

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABRÍZIO FIGUEIREDO VELLA

ESTUDO TEÓRICO E NUMÉRICO DA AÇÃO DE ONDAS SOBRE PILARES
CILÍNDRICOS

PONTAL DO PARANÁ

2019

FABRÍZIO FIGUEIREDO VELLA

ESTUDO TEÓRICO E NUMÉRICO DA AÇÃO DE ONDAS SOBRE PILARES
CILÍNDRICOS

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, do Campus Pontal do Paraná - Centro de Estudos do Mar, da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^ª Dra. Eng. Roberta Brondani Minussi

PONTAL DO PARANÁ

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE:
UFPR / SiBi - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar
Fernanda Pigozzi- CRB-9/1151

V438e Vella, Fabrício Figueiredo
Estudo teórico e numérico da ação de ondas sobre pilares cilíndricos. / Fabrício Figueiredo Vella. – Pontal do Paraná, 2019.
76 f.: il., 29 cm.

Orientadora: Prof^a. Dra. Roberta Brondani Minussi.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro de Estudos do Mar, Setor Reitoria, Universidade Federal do Paraná.

1. Engenharia Civil – estrutura. 2. Ondas oceânicas. I. Título. II. Minussi, Roberta Brondani. III. Universidade Federal do Paraná.

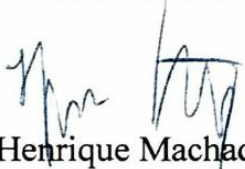
CDD 624.1

TERMO DE APROVAÇÃO

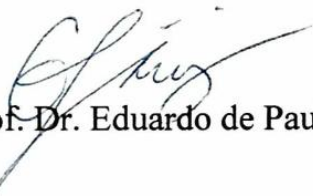
Fabrizio Figueiredo Vella

“ESTUDO TEÓRICO E NUMÉRICO DA AÇÃO DE ONDAS SOBRE PILARES CILÍNDRICOS”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:



Prof. Dr. Henrique Machado Kroetz - CEM/UFPR



Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus



Profa. Dra. Enga. Roberta Brondani Minussi - CEM/UFPR
Presidente

Pontal do Paraná, 11 de Dezembro de 2019.

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

“É preciso sonhar, mas com a condição de crer em nosso sonho, de observar com atenção a vida real, de confrontar a observação com nosso sonho, de realizar escrupulosamente nossas fantasias.”
(Vladimir Lenin)

RESUMO

Este trabalho dedica-se à análise das ações de ondas oceânicas em pilares cilíndricos, de forma quantitativa e qualitativa. A metodologia empregada baseia-se conceitualmente em dispor um pilar dentro de um tanque de ondas, submetendo-o a interação com fluxo oscilatório. Este modelo conceitual foi implementado em simulações numéricas através do método *Volume of fluid* (VOF) para o rastreamento da interface em meio bifásico (água - ar) através do *software Fluent*. Foram executadas quatro simulações em três cenários com ondas de diferentes características, atribuindo parâmetros distintos entre as simulações. Os resultados foram analisados segundo as forças horizontais, forças verticais, momentos fletores e momentos torsores, além de verificar a geração de vórtices ao redor do pilar. Com essa análise observou-se o comportamento das forças em diferentes direções e sua distribuição sobre o pilar. O modelo utilizado nas simulações foi validado com base em dois trabalhos existentes na literatura. Devido à não linearidade apresentada entre a onda e as ações no pilar, conclui-se que os efeitos da onda sobre a estrutura estão nas combinações de diferentes características desta, bem como a inter-relação entre o pilar e a onda. A validação demonstrou que o modelo implementado é satisfatório na obtenção das ações, contudo cabe aperfeiçoar o modelo de propagação de ondas.

Palavras-chaves: CFD, interação onda-estrutura, ondas oceânicas.

ABSTRACT

The present study refers to analysis of actions of ocean waves on cylindrical pillars, quantitatively and qualitatively, with computational tools and simulations. The methodology used is based conceptually on setting a pillar within a wave tank, submitting it to interaction with oscillatory flow. This conceptual model was implemented in numerical simulations through Volume of fluid (VOF) methodology to tracking the interface in biphasic medium (water-air). The software used was the Fluent. Were executed four simulations in three scenarios with waves of different characteristics, attributing distinctive results between the simulations. The results were analyzed according to horizontal forces, vertical forces, bending moments and torsional moments, besides verify the generation of vortices around the pillar. With this analysis it was observed the forces behavior in different directions and their distribution over the pillar. The model used in the simulations was validated based on two existing studies in the literature. Due to the nonlinearity presented between the wave and the actions over the pillar, concluded that the effects of the wave on the structure are in the combination of different wave characteristics, as well as the interrelationship between the pillar and the wave. The validation demonstrated that the implemented model is satisfactory in obtaining the actions, however it is necessary to improve the wave propagation model.

Key-words: CFD, wave-structure interaction, ocean waves.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ESPECTRO DE DENSIDADE DE ENERGIA DOS DIFERENTES TIPOS DE ONDAS	18
FIGURA 2 – CARACTERÍSTICAS DE UMA ONDA REGULAR	19
FIGURA 3 – INTERFERÊNCIA CONSTRUTIVA E DESTRUTIVA	20
FIGURA 4 – CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO E PROFUNDIDADE	21
FIGURA 5 – RELAÇÕES PARA TEORIAS DAS ONDAS	25
FIGURA 6 – ONDAS IRREGULARES	27
FIGURA 7 – CORRENTE VERTICAL INDUZIDA PELA INTERAÇÃO ENTRE ONDA E ESTRUTURA E A GERAÇÃO DO <i>HORSESHOE VORTEX</i>	28
FIGURA 8 – VÓRTICES PRESENTES EM UM PILAR CILÍNDRICO	29
FIGURA 9 – ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE	31
FIGURA 10 – RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE/ACELERAÇÃO E PREDOMINÂNCIA DE FORÇAS	32
FIGURA 11 – VARIAÇÃO NA DIREÇÃO DAS FORÇAS	34
FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO SOBRE UM PILAR CILÍNDRICO	35
FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS TRANSVERSAIS COM $Re < 1,2 \times 10^4$	36
FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS TRANSVERSAIS COM $Re > 1,2 \times 10^4$	36
FIGURA 15 – TIPOS DE MALHAS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE VOLUMES FINITOS	38
FIGURA 16 – DISTRIBUIÇÃO DAS FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DO FLUIDO B	40
FIGURA 17 – MÉTODO IWG DE ABSORÇÃO DE ONDAS	41
FIGURA 18 – MÉTODO RZ DE ABSORÇÃO DE ONDAS	42
FIGURA 19 – PARÂMETROS DA ONDA	43
FIGURA 20 – MODELOS DOMÍNIO 1 E 2	47
FIGURA 21 – RELAÇÃO KC E D/λ	49
FIGURA 22 – FORÇAS TOTAIS EM x	55
FIGURA 23 – FORÇAS TOTAIS EM z	57
FIGURA 24 – FORÇAS TOTAIS EM y	59
FIGURA 25 – MOMENTO EM x	61
FIGURA 26 – MOMENTO EM y	63
FIGURA 27 – MOMENTO EM z	65
FIGURA 28 – ONDA SIMULAÇÃO 1 E 2	66
FIGURA 29 – ONDA SIMULAÇÃO 3 E 4	67

FIGURA 30 – VELOCIDADE SUPERFICIAL SIMULAÇÃO 1 E 2	68
FIGURA 31 – VELOCIDADE SUPERFICIAL SIMULAÇÃO 3 E 4	68
FIGURA 32 – VORTICIDADE SOBRE O PILAR - SIMULAÇÃO 1 E 2	69
FIGURA 33 – VORTICIDADE SOBRE O PILAR - SIMULAÇÃO 3 E 4	69
FIGURA 34 – FORÇA EM x (SIMULAÇÃO DE VALIDAÇÃO)	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DOMÍNIOS PARA SIMULAÇÕES	47
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS PARA SIMULAÇÕES	48
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DOS PILARES	50
TABELA 4 – INFORMAÇÕES DAS MALHAS	50
TABELA 5 – SIMULAÇÕES IMPLEMENTADAS	51
TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS	52
TABELA 7 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DAS FORÇAS EM x E CENTROS DE PRESSÃO	56
TABELA 8 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DAS FORÇAS EM z E CENTROS DE PRESSÃO	58
TABELA 9 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DAS FORÇAS EM y	60
TABELA 10 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DOS MOMENTOS EM x	62
TABELA 11 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DOS MOMENTOS EM y	64
TABELA 12 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DOS MOMENTOS EM z	66
TABELA 13 – PARÂMETRO DA ONDA UTILIZADO PARA VALIDAÇÃO	70

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

CFD Computational Fluid Dynamics

IWG Internal Wave Generator

RZ Relaxation Zone

SST Shear-Stress Transport

SWENSE Spectral Wave Explicit Navier-Stokes Equations

VC Volume de Controle

VOF Volume of Fluid

LISTA DE SÍMBOLOS

h	altura do pilar (m)
D	diâmetro do pilar (m)
T	período da onda (s)
H	altura da onda (m)
A	amplitude da onda (m)
λ	comprimento da onda (m)
k	número de onda (m^{-1})
f	frequência da onda (s^{-1})
η	elevação da onda (m)
c	velocidade de fase ou celeridade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
d	profundidade (m)
u	velocidade na direção x ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
v	velocidade na direção y ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
p_a	pressão atmosférica (Pa)
p	pressão (Pa)
ω	frequência angular ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
t	tempo (s)
g	aceleração da gravidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
E_{tot}	energia total ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)
E_c	energia cinemática ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)
E_p	energia potencial ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)
c_g	velocidade de grupo ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
n	número de ondas propagadas (adm)
\overline{P}_w	taxa média de transferência de energia (W/m)

$S_{\eta(v)}$	densidade de energia em função da frequência ($m^2.s$)
C_M	coeficiente de inércia (adm)
C_D	coeficiente de arrasto (adm)
f_p	força horizontal por unidade de comprimento do pilar (N/m)
f_i	força inercial (N)
f_D	força de arrasto (N)
F_L	força transversal variável no tempo (N)
F_{Lm}	força transversal máxima (N)
θ	fase da onda (rad)
C_L	coeficiente de elevação (adm)
KC	número de Keulegan-Carpenter (adm)
V	velocidade ($m.s^{-1}$)
u_m	máxima velocidade horizontal da partícula ($m.s^{-1}$)
e	rugosidade do pilar (m)
a	raio do cilindro (m)
ρ	massa específica ($kg.m^{-3}$)
ν	viscosidade cinemática ($m^2.s$)
Re	número de Reynolds (adm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	ONDAS OCEÂNICAS	17
2.1.1	Características das ondas	19
2.1.2	Fenômenos ondulatórios	19
2.1.3	Profundidade e o movimento orbital	21
2.1.4	Teoria linear das ondas	22
2.1.5	Teoria não linear das ondas	24
2.1.6	Energia das ondas	25
2.2	EFEITOS FÍSICOS PROVENIENTES DA INTERAÇÃO ONDA-PILAR	27
2.2.1	Correntes	27
2.2.2	Vórtices	28
2.3	FORÇAS NO PILAR	29
2.3.1	Força inercial	30
2.3.2	Força de arrasto	31
2.3.3	Força transversal	33
2.3.4	Direção e distribuição das forças	33
3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	37
3.1	MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	37
3.1.1	Malha	38
3.1.2	Método VOF	39
3.1.3	Modelagem de ondas oceânicas	40
3.1.4	Análise dimensional e números adimensionais importantes	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1	METODOLOGIA NUMÉRICA	46
4.1.1	Domínio	46
4.1.1.1	Modelo conceitual e geométrico	47
4.1.2	Ondas	48
4.1.3	Pilares	49
4.1.4	Malha	50

		14
4.2	<i>SETUP</i> DAS SIMULAÇÕES	51
4.2.1	Modelo bifásico	51
4.2.2	Condições de contorno	52
4.2.3	Absorção de ondas	52
4.2.4	Execução da simulação	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1	FORÇAS HORIZONTAIS	54
5.1.1	Forças em x	54
5.1.2	Forças em z	56
5.2	FORÇA VERTICAL	58
5.3	MOMENTOS	60
5.3.1	Momento em x	60
5.3.2	Momento em y	62
5.3.3	Momento em z	64
5.4	VALIDAÇÃO DO MODELO	70
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	72
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

O estudo de corpos submersos sob ação de ondas é complexo, já que envolve dois fluidos (água e ar) interagindo com uma estrutura. Pelo fato de que as equações de transporte (conservação da massa, quantidade de movimento, etc) são equações diferenciais parciais sem solução analítica, o uso de ferramentas numéricas se torna importante. Dentro destas ferramentas o método VOF (*Volume of Fluid*) é muito utilizado. Este método consiste, de maneira simplificada, na discretização das equações através de um balanço em volumes elementares (MALISKA, 2004).

