orientador: Prof. Silvio Eduardo Teixeira Pinto da Silva
Graduação em (Engenharia Mecânica) - Institutos Superiores de
Ensino CENSA, 2021.

1. Unidades Flutuantes. 2. Estabilidade. 3. Ondas Marinhas.
I. Título.

CDD

Bibliotecária responsável Glauce Virgínia M. Régis CRB7 - 5799.
Biblioteca Dom Bosco.

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA EMBARCAÇÃO SUBMETIDA A
DIFERENTES ESPECTROS DE FREQUÊNCIA DE ONDA

Por

Claudio Matheus Rangel Pessanha

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado em cumprimento às
exigências para a obtenção do grau no
Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica nos Institutos Superiores de
Ensino do CENSA.

Aprovado em 21 de Junho de 2021.

BANCA EXAMINADORA



Silvio Eduardo Teixeira Pinto da Silva, MSc - Isecensa



Marcus Vinicius Paes Carvalho, MSc – Isecensa



Claudia Márcia Ribeiro Machado Albernaz, MSc – Isecensa

AGRADECIMENTOS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação entre peso e empuxo na embarcação	17
Figura 2: Pontos importantes para a estabilidade estática	19
Figura 3: (a) Variação longitudinal (b) Variação transversal do empuxo	20
Figura 4: Tipos de Equilíbrios em uma embarcação.	22
Figura 5: Braço de Endireitamento GZ.....	24
Figura 6: Curva de estabilidade estática e braço de endireitamento GZ.....	25
Figura 7: Diagrama de corpo livre de uma estrutura flutuante ancorada.....	27
Figura 8: Movimento rotacionais: (a) Flutuador com ancoragem única, (b) Plataforma gravitacional.....	28
Figura 9: Geração da Onda.....	31
Figura 10: Distribuição aproximada da energia superficial e classificação de ondas oceânicas	32
Figura 11: As três zonas de agitação marítima	33
Figura 12: Tipos de agitação	34
Figura 13: Elementos caracterizados de uma onda	34
Figura 14: Movimento das partículas de água sob diferentes profundidades.	36
Figura 15: Variação da direção e do sentido da velocidade e da aceleração de um ponto em uma onda	40
Figura 16: Esquema de ilustração da energia cinética e da energia potencial de uma onda	41
Figura 17: Representação gráfica da teoria das ondas.....	43
Figura 18: Faixas de validade da Teoria de Onda.....	44
Figura 19: Perfis de ondas para diversas configurações.....	47
Figura 20: Geração de onda irregular a partir da superposição de ondas regulares.	49
Figura 21: Espectro de Jonswap ($H_s=4m$, $T_p=8s$) para $\gamma=1$, $\gamma=2$ e $\gamma=5$	51
Figura 22: Graus de Liberdade de um corpo.....	52
Figura 23: Associação dos fenômenos da difração e da radiação	53
Figura 24: Sistema do tipo “massa-mola”, linearmente amortecido	54
Figura 25: Oscilações livres de um sistema sub-amortecido.....	59
Figura 26: Fluxograma da proposta de simulação da Unidade flutuante	76

Figura 27: Principais zonas de um casco de embarcação.	79
Figura 28: Determinação do coeficiente de bloco.	80
Figura 29: Ligações e Escalonamentos no Workbench.	82
Figura 30: Vista isométrica da embarcação LNG.	83
Figura 31: Vista isométrica da embarcação LNG após a limpeza.	85
Figura 32: Domínio de Integração na metodologia numérica.	85
Figura 33: Definição do sistema de eixo ANSYS-AQWA.	86
Figura 34: Divisão do corpo em duas seções a partir da linha d'água.	87
Figura 35: Área de reparos do Space Claim.	87
Figura 36: Inserção do ponto de massa.	88
Figura 37: Atribuição da massa e raio de giração.	89
Figura 38: Resultados dos dados hidrostáticos.	91
Figura 39: Pressão máxima atingida pela incidência da onda no navio para diferentes frequências em uma amplitude de onda de 1 metro.	92
Figura 40: Pressão máxima atingida pela incidência da onda no navio para diferentes frequências em uma amplitude de onda de 1,8 metro.	93
Figura 41: Pressão máxima atingida pela incidência da onda no navio para diferentes frequências em uma amplitude de onda de 2,5 metro.	93
Figura 42: Entrada de água no convés na direção de 0° e amplitude de onda de 2,5 metro.	94
Figura 43: Possível adernamento da embarcação para a frequência de 0,20686 Hz.	95
Figura 44: Operador de Amplitude e Resposta do deslocamento da estrutura ao longo do eixo longitudinal.	97
Figura 45: Operador de Amplitude e Resposta do deslocamento da estrutura ao longo do eixo transversal.	98
Figura 46: Operador de Amplitude e Resposta do deslocamento da estrutura ao longo do eixo vertical.	99
Figura 47: Operador de Amplitude e Resposta da rotação da estrutura ao longo do eixo longitudinal.	100
Figura 48: Operador de Amplitude e Resposta da rotação da estrutura ao longo do eixo transversal.	101

Figura 49: Operador de Amplitude e Resposta da rotação da estrutura ao longo do eixo vertical 102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais características dos modelos de ondas utilizados em simulação computacional	44
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação do coeficiente de bloco para diferentes embarcações.	81
Tabela 2: Dimensões da embarcação.	84

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Princípio de empuxo.....	17
Equação 2: Altura Metacêntrica	21
Equação 3: Raio Metacêntrico	21
Equação 4: Braço de Endireitamento.....	24
Equação 5: Energia Potencial	26
Equação 6: Momento restaurador	26
Equação 7: Energia de Estabilidade Dinâmica.....	26
Equação 8: Deslocamento Longitudinal	27
Equação 9: Equação resultante do deslocamento longitudinal	28
Equação 10: Somatório dos momentos em função do ângulo de rotação	28
Equação 11: Momento de inércia de uma massa distribuída ao redor de um Centro de Gravidade	29
Equação 12: Resultantes de cargas horizontais	29
Equação 13: Frequência de onda	35
Equação 14: Frequência angular	35
Equação 15: O número da onda	35
Equação 16: Amplitude das Ondas Senoidais	35
Equação 17: Celeridade de uma onda regular	35
Equação 18: Comprimento de onda para profundidades infinitas	37
Equação 19: Celeridade para profundidades infinitas	37
Equação 20: Equação geral da Celeridade	37
Equação 21: Simplificação da Equação da Celeridade para águas profundas	37
Equação 22: Simplificação da Equação de Celeridade para águas pouco profundas.	38
Equação 23: Equação geral de comprimento de onda.....	38
Equação 24: Deslocamento da partícula.....	38
Equação 25: Equação potencial de velocidade.....	39
Equação 26: Velocidade horizontal de uma onda regular	39
Equação 27: Velocidade vertical de uma onda regular	39
Equação 28: Aceleração da onda na posição horizontal.....	40
Equação 29: Aceleração da onda na posição vertical.....	40

Equação 30: Deslocamento em relação a coordenada x	41
Equação 31: Deslocamento em relação a coordenada z	41
Equação 32: Energia cinética de uma onda por unidade de largura da crista	42
Equação 33: Energia cinética em relação ao comprimento de onda e profundidade da água	42
Equação 34: Energia potencial de uma onda por unidade de largura da crista ...	42
Equação 35: Energia total	43
Equação 36: Elevação da onda pela Teoria de Airy.....	45
Equação 37: Equação da Teoria de Stokes	46
Equação 38: Equação de Stokes de segunda ordem	47
Equação 39: Elevação da superfície da água na Teoria de Onda Cnoidal	48
Equação 40: Espectro de Jonswap	50
Equação 41: Fator de normalização.....	50
Equação 42: Velocidade angular para determinação de Jonswap.....	50
Equação 43: Equação do movimento.....	55
Equação 44: Força externa segundo a Lei de Newton.....	55
Equação 45: Conjunto de forças em uma unidade flutuante	56
Equação 46: Força de restituição hidrostática.....	56
Equação 47: Força introduzida pela embarcação	56
Equação 48: Força de radiação	56
Equação 49: Reescrita da Equação de Força de Radiação	56
Equação 50: Equação geral do sistema massa-mola	56
Equação 51: Equação do sistema massa-mola sem presença de uma força	57
Equação 52: Simplificação da Equação geral massa-mola.....	57
Equação 53: Constante de deslocamento da mola	57
Equação 54: Constante do expoente de deslocamento do sistema massa mola.	57
Equação 55: Equação resolvida do deslocamento do sistema massa-mola	57
Equação 56: Coeficiente de amortecimento crítico	58
Equação 57: Fator de amortecimento	58
Equação 58: Frequência Natural de oscilação	58
Equação 59: Período Natural de oscilação	58
Equação 60: Equação Geral de um sistema de oscilações livres	59

Equação 61: Frequência Natural de oscilação de um sistema com amortecimento	59
Equação 62: Coeficiente de massa	60
Equação 63: Equação de movimento de um corpo flutuante no domínio da frequência.....	61
Equação 64: Equação linear para oscilações de balanço do navio, sem amortecimento.....	62
Equação 65: Equação diferencial para oscilações harmônicas simples	62
Equação 66: Frequência angular natural do modo de oscilação de balanço	62
Equação 67: Simplificação da Equação 65, considerando a velocidade angular inicial de balanço nula	63
Equação 68: Reescrita da Equação 67	63
Equação 69: Fase inicial da oscilação	63
Equação 70: Período das oscilações harmônicas.....	63
Equação 71: Forças de radiação em função do domínio do Tempo	64
Equação 72: Função de resposta ao impulso	64
Equação 73: Força de radiação simplificada.....	65
Equação 74: Resposta de impulso com base nas Transformadas de Fourier	65
Equação 75: Momento de inércia com base nas Transformadas de Fourier	65
Equação 76: Momento de Inércia.....	77
Equação 77: Equação geral do Raio de giração	78
Equação 78: Raio de giração em x	78
Equação 79: Raio de giração em y	78
Equação 80: Raio de giração em z	78
Equação 81: Coeficiente de bloco.....	80

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
1. Estabilidade das embarcações.....	16
1.1 Princípio de Arquimedes	16
1.2 Estabilidade Estática	18
2 POSIÇÕES GEOMÉTRICAS DA UNIDADE FLUTUANTE	19
3 ESTABILIDADE DINÂMICA	25
3.1 Construção de diagrama de esforços na embarcação em um fluido.....	26
4 AGITAÇÃO MARÍTIMA	29
5 MECANISMOS DE ONDAS	34
6 CELERIDADE E COMPRIMENTO DE ONDA.....	35
7 VELOCIDADE, ACELERAÇÃO E DESLOCAMENTO DAS PARTÍCULAS DOS FLUIDOS.....	38
8 ENERGIA DAS ONDAS	41
9 INTRODUÇÃO A TEORIA DA ONDA	43
10 TEORIA DE AIRY.....	45
11 TEORIA DE STOKES	46
12 TEORIA DE ONDA CNOIDAL.....	47
13 AGITAÇÃO IRREGULAR.....	48
14 ESPECTRO DE JONSWAP	50
15 INTERAÇÃO ONDA-CORPO.....	51
16 ANALOGIA DE UM SISTEMA COM UM GRAU DE LIBERDADE	54
17 DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E DO TEMPO.....	60
17.1 Análise do domínio da frequência e do tempo	61
17.2 Análise do domínio do tempo.....	63
18 TEORIA DOS PAINÉIS	66
19 ANSYS-AQWA.....	67
RESUMO.....	72
ABSTRACT	73
1 INTRODUÇÃO	74
1.1 Objetivo Geral:	75
1.1.1 Objetivos Específicos:	75

2. METODOLOGIA.....	75
2.1 Momento de Inércia.....	76
2.2 Raio de Giração	77
2.3 Sistema de Embarcação	78
2.4 Coeficiente de Carena.....	79
2.5 Plataforma Workbench	81
2.6 Análise da Embarcação	83
2.7 Modelo Sólido Tridimensional	84
2.7.1 Limpeza da estrutura.....	84
2.7.2 Preparação do Modelo	88
2.7.2.1 Profundidade da lâmina d'água.....	88
2.7.2.2 Ponto de massa	88
2.7.2.3 Modelo de malha.....	90
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	90
3.1 Análise dos resultados dos campos de pressões.....	91
3.2 RAO para Surge.....	96
3.3 RAO para SWAY.....	97
3.4 Heave.....	98
3.5 Roll	99
3.6 PITCH.....	100
3.7 YAW	101
4 CONCLUSÕES	103
4.1 Sugestões de trabalhos futuros.....	103
5. REFERÊNCIAS:.....	105
CAPÍTULO III: REFERÊNCIAS.....	106

CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. Estabilidade das embarcações

Estabilidade de unidade flutuantes, como plataforma e navios, é um fator fundamental em um projeto naval, sendo esta propriedade relacionada pela capacidade da embarcação de reconstituir seu equilíbrio inicial depois de uma perturbação qualquer, seja esta por meios naturais, como correntes e ventos, assim como acomodar carga a bordo. Portanto a estabilidade é o atributo mais importante para que o navio desempenhe a sua função (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

Para que se atinja a estabilidade o projeto naval deve atender a vários critérios com o objetivo de garantir que a embarcação terá capacidade de comportar cargas dentro de limites aceitáveis de inclinação e afundamento. De forma geral estes carregamentos promovem alterações da posição de equilíbrio da unidade quando, os fatores que afetam o equilíbrio de uma unidade flutuante são:

- Arranjo e distribuição de carga na embarcação;
- Geometria emersa e submersa;
- Deslocamentos de pesos na embarcação: avaria, içamento e descarte de pesos, peso solto no convés etc.;
- Carregamentos provenientes de ações do meio ambiente: ventos, ondas e correntes marítimas;
- Análise satisfatória da curva de estabilidade limite;

O modelo de embarcação também deve atender às restrições de estabilidade, flutuação, velocidade, potência e que sua construção seja economicamente viável.

1.1 Princípio de Arquimedes

Os barcos estão presentes na história do ser humano desde tempos imemoriais. Os primeiros conhecidos remontam a cerca de 10 mil anos, tendo

como função principal o transporte e a pesca. Este meio de transporte sofreu diversas alterações e melhorias ao longo dos séculos a partir do estudo das interações entre as forças que afetam a embarcação.

O princípio de Arquimedes estabelece que o peso de uma embarcação é igual ao empuxo. O empuxo é a força vertical resultante da pressão do fluido exercida sobre a superfície submersa do corpo flutuante, conforme mostra a Figura 1. Sua direção de atuação é sempre vertical com sentido para cima, contrária à força peso, sendo seu ponto de aplicação no centro de volume submerso. A força peso é a resultante do somatório de toda a massa que forma a embarcação, incluindo o casco, elementos estruturais, líquidos em tanques e tubulações, cargas de convés e até mesmo as pessoas a bordo. A força peso possui um único ponto de aplicação que é o centro de gravidade G do navio. Sua direção de atuação é sempre vertical com sentido para o centro da terra, ou seja, para baixo (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

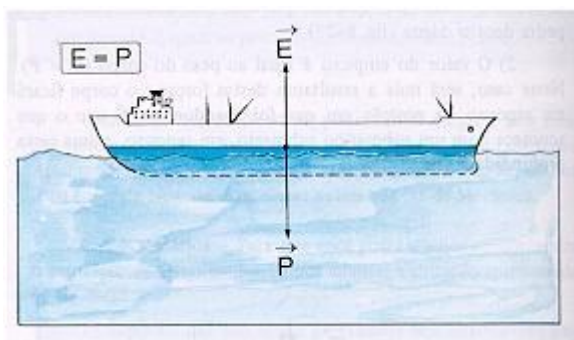


Figura 1: Relação entre peso e empuxo na embarcação

Fonte: Hayashi e Tachibana, 1994.

O valor do empuxo, que age em um objeto mergulhado em um fluido, é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo. Esta força vertical é o motivo pelo qual uma embarcação continua flutuando. De acordo com o princípio de Arquimedes, é conhecido que o empuxo é igual ao peso do líquido deslocado ou como mostrado na Equação 1:

$$E = \rho_L V_L g \quad (1)$$

Onde:

E: Valor o empuxo;

ρ_L : Densidade do líquido;

V_L : Volume de líquido deslocado;

g: Aceleração da gravidade;

A interação entre as forças peso e empuxo define se um corpo será capaz de flutuar, pois caso o peso seja maior que o empuxo máximo, o corpo afundará completamente. Quando o valor do empuxo é maior do que o peso do corpo, neste caso, a resultante destas forças estará dirigida para cima e o corpo sobe no interior do líquido (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

Caso o corpo esteja completamente submerso, mas em equilíbrio seu peso seja igual ao empuxo, este corpo estará sujeito a uma flutuação neutra, neste caso, a resultante destas forças e o corpo ficará em repouso sem tendência a afundar ainda mais ou a emergir. Submarinos quando navegando completamente submersos numa mesma profundidade operam com este tipo de equilíbrio (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

Nesta posição o corpo flutuará em equilíbrio. Destas considerações deduz se que, quando um navio está flutuando em equilíbrio, ele está recebendo um empuxo cujo valor é igual ao seu próprio peso, isto é, o peso do navio está sendo equilibrado pelo empuxo que ele recebe da água.

1.2 Estabilidade Estática

Uma unidade flutuante está em estado de equilíbrio enquanto as circunstâncias externas (ondas, vento etc.) e internas (carregamento) não mudarem quando uma ou mais destas condições se alterarem, a embarcação também irá mudar para uma nova condição de equilíbrio e lá permanecer até que algum parâmetro mude novamente (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

De acordo com a mecânica clássica, equilíbrio estático é caracterizado quando uma partícula está em repouso e permanece nesta condição (equilíbrio estático) ou quando uma está em movimento retilíneo uniforme, ou seja, com

velocidade constante (equilíbrio dinâmico). Portanto, obedecendo a Primeira Lei de Newton, o somatório de forças resultante na partícula necessariamente precisa ser zero. Porém, para um corpo rígido, somente o somatório de forças ser igual a zero não é o suficiente para que o corpo esteja em equilíbrio, mas também o somatório de momentos precisa ser zerado, ou seja, o vetor resultante de momento precisa ser um vetor nulo.

A estabilidade estática de uma embarcação determina a sua capacidade de se manter flutuando em posição ereta (calado paralelo), mesmo quando excitada por fatores externos. Porém, neste tópico será tratado a estabilidade estática avaliando somente a interação das forças peso e empuxo considerando a interface água/ar completamente plana e estática. A estabilidade estática é dividida em longitudinal e transversal. Para navios, a estabilidade longitudinal não é problema e normalmente só são estudadas situações que envolvam a estabilidade transversal (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

2 POSIÇÕES GEOMÉTRICAS DA UNIDADE FLUTUANTE

O tipo de equilíbrio de um corpo flutuante, está relacionado com a forma como variam as forças que atuam sobre este corpo quando é deslocado da sua posição inicial. O que define a estabilidade estática inicial de uma embarcação é o lugar geométrico onde as forças peso, localizada no centro de gravidade, e empuxo (localizado no centro de carena) estão situadas. A Figura 2 ilustra um corpo idealmente equilibrado (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

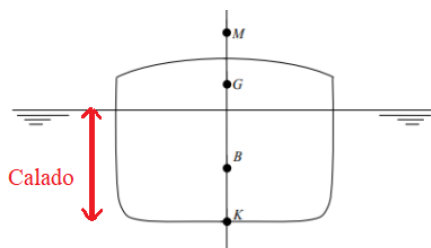


Figura 2: Pontos importantes para a estabilidade estática

Fonte: Hayashi e Tachibana, 1994.

O centro de carena é o ponto no qual idealmente estão aplicadas as resultantes da força empuxo, sendo o centro geométrico do volume imerso.

Qualquer corpo flutuando desloca o peso próprio do líquido no qual está submerso. Este peso exerce uma força direcionada para baixo pelo centro de gravidade do corpo (G). O navio em situação de equilíbrio de forças, isto é, todas elas se anulando, tem como componentes a força de empuxo, que se equivale à intensidade do peso com força na direção contrária e ponto de ação no centro de flutuação (B), que pode ser considerado como o centro geométrico do volume de líquido que o navio desloca (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

As forças exercidas sobre os pontos G e B, localizados na Figura 2, são sempre paralelas e em direção contrária. Elas estarão na mesma linha de atuação quando o navio estiver na posição de equilíbrio de forças e quando for transversalmente estável. Caso haja pequenas variações devido aos carregamentos externos na embarcação, o volume submerso da embarcação varia devido à forma irregular do casco, esta alteração faz com que o centro de empuxo seja alterado e se desloque em direção paralela à dos centroides das cunhas imersa e emersa.

A variação do centro de empuxo (CB) se aproxima por um círculo, sendo o centro do círculo a altura metacêntrica inicial (M). Desta forma a embarcação irá oscilar em torno do raio metacêntrico, pois, o centro de carena da embarcação varia. Estas alterações são mostradas na Figura 3. Já o centro de gravidade, com o movimento da embarcação, não se altera. Apenas se houver mudança de pesos ou centros (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

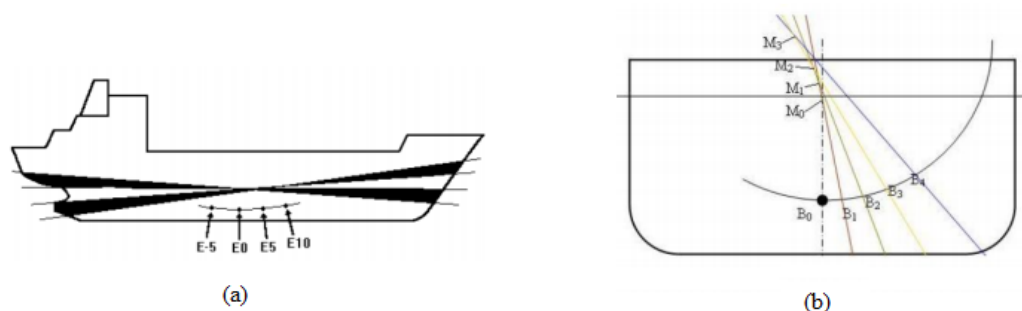


Figura 3: (a) Variação longitudinal (b) Variação transversal do empuxo

Fonte: Hayashi e Tachibana, 1994.

Outros pontos importantes para o entendimento de estabilidade inicial é o ponto (K) que é ponto da linha base, também conhecido como ponto de quilha e o

(M) chamado de metacentro inicial, que é definido como ponto de interseção entre a reta vertical existente na condição de equilíbrio e a linha de atuação das forças de empuxo (B). Uma vez que após uma perturbação a força de empuxo (B) tem sua posição alterada, gera-se um ângulo entre a altura metacêntrica inicial e a nova reta BM'. Para ângulos menores que 4° o BM pode ser considerado constante.

Para a determinação das condições de flutuabilidade e estabilidade inicial de uma embarcação, a variável mais importante é a altura metacêntrica (GM), que é a distância vertical entre o centro de gravidade da embarcação G e o metacentro inicial. Para que uma embarcação atinja aos critérios de estabilidade, a embarcação deve possuir uma altura mínima para o GM conforme a Equação 2.

$$GM = CB + BM - KG \quad (2)$$

Onde:

CB: centro de carena, onde são aplicadas a força resultante do campo de pressão hidrostática e da força de empuxo;

I_{wl} : inércia de área de linha d'água;

Assumindo que B gira em torno de um ponto fixo e calcula-se o raio metacêntrico (BM) para aquela posição de B, pode-se determinar o raio metacêntrico conforme mostrado na Equação 3.

$$BM = \frac{I}{\nabla} \quad (3)$$

Onde:

∇ : deslocamento volumétrico em metros cúbicos.

O momento de inércia (I), na área de linha d'água, pode ser obtido como o somatório do produto de cada parcela desta área pelo quadrado da sua distância até o eixo de giro da área como um todo. A inércia da área de linha d'água

quantifica o montante desta área e o seu grau de afastamento do eixo de giro, ou seja, o quanto o volume em torno da linha d'água se altera e o centro de empuxo deste volume se desloca lateralmente quando a unidade inclina (BRAGA, 2016).

Com as coordenadas de B e o raio metacêntrico (BM), sabe-se as coordenadas do metacentro (M). Com a posição de M determinada, calcula-se o braço de retorno (GZ), mostrado na Figura 2. A Equação 3 mostra o cálculo do braço de retorno (GZ) e a Equação 4 mostra o cálculo do momento de retorno (Mr).