Como o território brasileiro é muito vasto, sua região costeira também é e o emprego de construções submersas, ou parcialmente submersas, se torna inevitável.

Dito isto, o trabalho que se apresenta busca avaliar as ações sob um pilar cilíndrico, provenientes de uma onda em regime transiente e, a partir disso, estudar os efeitos causados. Para isto, utiliza-se o *software Fluent*®.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção mostra-se os principais apontamentos que serão abordados no trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

Propõe-se analisar as diferentes ações causadas por uma onda sobre pilar cilíndrico parcialmente submerso. Através do *software* de modelagem numérica *Fluent*.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Elaborar um modelo geométrico do conjunto pilar-onda com características a serem implementadas na simulação numérica;
- b) Determinar os esforços internos no pilar causados pela ação da onda;
- c) Comparar os resultados da modelagem numérica com resultados existentes na literatura afim de validar a metodologia.
- d) Relatar os principais fenômenos físicos inerentes à interação entre a onda e o pilar.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta proposta trata do estudo das ações sobre um pilar de seção cilíndrica, com altura h e diâmetro D parcialmente submerso em água. Neste meio, propaga-se uma onda que se choca com o pilar em um determinado instante. O choque entre a onda e o pilar promove a transferência de energia da onda para a estrutura, o que pode promover danos.

Algumas ressalvas devem ser feitas para compatibilizar a modelagem numérica e os conceitos físicos, pois a compreensão teórica dos efeitos auxiliam na simplificação do problema que, por sua vez, reduz o custo computacional para modelagem. Um destes efeitos é a vorticidade demasiada no entorno do pilar em decorrência da mudança abrupta na direção de propagação da onda, como mostra o estudo de Vieira et al. (2009). Eles analisaram a interação de um cilindro estacionário em um movimento oscilatório linear do fluido com escoamento pulsátil ascendente, e observaram a entrada de núcleos de vorticidade dentro do domínio de cálculo, sendo que esses interferem na qualidade dos resultados, criando efeitos não físicos. Para isso, utilizou-se uma função de amortecimento para reduzir as instabilidades numéricas.

Além dos cuidados numéricos, inerente a qualquer modelagem numérica, é preciso conhecer a fundo os fenômenos físicos do problema para que a modelagem seja bem realizada. A seguir, uma revisão bibliográfica sobre o tema é feita.

Estruturas costeiras estão sujeitas ao efeito de *run-up* quando em regiões que apresentam incidência de ondas. Esse efeito trata-se da elevação do nível d'água sobre uma estrutura em forma de espraiamento da água. Liu e Wan (2011) estudaram, entre outros fatores, a elevação da superfície da água em torno de um pilar, a força da onda e o campo de onda. Análogo a este trabalho, Ramirez (2012) investigou, através de modelagem numérica com simulação simplificada, o *run-up* de uma onda sobre um pilar cilíndrico e comparou com dados medidos da superfície d'água próximo à estrutura. Com isso pode-se validar o método e fazer previsões da variação da superfície da água no entorno de pilares, a partir dos parâmetros característicos das ondas de águas profundas, sendo utilizado por projetistas de plataforma.

Um dos primeiros procedimentos de cálculo para dimensionamento de um pilar sujeito a esforços de uma onda foi através de simplificações matemáticas e da utilização de parâmetros empíricos equacionado por Morison et al. (1950) pela teoria de MacCamy-Fuchs. Kamath, Bihs e Arntsen (2013) e Choi e Gudmestad (2013) desenvolveram modelos numéricos para quantificação de forças em um pilar de plataforma *offshore*. Ambos os casos foram analisados tridimensionalmente, baseando-se nas

equações de Navier-Stokes, com modelo de fluxo bifásico (ar e água) aplicando o método VOF. Em seu trabalho, Kamath, Bihs e Arntsen (2013) compararam os resultados da simulação de uma onda que se choca em um único pilar com as formulações previstas por Morison. De acordo com Kamath, Bihs e Arntsen (2013), para a determinação dos esforços basta integrar a pressão e a tensão de cisalhamento da parede ao redor da superfície do cilindro.

Posterari (2015) estudou o efeito das ondas sobre os pilares de uma plataforma *offshore*. Os pilares eram de seção quadrada e os resultados mostram que os pilares a montante sofreram efeitos superiores aqueles a jusante. Além disso, a onda que se choca com o pilar a jusante tem sua amplitude reduzida por interagir com o pilar a montante. Em sua modelagem, foram estudados casos distintos com diferentes características, com ondas de baixa, média e elevada amplitude. Foram observadas que as maiores ações sobre os pilares não estão necessariamente associadas à maior amplitude e sim à combinação dos fatores período e amplitude.

2.1 ONDAS OCEÂNICAS

Por definição, ondas são perturbações causadas em um meio e transportam energia. Quando se fala em corpos aquosos, sejam, lagos, rios, mares ou oceanos, essa perturbação ocorre principalmente devido à ação de vento. Esse surgimento se dá devido à transferência de quantidade de movimento pela fricção entre o meio atmosférico e o oceano, sendo esta sua causa principal e, em casos excepcionais, por sismos ou deslocamentos de massas. (BROWN, 1999)

A transferência de energia depende da intensidade do vento, da duração do mesmo e da pista de ação do vento, em inglês *fetch*. O conjunto dessas ações caracterizam as ondas nos seguintes aspectos: forma, frequência, energia, amplitude, comprimento e período. (GARRISON, 2012)

Munk (1951) propôs classificar as ondas em: capilares, de ultra-gravidade, de gravidade, Infra-gravidade, de longo período, de maré e maré de transição, distinguindo-as pelo período, forçante e energia por ela transportada.

As ondas capilares são de baixos comprimento e duração e alta frequência. O efeito destas ondas se torna desprezível quando se trata de propagação de energia. São influenciadas principalmente pela troca gasosa entre a atmosfera e a superfície do corpo aquoso. Sua força restauradora é a tensão superficial da água.

A transição entre as ondas capilares para as ondas de gravidade se dá através das chamadas ondas de ultra gravidade que têm como forças restauradora a tensão superficial e a gravidade. Essas ondas são geradas a partir do vento.

As ondas de gravidade tem períodos maiores que as capilares e o comprimento

varia conforme o período e profundidade. Sua força restauradora é a gravidade e, assim como as ondas capilares e as ondas de ultra gravidade, tem como força geradora o vento. Ondas com período de até 5 min, chamadas ondas de infra gravidade, fazem a transição entre as ondas de gravidade e ondas de longo período. Eles têm como forças geradoras principais o vento e a gravidade. Esse tipo de onda é controlado pelo efeito de Coriolis.

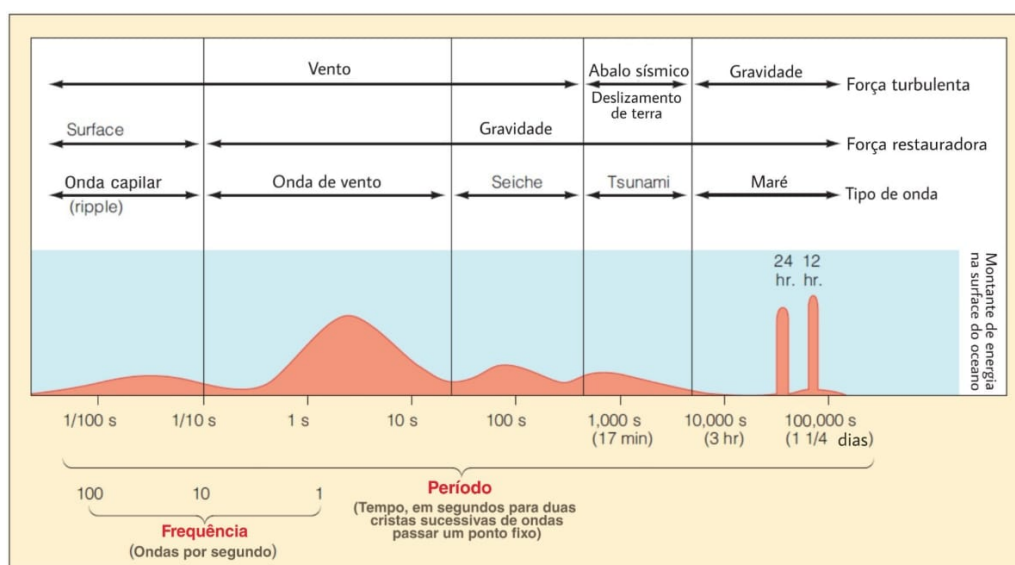
As ondas de longo período são geradas a partir de tempestades e terremotos, pois demandam grande quantidade de energia para sua formação. Exemplo importante deste tipo de onda é o *tsunami*.

As marés têm seus períodos fixos, podendo ser diurno ou semidiurno, sua força geradora se dá através da combinação harmônica dos astros sendo principalmente a atração gravitacional do sol e da lua. (GARRISON, 2012).

A FIGURA 1 ilustra o espectro de energia das ondas. Segundo o seu período podemos observar que as ondas de gravidade detêm maior quantidade de energia e a amplitude relativa da energia é indicada pela curva. Segundo Garrison (2012) pode-se desprezar a energia das ondas capilares e ultra gravidade, devido a sua pequena duração.

Torna-se importante compreender os fenômenos das ondas para determinar quais parâmetros deverão ser utilizados em projetos de estruturas expostas às ações das ondas.

FIGURA 1 – ESPECTRO DE DENSIDADE DE ENERGIA DOS DIFERENTES TIPOS DE ONDAS

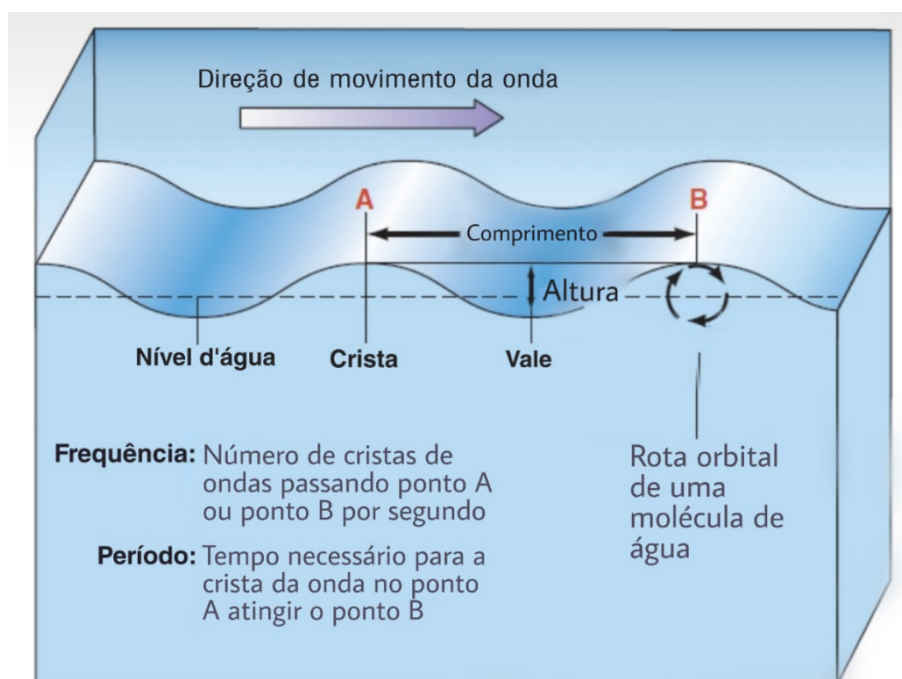


FONTE: Adaptado de Garrison (2012).

2.1.1 Características das ondas

As características de uma onda regular podem ser observadas na FIGURA 2. Nesta figura observa-se que, para um determinado período de tempo, denominado T , tem-se a crista, o cavado, a altura da onda (H), sua amplitude (A) e comprimento (λ). Dessas características, tiram-se correlações como: número de onda (k), frequência (f) e esbeltez (H/λ). Algumas outras características que estão presentes na onda são: a elevação (η) e a velocidade de fase ou celeridade (c).

FIGURA 2 – CARACTERÍSTICAS DE UMA ONDA REGULAR



FONTE: Adaptado de Garrison (2012).