Desta forma, quanto mais afastado o centro de gravidade estiver do metacêntrico (maior a altura metacêntrica GM), maior estabilidade terá a embarcação pela grande capacidade de restauração, ou seja, está em um equilíbrio estável. Caso o centro de gravidade estiver acima do metacentro, a embarcação não terá estabilidade, ou seja, equilíbrio instável. E por último, caso a embarcação esteja com o centro de gravidade no metacentro, está em um equilíbrio indiferente. As alturas metacênticas e suas respectivas estabilidades estão representadas na Figura 4.



Figura 4: Tipos de Equilíbrios em uma embarcação.

Fonte: Hayashi e Tachibana, 1994.

Equilíbrio Estável, $GM > 0$ – O equilíbrio em um objeto pode ser definido de três maneiras distintas, sendo elas: equilíbrio estável, equilíbrio indiferente e o equilíbrio instável. O equilíbrio estável representa o estado em que o corpo ao sofrer uma perturbação, consegue retornar ao seu estado inicial de movimento. a

embarcação tende a voltar para a condição em calado paralelo mesmo quando levada a um ângulo de banda diferente de zero (BRAGA, 2016).

Equilíbrio Indiferente, $GM = 0$ – O equilíbrio indiferente é caracterizado quando o corpo é perturbado, reage ao estímulo, porém permanece no movimento ou encontra o equilíbrio em uma nova posição diferente da inicial. A embarcação não apresenta tendências restauradoras ou emborcadoras mesmo quando levada a ângulos de banda diferentes de zero. Em navios e semissubmersíveis este comportamento só é verdadeiro para ângulos muito pequenos, inferiores a 1 grau.

Equilíbrio Inicial Instável, $GM < 0$ – O equilíbrio instável é representado por corpo que ao ser estimulado por uma força externa, não consegue retornar à sua posição inicial ou não encontra o equilíbrio em uma outra posição diferente da inicial. Neste caso a embarcação tende a emborcar para um dos dois bordos quando levada a um ângulo de banda diferente de zero, procurando uma nova posição de equilíbrio, porém em banda permanente. Este novo ângulo de equilíbrio é tão maior quanto menor o GM inicial negativo. Nesta condição algumas geometrias podem levar ao emborcamento completo com GM inicial minimamente negativo, como seria o caso de um casco com formato de um cilindro, flutuando na horizontal, em qualquer calado de flutuação (BRAGA, 2016).

Para ser conferida a estabilidade inicial de uma embarcação, deve-se verificar se existe momento de endireitamento (momento que restaura a embarcação para a posição normal) ou momento de emborcamento (momento que faz a embarcação ter equilíbrio instável), o qual é gerado pelo binário de forças peso e empuxo multiplicado pela distância horizontal entre o centro de gravidade e o centro de carena (BRAGA, 2016).

Essa distância é tratada como braço de endireitamento GZ , que é a distância entre a força peso localizada no centro de gravidade (G) e a linha vertical de ação da força de empuxo (B), agindo no centro de carena quando a embarcação se encontra inclinada que gera um momento restaurador (M_{rest}), como é retratado na Figura 5.

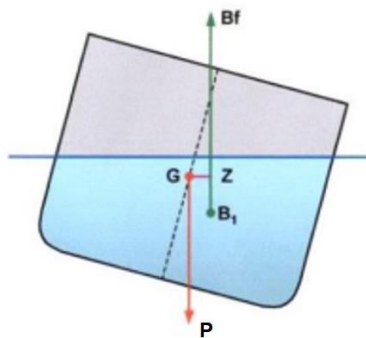


Figura 5: Braço de Endireitamento GZ.

Fonte: Santos, 2010b.

A distância entre o centro de gravidade e o centro de empuxo faz com que gere o binário de restauração, conforme a Equação 4.

$$GZ = GM(\text{Sen}\theta) \quad (4)$$

Onde:

θ : ângulo de inclinação da embarcação.

Para verificar se o momento gerado é de restauração, deve-se checar a altura metacêntrica GM, que é a distância entre o ponto G e o ponto M. Essa distância deve ser maior do que 0 para que o navio tenha estabilidade inicial com braço de endireitamento. Se o GM for menor do que 0, o momento será de emborcamento, e se GM for igual a 0, a embarcação não terá momentos atuando a pequenos ângulos de inclinação, chamado de equilíbrio neutro (SANTOS, 2010a).

A Curva de Estabilidade Estática é o resultado para a estabilidade em corpos flutuantes para grandes ângulos de inclinação. É possível observar que quanto maior o valor para o GM, maior será o braço de Endireitamento e, conseqüentemente, maior será a força de restauração gerada pelo momento restaurador (SANTOS, 2010a).

O braço de Endireitamento (GZ) aumenta até um valor máximo, após isso, começa a diminuir quando a embarcação se inclina progressivamente. O comportamento da curva está representado na Figura 6. Para uma aproximação

para pequenos ângulos, a curva GZ pode ser dada pela Equação 4(BRAGA, 2016).

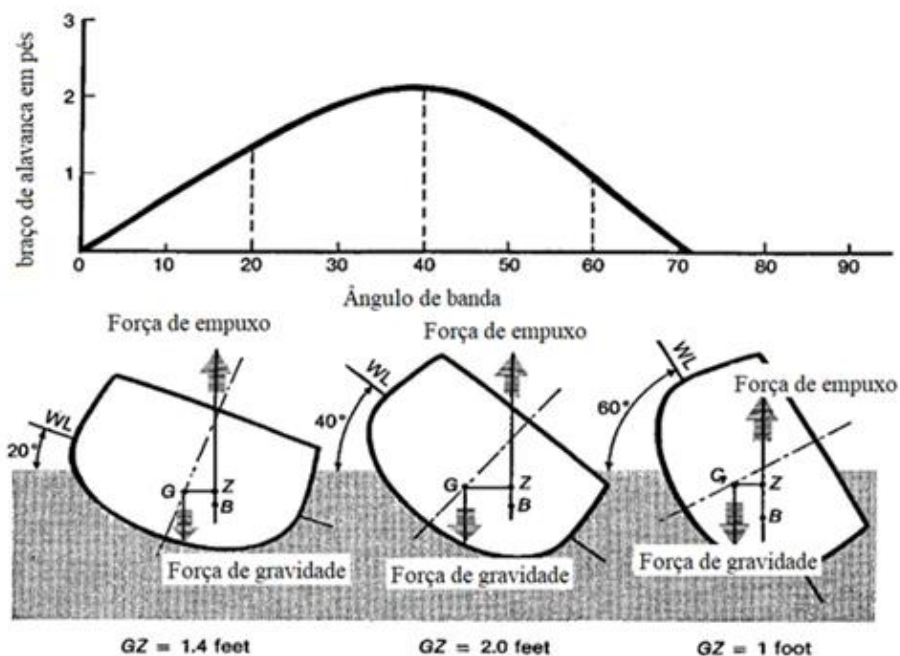


Figura 6: Curva de estabilidade estática e braço de endireitamento GZ.

Fonte:André,2010.

Com isso, as embarcações possuem valores máximos para a posição vertical do centro de gravidade, que dependem do formato do casco, de pontos de alagamento e qual a regra de estabilidade que está sendo aplicada para a embarcação (ANDRÉ, 2010).

3 ESTABILIDADE DINÂMICA

A estabilidade dinâmica trata do comportamento de uma embarcação quando sujeita a momentos emborcadores provenientes de condições ambientais ou quando submetida a manobras bruscas, como mudanças rápidas de curso ((BRAGA, 2016).

A estabilidade dinâmica está relacionada à energia potencial que a unidade flutuante adquire quando submetida a uma inclinação θ . Assumindo uma unidade flutuante em equilíbrio estável (GM inicial positivo), quanto mais inclinada, maior

será a energia potencial restauradora que deve trazer a unidade para a condição normal (ANDRÉ, 2010).

O trabalho e a energia potencial se alteram em decorrência do binário que é dependente dos ângulos distintos de inclinação θ . Deste modo a energia potencial U adquirida por uma embarcação quando inclinada até um determinado ângulo θ é dado pela Equação 5:

$$U = \int_0^{\theta} M d\theta \quad (5)$$

Onde:

M : é dado pelo produto do momento restaurador;

θ :ângulo;

O momento restaurador é o produto do braço de endireitamento (GZ) e Δ é o deslocamento da embarcação, conforme anunciado na Equação 6.

$$M = GZ(\Delta) \quad (6)$$

Portanto, a curva de estabilidade dinâmica pode ser plotada através do produto do deslocamento pela integral da curva de restauração (GZ) pelo ângulo de inclinação (θ), Equação 7 (ANDRÉ, 2010).

$$U = \Delta \int_0^{\theta} GZ d\theta \quad (7)$$

3.1 Construção de diagrama de esforços na embarcação em um fluido.

Para desenvolver o modelo matemático que descreve o comportamento dinâmico de uma unidade flutuante fixada no leito do mar. O modelo para retratar o conjunto fluido e estrutura é apresentado na Figura 7 na forma do diagrama de corpo livre, juntamente com as ações de carregamento e restrições propostas, a

partir deste modelo será desenvolvido as equações que descrevem o movimento (BRAGA, 2016).

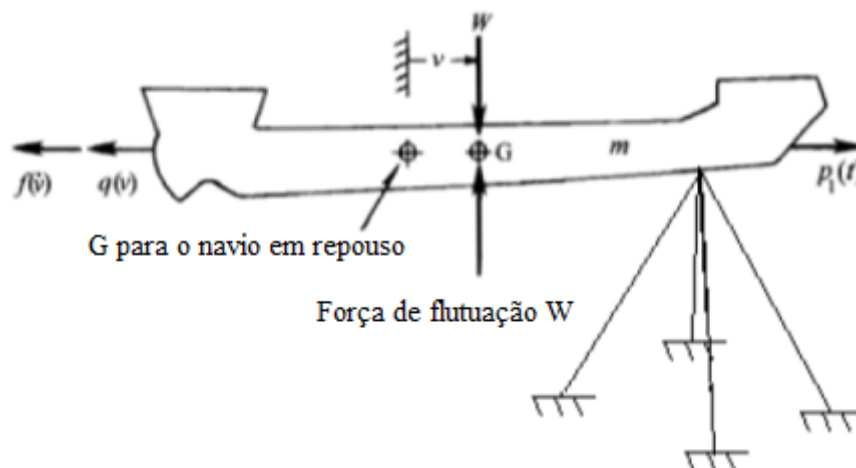


Figura 7: Diagrama de corpo livre de uma estrutura flutuante ancorada.

Fonte: André, 2010.

Considerado o navio como um corpo rígido de massa m fixado ao leito marinho, cujo seu valor seja a soma da massa da estrutura, juntamente com alguma porção do fluido que é arrastada durante o movimento da estrutura. Tem-se que para a condição de equilíbrio a estrutura está submetida a cinco tipos de carregamentos. O peso com o centro de massa G está balanceado pela força de flutuação igual em valor; as forças ambientais, subordinadas ao tempo e dadas por $p_1(t)$; as forças de restrição de ancoragem $q(v)$, e a força de amortecimento dependente da velocidade (ANDRÉ, 2010).

A partir destes critérios pode-se determinar as equações de movimento associado ao corpo e as propriedades hidrodinâmicas geradas pela interação do corpo com o fluido (ANDRÉ, 2010).

As equações de deslocamento podem ser desmembradas nas componentes longitudinal e vertical do navio. Onde o deslocamento longitudinal (v) , ao longo do eixo x , é dado pela Equação 8.

$$\sum F_V = m\ddot{v} + f(\dot{v}) + q(v) \quad (8)$$

Onde:

\dot{v} é a velocidade e a aceleração de G ao longo do eixo x.

A equação resultante, por exemplo para o movimento de surge, quando se aplica a Equação (9) na direção de v, é dada por:

$$m\ddot{v} + f(\dot{v}) + q(v) = p_1(t) \quad (9)$$

As embarcações também possuem movimentos rotacionais em torno do seu eixo de rotação, apresentando três graus de liberdade conforme escrito na Figura 8(a), e de oscilação no plano vertical, Figura 8 (b).

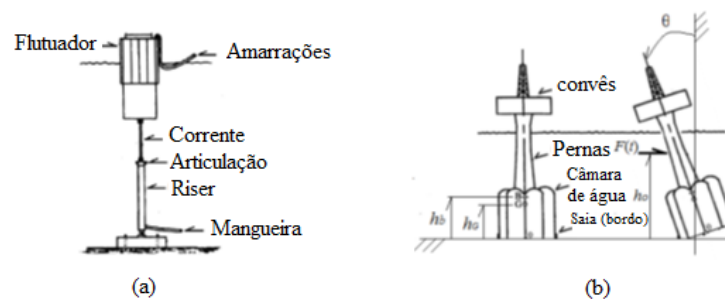


Figura 8: Movimento rotacionais: (a) Flutuador com ancoragem única, (b) Plataforma gravitacional

Fonte: André, 2010.

O movimento de rotação de uma estrutura flutuante pode ser descrito em função do ângulo ($\theta = \theta t$). Supondo que tais estruturas giram em torno do ponto O no plano e utilizando o somatório dos momentos ($\sum M_o$) como a soma de todos os momentos das forças externas agindo sobre a massa virtual m.

A equação de movimento possui como forma geral a Equação 10:

$$\sum M_o = j_0(\ddot{\theta}) \quad (10)$$

Onde:

J_0 : Momento de Inércia baseado na massa virtual da porção submersa da estrutura;

Na equação 10, $\ddot{\theta}$ é a aceleração angular do corpo rígido e M é o momento de inércia da massa virtual do corpo. De forma geral, nas aplicações resultantes é conveniente expressar em termos de J_G , que é o valor de quando o ponto O coincide com o centro de massa G do corpo, através do teorema dos eixos paralelos conforme a Equação 11 (IBINABO E TAMUNODUKOBIPI, 2019).

$$j_0 = j_G + mh_G^2 \quad (11)$$

Onde:

h_G é a distância entre o ponto O e o centro de massa G .

A Equação que representa as resultantes de cargas horizontais como (correntes, ventos e ondas) de uma plataforma gravitacional, ilustrada na Figura 8(b), é representada pela Equação 12, considerando que a plataforma está posicionada a uma altura acima do ponto O , $f(\dot{\theta})$ e $q(\dot{\theta})$ são respectivamente os momentos de reação de amortecimento e restrição de rotação (IBINABO E TAMUNODUKOBIPI, 2019).

$$\begin{aligned} j_0 \ddot{\theta} + f(\dot{\theta}) + q(\theta) - (m_0 g h_G - m_b g h_b) \sin \theta \\ = -F(t) h_o - M_{pc} \end{aligned} \quad (12)$$

Onde:

m_0 : massa da estrutura;

m_b : massa flutuante, com centro de flutuação B , localizado a uma altura h_b ;

M_{pc} : Momento relativo em torno do ponto O devido à diferença de pressão na câmara de água.

4 AGITAÇÃO MARÍTIMA

A energia transportada pelas ondas, é um fator importante na flutuabilidade e posição da embarcação. E, por isso, é absolutamente decisivo conhecer e saber caracterizar o movimento de ondas e às teorias que a regulam. De forma geral,

três fatores influenciam a formação das ondas: a força do vento, sua duração e sua área de atuação (BRAGA, 2016).

Cada elemento da terra como tipo de solo, a água e vegetação possui diferente capacidade calorífica que motivam que se aqueçam de modo irregular pela radiação solar e que sua capacidade de ceder calor aconteça de modo diferente (IBINABO E TAMUNODUKOBIPI, 2019).

O ar perto das superfícies com baixa capacidade calorífica se aquece e expande mais rapidamente, de modo oposto ao que acontece com o que está próximo das superfícies de maior capacidade calorífica. Desta forma, gera-se zonas de baixas e altas pressões, ocorrendo o movimento do ar das zonas de altas para baixas pressões (BRAGA, 2016).

A formação e crescimento de ondas podem ser descritas em três estágios. Inicialmente, à medida que os ventos agem sobre a água dos oceanos, transferem sua energia e provocam a formação de ondas. O ar que flui sobre a superfície do mar troca energia por meio das tensões cisalhantes, promovendo a formação e crescimento das ondas; o fluxo turbulento do ar, próximo a superfície livre, gera uma intensa variação das tensões cisalhantes e do campo de pressões (IBINABO E TAMUNODUKOBIPI, 2019).

A ação do vento, com uma velocidade e duração específica, sobre a superfície de uma massa de água, promove a perturbação da mesma, gerando ondas de período reduzido, aparência irregular e crista curta na zona de geração. No momento que estas oscilações entram em fase com as ondas já existentes há uma intensificação no processo de geração das ondas (Swell), possuindo uma oscilação menor, e um período e crista mais longos. Assim, quando as ondas atingem um tamanho específico, o vento pode desempenhar uma ação mais intensa na sua face, acarretando um crescimento ainda maior (IBINABO E TAMUNODUKOBIPI, 2019).

O enrugamento da superfície do mar é gerado pelas flutuações das tensões tangenciais e pressões originadas pela característica turbulenta do vento. A maior rugosidade da superfície do mar cria maior atrito ao vento, o que gera

uma transferência mais intensa de energia do vento para superfície, logo mais energia na camada superficial, o que representa em uma rugosidade e ondas ainda maiores. A Figura 9 mostra a geração e o crescimento de onda, medido na direção de atuação do vento, assim como o enrugamento da superfície do mar.

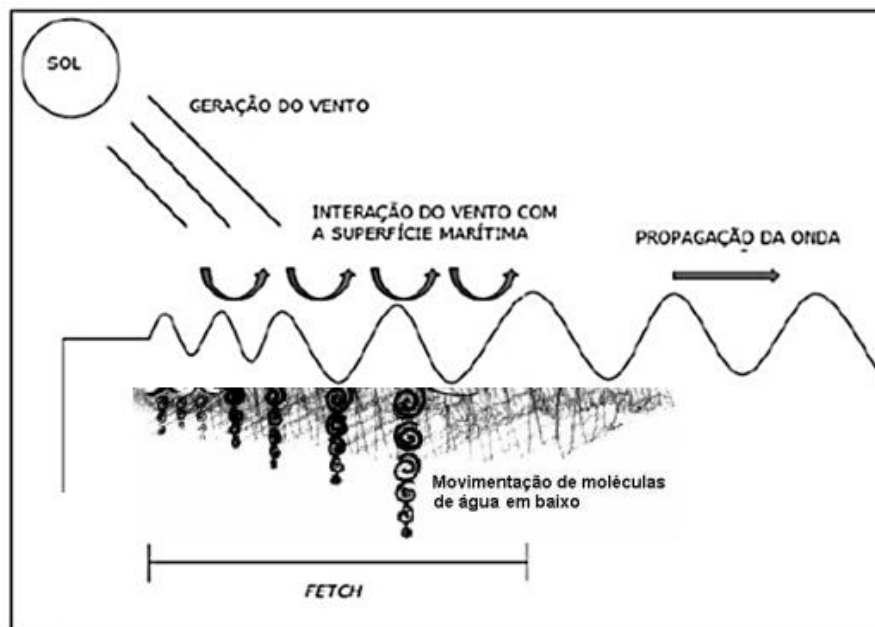


Figura 9: Geração da Onda

Fonte: Perdigão, 2015;

A quantidade de energia transferida e a altura das ondas geradas pelo vento dependem não só da intensidade do vento, mas da dimensão da zona onde este atua, que é conhecida por Fetch ou comprimento de geração de onda.

As ondas do mar podem ser classificadas por diversos critérios, de acordo com o período ou frequência, com as forças perturbadoras e restauradoras. Estas forças são provocadas por diversos agentes físicos como ação de ventos, terremotos, movimento de embarcações ou impactos com objetos.

Os processos de dissipação implicam perdas energéticas importantes e resultam em uma diminuição na altura da onda incidente à medida que se propaga a ondulação na faixa de transformação. As ondas de menor período tem como principal força perturbadora o vento, que atua na interface atmosfera/oceano. O vento transfere energia da atmosfera para o oceano, resultando no movimento irregular da superfície do oceano, que é denominado

por agitação marítima. Neste processo, a gravidade atua como força restauradora, para recuperar a condição de equilíbrio.

As ondas de baixa energia tem como o principal agente da sua força restauradora a tensão superficial. As ondas de maior período têm como principais forças perturbadoras os sistemas de tempestades e tsunamis, bem como o movimento da terra na órbita do sol e o movimento da lua na órbita da terra. A força de Coriolis (criada pelo movimento rotacional da terra) age como força restauradora primária; já o tsunami é produzido pelos movimentos sísmicos, ou de impacto de meteoritos (PERDIGÃO, 2015).

A Figura 10, apresenta uma distribuição da densidade de energia por banda de frequência e com as forças restauradora de acordo com a sua origem.

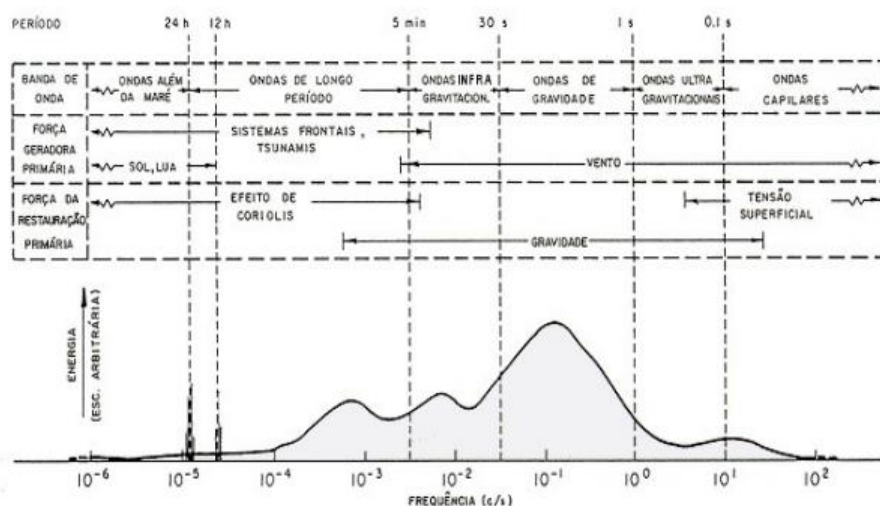


Figura 10: Distribuição aproximada da energia superficial e classificação de ondas oceânicas

Fonte: Ibinabo e Tamunodukobipi, 2019.

Devido à alta variabilidade do vento na zona de geração, a superfície do mar é muito irregular, sendo composta por ondas de diferentes comprimentos e direções. A Figura 11 mostra as três zonas de agitação marítima, as ondas de superfície à medida que se aproximam da plataforma continental tem sua altura reduzida devido aos processos de refração e dissipação de energia por atrito com o fundo (GOMES, 2014b).

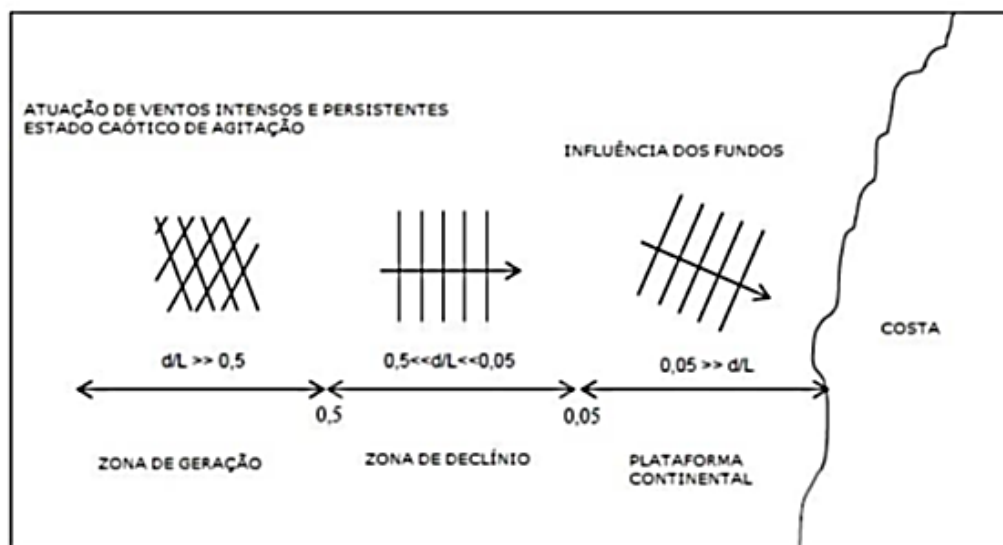


Figura 11: As três zonas de agitação marítima

Fonte: Gomes, 2014b.