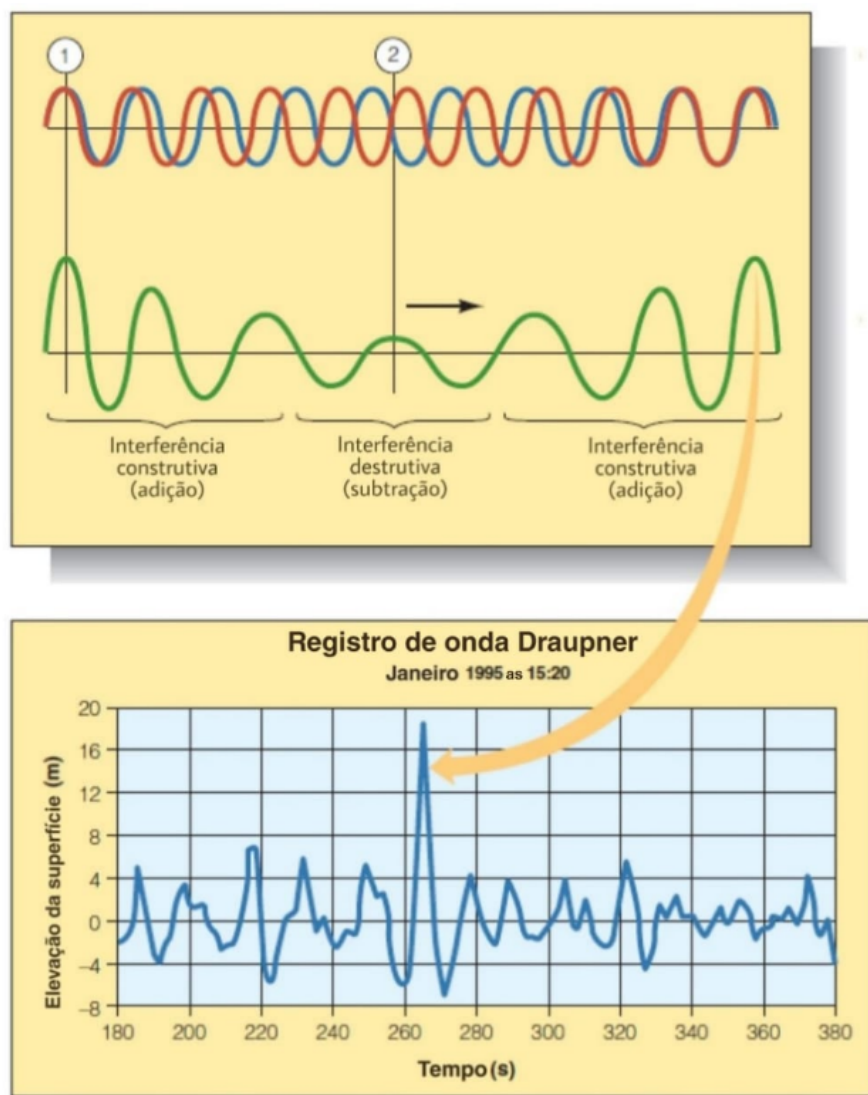
Altura da onda é a distância vertical máxima entre a crista e a cavada. Já a amplitude é a distância vertical entre o nível médio da superfície do mar e a cavada ou a crista. O comprimento da onda é a distância horizontal entre duas cristas ou duas cavadas, e a frequência é inverso do período. A esbeltez é a relação entre o comprimento e altura da onda. A velocidade de fase ou celeridade é expressa em metros por segundo sendo a velocidade de propagação da onda. (GARRISON, 2012)

2.1.2 Fenômenos ondulatórios

De acordo com Garrison (2012), quando uma onda se propaga, ela pode interferir no movimento e geometria de outras ondas diferentes. Esta interferência pode ser de natureza construtiva ou destrutiva (FIGURA 3). A interferência construtiva é

aquela em que ocorre a soma das amplitudes quando duas ou mais ondas, em mesma fase, se sobrepõem, já as interferências destrutivas são aquelas que ondas em fases diferentes se encontram.

FIGURA 3 – INTERFERÊNCIA CONSTRUTIVA E DESTRUTIVA



FONTE: Adaptado de Garrison (2012).

Outros fenômenos ondulatórios incluem: a reflexão, refração e difração. Quando uma onda incide sobre um paramento em uma determinada direção e sentido, ela será refletida nessa mesma direção com sentido oposto ou em outra direção e sentido, sem que suas características se alterem. Esse fenômeno é denominado reflexão da onda. Ondas que se propagam em meios de diferentes características estão sujeitas ao fenômeno de refração que implica na mudança de direção da onda, ao passar de um meio para outro devido suas diferentes características. Já a difração da onda é o

resultado do encontro da onda com um obstáculo, fazendo com que haja o curvamento dos raios da onda.

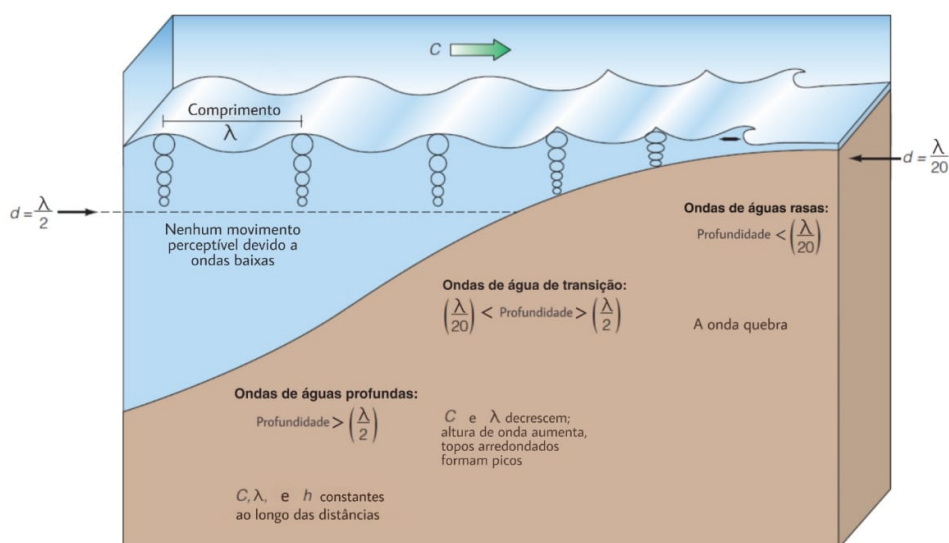
2.1.3 Profundidade e o movimento orbital

Ondas oceânicas formadas por ventos ou atração gravitacional (marés) têm características de órbitas circulares, sendo o diâmetro da trajetória da partícula igual a altura da onda. A órbita das partículas diminui conforme a redução da profundidade d em decorrência da transferência da quantidade de movimento angular ao longo das camadas. A forma da órbita e a interação com o fundo classificam as ondas em: ondas de águas profundas, ondas de águas rasas e ondas de transição.

O comprimento da onda em relação à profundidade estabelece a seguinte classificação, quando a profundidade supera $(\lambda/2)$ o comprimento da onda em 50% têm-se ondas de águas profundas e, portanto, diz-se que não há interação com o fundo e a onda conserva sua órbita circular, velocidade, amplitude e comprimento. Quando essa relação fica abaixo de $1/20$, a onda é classificada como ondas de águas rasas e, a partir dessa profundidade, a onda passa a ser influenciada pelo fundo o qual modifica sua órbita que passa a ser elíptica. Além disso, há também alteração do comprimento, amplitude e velocidade.

As ondas que ocorrem no intervalo entre $\lambda/2$ e $\lambda/20$ denominam-se ondas de transição e sofrem influência do fundo tendo sua velocidade controlada em parte pela profundidade e parte pelo comprimento. Tais ondas estão representadas na FIGURA 4.

FIGURA 4 – CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO E PROFUNDIDADE



FONTE: Adaptado de Garrison (2012).

2.1.4 Teoria linear das ondas

No século XIX George Biddell Airy propôs a hipótese de uma onda regular propagando-se em um meio homogêneo, de forma a poder aplicar simplificações e chegar no que se chama hoje de teoria linear das ondas. As hipóteses que Airy considerou foram as seguintes:

1. A amplitude do distúrbio na superfície é muito pequena se comparada ao comprimento de onda e à profundidade;
2. O fluido tem profundidade uniforme d ;
3. O fluido é não viscoso e, portanto irrotacional (sem vorticidade);
4. O fluido é incompressível e homogêneo;
5. A aceleração de Coriolis pode ser desprezada;
6. A tensão superficial pode ser desprezada;
7. O fundo é impermeável e apresenta inclinação desprezível;
8. A pressão atmosférica no nível do mar é uniforme.

A formulação considera o eixo x positivo para a direita e o eixo y positivo para baixo. O desenvolvimento das equações foi retirada de Viera (2007).

Com as hipóteses enumeradas, conclui-se que a teoria linear das ondas exclui ondas muito longas (hipótese 5); ondas muito curtas (hipótese 6) e ondas acústicas e internas (hipótese 4)

Da hipótese (4), a equação da conservação da massa pode ser escrita como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

Da hipótese (3), tem-se:

$$\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

Já o componente u da equação da quantidade de movimento e, das hipóteses 3, 4, 5, 6 e 7 tem-se que:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.3)$$

Das equações (2.1), (2.2) e (2.3) provém as soluções para a velocidade em x (u), velocidade em y (v) e a pressão local p . Considerando as seguintes condições de contorno, da hipótese (1):

$$v = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{em} \quad y = 0 \quad (2.4)$$

em que η é a posição da superfície livre.

Da hipótese (7), resulta:

$$v = 0 \quad \text{em} \quad y = d \quad (2.5)$$

e das premissas (1) e (8), resulta:

$$p = p_a \quad \text{em} \quad y = 0 \quad (2.6)$$

sendo p_a a pressão atmosférica local.

As equações (2.1), (2.2) e (2.3), sujeitas as condições de contorno (2.4), (2.5) e (2.6), definem um problema linear, de modo que uma onda harmônica simples é uma solução. Considerando a frequência angular (ω) e o tempo t , tem-se a superfície livre sendo:

$$\eta = A \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (2.7)$$

portanto

$$u = A \cdot \omega \frac{\cosh[k(d - y)]}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.8)$$

$$v = A \cdot \omega \frac{\sinh[k(d - y)]}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.9)$$

e

$$p = p_a - \rho g y + \rho g A \frac{\cosh[k(d - y)]}{\cosh(kd)} \cos(kA - \omega t) \quad (2.10)$$

e também

$$\omega^2 = gk \cdot \tanh(kd) \quad (2.11)$$

sendo g a aceleração gravitacional.

Como já definida a velocidade de fase $c = \omega/k = \lambda/T$, pode ser reescrita em função da superfície livre, resultando em:

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd) \quad (2.12)$$

Quando levada essa função aos extremos, incorre nas seguintes simplificações:

- Para águas profundas ($d/\lambda > 1/2$), a profundidade d é muito grande levando o termo $\tanh(kd) \rightarrow 1$, resultando em:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k}} \quad (2.13)$$

- Para águas rasas ($d/\lambda < 1/20$) a profundidade d é pequena demais levando o termo $\tanh(kd) \rightarrow kd$, resultando em:

$$c = \sqrt{gk} \quad (2.14)$$

2.1.5 Teoria não linear das ondas

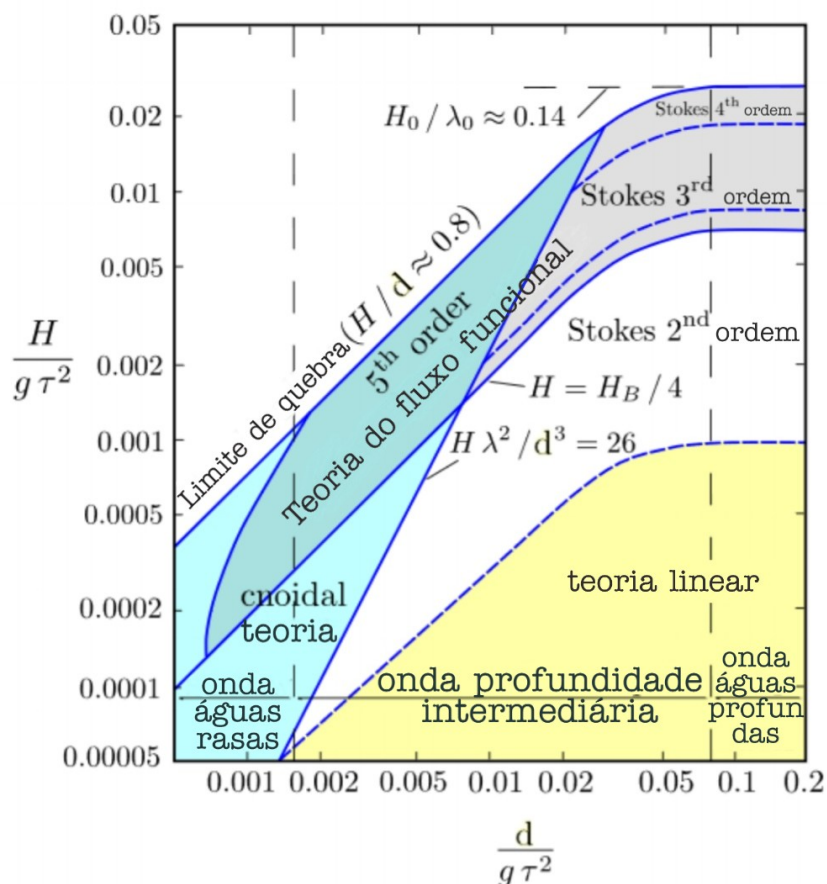
A solução para problemas de ondas regulares ou de baixa amplitude limita-se à teoria de Airy portanto, problemas com ondas de maior amplitude ou irregulares tem solução através do que se conhece por teoria de Stokes. Essa teoria utiliza séries geométricas que oferecem maior precisão para soluções não lineares das ondas.