Em situações de águas profundas as ondas de superfície podem propagar-se a grandes distâncias com pequena dissipação de energia. Por esta razão, as ondas que atingem a linha da costa podem ser resultado da atuação do vento sobre grandes áreas do oceano, durante um período de várias horas ou dias (GOMES, 2014b).

Um swell é um grupo de ondas marinhas lisas e uniformes, com intervalos de tempo regulares entre duas ondas (períodos) e que se propagam para fora da zona de geração. Possuem maior comprimento de onda e tem características mais próximas das ondas regulares. As vagas são ondas pequenas que não tiveram tempo nem percorreu distâncias suficientes uma vez que foram geradas próximas a costa. E caso tenha uma origem mais distante, essas vagas podem dar origem a um Swell. No mar é usual coexistir os dois tipos de agitação conforme a Figura 12.



Figura 12: Tipos de agitação

Fonte: Gomes, 2014b.

5 MECANISMOS DE ONDAS

Nessa seção serão descritas algumas das propriedades mecânicas básicas das ondas, relacionadas ao movimento das partículas de água e às componentes da sua velocidade e aceleração (GOMES, 2014b).

A Figura 13 mostra alguns parâmetros caracterizadores de uma onda regular, como a altura de onda (H), a amplitude de onda (A), a fase (θ) e a profundidade de água (d).

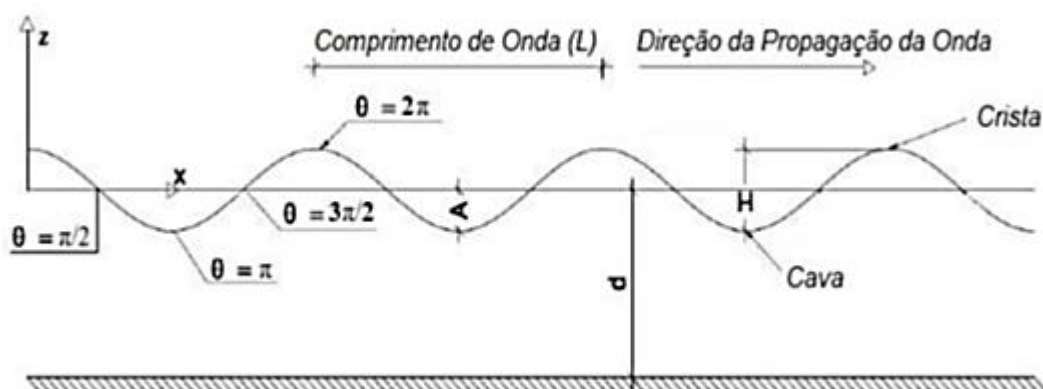


Figura 13: Elementos caracterizados de uma onda

Fonte: Gomes, 2014b.

A altura H é a distância entre crista e vales sucessivas, o comprimento de λ é a distância entre duas cristas ou dois vales sucessivos, o período T é o intervalo de tempo que decorre entre as passagens de duas cristas ou vales consecutivos no mesmo ponto (GOMES, 2014b).

A frequência da onda f é definida como o inverso do período T

$$f = \frac{1}{T} \quad (13)$$

A frequência angular ω define-se por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (14)$$

O número de onda:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (15)$$

No caso das ondas senoidais a amplitude da onda é:

$$a = \frac{H}{2} \quad (16)$$

6 CELERIDADE E COMPRIMENTO DE ONDA

Entende-se por celeridade de uma onda a sua velocidade de propagação, podendo ser definida como a razão entre uma distância percorrida por uma determinada fase de onda e o intervalo de tempo em que isso acontece. Assim, a celeridade de uma onda (C) pode ser caracterizada pela Equação 17 (GOMES, 2014b).

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (17)$$

Onde:

L : representa o comprimento de onda;

ω : a frequência angular;

k : o número de onda;

T : Período.

Com base na teoria linear, quando as ondas se propagam de água profunda para rasas, as ondas são afetadas pelo leito marinho, que normalmente se tornam cada vez mais rasos. As águas profundas o fundo do mar não afeta o deslocamento das partículas e por isso assumem uma trajetória circular, já para águas intermediárias o fundo do mar tem influência tanto no deslocamento vertical quanto no horizontal fazendo com que as partículas assumam formas elípticas. Em águas rasas o deslocamento horizontal das partículas deixa de variar com a profundidade (GOMES, 2014b). A Figura 14 ilustra o movimento das partículas de água sob diferentes profundidades.

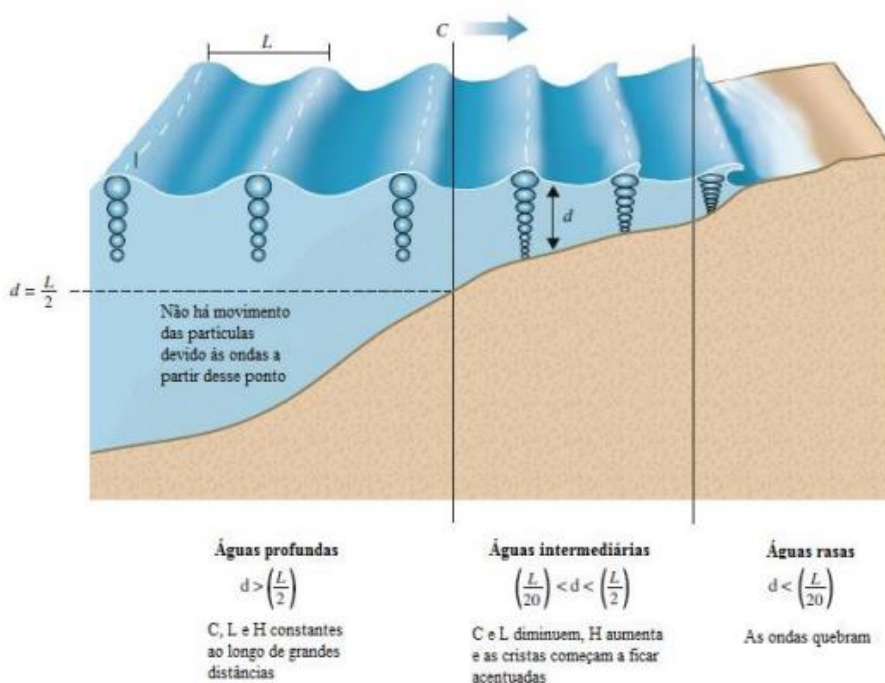


Figura 14: Movimento das partículas de água sob diferentes profundidades.

Fonte: Gomes, 2014b.

Apesar do comprimento de onda e da celeridade variar com a profundidade da água, o período de onda mantém-se constante. Em termos teóricos, para profundidades infinitas, o fundo não influencia o cálculo da celeridade e do comprimento de onda, uma vez que estes dependem apenas de T . Portanto, L_0 e C_0 representam o comprimento de onda e a celeridade, respectivamente, para profundidades infinitas (GOMES, 2014c).

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (18)$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{gL_0}{2\pi}} = \frac{gT}{2\pi} \quad (19)$$

No entanto, uma vez que de fato a profundidade não é infinita, esta influencia tanto a celeridade como o comprimento. Assim, a crista da onda tende a se alinhar com a costa marítima e assim, tem-se a Equação 20 (GOMES, 2014b).

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}} \quad (20)$$

Onde:

g: é a aceleração da gravidade;

L: é o comprimento da onda;

Porém, esta expressão geral pode ser bastante simplificada quando se consideram ondas em águas profundas, pois que, nessas condições, $2\pi d$ é muito maior que L, e a tangente hiperbólica de valores superiores a 2 aproxima-se da unidade. Conseqüentemente, a expressão simplifica-se, de forma aproximada, para:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad (21)$$

Em águas pouco profundas o termo $2\pi d/L$ tem valor pequeno, inferior a 1. Nestas condições a tangente hiperbólica é aproximadamente igual ao valor que afeta, pelo que a expressão geral se pode simplificar, resultando na Equação 22 (GOMES, 2014b).

$$C = \sqrt{gd} \quad (22)$$

Quando uma onda sofre variações no valor da sua velocidade de propagação, também pode modificar a sua direção de propagação. Esse fenômeno é denominado de refração. A Equação 23 também pode ser designada como relação de dispersão, uma vez que dela pode concluir-se que ondas de diferentes períodos propagam-se a velocidades diferentes. Assim, da relação entre as expressões, obtém-se a expressão que permite o cálculo do comprimento de onda:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (23)$$

7 VELOCIDADE, ACELERAÇÃO E DESLOCAMENTO DAS PARTÍCULAS DOS FLUIDOS

As partículas do líquido oscilam ao longo da propagação das ondas,. Sendo facilmente observável a oscilação da água na direção do campo gravitacional, perpendicularmente à direção de propagação da onda. Contudo também existe uma oscilação das partículas do líquido na própria direção de propagação da onda. Deste modo, as ondas marítimas dispõem de uma componente oscilatória longitudinal e outra transversal (na direção do campo gravitacional) (SANTOS, 2010a).

A velocidade potencial é uma escala da potencialidade de um fluido usado na mecânica do contínuo quando um fluido ocupa uma região de forma irrotacional. No estudo bidimensional de propagação de uma onda linear, tem uma função potencial de velocidades (ϕ) o deslocamento da partícula pode ser dado pela Equação 24.

$$\phi(x, y, z) = \frac{gA \cosh(k(z + d))}{\omega \cosh(kd)} \sinh(kx - \omega t) \quad (24)$$

em que g representa a aceleração da gravidade e x e z a localização de um ponto na onda, na horizontal e na vertical respectivamente.

Também é necessário obter as velocidades geradas no fluido, através do gradiente da função potencial de velocidades, ou formulação de Laplace.

Derivando a Equação 24 em função das direções x e z, torna-se possível obter as componentes da velocidade local do fluido segundo cada uma das direções. Sendo a velocidade horizontal, u, e a velocidade vertical v, tem-se, a Equação 25.

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{HgT \cosh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right)}{2L \cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos\theta \quad (25)$$

Para uma onda regular cada ponto da onda tem uma determinada fase, θ , onde os vales terão sempre o valor de π e as cristas de 2π , pode-se garantir que, em todos os pontos de um comprimento de onda característico, existe constância de fase. Assim, se a fase, θ , é constante, também o serão os valores de $\cos\theta$ e de $\sin\theta$. Considerando a aplicação das expressões 26 e 27 para uma determinada profundidade de água, também os valores de H, d e L serão constantes. (SANTOS, 2010a).

$$u = B_1 \cosh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right) \quad (26)$$

$$v = B_2 \sinh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right) \quad (27)$$

em que B_1 e B_2 são constantes.

Uma vez que a aceleração é obtida derivando a velocidade em função do tempo, é possível afirmar que esta varia de forma inversa à velocidade, de modo, quando a velocidade é máxima, a aceleração é nula e vice-versa, as Equações 28 e 29 são utilizadas para o cálculo da aceleração segundo as componentes x (horizontal) e z (vertical) respectivamente (SANTOS, 2010a).

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{g\pi H \cosh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right)}{L \cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin\theta \quad (28)$$

$$a_z = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{g\pi H \sinh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right)}{L \cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos\theta \quad (29)$$

em que a_x representa a aceleração das partículas fluidas na direção x e a_z representa a aceleração das partículas fluidas na direção z .

A variação da direção e do sentido das velocidades e das acelerações ao longo de um comprimento de onda pode ser vista na Figura 15.

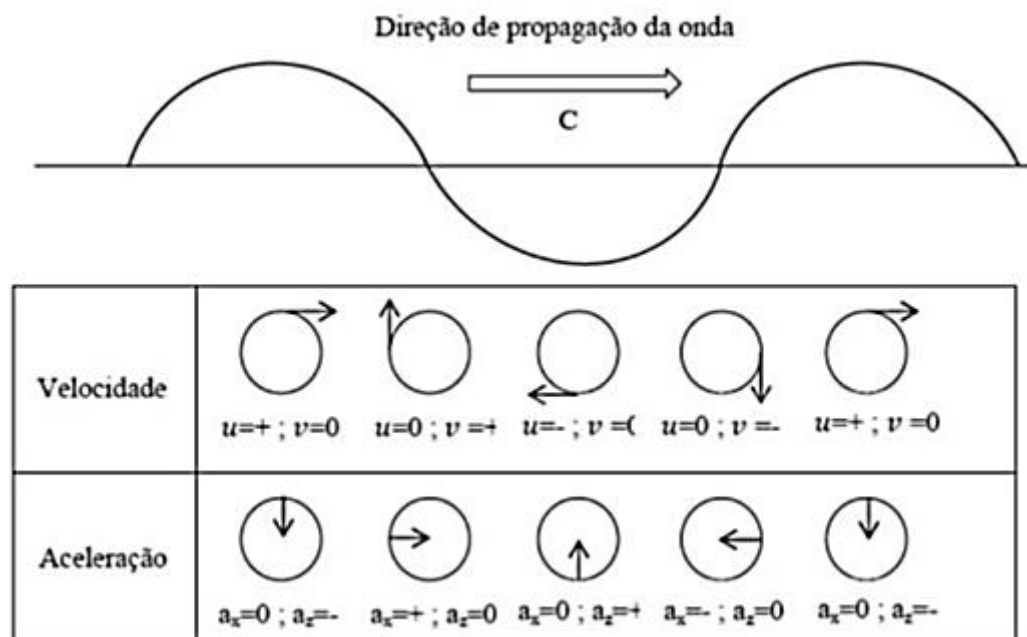


Figura 15: Variação da direção e do sentido da velocidade e da aceleração de um ponto em uma onda

Fonte: Santos, 2010a.

As equações que definem os deslocamentos das partículas segundo as direções, x e z , são determinadas por meio da integração das expressões das velocidades em função do tempo, desprezando os efeitos de segunda ordem, tem-se as Equações 30 e 31 (SANTOS, 2010a).

$$\xi_x = -\frac{HgT^2}{4\pi L} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi(z_0+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \sin(kx_0 - \omega t) \quad (30)$$

$$\xi_z = \frac{HgT^2}{4\pi L} \frac{\sinh\left(\frac{2\pi(z_0+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cos(kx_0 - \omega t) \quad (31)$$

em que x_0 e z_0 representam as coordenadas da posição média da partícula ao longo de um ciclo, na direção horizontal e vertical respectivamente.

8 ENERGIA DAS ONDAS

As ondas marítimas transportam energia mecânica. A energia de uma onda pode ser dividida em duas partes: a energia cinética que representa a velocidade das partículas associada ao movimento das ondas e a energia potencial que resulta de parte da massa de água se encontrar acima do vale, como mostra a Figura 16.



Figura 16: Esquema de ilustração da energia cinética e da energia potencial de uma onda

Fonte: Gomes, 2014b.

De acordo com a teoria linear, a energia cinética de uma onda por unidade de largura da crista, pode ser determinada pela Equação 32 (GOMES, 2014b).

$$E_c = \int_x^{x+L} \int_{-d}^{\eta} \rho \frac{u^2 + v^2}{2} dz dx \quad (32)$$

Onde:

E_c : representa a energia cinética total por unidade de largura da crista da onda;

ρ : massa volumétrica da água.

Integrando a expressão anterior, ao longo do comprimento de onda e da profundidade da água tem-se a Equação 33 (GOMES, 2014b).

$$E_c = \frac{1}{16} \rho g H^2 L \quad (33)$$

A energia potencial de uma onda por unidade de largura da crista, pode ser determinada pela Equação 34.

$$E_p = \int_x^{x+L} \rho g \left[\frac{(\eta + d)^2}{2} - \frac{d^2}{2} \right] dx \quad (34)$$

Onde:

E_p : representa a energia potencial total por unidade de largura da crista da onda;

η : a elevação da superfície livre.

Considerando que a energia potencial é determinada em relação ao nível médio da superfície livre da água, com ondas a propagarem-se na mesma direção, deste modo, segundo a teoria linear as componentes E_c e E_p são iguais. Assim, a energia total (E_t), pode ser determinada através da Equação 35.

$$E_t = E_c + E_p = \frac{1}{16} \rho g H^2 L + \frac{1}{16} \rho g H^2 L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (35)$$

9 INTRODUÇÃO A TEORIA DA ONDA

A seleção da teoria adequada para demonstrar o comportamento do fluido dentro de um conjunto de propriedades como comportamento das ondas, a velocidade do vento, a influência das marés etc. É muito importante. Sendo estes dados obtidos e validados a partir observações oceanográficas (CHAKRABARTI, 1987).

Um modo de caracterizar essas ondas baseia-se na superposição de diferentes ondas regulares com distintos parâmetros de onda (altura, período, frequência e fase), podendo então fazer uso de teorias determinísticas para as ondas regulares (CHAKRABARTI, 1987). Várias são as teorias de onda foram desenvolvidas nas últimas décadas, destacando-se a Teoria linear de Airy, a Teoria não linear de Stokes, a Teoria Cnoidal e a onda Solitária. A Figura 17 mostra os diversos perfis das teorias de ondas representada em função do seu comprimento e amplitude (CHAKRABARTI, 1987).

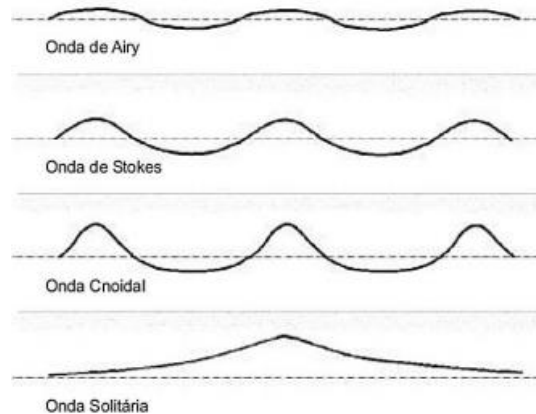


Figura 17: Representação gráfica da teoria das ondas

Fonte: Chakrabarti, 1987.

As ondas oceânicas possuem comportamento aleatório, e, portanto, de difícil representação matemática. As ondas aleatórias oceânicas são caracterizadas por um espectro de densidade de energia, conhecido também por espectro de onda, que representa a quantidade de energia da onda e sua

disposição em um intervalo de frequências. A Figura 18 descreve os perfis de ondas onde as teorias são válidas enquanto a Tabela 1 resume as principais características destas soluções (CHAKRABARTI, 1987).

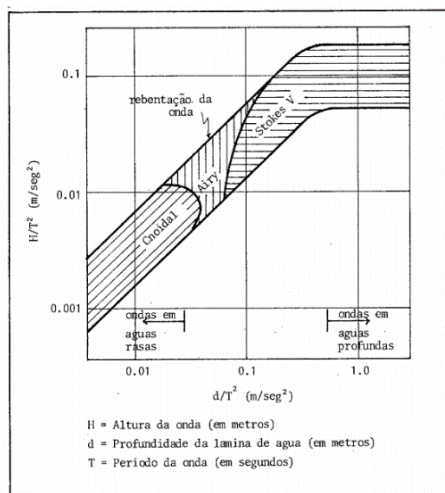


Figura 18: Faixas de validade da Teoria de Onda.

Fonte: Chakrabarti, 1987.

Quadro 1: Principais características dos modelos de ondas utilizados em simulação computacional

Teoria de Airy (Ondas senoidais lineares)	A Teoria de Stokes - Ondas trocoidais.	A Teoria de KdV - Ondas Cnoidais.	A Teoria da onda Solitaria
Mais precisa para ondas de pequenas amplitudes em águas profundas.	pode ser usada para águas profundas, águas intermediárias (transição) e águas rasas.	Ondas gravitacionais de superfície com comprimento de onda razoavelmente longo, quando comparado com a profundidade da água	considera o movimento de uma onda isolada em águas rasas.
Menos precisa para prever o comportamento da onda em águas rasas.	é mais complexa matematicamente		É usada exclusivamente para ondas de águas rasas.
É a teoria de onda mais comumente usada porque é a menos complicada matematicamente	Considera os efeitos da altura da onda na velocidade.		
não considera os efeitos da altura da onda em determinada velocidade da onda.	descreve mais precisamente as assimetrias das velocidades orbitais		

Fonte: Autor, 2021.

10 TEORIA DE AIRY

No âmbito do estudo das ondas regulares, a forma mais elementar de reproduzir os fenômenos de agitação marítima é a teoria regular de ondas. A teoria de Airy, ou teoria de ondas de pequena amplitude, é a teoria mais simples e mais utilizada (CUMMINS, 1962).

Ela parte do princípio que a altura de onda é tão pequena comparada ao seu comprimento que os termos de ordem superiores usados para descrever a elevação da superfície da água podem ser desprezados, conseqüentemente linearizando a equação e permitindo considerar os movimentos da superfície livre podem ser descritos por uma função senoidal perfeita, onde qualquer partícula de água, sempre que solicitada tende a voltar à sua posição inicial, sendo que o intervalo de tempo que demora a percorrer este ciclo é denominado por período da onda (T)(CUMMINS, 1962).

Esta teoria pode ser aplicada em águas profundas e para ondas com baixa amplitude, ou seja, quando a amplitude da onda é muito pequena em relação ao comprimento e/ou com a profundidade. Por sua vez, as teorias não lineares demonstram o comportamento das ondas quando têm grande amplitude relativa ou quando se aproximam de zonas menos profundas. Dessa forma, a superfície não pode mais ser considerada como uma senoide perfeita (CUMMINS, 1962).

A Equação 36 que descreve a elevação da onda pela teoria de Airy é representada por uma função senoidal da seguinte forma na Equação 36.

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad (36)$$

Onde:

H: Altura da onda;

λ : Comprimento de onda;

T: Período.

O desenvolvimento da Teoria Linear baseia-se nos seguintes pressupostos:

- O fluido é incompressível, homogêneo e não viscoso;
- A pressão ao longo da superfície livre é uniforme e constante;
- O efeito da tensão superficial e das forças de Coriolis são desprezíveis;
- A forma da onda não varia no tempo e no espaço;
- Ondas com crista e cava bem definidas;
- Ondas de crista longa (2D);
- A amplitude da onda é reduzida;
- A profundidade é elevada;
- O escoamento é irrotacional;
- Os fundos são horizontais e impermeáveis.

11 TEORIA DE STOKES

À medida que a relação H/λ aumenta, a crista da onda se torna mais acentuada e o vale mais plano. Deste modo, é preciso adicionar termos de ordem superior para representar a elevação da superfície da água, de forma a se obter uma representação mais realista das ondas (CUMMINS, 1962).

Em geral, a família de equações da teoria de Stokes pode ser formulada com base na Equação 37, onde $a=H/2$, $\theta = 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)$ e B_n são termos dependentes do comprimento de onda e da profundidade da água.

$$\eta(x, t) = a\cos(\theta) + a^2B_2(\lambda, d)\cos(2\theta) + a^3B_3(\lambda, d)\cos(3\theta) + \dots + a^nB_n(\lambda, d)\cos(n\theta) \quad (37)$$

Já foi validada a utilização dessa expressão até a quinta ordem, porém nessa dissertação só será apresentada a equação de Stokes de segunda ordem, Equação 38.

$$\begin{aligned} \eta(x, t) = & \frac{H}{2} \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \\ & + \left(\frac{\pi H^2}{8\lambda} \right) \frac{\cosh(2\pi d/\lambda)}{\sinh^3(2\pi d/\lambda)} [2 \\ & + \cosh(4\pi d/\lambda)] \cos \left(4\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right) \end{aligned} \quad (38)$$

12 TEORIA DE ONDA CNOIDAL

Uma onda cnoidal é representada por uma solução não linear, da equação de Korteweg de Vries - KdV. Estas ondas são representadas em ondas periódicas cujo perfil pode ser expresso em termos da função elíptica de Jacobi. Descrevendo ondas gravitacionais de superfície com comprimento de onda razoavelmente longo, quando comparado com a profundidade da água, sendo válida para intervalos de $1/50 < d/\lambda < 1/10$. De acordo com a teoria de KdV no limite de uma onda com comprimento infinito, a onda cnoidal se torna uma onda solitária (CUMMINS, 1962).

A Figura 19 faz um comparativo entre a altura e o comprimento de onda para diversos perfis, onde fica claro o perfil elíptico e de altura elevada para onda cnoidal, com comprimento próximo a uma onda solitária.