As teorias não lineares das ondas podem ser de segunda, terceira, quarta ou quinta ordem. Embora as equações provenham da teoria linear das ondas, sua solução é aproximada através de séries de Fourier. Para determinar qual ordem é mais adequada para solução das equações, é necessário analisar as características da onda.

Soluções de problemas com a teoria não-linear das ondas requerem custo computacional maior comparado à teoria linear, devido às equações derivadas de séries poderem chegar a ter coeficientes de até 7ª ordem (SKJELBREIA; HENDRICKSON, 1960).

Para a determinação da teoria mais adequada para implementação das simulações é necessário correlacionar as características das ondas com a profundidade em que se propaga. Le Mehaute (2013) desenvolveu um método gráfico para a identificação da teoria adequada, apresentado na FIGURA 5.

FIGURA 5 – RELAÇÕES PARA TEORIAS DAS ONDAS



FONTE: Adaptado de Le Mehaute (2013).

2.1.6 Energia das ondas

Ondas oceânicas transportam energia através da oscilação das partículas d'água em movimentos orbitais. Essa energia é quantificável através da teoria linear das ondas que considera dois espectros energéticos, um encontrado em ondas regulares e o outro encontrado em ondas não regulares, sendo este último o caso mais comum para ondas do mar (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

De acordo com a teoria linear, as ondas regulares de superfície tem energia total (E_{tot}) composta em uma parcela cinemática (E_c) e uma parcela potencial (E_p)

). Essa energia é dada por unidade de área da onda (BROWN, 1999) . A média de energia ao longo de um ciclo da onda é dada por:

$$E_{tot} = E_c + E_p = \frac{1}{4}\rho g \eta^2 + \frac{1}{4}\rho g \eta^2 = \frac{1}{2}\rho g \eta^2 = \frac{1}{8}\rho g H^2 \quad (2.15)$$

De modo geral, a velocidade de propagação de ondas individuais é superior à velocidade de transporte de energia, exceto para ondas de água rasas. Em condições ideais, a energia se propaga com a chamada velocidade de grupo (c_g), obtida por:

$$c_g = c.n \quad (2.16)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\cosh 2kh} \right) \quad (2.17)$$

onde:

n é o número de ondas propagadas Por fim, a taxa média com a qual a energia é transferida (\bar{P}_w) em um ciclo é dada por:

$$\bar{P}_w = E_{tot} \cdot c_g \quad (2.18)$$

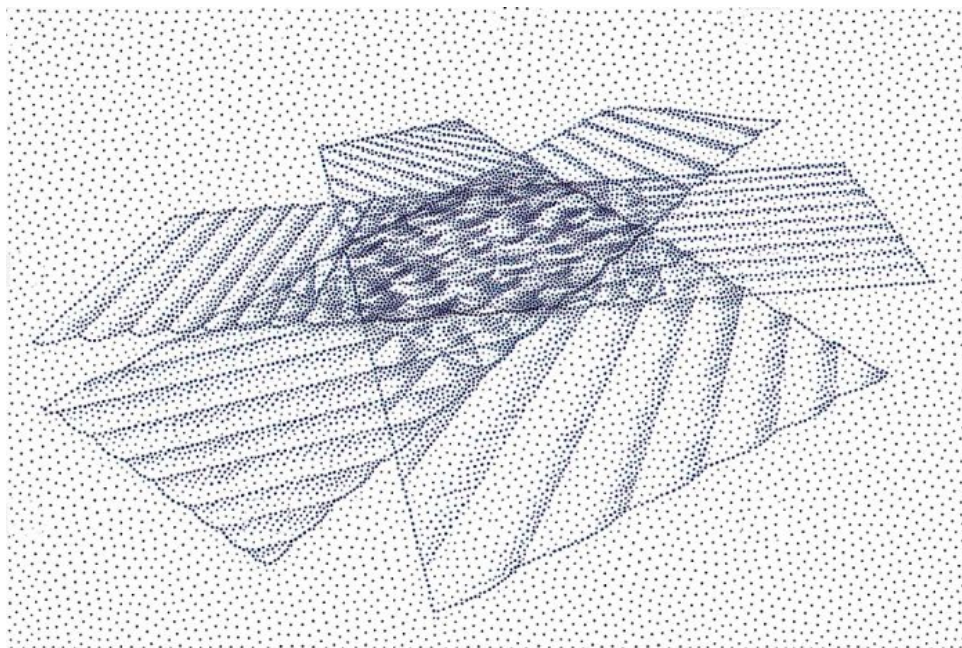
em que a taxa é expressa em W/m .

Para a condição de ondas não regulares, que representa de forma mais próxima a transferência de energia em bacias oceânicas, se tem uma composição harmônica das diversas frequências de ondas com diferentes características. Portanto, para determinar essa energia, é preciso combinar as frequências discretas e obter uma faixa de frequência equivalente com a sobreposição destas (KAMPION, 1997). Na FIGURA 6 observa-se a constituição de uma onda em mar aberto (onda irregular), a partir de ondas regulares.

Em casos de ondas irregulares é mais importante descrever as propriedades estatísticas das ondas do que as elevações instantâneas. As propriedades estatísticas do estado irregular do mar são descritas pela relação de densidade de energia dependente da frequência $S_{\eta(v)}$. (KALOFOTIAS, 2016).

$$E_{tot} = \rho g \int_0^{\infty} S_{\eta(v)} d\omega \quad (2.19)$$

FIGURA 6 – ONDAS IRREGULARES



FONTE: Kampion (1997).

A taxa média de transferência de energia se resume a superposição das N ondas com suas respectivas frequências. Portanto, de forma análoga à equação (2.18), tem-se:

$$\bar{P}_w = \sum_{n=1}^N E_{tot} \cdot c_g \quad (2.20)$$

2.2 EFEITOS FÍSICOS PROVENIENTES DA INTERAÇÃO ONDA-PILAR

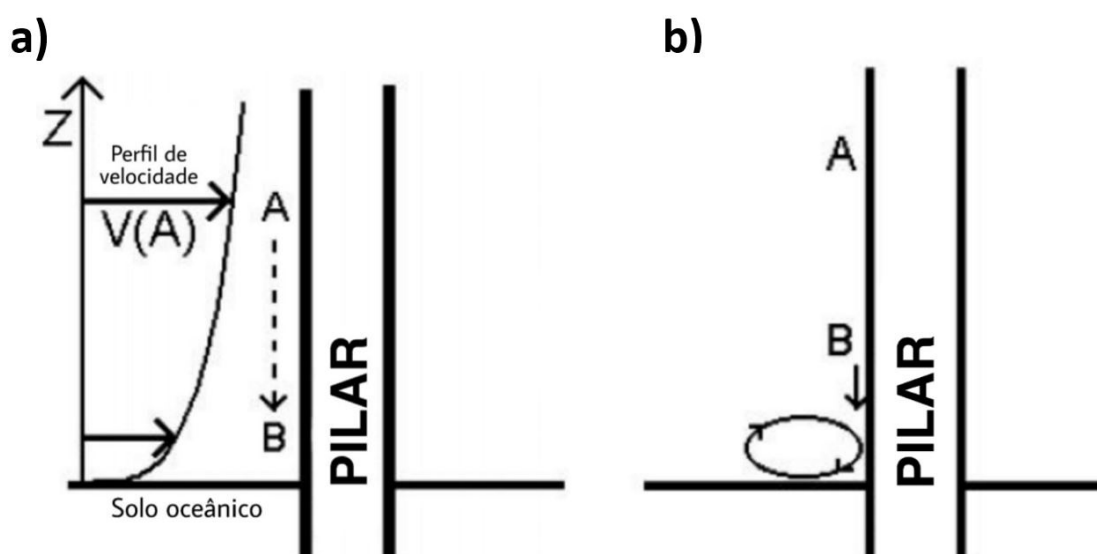
Quando uma onda regular se propaga em um fluido homogêneo, seu formato e velocidade são mantidos quase inalterados, quando comparados com a situação do encontro desta com alguma estrutura já que, neste caso, há uma significativa perda energética. Quando a estrutura em questão é um pilar cilíndrico, alguns fenômenos podem ocorrer, como: refração, *run-up*, surgimento de corrente vertical e formação de vórtices.

2.2.1 Correntes

A propagação de ondas de águas intermediárias ou rasas induz correntes na mesma direção da celeridade da onda. Contudo, ao colidir com um obstáculo, as linhas de fluxo são desviadas em torno do objeto. Aplicando-se esse conceito a um pilar cilíndrico, nota-se o desenvolvimento de regiões de turbulência a jusante do pilar por causa do aumento da velocidade.

A FIGURA 7 (a) demonstra o perfil de velocidade da corrente, que varia de forma decrescente da superfície livre para o fundo, fazendo com que a associação do obstáculo com a corrente horizontal gere uma corrente residual direcionada verticalmente para o fundo. O resultado dessa corrente é uma força de arrasto, de baixa magnitude e na vertical. (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

FIGURA 7 – CORRENTE VERTICAL INDUZIDA PELA INTERAÇÃO ENTRE ONDA E ESTRUTURA E A GERAÇÃO DO *HORSESHOE VORTEX*



FONTE: Adaptado de Journée e Massie (2001).

2.2.2 Vórtices

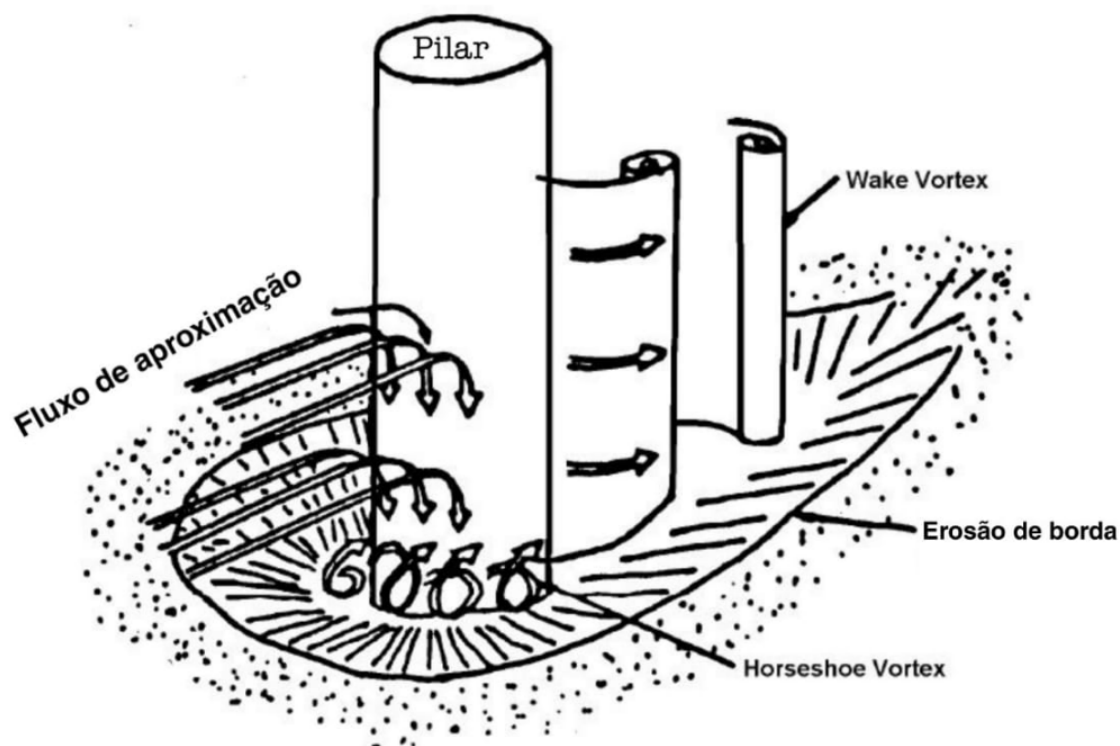
Dois tipos de vórtices são encontrados do resultado da interação de ondas com pilares cilíndricos. O primeiro tipo são os vórtices denominados *horseshoe vortex* (FIGURA 7 (b)), gerados sob o fundo do mar a montante do pilar. Esses vórtices originam-se das correntes verticais, descritos na subseção 2.2.1, ao encontrarem o leito.

Apesar desses vórtices não gerarem carregamento significativo sobre o pilar, eles podem causar grande mobilização de sedimentos ao redor da estrutura, promovendo assim instabilidade no alicerce.

O segundo vórtice que pode ser notado é o *wake vortex* que, diferentemente do *horseshoe vortex*, afeta a distribuição da pressão sobre o pilar por causa das altas velocidades atingidas pelas correntes em torno do mesmo. Desta forma a força inercial causada pela onda sobre a estrutura é alterada.

Esses vórtices são gerados a jusante do pilar em pontos sucessivos e diametralmente opostos. De acordo com Journée e Massie (2001), o efeito de sucessividade pode causar pequenas vibrações na estrutura e assimetria na distribuição das forças.

FIGURA 8 – VÓRTICES PRESENTES EM UM PILAR CILÍNDRICO



FONTE: Journée e Massie (2001).

2.3 FORÇAS NO PILAR

Entre as forças geradas por ondas sobre pilares, as mais comuns e de maior magnitude são: as forças inerciais, forças de arrasto e as forças transversais. Há também de se citar forças secundárias como forças de impacto de ondas de águas rasas ou colapsantes.

As equações que descrevem as forças sobre um pilar nem sempre podem ser tratadas considerando sua sobreposição linear, como no caso das forças transversais em relação a forças de arrasto e inerciais.

A equação que exprime a força gerada por uma onda sobre um pilar cilíndrico, segundo as relações citadas, foi desenvolvida por Morison et al. (1950) sendo uma forma aproximada, considerando simplificações nas equações de Navier-Stokes. Dessa forma, é necessário encontrar coeficientes que representem efeitos complexos

e possam ser identificados em laboratório. De forma empírica esses coeficientes são reduzidos a coeficiente de inércia (C_M) e coeficiente de arrasto (C_D).

Na literatura, os coeficientes que compõem a equação de Morison et al. (1950) são geralmente obtidos através de ábacos e gráficos, que consideram parâmetros adimensionais importantes, parâmetros esses discutidos na subseção 3.1.4. Dessa equação, Morison et al. (1950) sugerem que a força horizontal por unidade de comprimento do pilar sujeito a ondas é análogo ao mecanismo pelo qual as forças de fluido nos corpos ocorrem em fluxo unidirecional. Essa força pode ser expressa por:

$$f_p = f_i + f_D = C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} + C_D \frac{1}{2} \rho D u |u| \quad (2.21)$$

onde:

f_p = força horizontal por unidade de comprimento

f_i = parcela inercial da força sobre o pilar

f_D = parcela viscosa da força sobre o pilar

C_M = coeficiente de inércia

C_D = coeficiente de arrasto

ρ = massa específica

D = diâmetro do pilar

$\frac{du}{dt}$ = aceleração na direção x

u = velocidade na direção x

2.3.1 Força inercial

Na Equação (2.21), f_i é o termo de força inercial obtido pela análise das forças sobre o corpo em um fluxo acelerado de um fluido não viscoso. Dessa forma, quando a fase da onda se encontrar na máxima aceleração, haverá a maior contribuição da força inercial.

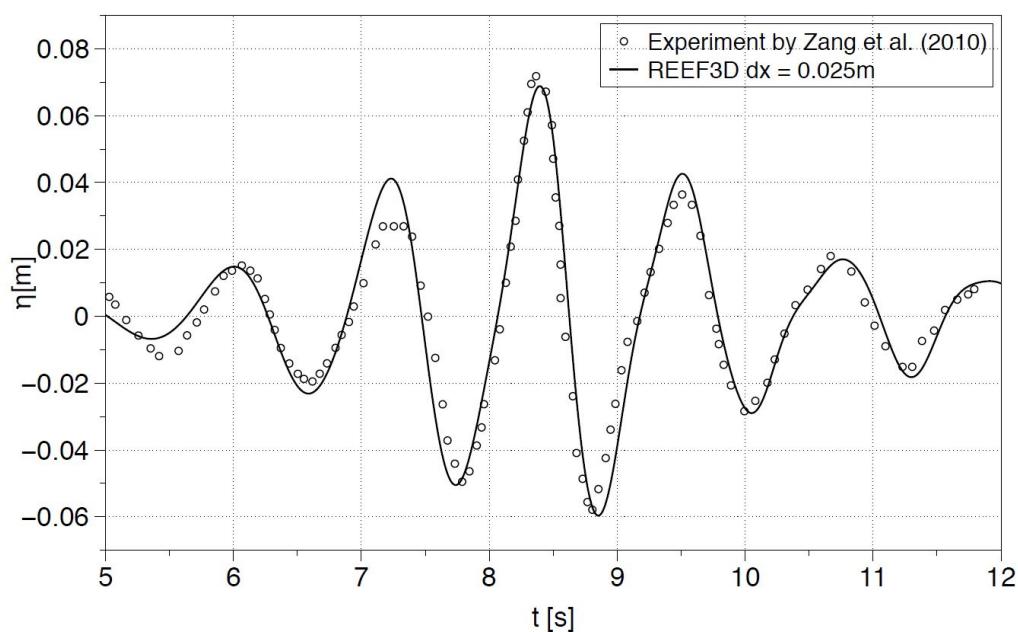
Essa força é responsável pela maior fração da composição global das forças a que um pilar está sujeito sob um fluxo oscilante, podendo ser a única existente na estrutura sob uma determinada onda.

Pode ser combinada a sobreposição da força de arrasto ou com a força transversal, sendo que essa força passa a ser secundária devido à baixa magnitude. Bihs et al. (2017) analisaram e correlacionaram a elevação da onda com as forças inerciais.

O comportamento da elevação está associado ao tipo de propagação da onda, sendo a FIGURA 9 um exemplo deste comportamento para simulações em tanque de ondas. Bihs et al. (2017) compararam sua simulação numérica com um experimento realizado por Zang et al. (2010) para validar seus estudos.

Os autores relacionaram a elevação da onda com as forças induzidas sobre o pilar, obtendo como resultado os dados representados na FIGURA 34.

FIGURA 9 – ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE



FONTE: Bihs et al. (2017).

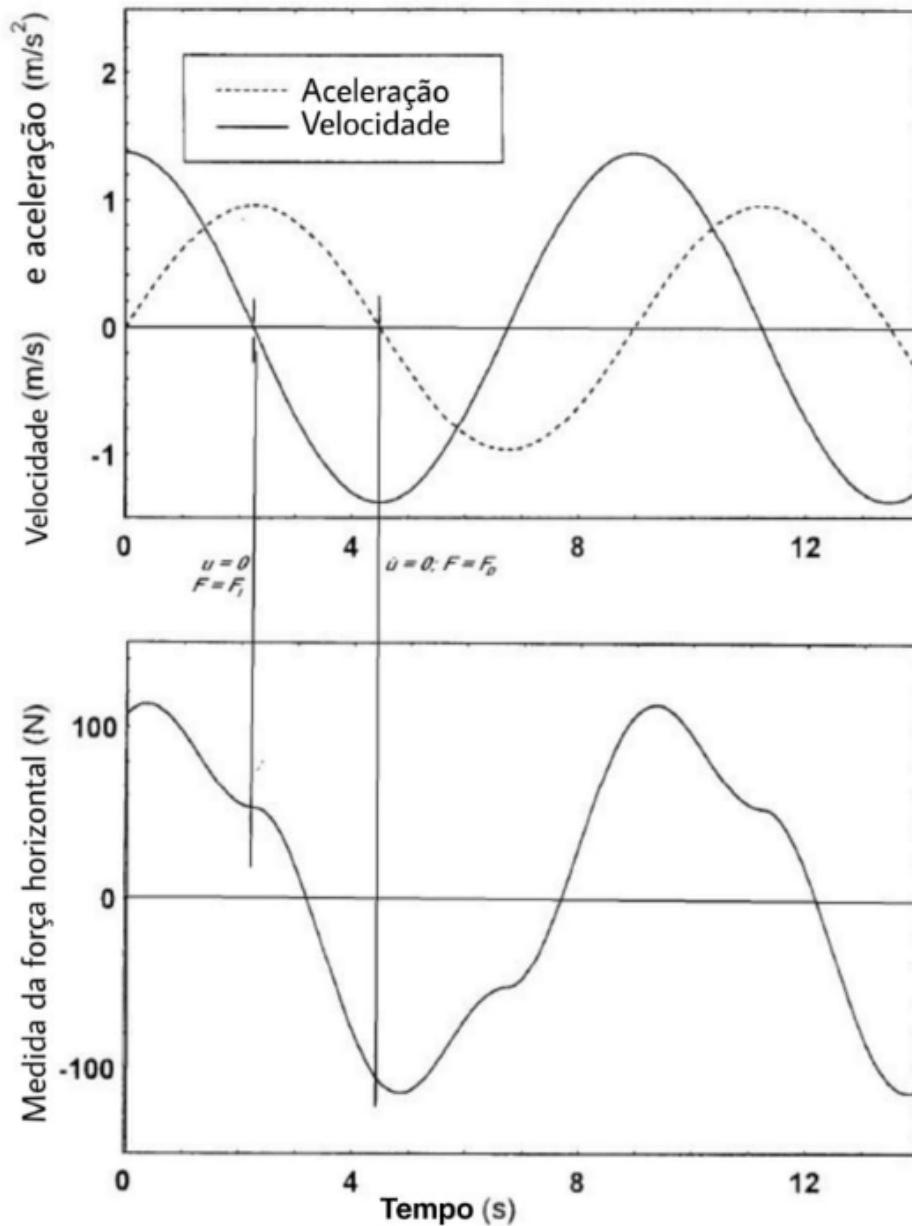
2.3.2 Força de arrasto

Na equação de Morison et al. (1950) f_D é o termo da força de arrasto exercida sobre cilindro com fluxo constante em um fluido viscoso. Dessa forma, quando a fase da onda se encontrar na máxima velocidade haverá a máxima força de arrasto.

De acordo com Journée e Massie (2001), as forças a que um pilar cilíndrico está sujeito variam de predominância conforme a fase de oscilação do fluido, pois quando a velocidade horizontal é máxima a aceleração será nula e o contrário também é válido.

Quando a aceleração atingir o ponto máximo, a velocidade será nula. Essa relação pode ser observada na FIGURA 10 onde entre os tempos 2 e 4 ocorrem o aumento da velocidade e a desaceleração e no tempos 9 e 11 respectivamente ocorre o ponto de máxima velocidade com aceleração nula e aceleração máxima com velocidade nula.

FIGURA 10 – RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE/ACELERAÇÃO E PREDOMINÂNCIA DE FORÇAS



FONTE: Adaptado de Journée e Massie (2001).

Exceções podem ser consideradas para as forças viscosas, como em estudos realizados por MacCamy e Fuchs (1954) que analisaram teoricamente ondas passando por pilares cilíndricos. Eles chegaram à conclusão de que as forças viscosas podem ser desconsideradas como indicado no termo f_i . Contudo, essa análise fica restrita a uma condição em que a razão do diâmetro do pilar pelo comprimento da onda não seja superior a 0,05, portanto:

$$\frac{D}{\lambda} < 0,05$$

2.3.3 Força transversal

Para ondas não quebradas, além das forças inerciais viscosas e de arrasto estão presentes as forças transversais, também denominadas forças de elevação. Essas forças são causadas por vórtices a jusante do pilar resultando em uma força de oscilação lateral. Contudo, essas forças são mais expressivas em cilindros oscilantes do que para estruturas rígidas, como estudado por Laird, Johnson e Walker (1960). Em testes laboratoriais eles concluíram que as forças transversais podem ser 4,5 vezes maiores do que a força de arrasto. Para estruturas rígidas foram observadas forças iguais ou muito próximas à força de arrasto, sendo assim um limite razoável para serem consideradas. Chang (1964) comprovou através de ensaios em laboratório que os vórtices e redemoinhos gerados a jusante dos pilares são eliminados em uma frequência que é o dobro da frequência da onda e também que a força máxima de elevação é proporcional ao quadrado da velocidade induzida pela onda, assim como a força de arrasto.