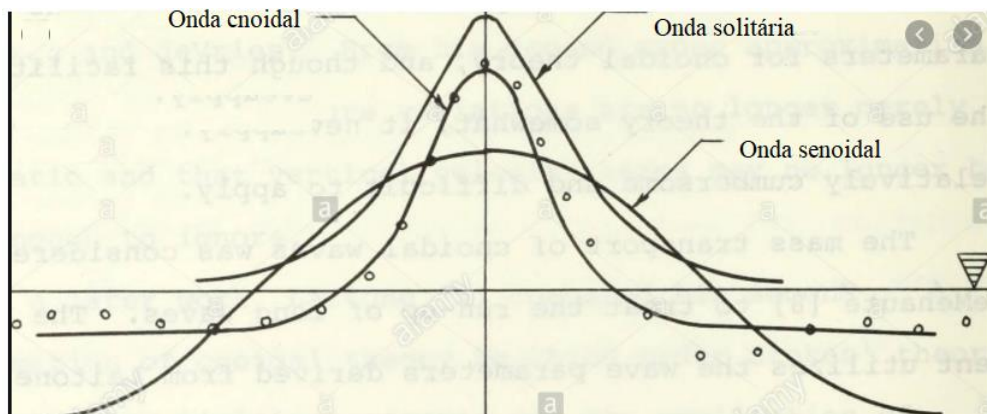


Figura 19: Perfis de ondas para diversas configurações

Fonte: Gomes, 2014c.

Assim como a teoria de segunda ordem de Stokes, ela considera termos de segunda ordem para descrever a elevação da superfície da água, apresentando, portanto, resultados mais precisos. A expressão que rege a elevação da superfície da água na Teoria de Onda Cnoidal é representada pela Equação 39, difere-se das outras no sentido que essa elevação é medida a partir do fundo do mar e não mais a partir do nível de águas tranquilas (CUMMINS, 1962).

$$y_s(x, t) = y_t + HC_n^2 \left(2K(k) \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right), k \right)^2 \quad (39)$$

Onde:

y_t : é a distância entre o fundo do mar e o vale da onda;

C_n : é uma função cosseno elíptica;

$K(k)$: é uma função integral elíptica completa do primeiro tipo;

k : é módulo das integrais elípticas. Uma descrição mais aprofundada sobre esses parâmetros foge ao escopo dessa dissertação.

13 AGITAÇÃO IRREGULAR

As condições reais da superfície do mar não são regulares implicando que a agitação também não seja regular. Características como o período, o comprimento, a direção ou a altura da onda, apenas podem ser consideradas e representadas como constantes em laboratório (CUMMINS, 1962).

As ondas criadas pela ação do vento apresentam características irregulares: as ondas não só possui diferentes períodos e alturas, como podem atingir um dado ponto, provenientes de várias direções. Com efeito, a superfície livre do mar é normalmente irregular, tridimensional, e com variabilidade no tempo e no espaço. Matematicamente, podem-se supor estados de mar aleatórios, como a sobreposição linear de um grande número de componentes regulares (CUMMINS, 1962).

Devido a este caráter aleatório dos fenômenos naturais, a utilização de ondas regulares para a modelagem de ondas reais pode tornar-se uma representação muito simplificada e pouco realista. Devido a isto, o conceito das ondas irregulares pode ser entendido como uma representação do mar assumindo-se um espectro de ondas, gerado a partir da combinação linear de uma infinidade de ondas regulares com frequências, amplitudes e direções diferentes. A Figura 20 mostra a superposição de diversas ondas regulares em uma onda representativa.

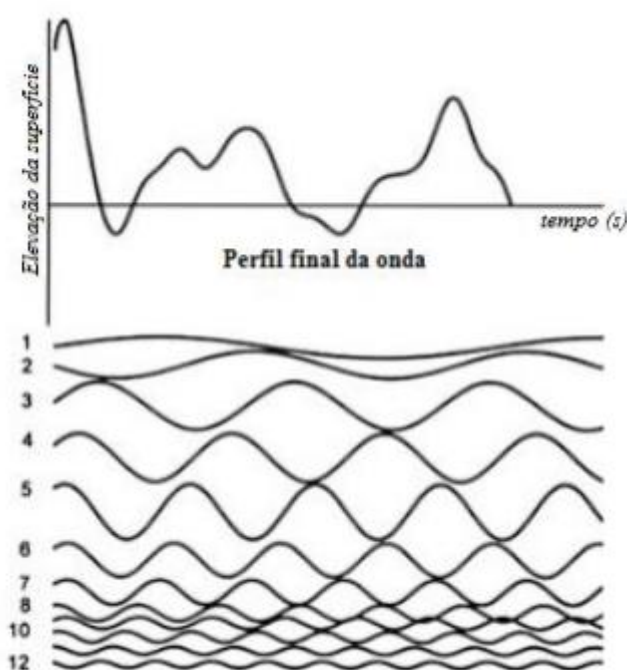


Figura 20: Geração de onda irregular a partir da superposição de ondas regulares.

Fonte: Gomes, 2014c.

Como estes parâmetros são irregulares não é possível prever com dias de antecedência e com uma exatidão aceitável algumas características da agitação marítima, como o período, a altura de onda significativa ou a direção incidente, tornando-se desta forma um fenômeno aleatório, sem qualquer lei formulada para o descrever. Assim, a sua caracterização obriga a recorrer a métodos estatísticos, podendo estes ser no domínio do tempo, ou no domínio da frequência (CUMMINS, 1962).

Cada onda elementar de um registro temporal da elevação da superfície da água é discriminada numa análise no domínio do tempo para, de seguida, se proceder à análise estatística do conjunto. A segunda análise, no domínio da frequência, apesar de partir do mesmo registro temporal, procura fazer o seu tratamento recorrendo às Transformadas de Fourier (CUMMINS, 1962).

14 ESPECTRO DE JONSWAP

O espectro de Jonswap foi elaborado com base em uma série de pesquisas feitas pelo Projeto Conjunto de Observação de Ondas do Mar do Norte (Joint North Sea Wave Project) onde identificaram uma variação do espectro de Pierson-Moscowitz, parâmetro também utilizado para medição de ondas irregulares (ANDRÉ, 2010).

O espectro de JONSWAP ($S_J(\omega)$) pode ser obtido a partir da Equação 40 para quando o mar não está totalmente desenvolvido, baseada na velocidade do vento, no comprimento da extensão sobre a qual sopra, e no fator de pico, parâmetro que determina o formato do espectro (CUMMINS, 1962).

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{\exp\left[-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right]} \quad (40)$$

O fator de normalização A_γ é obtido pela Equação 41.

$$A_\gamma = (1 - 0,287) \ln(\gamma) \quad (41)$$

O fator de pico γ , se utiliza normalmente valor de 3,3.

O fator de largura do espectro depende da velocidade angular, onde os valores são adotado com base na frequência natural ou de pico.

$$\sigma = \begin{cases} 0,07, & \omega < \omega_p \\ 0,09, & \omega > \omega_p \end{cases} \quad (42)$$

O espectro de JONSWAP é capaz de para representar ondas irregulares de forma razoável dentro do intervalo $3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5$, para valores fora do intervalo, ainda pode ser empregado, porém com algumas condições de contorno. A PETROBRAS emprega esta expressão de Jonswap para águas profundas para condições ajustadas a Bacia de Campos (PERDIGÃO, 2015).

Vale ressaltar que o espectro de JONSWAP exibe um pico mais pronunciado, e uma largura de banda menor quando comparado com o espectro de Pierson-Moscowitz. Esse efeito é realçado com o aumento do fator de pico. A Figura 21 mostra a influência do fator de pico sobre o formato do espectro, incluindo o caso em que $\gamma = 1$, onde o espectro de JONSWAP se reduz ao espectro de Pierson-Moscowitz (ANDRÉ, 2010).

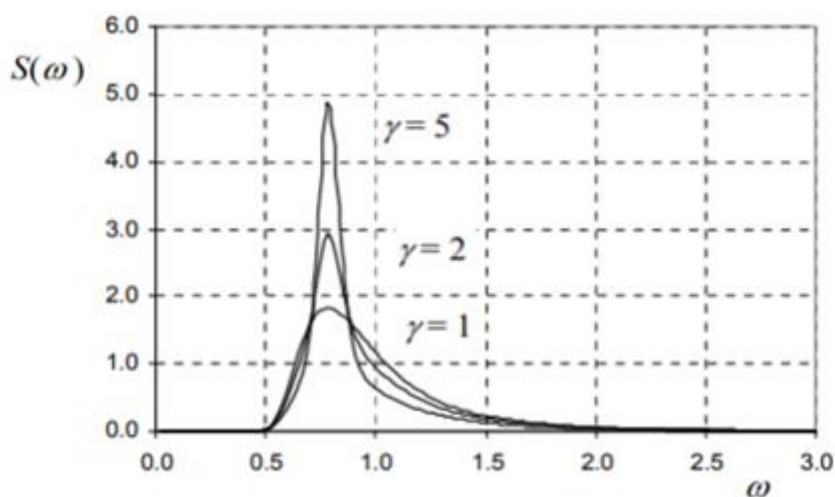


Figura 21: Espectro de Jonswap ($H_s=4m$, $T_p=8s$) para $\gamma=1$, $\gamma=2$ e $\gamma=5$

Fonte: André, 2010.

15 INTERAÇÃO ONDA-CORPO

As teorias de onda é uma hipótese simplificadora, uma vez que ignoram o impacto da presença de corpos que obstruem a passagem da onda. Estas teorias são aplicáveis para corpos de dimensões diminutas onde a obstrução possa ser ignorada, como é o caso de um navio, este efeito não pode ser mais desconsiderado, sendo necessário um modelo de difração baseado na teoria potencial (GOMES, 2014b).

Um corpo tridimensional possui seis graus de liberdade, ou seja, o seu movimento pode ser dividido em seis componentes elementares, associadas a três eixos ortogonais entre si: três movimentos de translação e três de rotação. A Figura 22 ilustra estes movimentos.

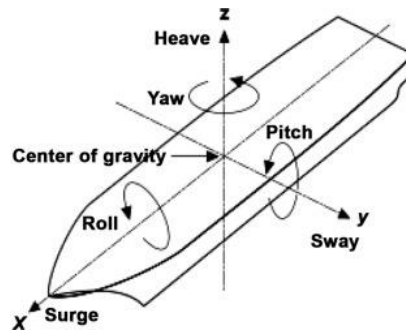


Figura 22: Graus de Liberdade de um corpo

Fonte: Gomes, 2012.

Os movimentos de rotação e translação são classificados segundo seu movimento em:

- Avanço (surge ou surging) – movimento longitudinal de translação no plano horizontal, segundo o eixo dos xx ;
- Deriva (sway ou swaying) – movimento lateral de translação no plano horizontal, segundo o eixo dos yy ;
- Arfagem (heave ou heaving) – movimento vertical de translação, segundo o eixo dos zz ;
- Balanço (roll ou rolling) – movimento de rotação em torno do eixo longitudinal central do corpo, eixo dos xx ;
- Cabeceio (pitch ou pitching) – movimento de rotação em torno do eixo transversal central do corpo, eixo dos yy ;
- Guinada (yaw ou yawing) – movimento de rotação em torno do eixo vertical que passa no centro de gravidade do corpo, eixo dos zz .

Com base no princípio da sobreposição de efeitos, o problema da interação da agitação marítima com um corpo flutuante pode ser dividido em duas partes, conforme mostra a Figura 23, admitindo a linearidade do sistema corpo-onda: a primeira parte trata o fenômeno da difração, considerando que o corpo está impedido de se movimentar; já a segunda parte, onde se considera a libertação do mesmo corpo, passando a encarar-se o fenômeno da radiação, causado pela oscilação forçada do corpo com os movimentos sinusoidais segundo cada um dos seus seis graus de liberdade, em águas inicialmente paradas (GOMES,2014b).

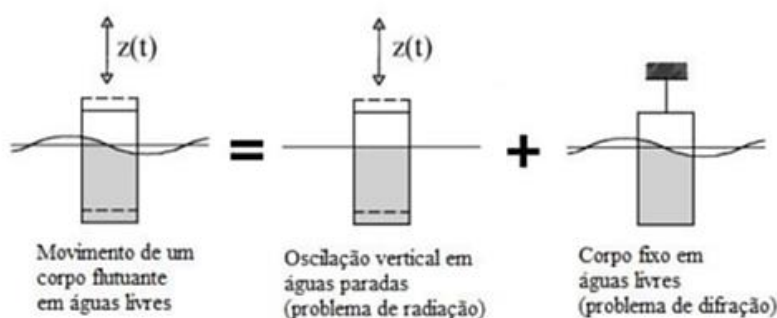


Figura 23: Associação dos fenômenos da difração e da radiação

Fonte: Braga, 2015.

A hipótese da linearidade do sistema é verdadeira apenas se for considerado que os movimentos do corpo são de amplitude reduzida e da mesma ordem de grandeza da amplitude das ondas, se estas possuírem pequena declividade e se o escoamento puder ser considerado irrotacional (BRAGA, 2015).

Desta forma, os movimentos de uma estrutura flutuante são influenciados, em primeiro lugar, pelo amortecimento introduzido pela sua interação com a água, estando este diretamente ligado, principalmente, à energia dissipada através das ondas geradas pela oscilação do corpo e portanto, relacionadas a velocidade dessas partículas, em segundo lugar, pelo efeito da massa adicionada, forças de inércia, que está relacionado com a energia necessária para acelerar as partículas do fluido movimentadas pelo corpo.

As forças de inércia dificultam o movimento do corpo, tornando-o mais “pesado”, devido à massa de água que é acelerada pelo corpo em movimento,

enquanto a segunda parcela é responsável pelo amortecimento desses movimentos, uma vez que existe uma transferência de energia do corpo para as ondas geradas pelo seu movimento (SANTOS, 2010a).

A análise da influência das ondas nos corpos flutuantes é importante uma vez que, a resposta de um corpo, depende dos coeficientes hidrodinâmicos, determinados através da resolução do problema da radiação.

16 ANALOGIA DE UM SISTEMA COM UM GRAU DE LIBERDADE

Um corpo livre, submetido à agitação marítima ao sujeitar-se as solicitações no plano horizontal (avanço, deriva e guinada), não gera forças nem momentos de restituição, considerando que não há alterações no deslocamento do corpo. No entanto, quando são inseridos movimentos no plano vertical (arfagem, balanço e cabeceio), estes sofrerão oposição por forças e momentos que obrigarão o corpo a retornar à sua posição inicial, sendo, para pequenas perturbações, a sua grandeza diretamente proporcional à amplitude do movimento imposto ao corpo, a partir da sua posição de equilíbrio.

Uma analogia para corpos flutuantes pode ser feita com um sistema do tipo “massa-mola” conforme mostra a Figura 24, com apenas um grau de liberdade (arfagem) na direção de solicitação introduzida pela força externa, sendo esta equilibrada por forças de inércia, de restituição e de amortecimento (CHAKRABARTI, 1987).

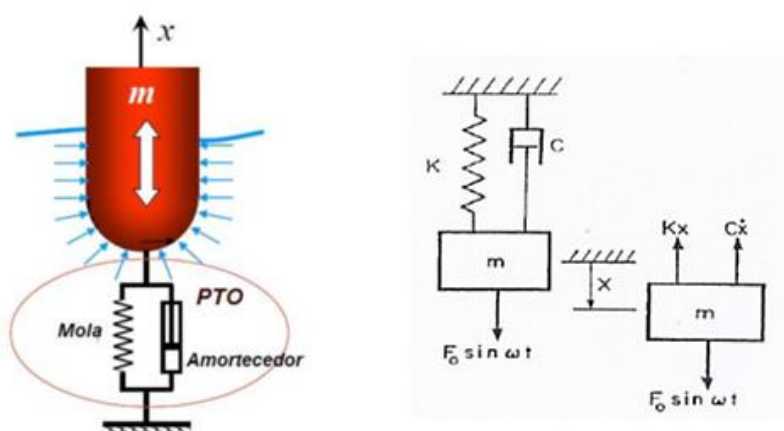


Figura 24: Sistema do tipo “massa-mola”, linearmente amortecido

Fonte: Perdigão, 2015.

A equação do movimento pode ser descrita com base na Equação 43,

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (43)$$

Onde:

m : Representa a massa do sistema;

B : o coeficiente de amortecimento linear das oscilações, K a rigidez da mola;

F_0 : A amplitude da força externa;

ω : Uma frequência angular;

T : Tempo;

x : Representa a posição do sistema na direção do movimento;

K : Rigidez do sistema massa-mola.

A força externa pode ser determinada com base na segunda lei de Newton, conforme Equação 44:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m\ddot{x} \quad (44)$$

Onde:

m : representa a massa do sistema;

a : a aceleração.

Torna-se possível aplicá-la ao exemplo da unidade flutuante conforme a Equação 45.

$$f_h(t) + f_m(t) = m\ddot{x} \quad (45)$$

Em que $f_h(t)$ representa o conjunto das forças de radiação (f_r) e de excitação (f_d) e da força de restituição hidrostática (f_{hs}) que pode ser obtido pela Equação 46.

$$f_{hs} = -\rho g S x \quad (46)$$

$f_m(t)$ representa a força introduzida pela embarcação e depende da rigidez da mola e do coeficiente de amortecimento introduzido.

$$f_m(t) = -kx - C\dot{x} \quad (47)$$

Sabendo que a força de radiação depende do amortecimento por radiação (B) e da massa adicionada (A), tem-se que esta variável pode ser obtida pela Equação 48:

$$f_r = -A\ddot{x} - B\dot{x} \quad (48)$$

Pode-se então reescrever a Equação 48, da seguinte forma:

$$f_d - kx - C\dot{x} - \rho g S x - A\ddot{x} - B\dot{x} = m\ddot{x} \quad (49)$$

Colocando a expressão 49 em função da força de excitação (f_d), obtém-se a Equação 50,

$$(m + A)\ddot{x} + (B + C)\dot{x} + (\rho g S + K)x = f_d \quad (50)$$

Onde $m+A$ representa a inércia total do corpo, $B+C$ o amortecimento da sua resposta e $\rho g S + K$ a restituição. Quando não existem forças externas de

excitação, a solução para as solicitações livres do sistema, através da anulação do membro da direita, satisfaz a equação 51:

$$(m + A)\ddot{x} + (B + C)\dot{x} + (\rho gS + K)x = 0 \quad (51)$$

O que significa que a solução associada às oscilações livres do sistema representa uma das componentes da solução geral da Equação 51, tendo a denominação de solução transitória ou complementar (PERDIGÃO, 2015).

Considera-se a solução da Equação 51; a Equação 52.

$$x = Xe^{qt} \quad (52)$$

Onde:

X e q são constantes.

Substituindo x na equação 52, determina-se a Equação 53.

$$X = (m'q^2 + B'q + K')e^{qt} = 0 \quad (53)$$

Em que $m'=m+A$, $B'=B+CeK'=\rho gS+K$, devendo esta equação ser verificada, independentemente do valor de t. Consequentemente, resolvendo a Equação 53, são obtidos dois valores de q, conforme demonstra a Equação 54.

$$q_{1,2} = -\frac{B'}{2m'} \pm \sqrt{\left(\frac{B'}{2m'}\right)^2 - \frac{K'}{m'}} \quad (54)$$

Assim, a solução da Equação 51 pode ser apresentada como a Equação 55

$$x = A_1e^{q_1t} + A_2e^{q_2t} \quad (55)$$

Em que, A1 e A2 representam constantes arbitrárias, sendo o seu valor determinado com base nas condições iniciais do problema, isto é, da mesma forma como o movimento foi iniciado.

Diz-se que o sistema é criticamente amortecido quando existe apenas um valor de q , ou seja, quando o radical da equação 54 é igual a zero. O coeficiente de amortecimento crítico é dado pela Equação 56.

$$B_c = 2\sqrt{Km} \quad (56)$$

O fator de amortecimento, ξ , é dado pelo quociente entre o coeficiente de amortecimento e o seu amortecimento crítico conforme mostra a Equação 57.

$$\xi = \frac{B'}{B_c} \quad (57)$$

Este fator, ξ , é utilizado para especificar a quantidade de amortecimento de um sistema onde:

- $\xi = 1$: Sistema criticamente amortecido;
- $\xi > 1$: Sistema superamortecido;
- $\xi < 1$: sistema sub-amortecido.

Num sistema sem amortecimento, a frequência natural de oscilação, ω_n , é dada pela Equação 58.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K'}{m'}} \quad (58)$$

Sendo T_n o período natural de oscilação, dado pela Equação 59.

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi \sqrt{\frac{m'}{K'}} \quad (59)$$

Assim, tendo por base as relações descritas nas Equações 51,52 e 53, é possível escrever a equação geral de um sistema de oscilações livres conforme mostra a Equação 60.

$$X = X e^{-\xi \omega_n t} \text{sen}(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t + \beta) \quad (60)$$

Em que X e β são determinadas tendo por base as condições iniciais do problema. A frequência natural de oscilação de um sistema com amortecimento, ω_d , é dada pela Equação 61.

$$\omega_d = (\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n) \quad (61)$$

A Figura 25 apresenta as oscilações livres de um sistema sub-amortecido.

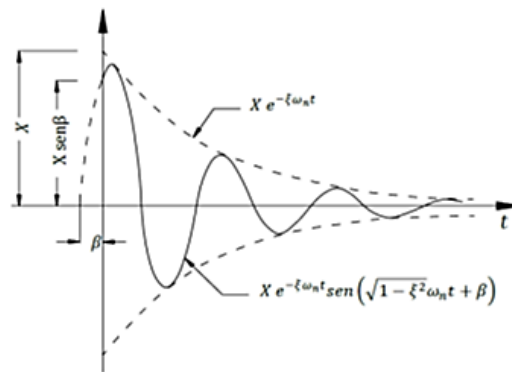


Figura 25: Oscilações livres de um sistema sub-amortecido.

Fonte: Perdigão, 2015.

O deslocamento do corpo de sua posição inicial, segundo a direção do grau de liberdade planejado, possibilita obter empiricamente as curvas de decaimento. Posteriormente, estas curvas exponenciais serão ajustadas aos registros das oscilações amortecidas do corpo, utilizando, métodos de convergência. O período natural e o amortecimento equivalente destas oscilações podem ser obtidos igualando o expoente das curvas referidas a $\xi \omega_n$, utilizando a Equação 57 (PERDIGÃO, 2015).

Os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento podem ser calculados a partir dos resultados das experiências de decaimento livre das oscilações do corpo flutuante, em águas paradas, sendo ξ determinado conforme apresentado na Equação 57 e CM obtido pela Equação 62.

$$C_M = \frac{m}{\rho V} - 1 \quad (62)$$

Onde:

ρ : representa a densidade da água,

V: volume de água deslocado pelo corpo flutuante

m: massa

Esta abordagem dificulta o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos à frequência natural do sistema, devido à essência das experiências de decaimento livre. Outra maneira para calcular estes coeficientes seria empregar à Teoria Linear de difração-radiação.

17 DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E DO TEMPO

Os problemas relacionados com a dinâmica de estruturas flutuantes podem ser abordados através de duas formas distintas: aplicando métodos no domínio da frequência ou no domínio do tempo. O domínio da frequência envolve abordagens mais simples, sendo possível incluir todas as não-linearidades presentes na equação de movimento, mas ainda considerando as forças de arrasto do fluido, características de amarração e o amortecimento viscoso. Sendo que a principal deficiência da análise no domínio da frequência é devido a impossibilidade de processar as não-linearidades presentes na equação do movimento, sendo imperativo a troca por aproximações lineares (PERDIGÃO, 2015).

Estes termos não-lineares têm origem, principalmente, das forças de segunda ordem da agitação marítima, das características não-lineares do sistema de fixação do corpo e das forças de resistência não-lineares.

Desta limitação decorre que o emprego de análises no domínio da frequência seja mais utilizada em estudos preliminares, a problemas onde uma solução simplificada seja admissível, ou a simulações com intervalo de tempo e número de registros consideravelmente longos (PERDIGÃO, 2016).

Entretanto, a análise no domínio do tempo permite incorporar todas estas não-linearidades, uma vez que provem da integração numérica das equações do movimento do corpo. Porém, este tipo de abordagem possui a desvantagem de requerer um processamento computacional superior, levando um tempo maior e apresentando soluções normalmente mais complexas e complicadas de interpretar (PERDIGÃO, 2016).