Para estimar a força transversal, considera-se a seguinte equação:

$$F_L = F_{Lm} \cos 2\theta = C_L \frac{\rho g}{2} D H^2 K_{Dm} \cos 2\theta \quad (2.22)$$

onde:

F_L = força transversal variável no tempo (N)

F_{Lm} = força transversal máxima (N)

θ = fase da onda (rad)

C_L = coeficiente de elevação (análogo ao coeficiente de arrasto) (adm)

K_{Dm} = parâmetro adimensional (adm)

Chang (1964) descobriu que C_L depende do número médio de Keulegan-Carpenter (KC), conforme detalhado na subseção 3.1.4. Observou-se que quando KC é menor ou igual a 3, reduz significativamente os vórtices e, por consequência, as forças transversais são diminuídas a ponto de poderem ser desprezadas.

Portanto, reconhecendo que a força de elevação, em determinada circunstância, poderá representar uma parte importante da força total, é necessário que esta não seja negligenciada no projeto e dimensionamento de estruturas com pilares.

2.3.4 Direção e distribuição das forças

A direção e sentido das forças está ligado diretamente aos vetores velocidade e aceleração, como pode ser visto na equação (2.21). Portanto, as forças terão suas direções e sentidos orientados na mesma posição desses vetores.

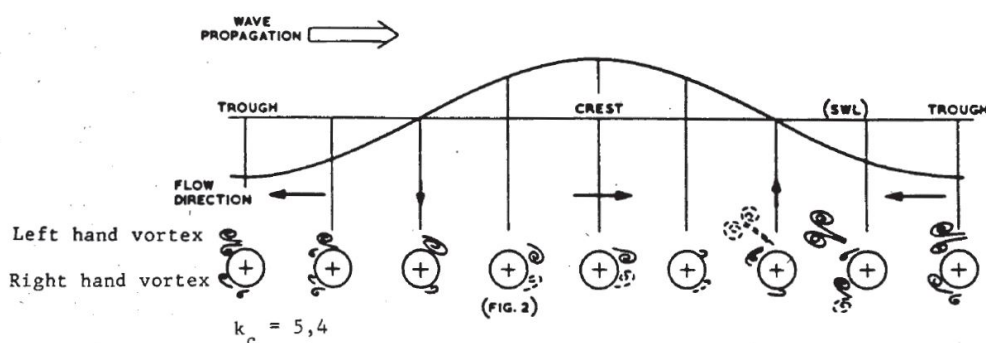
Em um fluxo oscilante, ao se analisar o início e o final do ciclo, observa-se que os vetores velocidade e aceleração conservam a direção e invertem o sentido, isso ocorre devido ao movimento orbital das partículas.

Na FIGURA 10 essa inversão de direção pode ser observada, pois a força passa de um valor positivo para um valor negativo passando pelo ponto nulo. Ou seja durante um ciclo completo da onda, as forças mudam de direção gradativamente, inicialmente reduzindo a intensidade, posteriormente passando pelo ponto nulo e voltando a aumentar a intensidade no sentido oposto.

Journée e Massie (2001) ilustraram a variação no fluxo de uma onda e o comportamento dos vórtices gerados ao redor do pilar. A FIGURA 11 mostra que os vórtices se encontram diametralmente opostos ao sentido do fluxo, ou seja, sempre a jusante. Acompanhando a mudança de direção do fluxo. Journée e Massie (2001) correlacionaram essa mudança ao movimento orbital, sendo o sentido de propagação da onda o predominante. Dessa forma, os fluxos ocorrem na mesma direção da propagação, quando se analisa a crista da onda e ocorre o contra fluxo na cavada da onda.

A Equação (2.21) sugere que a distribuição das forças ao longo do pilar seja constante, contudo não é isso que ocorre na prática. A distribuição das forças é diretamente proporcional à distribuição de pressão ao longo do pilar, pois ao integrar a pressão sobre a área do pilar obtém-se a força.

FIGURA 11 – VARIAÇÃO NA DIREÇÃO DAS FORÇAS

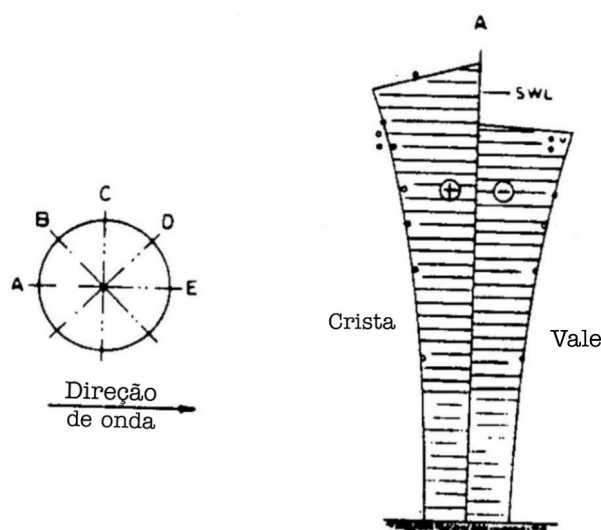


FONTE: Journée e Massie (2001).

Journée e Massie (2001) analisaram teoricamente a distribuição da pressão sobre um pilar e chegaram ao resultado apresentado na FIGURA 12, onde a pressão positiva representa o momento em que a onda se encontra com a crista sobre o pilar e os valores negativos quando a cavada está sobre o pilar. É importante ressaltar que

há uma diferença entre as pressões devido ao sentido da propagação da onda, onde predomina-se maior pressão no sentido de propagação da onda, causado pela parcela inercial da quantidade de movimento. Além disso a variação da pressão ao longo do pilar ocorre devido as maiores velocidades próximo a superfície livre, como ilustrado.

FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO SOBRE UM PILAR CILÍNDRICO

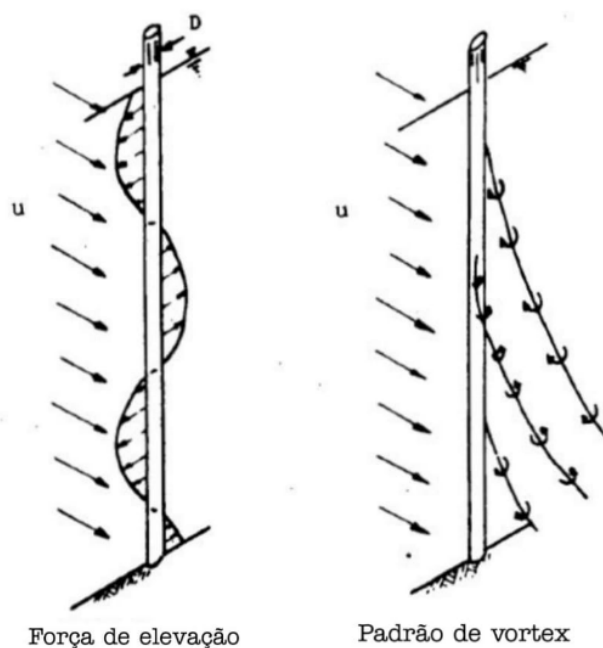


FONTE: Adaptado de Journée e Massie (2001).

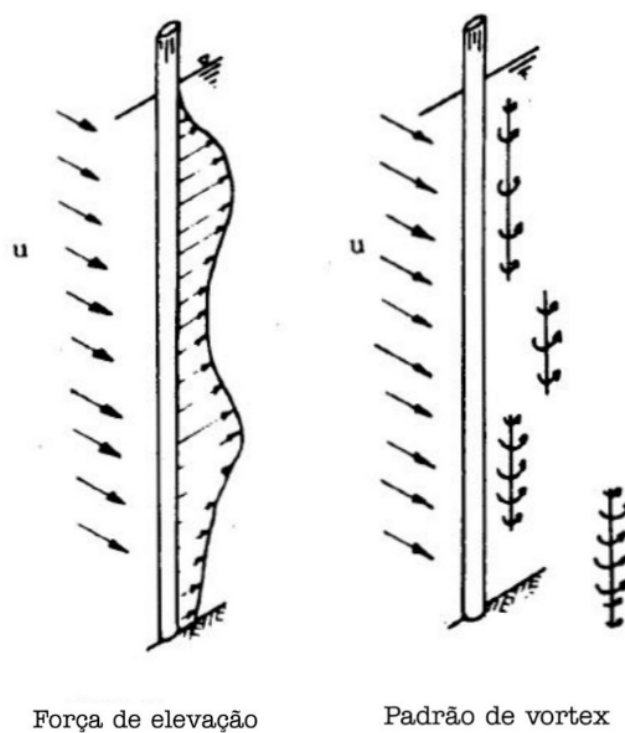
A distribuição da força transversal está relacionada ao comportamento dos vórtices que são gerados em torno do pilar. Segundo Journée e Massie (2001) há dois principais comportamento dos vórtices.

- (i) Quando o numero de Reynolds se encontra a baixo de $1,2 \times 10^4$, a distribuição da força terá mudança de direção ao longo do pilar.
- (ii) Quando o número de Reynolds estiver acima de $1,2 \times 10^4$ não haverá mudança de direção da força, mas uma variação na intensidade dessa nas extremidades do pilar.

Os comportamentos descritos estão ilustrados na FIGURA 13 e na FIGURA 14.

FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS TRANSVERSAIS COM $Re < 1,2 \times 10^4$ 

FONTE: Adaptado de Journée e Massie (2001).

FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS TRANSVERSAIS COM $Re > 1,2 \times 10^4$ 

FONTE: Adaptado de Journée e Massie (2001).

3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Atualmente há diversos *softwares* que promovem soluções numéricas de problemas de CFD, como o *CFX* e *Fluent* da desenvolvedora *ANSYS*, *OpenFOAM*, *SimScale*, *Autodesk CFD* entre outros. A validação das soluções destes *softwares* é feita através da comparação com experimentos (modelos reduzidos, etc), através de soluções analíticas de problemas simplificados ou através de comparação com resultados de outros autores. (LOH et al., 2018).

3.1 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Segundo Eymard, Gallouët e Herbin (2000), o método dos volumes finitos resume-se a uma forma de resolução de equações de derivadas parciais baseado em balanço de massa, energia e quantidade de movimento a partir da discretização do domínio por elementos de volume.

Por se tratar de um método versátil, acaba sendo amplamente utilizado no campo das engenharias para modelagem de fluidos e transferência de calor e massa. O método é bem aplicado a geometrias complexas, podendo ser utilizadas tanto malhas estruturas quanto não estruturadas. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Uma das principais características desse método, segundo Eymard, Gallouët e Herbin (2000), é a conservação local dos fluxos, ou seja, os fluxos são conservados de uma célula numérica para a célula vizinha.

Os processos para resolução de problemas utilizando o método de volumes finitos, segundo Osses (2016) são solucionados pelos seguintes passos:

- Decompor o domínio em volumes de controle;
- Formular as equações integrais de conservação para cada volume de controle;
- Aproximar numericamente as integrais;
- Aproximar os valores das variáveis nas faces e as derivadas com a informação das variáveis nodais;
- Montar e resolver o sistema algébrico obtido.

As equações de conservação são descritas em sua forma integral para cada volume. Utiliza-se o teorema de divergência de Gauss para converter integrais de

volume em operadores de divergência, (OSSES, 2016). Para uma variável Φ qualquer tem-se que:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \Phi) + S_{\Phi} \quad (3.1)$$

Integrando,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{Volume} \rho \Phi dV + \oint_{Area} \rho \mathbf{V} \Phi \cdot d\mathbf{A} = \oint_{Area} \Gamma \nabla \Phi \cdot d\mathbf{A} + \int_{Volume} S_{\Phi} dV \quad (3.2)$$

onde:

Φ = variável analisada

Γ = constante de difusão

ρ = densidade

\mathbf{v} = velocidade

S_{Φ} = termo de fonte

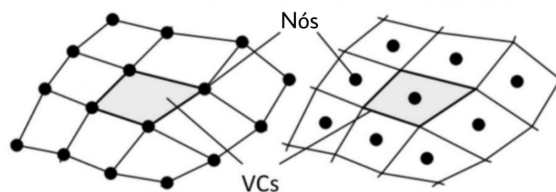
Por fim, as integrais são aproximadas através de discretização por volumes de controle, executando cálculos simplificados. As aproximações dos gradientes e das variáveis das faces são determinadas pelas variáveis dos nós. (OSSES, 2016). Sendo assim:

$$V_{cell} \cdot \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \mathbf{v}_f \Phi_f \cdot \mathbf{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_{\Phi} \nabla \Phi_f \cdot \mathbf{A}_f + S_{\Phi} \cdot V_{cell} \quad (3.3)$$

3.1.1 Malha

A discretização do domínio gera uma malha ou matriz algébrica na qual as equações de continuidade, quantidade de movimento e energia são resolvidas. Os nós da malha podem estar contidos nos centros dos volumes de controle (VCs) ou nos vértices da grade, conforme mostrado na FIGURA 15.