17.1 Análise do domínio da frequência e do tempo

A Equação 43 descreve o desenvolvimento das equações do movimento de um corpo. Entenda-se que esta equação não descreve corretamente o movimento uma vez que relaciona variáveis instantâneas do movimento com valores momentâneos das forças de excitação, e, portanto, estas equações devem ser representadas no domínio da frequência (PERDIGÃO, 2016).

Considerando que os movimentos do corpo estão em estado de equilíbrio são de amplitude pequena e que o sistema é linear, a equação do movimento de um corpo flutuante, no domínio da frequência, pode ser descrita pela Equação 63.

$$\sum_{j=1}^6 \{ (M_{kj} + a_{kj}) \ddot{x}_j + b_{kj} \dot{x}_j + c_{kj} x_j \} = F_k, \quad K = 1, 2, \dots, 6 \quad (63)$$

Em que x_j representa o movimento do corpo segundo o modo de oscilação j , M_{kj} a matriz de massas e de momentos de inércia, a_{kj} a matriz de massas e de momentos de inércia adicionados, b_{kj} a matriz de amortecimento, c_{kj} a matriz de restituição hidrostática e F_k as forças e os momentos exteriores que atuam no corpo, segundo o modo de oscilação k .

Caso todos os coeficientes expressos na Equação 63 fossem constantes para cada frequência particular do movimento, as seis equações diferenciais apresentadas poderiam ser resolvidas no domínio da frequência.

Porém, nem todas as forças apresentam um comportamento linear, inviabilizando a análise no domínio da frequência. Como resultado, o termo da equação que diz respeito ao amortecimento terá que ser substituído por uma

função de atraso, ou seja, a variável x passa também a ser função do tempo, seguindo uma abordagem baseada em funções de resposta a impulso (PERDIGÃO, 2016).

Regressando a uma análise no domínio da frequência, por uma questão de simplicidade, se as forças de amortecimento forem nulas, e se considerar que apenas se verificam oscilações de balanço puras de pequena amplitude, a Equação 64 pode ser escrita da seguinte maneira:

$$(Mi_x^2 + A_{44})\ddot{\theta} + W\overline{GM}_T\theta = 0 \quad (64)$$

Em que M representa a massa do corpo, i_x o raio de giração transversal, A_{44} o momento de inércia adicionado para o modo de oscilação de balanço em fase com a aceleração angular dessa oscilação, W o peso do corpo, \overline{GM}_T a altura metacêntrica transversal e θ a amplitude (ângulo) de oscilação de balanço (PERDIGÃO, 2016).

A Equação 64 é a equação linear para as oscilações de balanço do navio sem amortecimento, sendo idêntica à equação diferencial para oscilações harmônicas simples, cuja integral é dada pela Equação 65:

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega_R t) + \frac{\dot{\theta}_0}{\omega_R} \sin(\omega_R t) = 0 \quad (65)$$

Em que θ_0 representa o ângulo inicial de balanço ($t=0$ s), $\dot{\theta}_0$ a velocidade angular inicial de balanço e ω_R a frequência angular natural do modo de oscilação de balanço, sendo dada por:

$$\omega_R = \sqrt{\frac{W\overline{GM}_T}{Mi_x^2 + A_{44}}} \quad (66)$$

Caso a velocidade angular inicial de balanço, $\dot{\theta}_0$, seja igual a zero, a Equação 65 é reescrita na Equação 67:

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega_R t) \quad (67)$$

Podendo a Equação 67 ser escrita conforme a Equação 68:

$$\theta = \theta_m \cos(\omega_R t - \beta) \quad (68)$$

Em que θ_m é a amplitude máxima da oscilação de balanço e β a fase inicial da oscilação, dada pela Equação 69.

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\dot{\theta}_0}{\omega_R \theta_0} \quad (69)$$

O período das oscilações harmônicas (período natural) expressa pela Equação 69 é dado pela Equação 70.

$$T_R = \frac{2\pi}{\omega_R} = 2\pi \sqrt{\frac{M i_x^2 + A_{44}}{W G M_t}} = 2\pi \sqrt{\frac{i_x^2 + \frac{A_{44}}{M}}{g G M_t}} \quad (70)$$

A condição de linearidade é aplicável desde que o ângulo θ seja pequeno. Neste caso o valor de TR é independente da amplitude da oscilação de balanço. Por outro lado, o valor de TR varia no mesmo sentido que i_x , o que significa que o afastamento das massas do eixo longitudinal de oscilação do corpo aumenta o período da oscilação de balanço. Além disso, corpos com uma altura metacêntrica transversal menor apresentam períodos de balanço mais elevados.

17.2 Análise do domínio do tempo

Para obter uma análise no domínio do tempo, as equações do movimento na forma proposta por Cummins (1962) devem ser integradas em função do tempo, conforme descreve a Equação 71.

$$F_K^R(t) = \sum_{j=1}^6 \left\{ (M_{kj} + A_{kj}) \ddot{x}_j(t) + \int_{-\infty}^t (R_{kj})(t - \tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + C_{Kj} x_j(\tau) \right\} \quad (71)$$

Em que A_{kj} designa a matriz de inércia adicionada para a frequência infinita, R_{kj} as funções de resposta a impulso e t e τ o tempo.

Cummins (1962), parte do pressuposto que quando um corpo é forçado a oscilar em águas inicialmente paradas, as forças e os momentos que nele atuam, em cada instante, estão relacionados aos seus movimentos anteriores e não apenas o seu movimento atual.

Neste caso, o movimento de um corpo é descrito como uma sucessão temporal de pequenos movimentos impulsivos, que é válida caso os movimentos do corpo sejam de pequena amplitude, resultando em um sistema linear. Esta condição é fundamental para que se possa solucionar o problema da radiação e posteriormente obter a resposta hidrodinâmica do fluido no domínio do tempo.

Assim, em qualquer instante, a soma das reações a estes movimentos permite obter a força total de reação hidrodinâmica do fluido, considerando-se que cada reação possui um atraso temporal correto em relação ao instante do deslocamento impulsivo (CUMMINS 1962).

Considerando uma relação linear entre os dados de entrada e os de saída e, de acordo com a teoria das funções de resposta a impulso, Cummins (1962), afirma que, se a resposta (Rt) de um determinado sistema a um impulso unitário é conhecida, então a resposta desse sistema a uma força arbitrária (Ft) pode ser calculada através da correlação entre essa força e a função de resposta a impulso, conforme indica a Equação 72.

$$\Omega(t) = \int_{-\infty}^t R(t - \tau)F(\tau)d\tau \quad (72)$$

A partir desta abordagem pode ser demonstrado que as forças e os momentos de reação hidrodinâmica do fluido têm, tal como foi referido na análise do problema de radiação no domínio da frequência, uma componente relacionada com a aceleração instantânea do navio (força de inércia adicionada) e uma componente relacionada com a velocidade (força de amortecimento).

Assim, as forças de radiação, $F_K^R(t)$, são escritas conforme a Equação 73.

$$F_K^R(t) = \sum_{j=1}^6 \left\{ (A_{kj})\ddot{x}_j(t) + \int_{-\infty}^t (R_{kj})(t - \tau)\dot{x}_j(\tau)d\tau \right\} \quad (73)$$

Onde:

K: 1,2,...6

Em que A_{kj} representa a matriz de inércia adicionada para frequência infinita, t e τ o tempo, x_j o movimento do corpo segundo o modo de oscilação j e R_{kj} as funções de resposta a impulso que descrevem a evolução temporal da força generalizada que atua no corpo segundo a direção k , na sequência de um movimento do tipo impulsivo segundo a direção j .

Os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento com os termos da resposta hidrodinâmica do fluido possuem equivalência entre os coeficientes no domínio da frequência e do tempo, descritos na Equação 63. Esta comparação permite que a metodologia utilizada na resolução dos problemas de difração e radiação no domínio da frequência possa ser empregue na determinação das funções de resposta a impulso e dos coeficientes de inércia adicionada para frequência infinita, empregando para isso as transformadas de Fourier (CUMMINS 1962).

$$R_{kj}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{kj}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (74)$$

$$A_{kj}(t) = a_{kj}(\omega') + \frac{1}{\omega'} \int_0^{\infty} R_{kj}(t) \sin(\omega' t) dt \quad (75)$$

Em que ω representa a frequência angular, ω' um qualquer valor de ω , escolhido arbitrariamente e a_{kj} e b_{kj} os coeficientes de inércia adicionada e de amortecimento, respectivamente. A separação das componentes da reação hidrodinâmica do fluido, torna mais fácil o entendimento da transição da

formulação das equações dos movimentos do corpo no domínio da frequência para o domínio do tempo (CUMMINS 1962).

Assim, é possível resolver, no domínio do tempo, em cada instante, o conjunto de equações diferenciais, conforme a segunda lei de Newton, que relacionam os valores instantâneos das forças de excitação e dos movimentos provocados no corpo por ação dessas forças, presentes na Equação 63.

18 TEORIA DOS PAINÉIS

O método dos painéis baseia-se na teoria de escoamento potencial, sendo frequentemente utilizado para resolver geometrias complexas. A divisão dimensional do corpo flutuante em vários elementos pode ser realizada através do método dos painéis, o que requer um procedimento matemático apropriado, visto a influência da dimensão do corpo sobre o procedimento a ser adotado para a determinação das propriedades hidrodinâmicos (BRAGA, 2016).

Assumindo que o potencial de velocidades ao longo da camada limite é resolvido através da discretização dessa mesma camada, este método reduz a dimensão do problema de modo a que este possa ser resolvido numericamente.

Os procedimentos para análise de corpos sujeitos a ação do domínio fluido, em particular estruturas instaladas no oceano, compreende: análise linear e não linear da difração e radiação de ondas; métodos analíticos aplicados geralmente a geometrias (BRAGA, 2016).

A questão da análise dinâmica de uma unidade flutuante do tipo FPSO, considerando o escoamento do fluido, encontra restrições nas hipóteses da incompressibilidade e na irrotacionalidade do escoamento.

A evolução das teorias hidrodinâmicas em três dimensões está relacionada a análise da resposta hidroelástica dos corpos flutuantes, onde normalmente se faz uso do método linear dos elementos de contorno, o que viabiliza a estimativa do carregamento hidrodinâmico em três dimensões.

As restrições matemáticas consideram três hipóteses principais: o movimento de cada elemento mássico é considerado pequeno, supõe-se que os efeitos viscosos são desprezíveis e o escoamento será considerado irrotacional. Estes aspectos são padrões no estudo do movimento de navios e possibilitam reduzir o problema para uma abordagem linear. Os resultados podem ser obtidos no domínio da frequência, contudo o uso da transformada inversa de Fourier pode trazer a resposta para o domínio no tempo (BRAGA, 2016).

No caso de análises de problemas de difração e de radiação no domínio da frequência, a equação diferencial que orienta o potencial de velocidades do escoamento em torno do corpo é transformada numa equação integral, sendo o potencial apresentado sob a forma de uma distribuição de singularidades (fontes, dipolos ou ambas) na superfície molhada dos corpos que estão contidos no domínio em estudo. Dessa forma, a discretização da equação integral é feita dividindo a fronteira do domínio em painéis, no centro dos quais é exigida uma condição fronteira adequada.

A formulação do problema no domínio do tempo permite a inclusão de efeitos não lineares, sendo normalmente baseada em funções de resposta a impulso, referidas anteriormente. No método dos painéis o domínio computacional é discretizado ao longo dos seus limites, incluindo a superfície livre e os limites dos corpos, o que implica que a matriz dos coeficientes para este sistema de equações deve ser calculada em todos os momentos individualizados de cálculo (BRAGA, 2016).

19 ANSYS-AQWA

A ferramenta computacional Ansys Aqwa engloba um conjunto de análises computacionais de engenharia para a simular os efeitos da onda, vento e corrente sobre estruturas flutuantes fixas e móveis (ANSYS 2015a).

As propriedades hidrodinâmicas são comparadas com resultados gerados pelo pacote ANSYS® AQWA™ e com resultados obtidos durante procedimento experimental.

A evolução tecnológica verificada no século XX permitiu grandes desenvolvimentos no campo da simulação computacional de escoamentos de fluidos, apresentando vantagens que tornam o seu uso indispensável, como apresentado a seguir:

- Permite reduzir os custos e o tempo de exploração de qualquer dispositivo;
- Possibilita o teste de sistemas de dimensões consideráveis, cuja modelação física se apresenta como extremamente complexa;
- Admite um grau de precisão muito elevado, associado à resolução de equações matemáticas complexas e avançadas;
- Não apresenta limitações físicas, uma vez que é possível de efetuar em qualquer local, mesmo em computadores pessoais, que apresentam cada vez maior capacidade de processamento.

Segundo o manual do ANSYS-AQWA, o solver pode simular o carregamento de onda de fluido hidrodinâmico linearizado em corpos rígidos flutuantes ou fixos. Isso é realizado empregando a teoria da radiação tridimensional, difração em ondas regulares no domínio da frequência (ANSYS, 2015a).

O movimento em tempo real de um corpo ou corpos flutuantes durante a operação em ondas regulares ou irregulares pode ser simulado, no qual forças lineares e não-lineares e hidrostáticas são estimadas sob a superfície instantânea da onda incidente. Para o desenvolvimento de uma simulação numérica específica, são obrigatórias três etapas: pré-processamento, solucionador e pós-processamento.

O pré-processamento corresponde a primeira fase e refere-se a definição das condições de fronteira, das propriedades do fluido e a constituição da malha, sendo que esta última é criada através da discretização do domínio computacional num determinado número de elementos infinitesimais (ANSYS, 2015a).

É necessário chegar a uma solução eficaz nesta etapa, uma vez que, por um lado, quanto maior for o número destes elementos, melhor será a precisão dos resultados obtidos, mas, por outro lado, também será superior o tempo necessário para a computação e para o processamento desses resultados.

O solucionador consiste num algoritmo numérico (ou conjunto de algoritmos), cujo procedimento inclui a modelação das variáveis do escoamento num sistema de equações analíticas simples, a discretização das equações fundamentais, substituindo-as pelas equações analíticas atrás referidas e a resolução do sistema de equações algébricas (ANSYS 2015a).

O método das diferenças finitas exige um demasiado recurso as malhas estruturadas, o que inviabiliza a sua utilidade. Deste modo, a maioria dos códigos fundamenta-se na discretização de elementos finitos, assegurando uma flexibilidade ideal na construção da malha. Isto é obtido através das seguintes operações:

- Integração das equações do escoamento dos fluidos por todos os volumes de controlo do domínio;
- Conversão das equações integrais num sistema de equações algébricas;
- Determinação da solução das equações algébricas através de métodos iterativos.

A principal vantagem, sobre o método das diferenças finitas e dos elementos finitos, se dá no uso de um conceito primordial durante este processo: o princípio de conservação das quantidades físicas, expressas pelas equações que regem o fenómeno sobre qualquer volume de controle.

O pós-processamento engloba o estudo da solução pelo modelo numérico utilizado no cálculo, sendo então possível calibrar o respectivo modelo numérico e validá-lo através da comparação com resultados experimentais (ANSYS 2015b).

A teoria que está na génese do AQWA, assim como a descrição das diferentes funções e capacidades do software, encontra-se detalhada em três

manuais: o AQWA Theory Manual (ANSYS, 2012a), o AQWA User Manual (ANSYS, 2012b) e o AQWA Reference Manual (ANSYS, 2012c). Uma simulação numérica deve considerar algumas propriedades (André, 2010):

- Estabilidade - os erros decorrentes do processo de cálculo não podem ser exponenciados pelo método utilizado;
- Consistência - a discretização deve tender para o valor exato à medida que o espaço na malha tende para zero. A diferença entre o valor da equação discretizada e o valor real, dá pelo nome de erro de truncatura;
- Convergência - a solução deve convergir para a solução exata;
- Precisão - as soluções numéricas do escoamento são valores aproximados, pelo que interessa minimizar os erros de modelação, convergência, entre outros;
- Conservação - as leis de conservação introduzidas pela dinâmica de fluidos devem ser respeitadas pelo esquema numérico.

CAPÍTULO II: ARTIGO CIENTÍFICO

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA EMBARCAÇÃO SUBMETIDA A DIFERENTES ESPECTROS DE FREQUÊNCIA DE ONDA

Claudio Matheus Rangel Pessanha^{1}, Silvio Eduardo Teixeira Pinto da Silva^{2*}*

RESUMO

O estudo das condições de flutuabilidade das unidades flutuantes é de suma importância para garantir a integridade estrutural para diversas condições ambientais, principalmente ondas que podem incidir sobre diferentes amplitudes e ângulos. Este trabalho consistiu em avaliar a movimentação de um navio de transporte de gases líquidos LNG, quando sujeitas a diferentes frequências e amplitudes de ondas. Inicialmente foi realizado a preparação da estrutura e a determinação da linha d'água no Space Claim, em seguida foram definidos os elementos de malha e a simulação para diversas frequências e amplitudes de onda no AQWA diffraction, a partir disso foram averiguados a distribuição do campo de pressão e o gráfico de RAO para os seis graus de liberdade. Neste estudo se observou que o navio apresentou movimentos mais sutis quando submetido a ondas de menores amplitudes e frequências, e que embora os deslocamentos para Surge, Sway e Heave não foram críticos em altas frequências, os movimentos rotacionais apresentaram valores muito elevados, devendo-se realizar uma análise de estabilidade no domínio do tempo como estudo complementar.

Palavras-chave: Unidades Flutuantes; Estabilidade; Ondas Marinhas.

¹Institutos Superiores de Ensino do CENSA - ISECENSA - Laboratório de Análise e Projeto de Sistemas Mecânicos- LAPSIM - Rua Salvador Correa, 139, Centro, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28035-310, Brasil;

²Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF - Laboratório de Materiais Avançados - LAMAV - Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28013-602, Brasil

(*) e-mail: matheusmrp@hotmail.com

SIZING A PLATE HEAT EXCHANGER FOR COOLING THE LUBRICATING OIL OF A HYDROGEN TURBINE

Claudio Matheus Rangel Pessanha^{1*}, Silvio Eduardo Teixeira pinto da Silva^{2*}

ABSTRACT

The study of the buoyancy conditions of floating units is of paramount importance to ensure the structural integrity for various environmental conditions, especially waves that can affect different amplitudes and angles. This work consisted of evaluating the movement of a vessel carrying liquid LNG gases, when subjected to different frequencies and wave amplitudes. Initially, the preparation of the structure and the determination of the waterline in Space claim was carried out, then the mesh elements and the simulation were defined for various frequencies and wave amplitudes in the AQWA diffraction, then the distribution of the pressure field was investigated. and the RAO plot for the six degrees of freedom. In this study, it was observed that the ship presented more subtle movements when subjected to waves of lower amplitudes and frequencies, and that although the displacements for Surge, Sway and Heave were not critical at high frequencies, the rotational movements presented very high values, due to perform a time domain stability analysis as a supplementary study.

Keywords: Floating Units; Stability; Sea Waves.

¹ISECENSA Superior Education Institutes – LAPSIM - Rua Salvador Correa, 139, Centro, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28035-310, Brasil;

²Northern Rio de Janeiro State University Darcy Ribeiro - UENF – Advanced Materials Laboratory - LAMAV - Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28013-602, Brasil.

(*) e-mail:matheusmrp@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

Uma unidade flutuante situada em águas profundas caracteriza-se como um sistema dinâmico sujeito a ações ambientais (vento, ondas do mar e correntes marinhas), tendo como premissas de dimensionamento as condições de flutuação e estabilidade, sendo importante o peso da estrutura e o tipo de fixação utilizada.

O fundo da marinha mercante (FMM) aprovou no ano de 2020 cerca de 5,6 bilhões de reais de investimento para o setor naval, onde a maior parte da verba é destinada à construção, conversão, reparo e modernização de embarcações de apoio portuário e criações de novos estaleiros (RAWSON E TUPPER, 2001).

A integridade estrutural dos navios que operam no mar é de suma importância para garantir a segurança dos passageiros e do ecossistema marinho. A não integridade estrutural pode ocasionar uma catástrofe devido a ruptura do casco (RAWSON E TUPPER, 2001). Dessa forma, deve ser assegurado que as forças estruturais globais, assim como detalhes estruturais, estejam compatíveis com o carregamento de ondas que irão sofrer. O estudo das condições de flutuabilidade dessas estruturas pode tornar-se uma tarefa bastante complexa. A determinação das condições de flutuação normalmente é simulada a partir das teorias de painéis de chapa rígidos, onde as forças atuantes nas embarcações são originadas pela aceleração vertical da água.

No entanto, uma das condições mais preocupantes para unidades flutuantes ocorre devido as perdas da estabilidade provocadas pelas ondas. As ondas podem assumir diferentes perfis e incidir sob diferentes partes do navio. Entre as situações menos favoráveis para a flutuação da plataforma ocorre quando os extremos opostos da embarcação ficam entre cristas ou vales, pela direção da onda ($\theta=45^\circ$ até $\theta=60^\circ$), onde o comprimento de onda (λ) é associado com as dimensões da plataforma, especialmente na ausência de contraventamentos.

Este trabalho apresenta uma simulação computacional, baseada no método dos painéis que tem como objetivo analisar a estabilidade de uma

embarcação quando sujeita a carregamentos provocados por diferentes perfis de ondas.

1.1 Objetivo Geral:

O objetivo geral do trabalho é a determinação das propriedades hidrodinâmicas e de espectro de frequência de uma unidade flutuante, utilizando o software Ansys AQWA, para que este objetivo seja atingido serão assumidos os seguintes objetivos específicos.

1.1.1 Objetivos Específicos:

- Extrair coeficientes hidrodinâmicos da unidade flutuante;
- Obter gráficos de RAOs para os seis graus de liberdade segundo os modelos de ondas lineares;
- Obter a distribuição do campo de pressão ao longo da estrutura.

2. METODOLOGIA

O conhecimento da resposta estrutural é um elemento importante no projeto de navios e estruturas offshore. A Figura 26 mostra o Fluxograma utilizado para a realização da simulação.

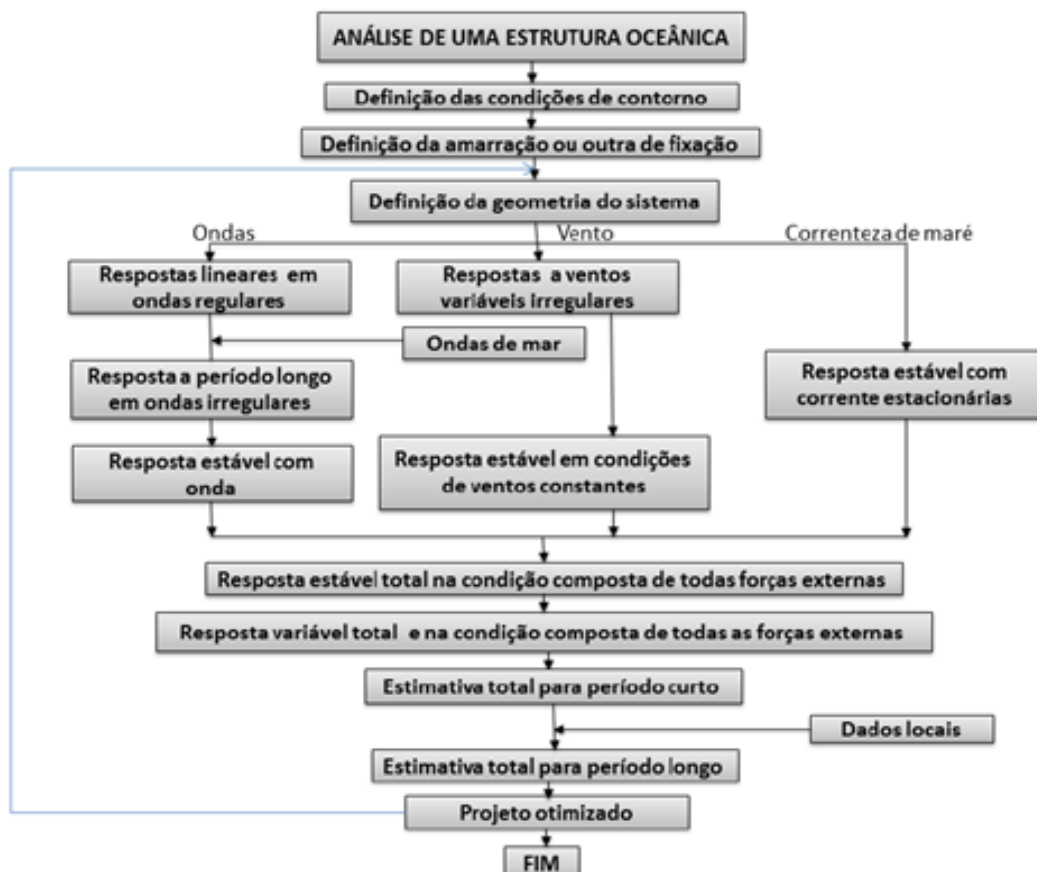


Figura 26: Fluxograma da proposta de simulação da Unidade flutuante

Fonte: Hayashi e Tachibana, 1994.