FIGURA 15 – TIPOS DE MALHAS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE VOLUMES FINITOS



FONTE: Osses (2016).

3.1.2 Método VOF

Em simulações bifásicas que envolve superfície livre é necessário identificar a forma e a posição da interface entre os fluidos, para isso utiliza-se o método numéricos de rastreamento da interface denominado *Volume of Fluid* ou pela sigla VOF.

O VOF tem como base método euleriano que considera uma malha estacionária, ou seja, a malha do domínio é fixa no espaço ao longo do tempo, de forma que permita acompanhar o comportamento da interface. O método não resolve problemas de fluxo, para isso há necessidade de aplicação das equações de Navier-Stokes.

De acordo com Hirt e Nichols (1981) o método baseia-se no uso de uma função fracionária C , que é determinada como parte integrante das características que o fluido desempenha em uma célula. C é uma função contínua, com $0 \leq C \leq 1$. Para exemplificar, pode ser considerado dois fluidos, A e B quando na célula estiver contida apenas o fluido A a função C será $C = 0$, se a célula estiver apenas o fluido B, então $C = 1$. As células que detém parcelas dos dois fluidos terão valores relativos a sua fração volumétrica do fluido B, e portanto considerado como uma superfície livre. Neste trabalho será considerado o fluido A sendo o ar e o fluido B a água.

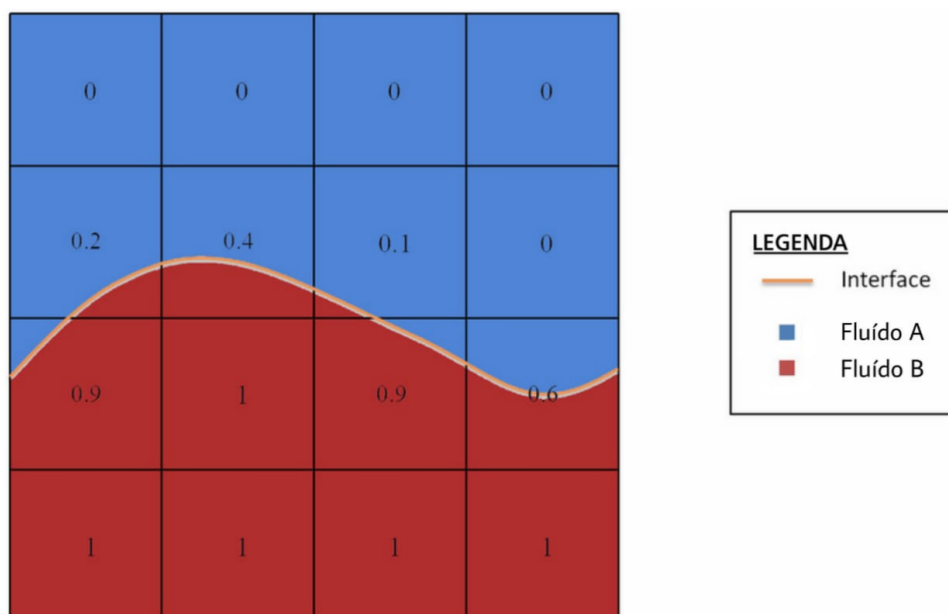
A Equação (3.4) expressa o transporte de C , através das velocidade ao longo de todo o domínio.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

Após obtenção das derivadas podem então ser usadas para determinar o limite de fronteira, contemplando a direção e o valor de C em uma célula de fronteira, e a partir disso pode ser construída uma linha que corta a célula que se aproxima da interface. Essa posição pode então ser usado na configuração das condições do limite. (HIRT; NICHOLS, 1981).

Na FIGURA 16 está representada a interface entre os fluidos A e B com suas respectivas frações volumétricas relativas ao fluido B, sendo observados valores de zero e um para as células vazias de fluido B e cheias com fluido B, respectivamente.

FIGURA 16 – DISTRIBUIÇÃO DAS FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DO FLUIDO B



FONTE: Adaptado de Haider (2013)

3.1.3 Modelagem de ondas oceânicas

Ao simular condições de mar aberto, o domínio computacional é limitado pelo o que se chama de tanque de ondas numérico, o que é diferente do problema físico. Assim, procura-se gerar ondas de forma a evitar sua reflexão em tanques de ondas experimentais, para isso, utiliza-se uma praia na região de saída das ondas, para absorver as ondas refletidas, contudo reproduzir essas condições nos tanques de ondas numéricos tem elevado custo computacional. Como substituto deste procedimento utilizam-se métodos de absorção de ondas.

Segundo Li et al. (2019) o método mais simples é usar a velocidade da onda incidente e a elevação da superfície livre como condições de contorno. Esse tipo de limite permite que ondas incidentes se desloquem para dentro e para fora, mas causa reflexões de ondas, enquanto as ondas reais são diferentes das ondas incidentes, por exemplo, ondas difratadas por estruturas.

Sem tratamentos adequados, grandes domínios devem ser usados para garantir uma janela de tempo tempo suficiente para a análise dos dados antes que as ondas refletidas retornem.

Há três principais métodos de absorção de ondas baseados e dois princípios diferentes:

- (i) Desenvolvimento de condições de fronteira de absorção e de geração, com o

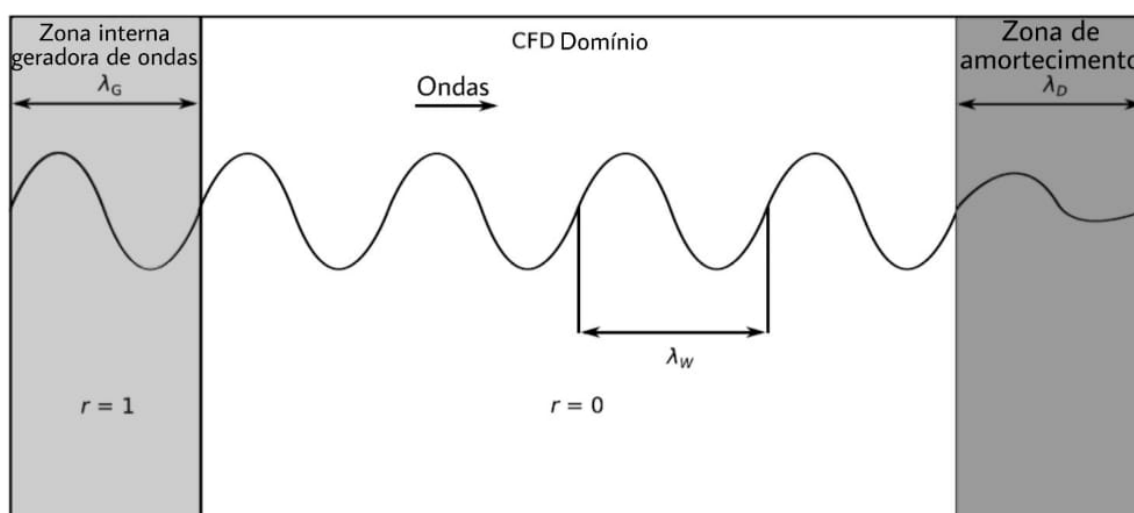
objetivo de usar a fronteira para gerar ondas incidentes e absorver as ondas difratadas ao mesmo tempo.

- (a) IWG (Internal Wave Generator) geram ondas incidentes dentro de uma região específica do domínio e é absorvida na saída.
- (b) RZ (Relaxation Zone) combina a solução numérica obtida pelo solucionador com uma solução de referência em uma zona próxima aos limites do domínio. A velocidade e a posição livre da superfície calculada são “relaxadas” para uma solução de onda incidente, isso gera ondas para fora dos RZ's e também evita que as ondas que saem sejam refletidas (LI et al., 2019).

Esses métodos foram estudados e aplicados a diferentes simulações, entre elas ondas interagindo com estruturas de geradores eólicos (PAULSEN; BREDMOSE; BINGHAM, 2014) e estruturas de pontes costeiras (HAYATDAVOODI; SEIFFERT; ERTEKIN, 2014).

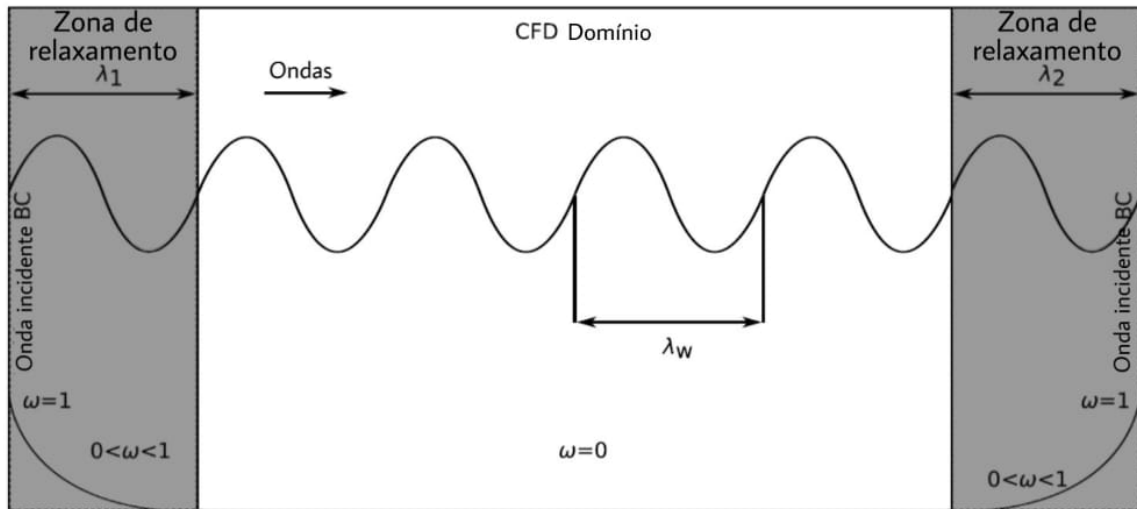
Problemas que envolvem a reflexão das ondas para dentro do domínio necessitam, por vezes, da técnica da zona de relaxação. Windt et al. (2019) analisaram a acurácia de diferentes técnicas de absorção de ondas relacionado ao tipo de onda e constataram que há pouca influencia nos resultados quando implementada técnica de absorção de ondas em caso de ondas de águas profundas e com domínio curto (2λ).

FIGURA 17 – MÉTODO IWG DE ABSORÇÃO DE ONDAS



FONTE: Adaptado de Li et al. (2019).

FIGURA 18 – MÉTODO RZ DE ABORÇÃO DE ONDAS



FONTE: Adaptado de Li et al. (2019).

(ii) Trata a geração de ondas e os problemas de absorção separadamente.

- (a) *Spectral Wave Explicit Navier-Stokes Equations* (SWENSE) resolve problemas de propagação de ondas não lineares através do solucionador CFD apenas para resolver os campos complementares.

Gentaz et al. (2017) relataram através de simulações de ondas incidentes em um cilindro vertical, executadas com o método SWENSE que a inclusão de efeitos viscosos leva a uma concordância um pouco melhor com experimentos para o componente de frequência das ondas. Os resultados mostraram maior influência do fluxo inercial em relação ao fluxo viscoso, levando à conclusão que o componente de atrito tem pouca influência.