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 (RAWSON E TUPPER, 2001).

Os modelos usados para determinar os carregamentos impostos aos navios são dependentes das ondas. Partiu-se também da condição do fluido ser invíscido, incompressível e de que o movimento é irrotacional, para geometrias complexas como a de cascos de navios (RAWSON E TUPPER, 2001).

2.1 Momento de Inércia

O momento de inércia (I) mede o grau em que um objeto resiste a aceleração em torno do eixo, sendo diretamente relacionado a distribuição de massa para rotação em torno de um eixo.

O momento de inércia (I) para unidades flutuantes é definido na área de linha d'água, podendo ser determinado a partir do somatório do produto de cada porção desta área pelo quadrado da sua distância até o eixo de giro da área como um todo.

O cálculo do momento de inércia é de fundamental importância para o conhecimento da estabilidade da embarcação, sem o mesmo, não tem a possibilidade da realização do estudo. A inércia da área de linha d'água quantifica o montante desta área e o seu grau de afastamento do eixo de giro, ou seja, o quanto o volume em torno da linha d'água se modifica e o centro de empuxo deste volume se desloca lateralmente quando a unidade inclina (RAWSON E TUPPER, 2001).

Os momentos de inércia a seguir assumem densidade homogênea e o eixo de rotação passa pelo centro de massa, a menos que especificado de outra forma. A Equação 76 demonstra o cálculo do momento de inércia:

$$I = \frac{1}{12} m(b^2 + h^2) \quad (76)$$

Onde:

m é a massa;

b é a base;

h é igual a altura.

2.2 Raio de Giração

O raio de rotação ou de giro de um corpo em torno do eixo de rotação é definido como a distância radial até um ponto que teria um momento de inércia igual à distribuição real da massa do corpo, se a massa total do corpo ali estivesse concentrada (RAWSON E TUPPER, 2001).

O raio de giro é muito importante para a modelagem da unidade flutuante terá valores diferentes para cada eixo considerado. Para a obtenção do raio de

giração é necessário conhecer as áreas e os momentos de inércia conforme mostra a Equação 77.

$$K_{x,y,z} = \sqrt{\frac{I_{x,y,z}}{A}} \quad (77)$$

Onde:

I_x é o momento de inércia;

A é igual a área.

Para o caso específico de uma embarcação, o manual do Ansys AQWA sugere a adoção das Equações 78, 79 e 80 para a determinação do raio de giração.

$$K_{xx} = 0,34 * B \quad (78)$$

$$K_{yy} = 0,34 * L \quad (79)$$

$$K_{zz} = 0,26 * L \quad (80)$$

2.3 Sistema de Embarcação

O casco é o invólucro exterior da embarcação, responsável por dar estanqueidade, e sendo o principal responsável pela flutuabilidade do navio. geralmente o casco não tem uma forma geométrica definida, e a principal característica de sua forma é ter um plano de simetria (plano diametral) que se imagina passar pelo eixo da quilha (FONSECA, 2002).

Para a simulação da flutuabilidade do casco é necessário conhecer as divisões existentes, partes as quais irão influenciar diretamente na estabilidade do navio. A Figura 27 ilustra as principais partes existentes.

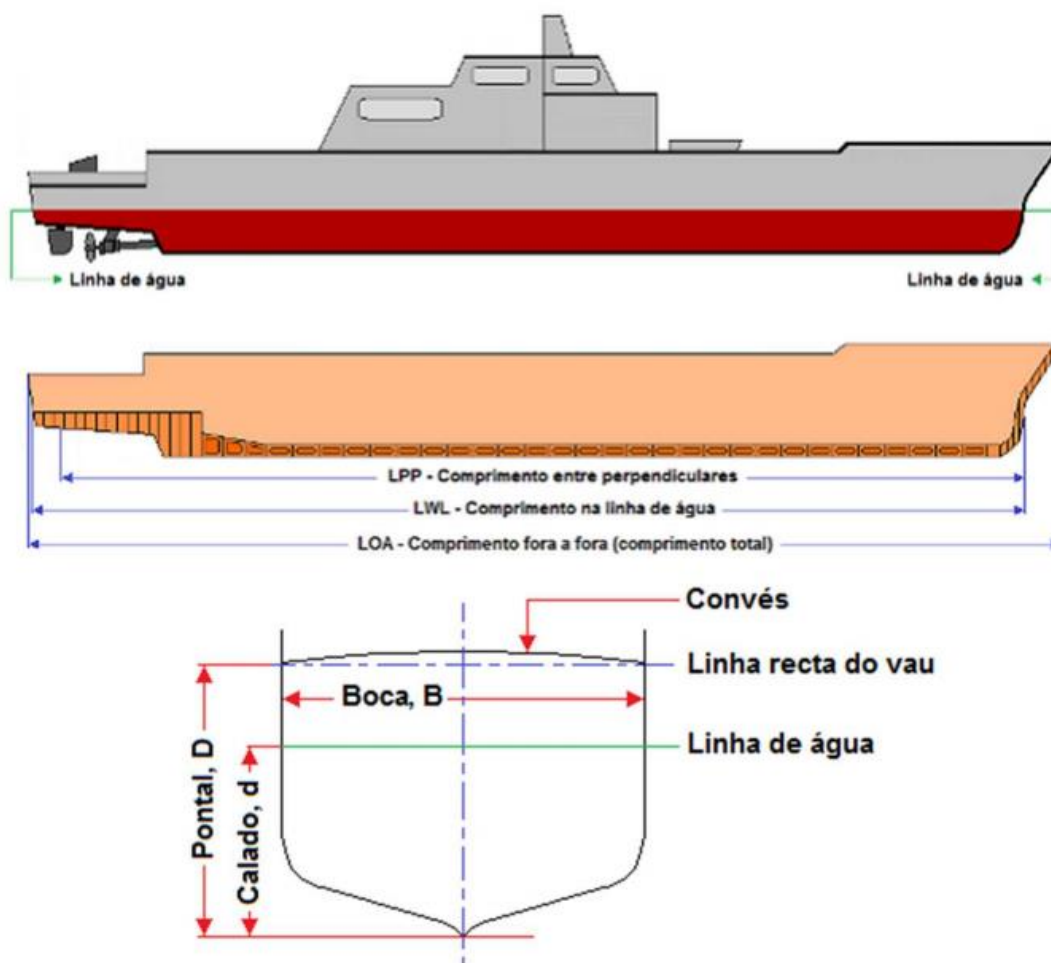


Figura 27: Principais zonas de um casco de embarcação.

Fonte: Taylor, 1996.

Costado é a parte externa do navio que fica acima da linha-d'água. Enquanto o calado ou carena é a parte que fica submersa, inferior a linha de flutuação da embarcação.

A Linha de flutuação (LF), ou simplesmente flutuação, é a interseção da superfície da água com o contorno exterior do navio. A flutuação correspondente ao navio completamente carregado denomina-se flutuação carregada, ou flutuação em plena carga. A flutuação que corresponde ao navio completamente vazio chama-se flutuação leve (TAYLOR, 1996).

2.4 Coeficiente de Carena

O coeficiente de bloco ou carena é a relação entre o volume deslocado correspondente a parte imersa da embarcação pelo volume das dimensões e o

volume do paralelepípedo correspondente. Este coeficiente têm grande utilidade para o projeto do navio, pois eles definem a finura do casco e de suas seções (TAYLOR, 1996).

Sendo que quanto mais próximo de 1, mais se assemelha a uma caixa retangular, tendo formas mais cheias e mais robusta e resistente ao movimento. Quanto menor o valor de C_b , mais o navio será esbelto, tendo formas mais finas e possuindo menor resistência ao movimento. Uma melhor interpretação do Coeficiente de bloco, é possível através da Figura 28.



Figura 28: Determinação do coeficiente de bloco.

Fonte: Taylor, 1996.

A Equação 80 possibilita determinar o coeficiente de bloco conforme preconiza sua definição, onde a relação entre o volume deslocado pela embarcação V e o volume do paralelepípedo que tem para arestas respectivamente L , B e C conforme a Equação 81:

$$C_B = \frac{V}{L.B.C} \quad (81)$$

Onde:

L : comprimento entre Proa e Polpa;

B : boca máxima da parte imersa;

C : calado médio.

Através do coeficiente de bloco é possível identificar o tipo de embarcação, com esse dado é escolhido a estrutura utilizada para o devido fim, neste caso, um

navio petroleiro (RAWSON E TUPPER, 2001). Na Tabela 1 é identificado a relação entre o coeficiente de carena e o tipo de embarcação.

Tabela 1: Relação do coeficiente de bloco para diferentes embarcações.

NAVIO	Coef. De bloco	Coef. da seção a M.N.	Coef. Prismático	Coef. Da área de flutuação
Encouraçado	0,6	0,97	0,62	0,73
Cruzador pesado	0,6	0,97	0,62	0,69
Cruzador de 10000 tons	0,53	0,85	0,62	0,72
Cruzadores menores	0,56	0,83	0,67	0,74
Contratorpedeiros	0,52	0,83	0,63	0,74
Rebocadores de porto	0,59	0,89	0,65	0,8
Navios de passageiros	0,67	0,99	0,72	0,77
Navios de cabotagem, mistos	0,64	0,97	0,66	0,77
Cargueiros grandes	0,78	0,99	0,78	0,84
Cargueiros médios	0,71	0,98	0,72	0,8
Navios-Tanques	0,76	0,97	0,77	0,84
lates a motor para alto-mar	0,57	0,94	0,6	0,72
lates a vela	0,2	0,4	0,5	0,75

Fonte: Taylor, 1996.

2.5 Plataforma Workbench

A plataforma Workbench possibilita integrar diversas funcionalidades dos plugins presentes no software Ansys, sendo capaz de criar diferentes ligações e escalonamentos entre pacotes distintos, sendo que a componente “Geometry” é a única possível de associar e transferir entre análises distintas, conforme se pode observar na Figura 29.

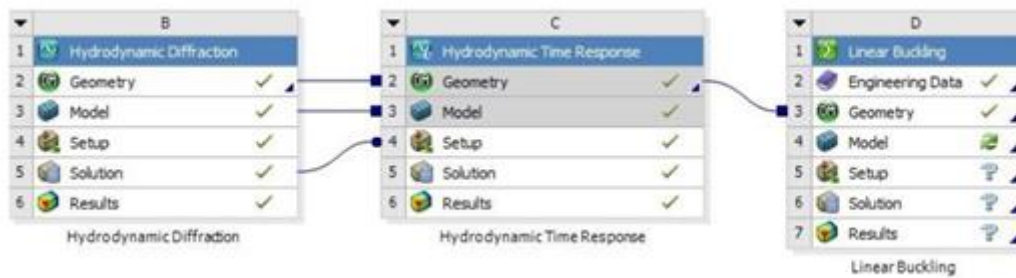


Figura 29: Ligações e Escalonamentos no Workbench.

Fonte: Autor, 2021.

O procedimento comum de uma simulação passa pelos seguintes passos:

- Definição da geometria;
- Definição das condições de testes;
- Definição da malha;
- Definição do tipo de outputs pretendidos;
- Solução.

O primeiro passo é realizado no Space Claim, uma das componentes do Workbench, onde se cria a geometria pretendida para um ou mais corpos. Posteriormente, os seguintes passos serão dados no modelo utilizado, neste caso o AQWA.

Na análise hidrodinâmica, é possível transferir todas as condições de teste, para além da geometria, alterando apenas o domínio da análise (ANSYS, 2015g).

Para a determinação e tratamento da geometria foi utilizado a ferramenta Space Claim R1 2021 e para a análise hidrodinâmica nas estruturas foi utilizado o software ANSYS-AQWA R1 2021 para a determinação da malha. A metodologia teve início com a limpeza e o detalhamento da geometria da embarcação, seguida da análise de difração e análise de resposta para diferentes ângulos (ANSYS, 2015g).

2.6 Análise da Embarcação

A embarcação LNG utilizada para transporte de gases líquidos foi empregada nesta análise. A unidade flutuante é composta por quatro tanques localizada no centro do convés, um casario e um helideck para pouso do helicóptero (RAWSON E TUPPER, 2001).

O SpaceClaim é o software de geração geométrica, edição e preparação de modelos geométricos da Ansys que importa a grande maioria de formatos CAD do mercado. O modelo da embarcação foi importado do site GrabCad, que fornece diversas estruturas gratuitamente para realização de simulações e impressão 3D.

A Figura 30 mostra a vista isométrica da embarcação no Spaceclaim

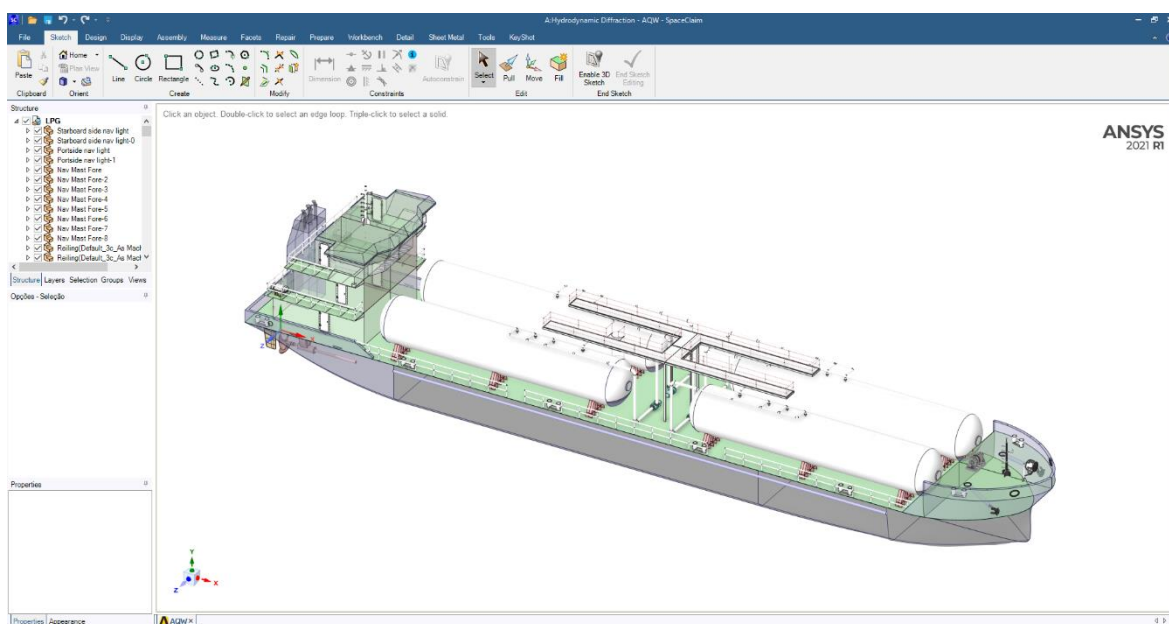


Figura 30:Vista isométrica da embarcação LNG.

Fonte: Rawson e Tupper, 2001.

As dimensões da embarcação LNG é mostrada no Tabela 2.

Tabela 2: Dimensões da embarcação.

Área do convés	1292,47 m ²
Área lateral da embarcação	1046,07 m ²
Comprimento	61,562 m
Largura	10,20 m
Altura	3,199 m

Fonte: Autor, 2021.

Conforme se pode verificar, o navio apresenta simetria em relação aos planos verticais que contêm os eixos dos xx e dos yy.

2.7 Modelo Sólido Tridimensional

Nesta sessão serão descritos os procedimentos para o tratamento da estrutura do Ansys AQWA.

2.7.1 Limpeza da estrutura

Uma maneira de reduzir a quantidade de nós da malha e conseqüentemente o tempo necessário de processamento é a preparação da estrutura de modo a otimizar o processamento, desta forma, componentes desnecessários devem ser excluídos na simulação (ANSYS, 2015d).

Isto reduz significativamente o custo computacional e os erros numéricos, pois o solver irá realizar menos interações e a convergência é mais facilmente alcançada.

A Figura 31 mostra a estrutura da embarcação já limpa, pronta para a simulação. Foram suprimidos da análise componentes que não influenciam na flutuabilidade da embarcação, porém propriedades diretamente influenciadas pelo peso destes componentes como o centro de gravidade e o raio de giração serão considerados na análise computacional.

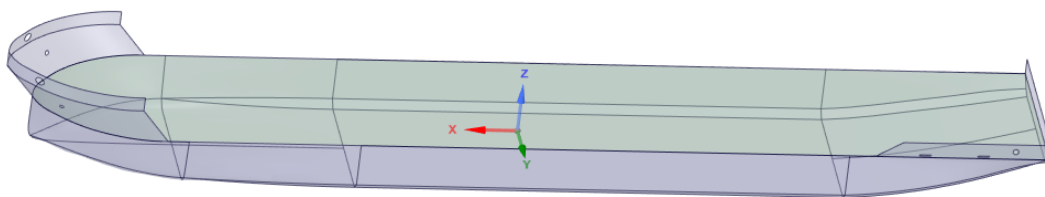


Figura 31: Vista isométrica da embarcação LNG após a limpeza.

Fonte: Ansys, 2015d.

Há 3 tipos de elementos usados na análise de elementos finitos para estruturas navais: elementos de viga, cascas e sólidos. A escolha do tipo de elemento influencia no comportamento mecânico que se deseja simular. Muitas das vezes, a simulação demanda um imenso processamento computacional. O elemento de casca tem ao menos 3 ou 4 elementos de nó no qual são definidos a espessura da casca com seis graus de liberdade em cada nó. Estes elementos podem ser representados em um plano 2D que podem ser colocados em qualquer espaço 3D. Tais elementos são bem ajustados em estruturas finas onde a razão de altura para comprimento é muito pequena (ANSYS, 2015d).

Os elementos de casca são preferidos para compor malhas em 2D, onde os 4 nós da casca usados para definir a geometria e a espessura da casca e devem ser adicionadas informações de entrada, para precisão do comportamento físico. Cargas podem ser aplicadas em qualquer direção da casca, que é um benefício em relação aos elementos de viga. Sendo amplamente utilizado para a representação de navios (ANSYS, 2015d).

O modelo deve ser lastrado na linha de água de modo a distinguir a posição de linha de água do corpo flutuante. O domínio de integração vai dessa linha até a superfície instantânea da onda, como mostrado na Figura 32. Todas as geometrias utilizadas no AQWA devem ser do tipo casca, não sendo possíveis aplicar modelos sólidos para solver.

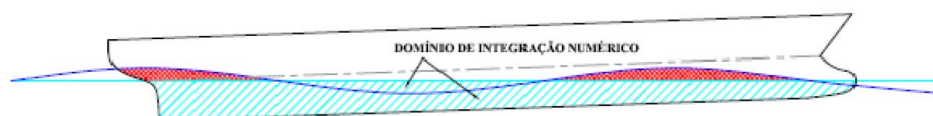


Figura 32: Domínio de Integração na metodologia numérica.

Fonte: Rawson e Tupper, 2001.

Em problemas hidrodinâmicos que incluem um limite de superfície livre de fluido, é prática comum definir um sistema de eixos com a origem na superfície livre média do fluido, como mostrado na Figura 33. No AQWA isto é referido como os eixos de referência fixos (FRA), eixos globais, ou OXYZ, que é um sistema de eixo fixo com a origem na superfície livre média e eixo Z apontando verticalmente para cima (ANSYS, 2015f).

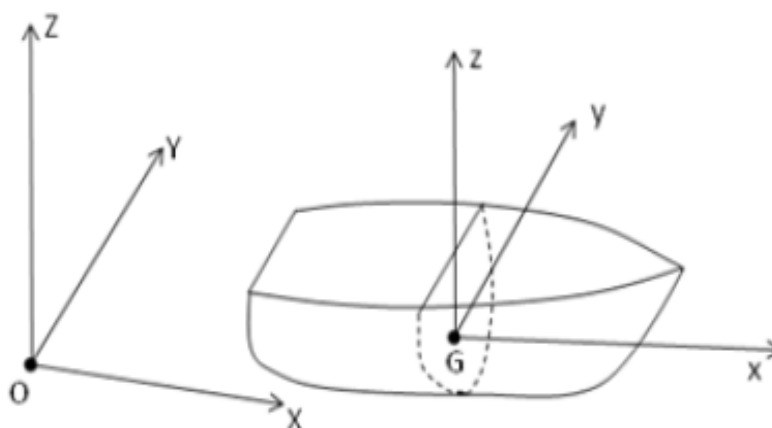


Figura 33: Definição do sistema de eixo ANSYS-AQWA.

Fonte: Ansys, 2015f.

Nesta seção são posicionados os centros de gravidade, os raios de giração, momento de inércia e distribuição de massa conforme as Equações 71 e 72, conseqüentemente, todas as quantidades hidrodinâmicas são avaliadas no centro de gravidade da embarcação em ANSYS AQWA. A fase é definida em relação a fase de uma onda incidente na origem do sistema de coordenadas global em X, Y e a superfície livre em Z sendo estas diretamente relacionadas com as dimensões do navio (ANSYS, 2015g).

Uma vez posicionado o eixo global no centro de gravidade da peça é necessário a divisão do objeto de estudo em torno da linha d'água, linha essa que será usada como referência durante toda análise. Para a divisão da geometria foi utilizado o menu projeto >> objeto plano, onde a embarcação foi dividida nos 3 planos, xx, yy e zz. Será empregado apenas o plano yy, onde a partir desse plano ocorrerá a divisão do objeto estudado em duas seções, superior e inferior utilizando o objeto dividir corpo (ANSYS, 2015g).

Para a descrição de movimentos de corpo rígido, é mais conveniente usar o centro de gravidade do corpo como um ponto de referência dinâmico. Além disso esta condição é necessária para que seja possível a divisão da embarcação em duas partes: a definição dos sistemas de eixo; a origem dos eixos da estrutura local está no centro de gravidade do corpo. A estrutura local que atravessa o centro de gravidade será inicialmente paralela aos eixos de referência fixos conforme Figura 34.

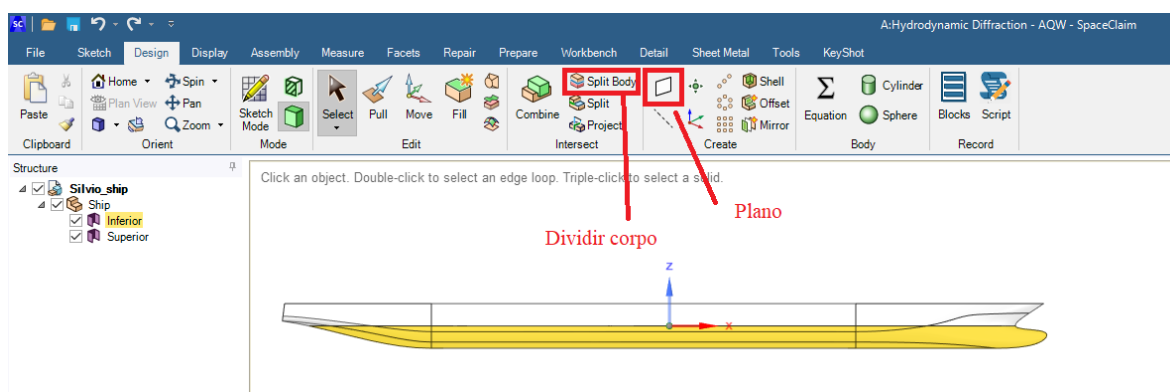


Figura 34: Divisão do corpo em duas seções a partir da linha d'água.

Fonte: Autor, 2021.

Alguns modelos de outros sistemas CAD quando importados podem apresentar faces corrompidas e falhas de descontinuidades. O Software Space Claim apresenta ferramentas para reparar folgas, faces ausentes, dividir arestas etc. A Figura 35, apresenta as opções da aba reparar presente no Space Claim.

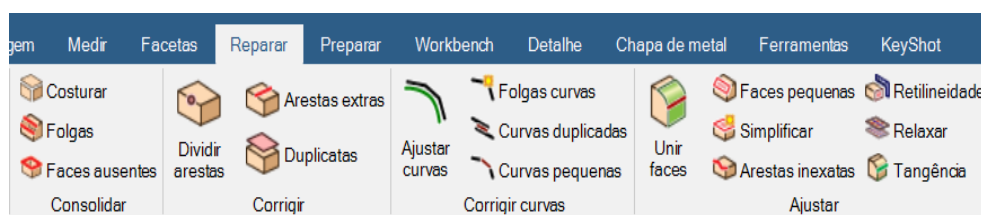


Figura 35: Área de reparos do Space Claim.

Fonte: Autor, 2021.

Para que a geometria ficasse apta para as análises e simulações foi necessário utilizar as ferramentas de “Faces ausentes”, “Arestas extras” e “Arestas inexatas” que tem como objetivo eliminar possíveis erros de convergência de malha. O arquivo foi salvo no formato scdoc (ANSYS) e posteriormente para a construção da malha (ANSYS, 2015g).

2.7.2 Preparação do Modelo

Antes de iniciar a preparação da malha deve ser preparado o modelo, com as propriedades da embarcação como profundidade da lâmina d'água, tipos de amarrações, raio de giração dos eixos.

2.7.2.1 Profundidade da lâmina d'água

A profundidade de água é também um importante parâmetro, uma vez que tem influência na dinâmica da embarcação. O seu valor vai influenciar diversos parâmetros, que determinam a resposta de um corpo flutuante (TAYLOR, 1996).

É de esperar que para profundidades de água mais próximo os valores obtidos estejam próximos dos valores teóricos para situações de profundidades infinitas, uma vez que à medida que a profundidade aumenta, menor é a sua influência. Para facilitar o processamento foi utilizado uma lâmina d'água de 200 metros (TAYLOR, 1996).

2.7.2.2 Ponto de massa

Elementos de massa pontuais podem ser inseridos no modelo manualmente ou podem ser calculados pelo software. Foi mantida a opção de cálculo do peso pelo software, que determina esse valor a partir da água deslocada. A Figura 36 ilustra a inserção do ponto de massa.

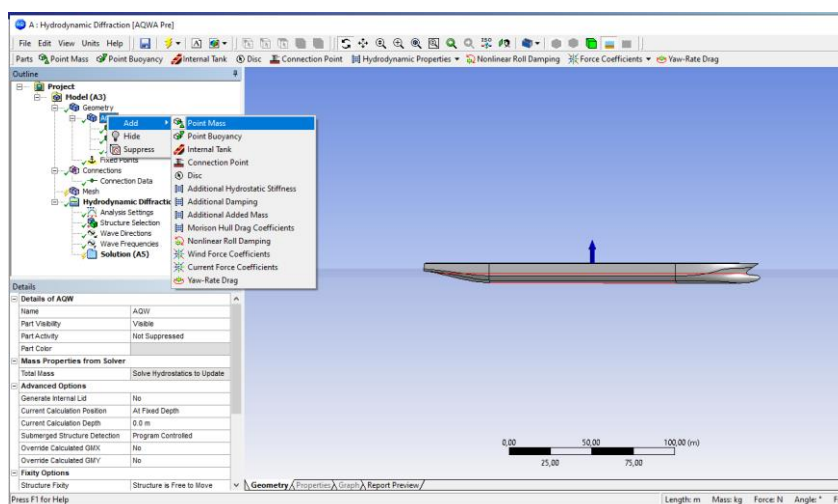


Figura 36: Inserção do ponto de massa.

Fonte: Autor, 2021.

Também foram atribuídos os raios de giração a partir da Equação 78, 79 e 80.

$$k_{xx} = 0,34 * 10,2 = 18,36\text{m}$$

$$k_{yy} = 0,25 * 61,562 = 15,39\text{m}$$

$$k_{zz} = 0,26 * 61,562 = 16,01\text{m}$$

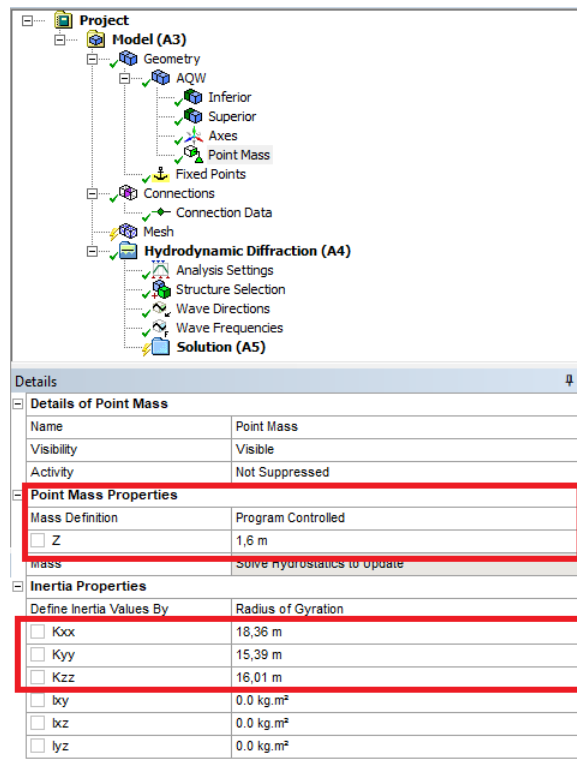


Figura 37: Atribuição da massa e raio de giração.

Fonte: Autor, 2021.

A fim de corrigir problemas durante a geração da malha foram habilitados dois sistemas de correção na geometria da malha. A opção generate internal Lid é um filtro para corrigir problemas associados a ondas irregulares a partir da opção, enquanto a opção Ignore Modelling Rule Violations parte do pré-suposto que é impossível se obter uma malha perfeita, neste caso é permitido que alguns painéis apresentem falhas desde que seja em uma quantidade relativamente pequena, de modo que possa ser desprezada (TAYLOR, 1996).

2.7.2.3 Modelo de malha

Antes de iniciar a simulação, é necessário realizar a análise da malha da geometria possuindo grande importância na resolução das equações dos elementos e nós e reduz o tempo de simulação. A definição da malha e o seu refinamento é um aspecto muito importante uma vez que determina com precisão os movimentos do navio e os coeficientes hidrodinâmico quando sujeitos a diferentes carregamentos. Apesar de uma malha tão pequena quanto possível, apresentar resultados mais próximos da realidade deve-se tomar alguma cautela em seu dimensionamento para que não seja exigido grandes capacidades de processamento, além disso, em um determinado momento os resultados convergirão para um valor aceitável, e um maior refinamento apenas consumirá mais recursos computacionais (TAYLOR, 1996).

A dimensão da malha tem influência, não apenas no tempo de simulação, mas também no intervalo de frequências para o qual os RAO's são calculados. Isto é, quanto mais refinada for a malha, maior é a frequência máxima considerada. Ainda que os testes sejam realizados maioritariamente com ondas regulares (frequência única), é importante ter em atenção unidade flutuante a torna a resposta significativamente irregular. Isto justifica o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos para uma gama de frequências e não apenas para uma frequência única. Também foi desabilitada a opção matriz quadrática QTF que é utilizada para avaliar o espectro de onda de segunda ordem para uma ampla faixa de profundidade de água de modo a otimizar o processamento da análise (RAWSON E TUPPER, 2001).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Embora numa aplicação real as características das ondas incidentes no dispositivo sejam variáveis e não se possam controlar, para uma análise preliminar da flutuabilidade de uma embarcação é importante analisar de que forma varia o seu desempenho para diferentes alturas de onda. Desta forma será possível identificar quais as condições de agitação que se traduzem em menores movimentos do navio (ANSYS, 2015d).

Além disso, as estruturas flutuantes apresentam períodos naturais de oscilação que podem ser excitados pelas ondas incidentes. Assim, para um dado período de onda próximo desse período natural de oscilação, sabe-se que acontecem fenômenos de ressonância que resultam na amplificação das oscilações da estrutura (ANSYS, 2015d).

No AQWA Diffraction é possível obter os resultados hidrostáticos do casco da embarcação movido, permitindo encontrar os centros de flutuabilidade, empuxo e gravidade são obtidos também os valores dos movimentos dos graus de liberdade Heave, Roll e Pitch, o valor dos coeficientes hidrostáticos da embarcação em condições hidrostáticas é mostrada na Figura 38.

Hydrostatic Results						
Structure	Navio					
Hydrostatic Stiffness						
Center of Gravity (CoG) Position:	X:	0.64112 m	Y:	-2.3297e-4 m	Z:	1.6 m
		Z		RX		RY
Heave (Z):		5605337.5 N/m		31.38979 N/°		123834.18 N/°
Roll (RX):		1798.5024 N.m/m		505473.22 N.m/°		39.929543 N.m/°
Pitch (RY):		7095176. N.m/m		39.929546 N.m/°		24637924 N.m/°
Hydrostatic Displacement Properties						
Actual Volumetric Displacement:		736.72888 m ³				
Equivalent Volumetric Displacement:		736.72888 m ³				
Center of Buoyancy (CoB) Position:	X:	0.64112 m	Y:	-2.3292e-4 m	Z:	-0.69655 m
Out of Balance Forces/Weight:	FX:	-4.1508e-9	FY:	-3.4863e-9	FZ:	4.0511e-7
Out of Balance Moments/Weight:	MX:	4.3781e-8 m	MY:	1.5123e-6 m	MZ:	4.1539e-8 m
Cut Water Plane Properties						
Cut Water Plane Area:		557.64423 m ²				
Center of Floatation:	X:	-0.6246693 m	Y:	8.7885e-5 m		
Principal 2nd Moments of Area:	X:	4573.1533 m ⁴	Y:	141235.67 m ⁴		
Angle between Principal X Axis and Global X Axis:		4.7002e-7°				
Small Angle Stability Parameters						
		<i>with respect to Principal Axes</i>				
CoG to CoB (BG):		2.29655 m				
Metacentric Heights (GMX/GMY):		3.910826 m		189.40988 m		
CoB to Metacentre (BMX/BMY):		6.207376 m		191.70644 m		
Restoring Moments (MX/MY):		505473.16 N.m/°		24481170 N.m/°		

Figura 38: Resultados dos dados hidrostáticos.

Fonte: Autor, 2021.

3.1 Análise dos resultados dos campos de pressões

As ondas lineares são ondas geradas no meio fluido ou na interface entre a água e o ar, tendo como força de restauração principal a gravidade. Na teoria linear, essas ondas se propagam sem transporte de massa, entretanto, transferindo energia. O módulo do AQWA (pressure and motion) calcula a

variação de pressão na embarcação 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, de acordo com o calado, oscilando com a forma da onda para os resultados máximos e mínimos de pressões (ANSYS, 2015f).

O módulo Pressure and motions possibilita a visualização do deslocamento do navio para diferentes ângulos de incidência de onda, frequências e amplitudes gerados a partir do AQWA, uma vez que uma solução hidrodinâmica foi realizada. Para gerar o campo de pressões é necessário que a opção Generate Wave grid pressure tenha sido definida como Sim (antes da solução ser executada).

A opção Frequency and Direction permite seleccionar os diferentes valores de frequências e direções da onda. A amplitude de onda incidente pode ser modificada para fornecer os resultados. A Figura 39, 40 e 41 mostra a variação destas pressões para diferentes frequências e ângulos de incidência quando fixado a amplitude de onda. Cabendo ressaltar que todas as direções da onda foram calculadas em relação ao centro de gravidade da embarcação na altura da linha da água (ANSYS, 2015d).

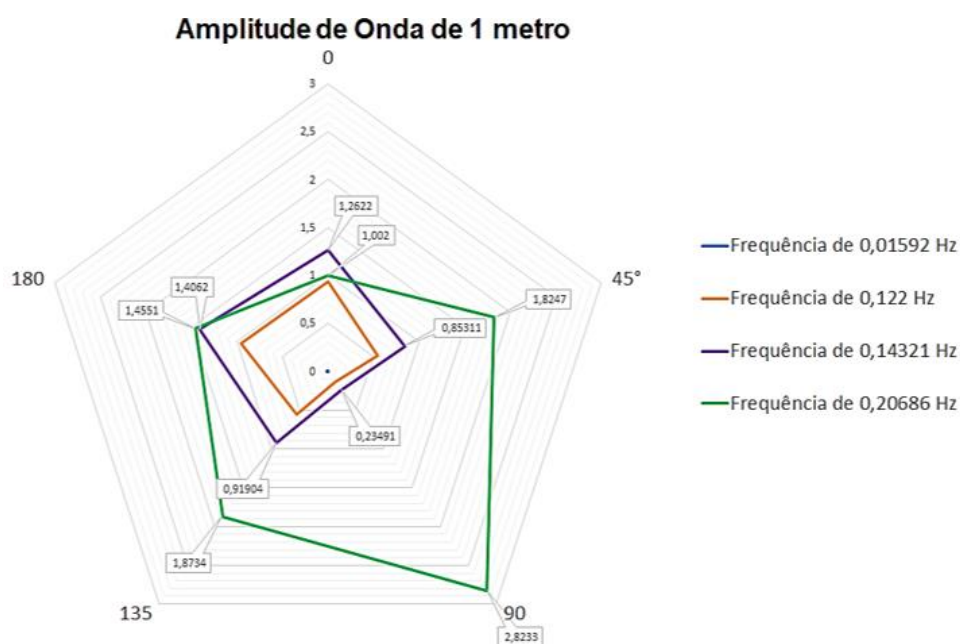


Figura 39: Pressão máxima atingida pela incidência da onda no navio para diferentes frequências em uma amplitude de onda de 1 metro.

Fonte: Autor, 2021.

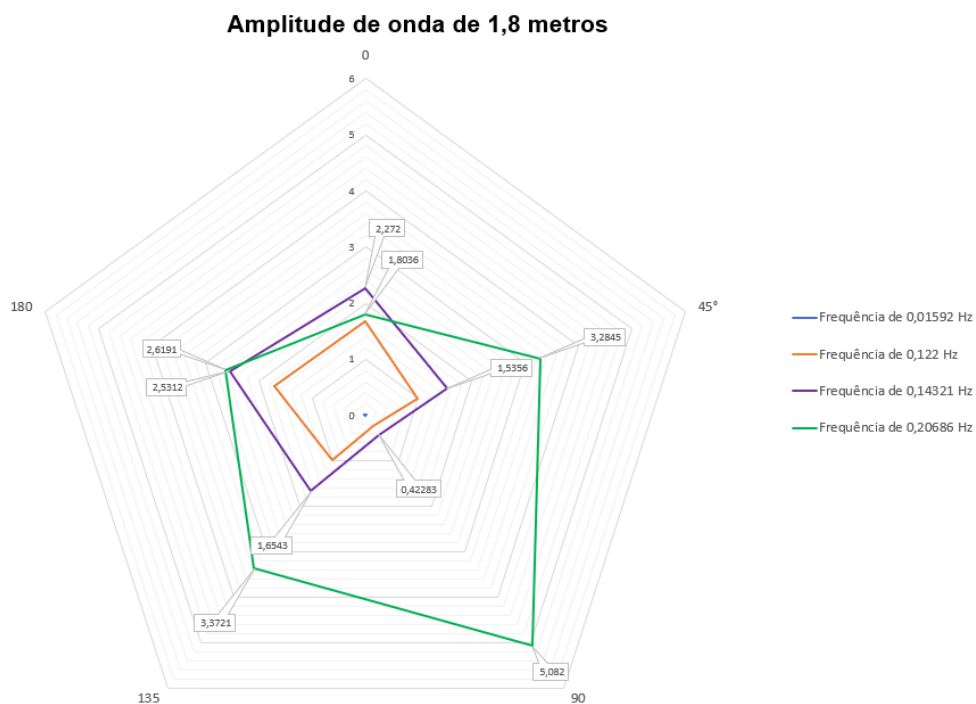


Figura 40: Pressão máxima atingida pela incidência da onda no navio para diferentes frequências em uma amplitude de onda de 1,8 metro.

Fonte: Autor, 2021.

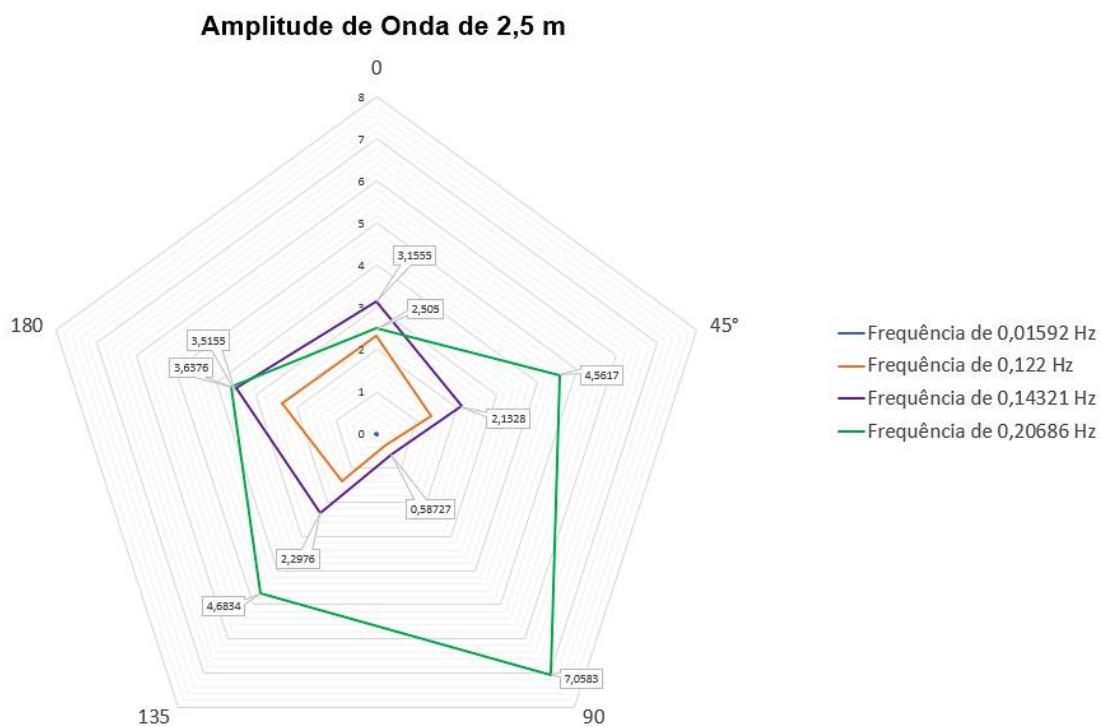


Figura 41: Pressão máxima atingida pela incidência da onda no navio para diferentes frequências em uma amplitude de onda de 2,5 metro.

Fonte: Autor, 2021.

Os resultados obtidos para a condição leve, com frequência da embarcação com o calado de 1,6 m, sofrendo a incidência de ondas com frequência de ondas de 0,001592 Hz, a embarcação apresentou pressões baixas que não tiveram grande variação com o ângulo de incidência e aumento da amplitude de vibração da onda. No intervalo de frequência entre 0,01592 Hz até 0,122 Hz supõem-se que a embarcação estará em condições de navegabilidade. Pois para a frequência de 0,122 Hz na direção incidência de zero graus para a amplitude de 2,5 metros as ondas passarão do convés trazendo risco a navegação, isso deve ao pequeno pontal da unidade flutuante. A Figura 42 mostra este momento, devendo-se realizar um teste de estabilidade da embarcação nesta condição a partir de uma análise no domínio do tempo.

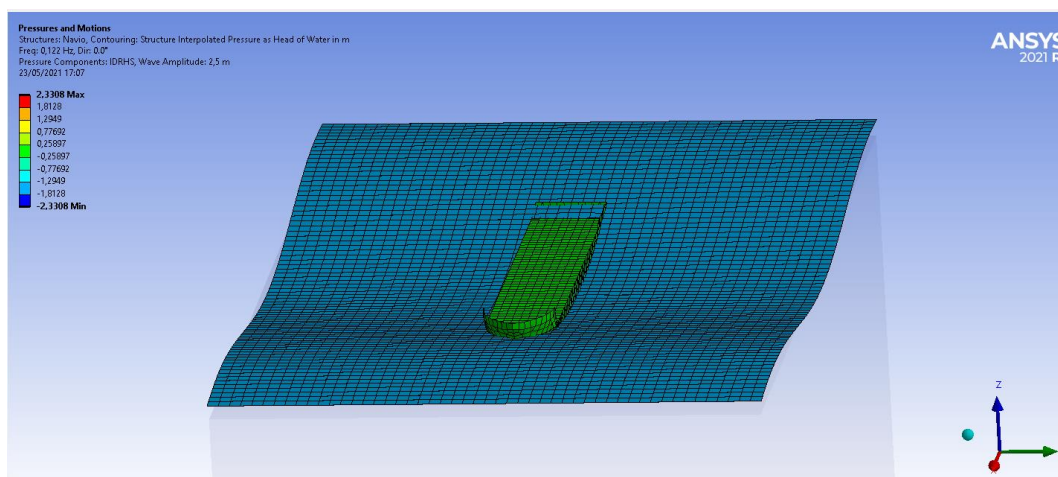


Figura 42: Entrada de água no convés na direção de 0° e amplitude de onda de 2,5 metro.

Fonte: Autor, 2021.

Com o aumento de frequência para 0,14321 Hz notou-se uma piora nas condições de navegabilidade e no aumento de pressão incidente no casco do navio com a entrada de maior quantidade de água para o convés quando comparado a simulação anterior, quando a onda se movimentava de popa para proa com a direção de zero graus. Nesta direção a onda atingiu a pressão máxima (ANSYS, 2015d).

Para esta frequência notou-se também um aumento do balanço para um ângulo de incidência de ondas em 90°, embora no gráfico fique nítido que para

este ângulo a pressão foi menor, notou-se que a unidade flutuante se mostrou mais sensível a grandes oscilações.

As oscilações se agravaram para as frequências de 0,20686 Hz onde para todas as direções e amplitudes houve a entrada de água no convés. Ocorrendo o possível adernamento da embarcação quando a onda incide com um ângulo de 90°. Um estudo maior sobre as condições de estabilidade no domínio do tempo deve ser feito de modo a verificar as condições de flutuabilidade nesta frequência (TAYLOR, 1996).

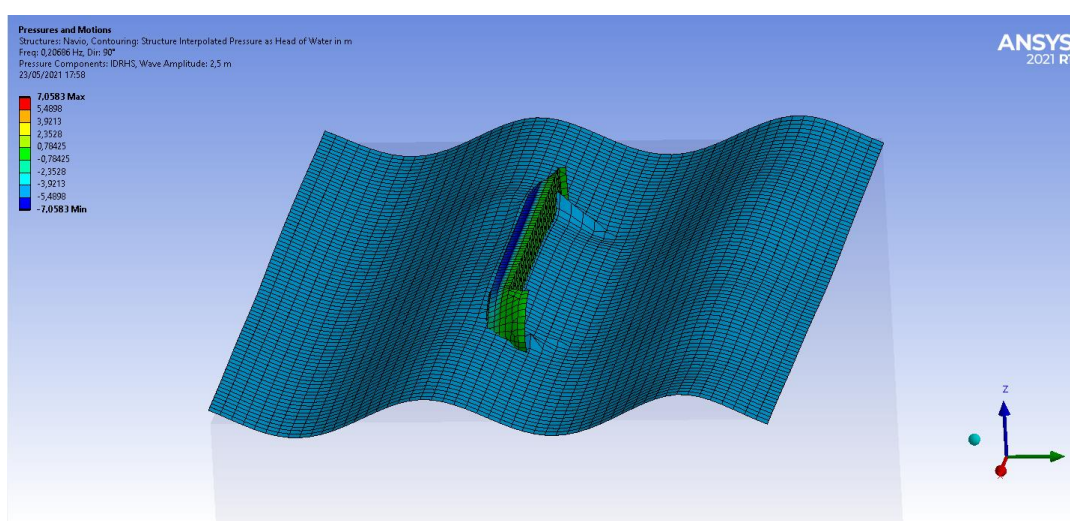


Figura 43: Possível adernamento da embarcação para a frequência de 0,20686 Hz.

Fonte: Autor, 2021.

3.2 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) (TAYLOR, 1996).