3.1.4 Análise dimensional e números adimensionais importantes

Um importante parâmetro adimensional que descreve a relação entre as forças de arrasto e as forças de inércia sobre o objeto sob influência de fluxo oscilatório é denominado número de Keulegan-Carpenter, ou apenas KC , definido como:

$$KC = \frac{u_m T}{L} \quad (3.5)$$

onde:

u_m = máxima velocidade horizontal da partícula

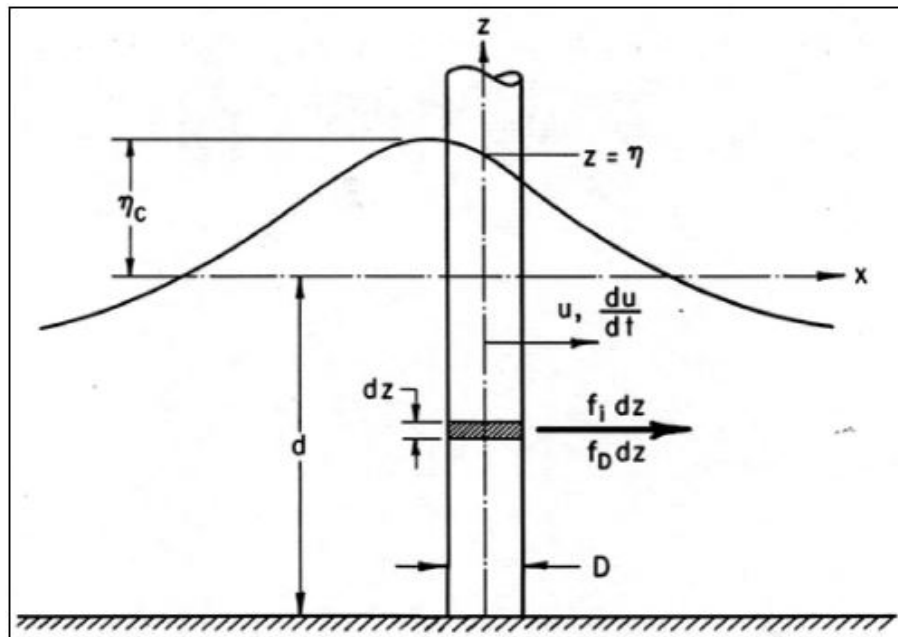
T = período da onda

L = escala características de comprimento do objeto

No caso deste trabalho L pode ser representado como sendo o diâmetro de um cilindro sobre a carga da onda.

Na FIGURA 19 tem-se um desenho representativo das principais características de uma onda ideal que se propaga em um meio fluido homogêneo, bem como a indicação dos elementos que compõem os números adimensionais importantes para a análise das ações das forças horizontais sobre o pilar.

FIGURA 19 – PARÂMETROS DA ONDA



FONTE: Engineers (2002).

Engineers (2002) descreve alguns parâmetros adimensionais que indicam a força total da onda atuando sobre o pilar cilíndrico. A partir de análise dimensional chegou-se aos seguintes parâmetros:

- $\frac{H}{gT^2}$ = Inclinação adimensional da onda
- $\frac{d}{gT^2}$ = Profundidade adimensional
- $\frac{D}{\lambda}$ = Relação diâmetro do pilar e o comprimento da onda (considerado pequeno)
- $\frac{\epsilon}{D}$ = Rugosidade relativa
- $\frac{HD}{T\nu}$ = Uma forma do número de Reynolds

Algumas das variáveis que formam os parâmetros adimensionais importantes segundo análise determinado por Engineers (2002) onde foram considerados ondas interagindo com pilares esbeltos. As seguintes variáveis são:

η = elevação da onda (m)

H = altura da onda (m)

D = diâmetro do pilar (m)

d = profundidade (m)

T = período da onda (s)

λ = comprimento da onda (m)

e = rugosidade do pilar (m)

Outra informação que a FIGURA 19 traz é a taxa de variação da velocidade ou seja, a aceleração do fluido du/dt . Essa é a parcela da força causada diretamente pelos fluxos induzidos pelas ondas, sendo que essa taxa varia a partir da superfície livre até uma profundidade em que a onda ainda em induz velocidades na coluna d'água. Em se tratando pilares esbeltos pode ser considerado desprezível o efeito do pilar sobre o fluxo, isso implica que a relação do diâmetro pelo comprimento deve ser pequeno. Outros parâmetros que devem ser considerados para essa análise são a densidade do fluido e sua viscosidade.

Engineers (2002) mostra que a variação da força ao longo do comprimento do pilar depende do tipo e formação da onda, que afetam as velocidades e acelerações das partículas de água que causam as forças.

As forças horizontais em um pilar vertical de profundidade finita devido ao movimento oscilatório são expressas em função das seguintes variáveis independentes:

$$f = \Phi(t, T, H, \lambda, u_m, D, \rho, \nu) \quad (3.6)$$

onde:

f = força por unidade de comprimento em um ponto do pilar (N/m)

t = tempo (s)

T = período da onda (s)

H = altura da onda (m)

λ = comprimento da onda (m)

u_m = máxima velocidade horizontal da partícula de água em um ponto do pilar no eixo onde será calculada a força (m/s)

D = diâmetro do pilar (m)

ρ = massa específica da água (kg/m³)

ν = viscosidade cinemática da água (m²/s)

O efeito causado com a variação da profundidade é incluso em u_m . Segundo a teoria linear de Airy; $\dot{u}_m = \omega u_m$ onde $\omega = 2\pi/T$; portanto \dot{u}_m é determinado com u_m e T . Dessa forma a variável f é considerada uma função de oito variáveis independentes. No sistema massa-comprimento-tempo, será constituído de 6 (=9-3) termos adimensionais, podendo assim a força adimensional ser escrita em termos de 5 parâmetros adimensionais (HERBICH, 1991):

$$\frac{f}{\rho D u_m^2} = \Phi \left(\frac{t}{T}, \frac{H}{\lambda}, \frac{u_m T}{D}, \frac{\pi D}{L}, \frac{u_m D}{\nu} \right) \quad (3.7)$$

onde:

t/T = tempo adimensional

H/λ = inclinação da onda

$u_m T/D$ = parâmetro de Keulegan-Carpenter (KC)

$\pi D/\lambda$ = Parâmetro de difração (ou ka , onde k = número de onda, a = raio do cilindro)

$u_m D/\nu$ = número de Reynolds (Re)

Pela teoria linear das ondas tem-se ao nível da superfície livre, a seguinte velocidade:

$$u_m = \frac{gHk}{2\omega} \quad (3.8)$$

Sendo o número de onda expressa por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.9)$$

Dessa forma a equação (3.8) pode ser simplificada para:

$$u_m = \frac{gHT}{2\lambda} \quad (3.10)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 METODOLOGIA NUMÉRICA

Para a determinação das forças em um pilar sujeito a ação de ondas foi utilizado o *software FLUENT* desenvolvido pela ANSYS. O *software* trabalha com métodos numéricos de discretização em volumes finitos e acompanha pacotes auxiliares de pós-processamento e exibição de resultados.

Para as simulações são necessários três itens:

- Domínio
- As ondas
- O pilar

Cada um desses itens precisa seguir critérios para sua adoção que garantam resultados condizentes com o estado natural.

4.1.1 Domínio

Para a determinação do domínio foi considerada a literatura do capítulo 2 que sugere simular ondas em tanques com comprimento de, no mínimo, uma vez o comprimento da onda, além de ter fundo com propriedades próximas ao que se deseja comparar ou analisar. No caso deste trabalho, a comparação será feita com base nos trabalhos de Zang et al. (2010) e Bihs et al. (2017).

Neste trabalho foram utilizados dois domínios, ambos usados para duas simulações. Para simplificação, tanto o comprimento quanto a largura dos domínios foram iguais, pois as ondas das simulações têm comprimentos aproximados. No primeiro, a profundidade a que a onda se propaga é de 7,0m e no segundo, de 29,0m. Com isso é necessário que o domínio tenha altura total mínima sendo a soma da profundidade de propagação mais a altura da onda. Para ilustrar a propagação da onda de forma clara, foi acrescentada à altura mínima uma altura da parcela que só conterá ar durante toda a simulação, podendo ser considerada uma altura de segurança, tais dados constam na TABELA 1.

A posição do pilar no tanque encontra-se no plano médio xy a 1/4 do comprimento do tanque, ou seja, o centro do pilar está localizado a 25,0m da face de entrada de onda (*inlet*) e a 10m de cada face lateral do tanque, além de ter a mesma altura do domínio.

TABELA 1 – DOMÍNIOS PARA SIMULAÇÕES

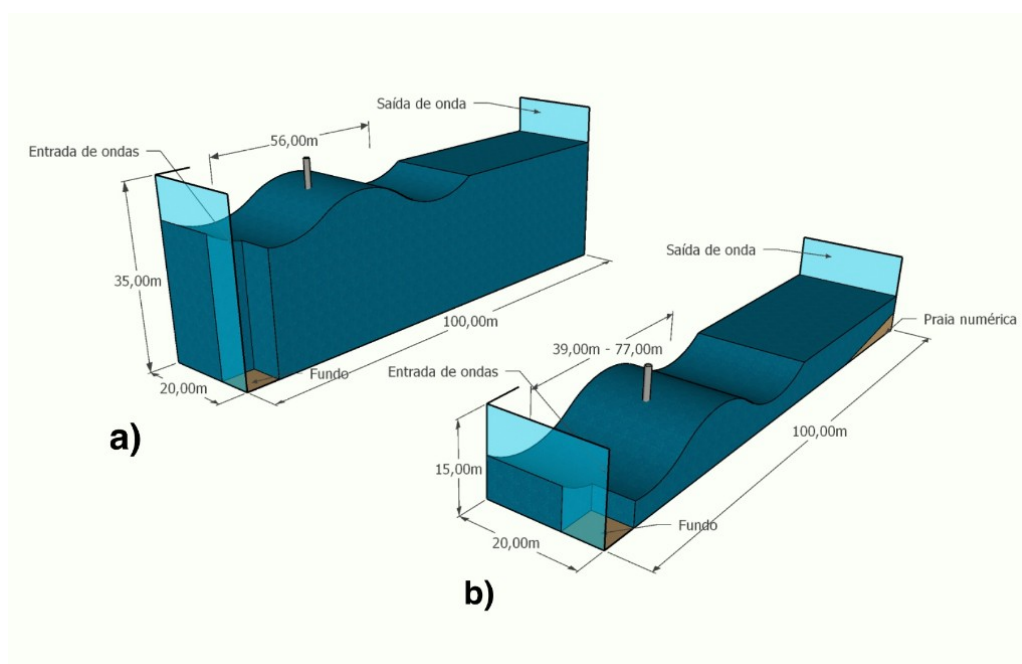
Domínio	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
Domínio 1	100	20	15
Domínio 2	100	20	35

FONTE: O autor (2019).

4.1.1.1 Modelo conceitual e geométrico

A simulação está representada conceitualmente na FIGURA 20, onde são representados os domínios com suas características geométricas, bem como o pilar e o fluxo oscilatório.

FIGURA 20 – MODELOS DOMÍNIO 1 E 2



FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: a) Domínio 2; b) Domínio 1

Na FIGURA 20 (b) as ondas se propagam em águas intermediárias e sofrem interação com o fundo, neste cenário há ao final do tanque um sistema de absorção de onda.

Em águas profundas as ondas não sofrem qualquer tipo de refração e portanto é dispensável uso de sistemas de absorção de ondas, como no cenário ilustrado na FIGURA 20 (a).

O sistema de coordenadas adotado para as simulações segue o mesmo padrão utilizado para a concepção do domínio. Baseia-se em coordenadas cartesianas tendo como origem a aresta inferior direita do domínio.

O eixo x encontra-se ao longo do comprimento do domínio, onde se inicia na face de entrada de ondas (*inlet*) e cresce no sentido da saída de ondas (*outlet*). O eixo y é a vertical do sistema iniciando no fundo do tanque e crescendo no sentido da atmosfera e o eixo z é perpendicular as laterais do tanque.

4.1.2 Ondas

Foram selecionadas três ondas, em que cada uma será submetida a uma condição diferente de interação com o pilar. As ondas adotadas para as simulações foram regulares e com características definidas pelo período e altura (TABELA 2), sendo influenciadas também pela profundidade que se propagam.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS PARA SIMULAÇÕES

Parâmetro	Onda 1	Onda 2	Onda 3
Período (s)	5	7	6
Altura da onda (m)	3,0	4,0	3,0
Profundidade de propagação (m)	7,0	7,0	29,0
Comprimento (m)	39,0	77,0	56,0
Propagação em águas Teoria	Intermediária 3a ordem	Intermediária 2a ordem	Profundas 3a ordem
d/λ	0,18	0,09	0,52
$H/g.t^2$	0,012	0,008	0,008
$d/g.t^2$	0,028	0,014	0,082
u_m (m/s)	1,89	1,79	1,57

FONTE: O autor (2019).

No *setup* das condições de saída da onda (*outlet*) preocupa-se em utilizar sistema numérico de absorção de ondas, para isso se torna necessário saber em qual condição de águas a onde se propaga. Essa informação é obtida pela relação entre a profundidade e o comprimento da onda. Dessa forma como mostra a TABELA 2 a onda 3 não terá sistema de absorção de ondas.

Além das condições de propagação das ondas, é preciso determinar a teoria ou a ordem da teoria de Stokes a qual a simulação estará sujeita. A não verificação dessa escolha compromete os resultados, podendo em alguns casos o solucionador numérico interromper a simulação devido