O RAO é um gráfico que mostra para cada frequência de excitação o quanto um corpo se movimenta em determinado grau de liberdade tomados em seu centro de gravidade, para uma onda senoidal de amplitude unitária como função do período de onda e sua direção (TAYLOR, 1996). O uso dos RAO está embasado em se considerar a teoria linear das ondas, em que a superfície do mar pode ser modelada como uma superposição de senos e cossenos (Série de

Fourier). Este nome alternativo acontece em resposta a uma função que descreve a transferência de quantidade de movimento entre a onda e o corpo, podendo se tratar com uma identidade hidrodinâmica entre onda e o corpo.

O RAO é adimensionalizada pela onda, para uma determinada frequência para o deslocamento do corpo (m/m), indica que para cada metro de onda incidente sobre o corpo, quantos metros o corpo irá se deslocar. O RAO, representa uma função transferência de um sistema linear que só tem sentido se assumir que os movimentos da unidade são lineares, portanto, proporcionais à altura da onda, e que o princípio da superposição funciona (TAYLOR, 1996).

Um navio no mar se move em seis graus de liberdade: Surge, Sway, heave, roll, pitch e yaw. Os três primeiros são movimentos lineares. Heave é o movimento linear ao longo do eixo Z vertical, Sway é o movimento ao longo do eixo Y transversal, e surge é o movimento ao longo do eixo X longitudinal. Roll é uma rotação em torno de um eixo longitudinal, pitch é uma rotação em torno do eixo transversal e yaw é uma rotação ao redor do eixo vertical. Podendo ser obtido RAO sob qualquer ponto de uma unidade flutuante, bastando para isso combinar apropriadamente os 6 RAO originais que são tomados no centro de gravidade da embarcação (RAWSON E TUPPER, 2001).

Na fase de projeto de uma embarcação as análises dos RAO são realizadas para a obtenção de melhores parâmetros de estabilidade e resposta com o objetivo de se chegar a um projeto ótimo e a RAO melhores. Como, por exemplo, as acelerações impostas à embarcação visando o bem-estar dos viajantes.

Foram plotados os gráficos de RAOs (Deslocamento versus Período) nas Figuras 45 a 50, para diversos ângulos de ondas incidentes quando fixados cada um dos seis graus de liberdade.

3.2 RAO para Surge

A Figura 44 exhibe o comportamento do RAO para o Surge em diferentes ângulos de incidência. Fica Nítido que para todos os ângulos as curvas

apresentaram o mesmo comportamento, porém, no entanto os valores máximos de RAO ocorrem quando a onda incide com direção paralela a embarcação, com curvas praticamente idênticas, com o movimento de onda proa-polpa e polpa-proa, com ângulos de incidência de 0° a 180° . Também se percebe que este RAO cresce com o aumento do período, chegando a atingir o valor de 2,2889 metros, Valor máximo de deslocamento (RAWSON E TUPPER, 2001).

Este comportamento está coerente com o descrito na simulação da movimentação do navio, onde para estes valores ocorreu a entrada de água para o convés.

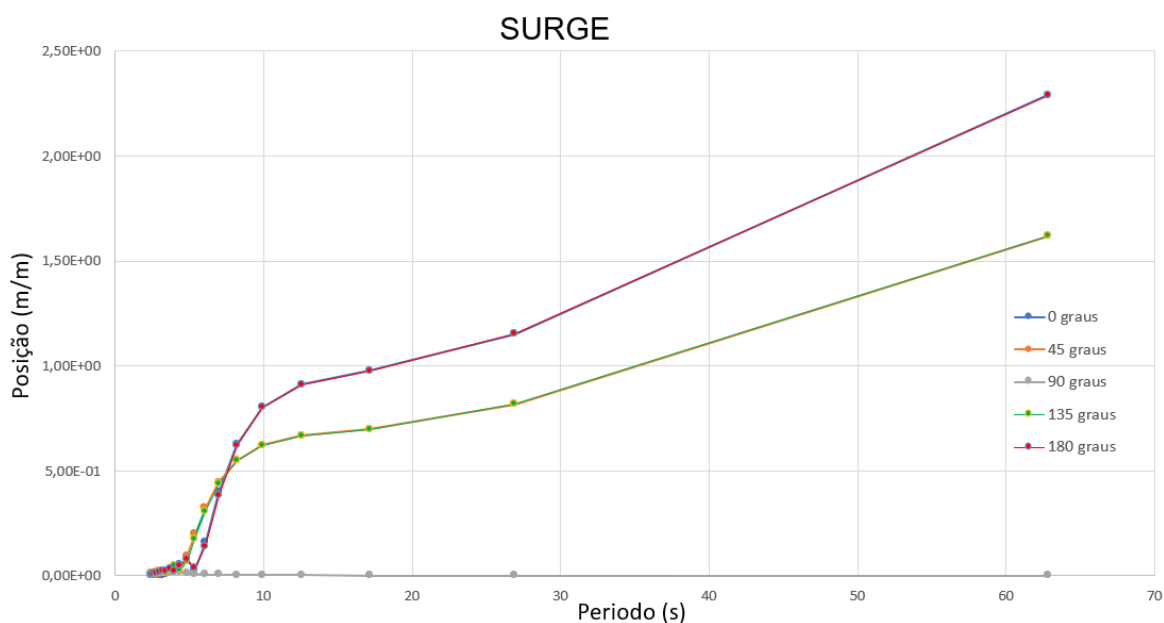


Figura 44: Operador de Amplitude e Resposta do deslocamento da estrutura ao longo do eixo longitudinal.

Fonte: Autor, 2021.

3.3 RAO para SWAY

O movimento de Sway impacta mais a navegabilidade do que a estabilidade da embarcação. A Figura 45 mostra o gráfico do Sway para os ângulos de incidência de onda estudado. A embarcação possui valores mínimos de deslocamento quando a onda incide de forma perpendicular ao eixo y, e obtendo valor máximo quando paralelo a este eixo, com um ângulo de 90° . Assim como o Surge, nota-se que os maiores valores de deslocamentos ocorreram na

frequência mais baixa, de 0,01592 Hz. Deste modo, paravelmente esta frequência de onda esteja próximo da frequência natural de oscilação (FONSECA, 2002).

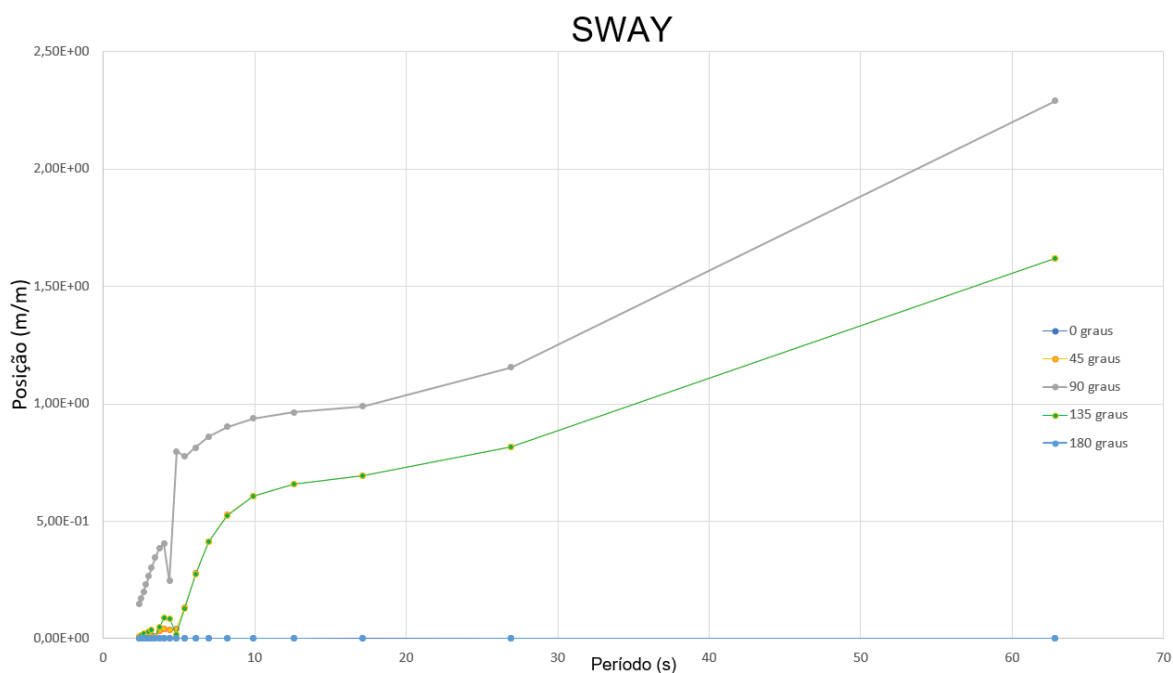


Figura 45: Operador de Amplitude e Resposta do deslocamento da estrutura ao longo do eixo transversal.

Fonte: Autor, 2021.

3.4 Heave

O heave, Figura 46, apresentou o mesmo comportamento em todas as direções, indicando rápida resposta aos efeitos de onda. Também foi possível perceber que para nenhum caso foi ultrapassado o valor de (1 m/m). Para uma onda incidente com o ângulo de 90° percebe-se uma amplificação mais rápida em períodos mais curtos, porém todos atingiram a convergência em maiores períodos (FONSECA, 2002).

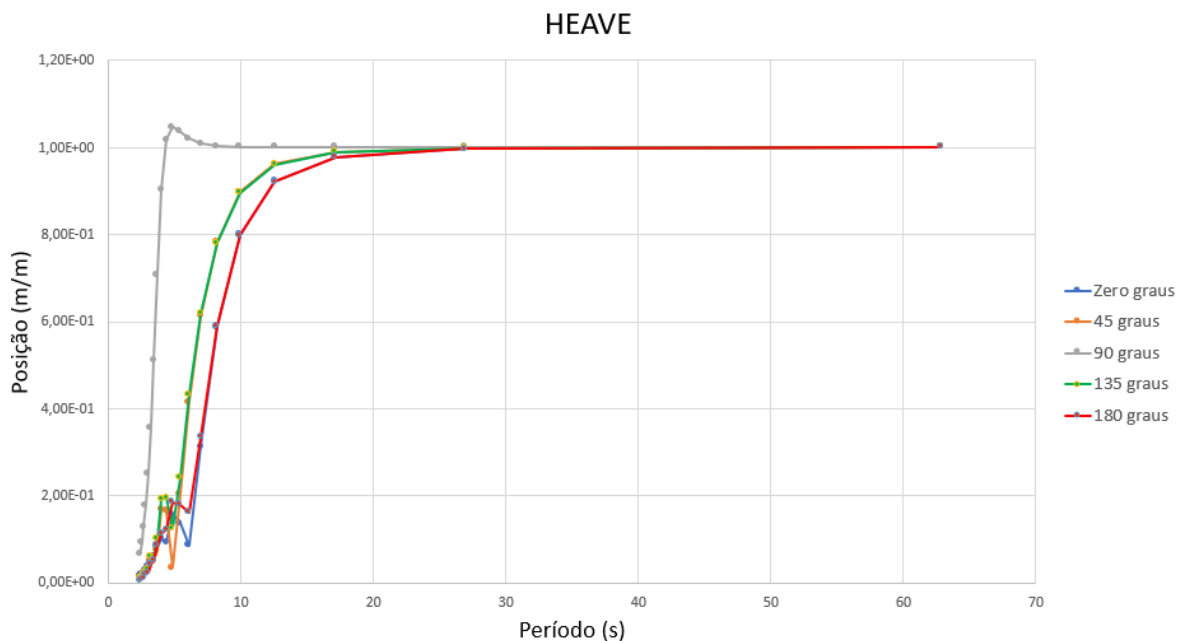


Figura 46: Operador de Amplitude e Resposta do deslocamento da estrutura ao longo do eixo vertical.

Fonte: Autor, 2021.

3.5 Roll

O gráfico de Roll, Figura 47, foi o que apresentou um pico mais expressivo, atingindo um pico de $40,723^\circ/\text{m}$ para um período de onda de 4,384 segundos com a direção de 90° . Como resultado de estabilidade do navio, qualquer resultado que seja inferior $2^\circ/\text{m}$ para uma onda com comprimento de 1 metro não é muito alto. Normalmente estabelece-se que o ângulo de inclinação da estrutura teria de ser maior que 15° para esta instabilizar. Mas na prática, esse valor é inferior dado que no caso de uma onda passar por cima do conjunto flutuador-âncora, o peso da água induziria nele uma força que o poderia instabilizar. Um estudo maior sobre as condições de estabilidade da embarcação empregando uma onda unitária na frequência de 0,2288 Hz nesta direção deve ser realizado a fim de constatar o possível adernamento da unidade flutuante nesta configuração (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

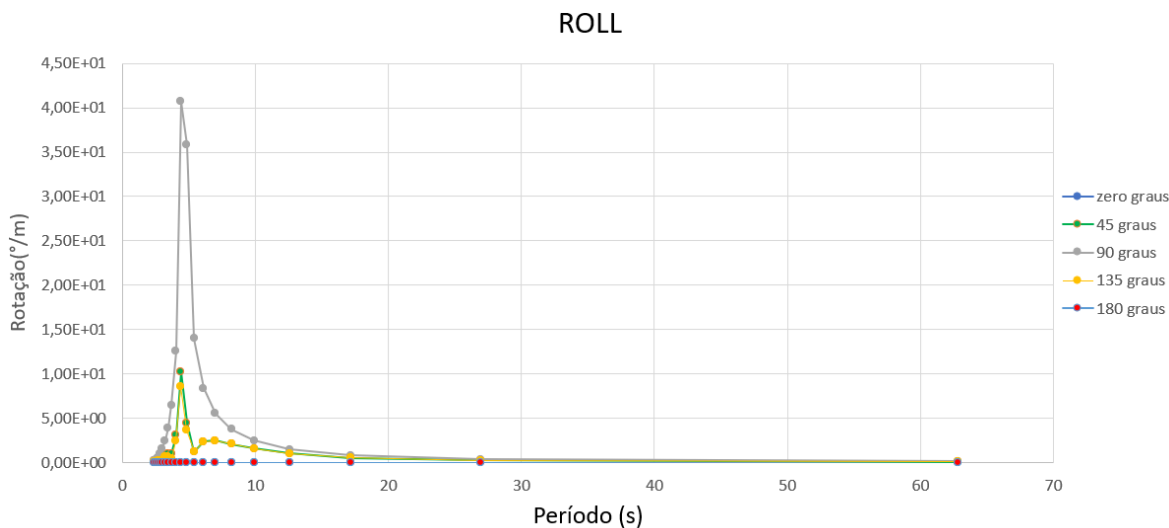


Figura 47: Operador de Amplitude e Resposta da rotação da estrutura ao longo do eixo longitudinal.

Fonte: Autor, 2021.

3.6 PITCH

O gráfico de Pitch, Figura 48, apresentou um pico com amplitude similar para todas as direções com exceção de 90° no intervalo entre 4 a 10 segundos ultrapassando pouco o valor recomendável de 2°/m. Uma vez que o ângulo é diretamente proporcional a amplitude da onda, a embarcação deve evitar ondas maiores que 1 metro (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

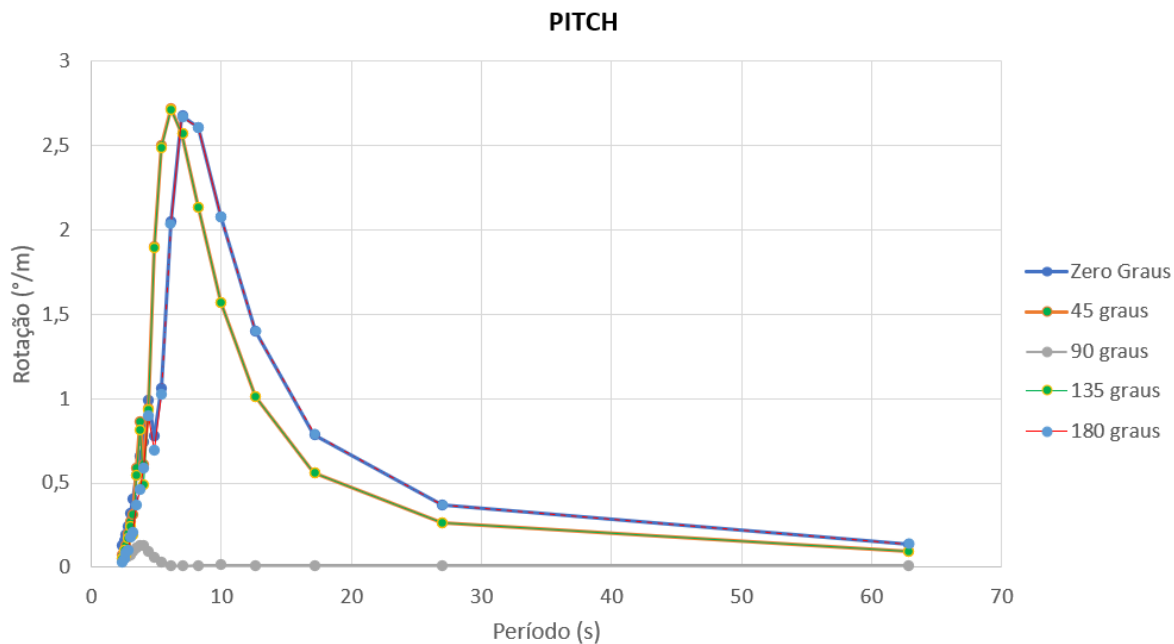


Figura 48: Operador de Amplitude e Resposta da rotação da estrutura ao longo do eixo transversal.

Fonte: Autor, 2021.

3.7 YAW

O YAW na Figura 49 foi o que apresentou menores ângulos de rotação. Apresentando um pico no mesmo intervalo de frequência que o Roll e o Pitch. Uma das formas de contornar a instabilidade da embarcação durante a navegação seria aumentar a velocidade da estrutura durante a etapa de navegação, contudo um aumento de velocidade vem acompanhado de um crescimento das forças hidrodinâmicas (HAYASHI E TACHIBANA, 1994).

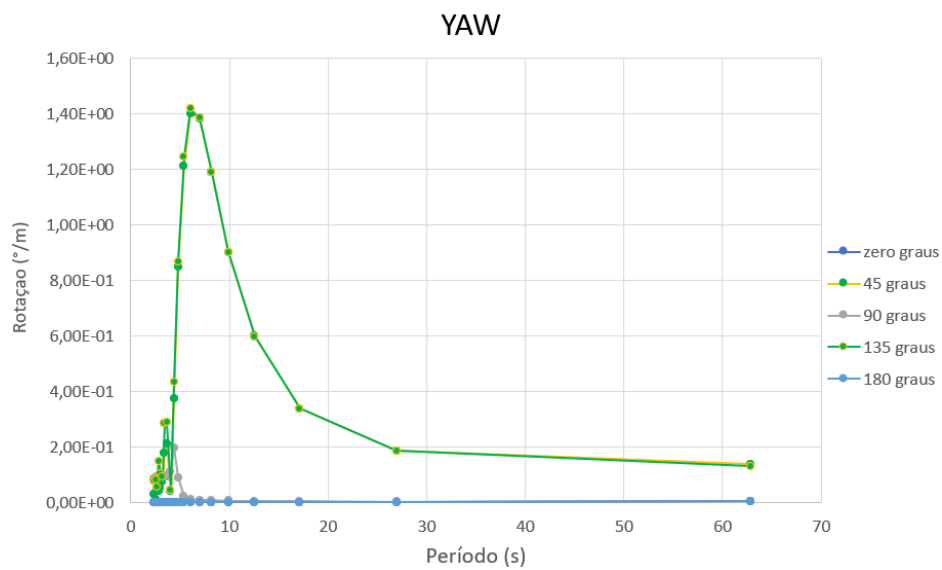


Figura 49: Operador de Amplitude e Resposta da rotação da estrutura ao longo do eixo vertical

Fonte: Autor, 2021.

4 CONCLUSÕES

- Este trabalho apresentou uma simulação do comportamento da unidade flutuante quando sujeita a diferentes configurações de ondas:
- As pressões incidentes sobre o casco da embarcação não foram significativas, no entanto pode-se perceber que o aumento das frequências e amplitudes da onda promoveram um maior deslocamento de resposta da unidade flutuante.
- Para a frequência de 0,122 Hz na direção incidência de zero graus para a amplitude de 2,5 metros as ondas passarão do convés trazendo risco a navegação, não sendo recomendado que o navio trabalhe com frequências superiores a este valor.
- Levando-se em consideração as observações do RAO para os eixos de deslocamento e rotação, pode-se concluir que as frequências menores são mais interessantes pois, embora para os deslocamentos Surge, Sway e Heave ultrapassem o valor de 1,00 m/m, logo em seguida se mantém constantes. Enquanto para frequências maiores a unidade flutuante atinge ângulos muito altos, podendo chegar ao adernamento do navio.
- O gráfico de Roll apresentou um pico muito expressivo, de 40,723°/m para um período de onda de 4,384 segundos com a direção de 90°, essa inclinação ultrapassa o valor máximo recomendável de 15°, deste modo deverá ser realizado um estudo sobre a estabilidade da embarcação a fim de checar o comportamento da unidade flutuante neste intervalo de frequência.

4.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Realizar uma análise do comportamento do fluido quando submetido a uma força de arrasto;
- Verificar a influência da utilização de turrente e sistema de fixação na estabilidade da embarcação;

- Simular a análise da estabilidade da embarcação no domínio do tempo para uma embarcação quando submetido a uma frequência alta.

5. REFERÊNCIAS:

ANSYS (2015d). **AQWA Theory Manual**, Release 16.0, Pennsylvania, USA.

ANSYS (2015f). **AQWA User Manual**, Release 16.0, Pennsylvania, USA.

ANSYS (2015g). **AQWA Workbench User's Guide**, Release 16.0, Pennsylvania, USA.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

HAYASHI, Y.; TACHIBANA, k. **Analysis of Spherical Carbon Particle Growth in Methane Plasma by Mie-Scattering Ellipsometry**. Japanese journal of applied physics, Volume 33, 7R, Japan, July, 1994.

RAWSON, K.J.; TUPPER, E.C. **Basic ship theory: Hydrostatics and strength**. Fifty edition. volume 1. Oxford: Butterworth Heinemann, 2001, 266p.

TAYLOR, D. A. **Introduction to Marine Engineering. Second edition**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996, 388p.

CAPÍTULO III: REFERÊNCIAS.

ANDRÉ, R. A. A. (2010). **Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, FEUP, Porto.

ANSYS (2015a). **AQWA Design Modeler User's Guide**, Release 16.0, Pennsylvania, USA.

ANSYS (2015b). **AQWA Hydrodynamic Diffraction, Introduction** to ANSYS AQWA, ANSYS Tutorial, Pennsylvania, USA.

BRAGA, G.M.G.O. **Desenvolvimento de tecnologia para produção de energia a partir do movimento de plataformas flutuantes offshore multifuncionais**. 2016. 122p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

CHAKRABARTI, S. K. (1987). **Hydrodynamics of Offshore Structures**. Computational Mechanics Publications, WIT Press (printed 2001), Southampton, UK. ISBN:0-905451-66-X.

CUMMINS, W. E. (1962). **The impulse response function and ship motions**. Schiffstechnik, 9:47, pp.101- 109.

GOMES, F. V. (2014b). **Agitação Marítima Irregular 1**. Apontamentos de Trabalhos Marítimos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto.

GOMES, F. V. (2014c). **Agitação Marítima Irregular 2**. Apontamentos de Trabalhos Marítimos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto.

HAYASHI, Y.; TACHIBANA, k. **Analysis of Spherical Carbon Particle Growth in Methane Plasma** by Mie-Scattering Ellipsometry. Japanese journal of applied physics, Volume 33, 7R, Japan, July, 1994.

IBINABO, I.; TAMUNODUKOBIPI, D.T. **Scientific Research Publishing**. In: **Determination of the response amplitude operator(s) of an fpso**. **Port Harcourt**, Nigeria, September of 2019. Internet. Disponível em: <<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=94920>>. Acesso em: 16 Jun. 2021.

PERDIGÃO D.R. **Avaliação Numérica do Comportamento do Dispositivo CECO – Conversor da Energia Cinética das Ondas**. 2015. 129p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.

SANTOS, P. J. R (2010b). **Análise da Interação de Navios com Dispositivos de Acostagem e Amarração**. Estudo em Modelo Físico do Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões, Volume 2, Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto.

SANTOS, P. J. R. (2010a). **Análise da Interação de Navios com Dispositivos de Acostagem e Amarração**. Estudo em Modelo Físico do Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões, Volume 1, Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto.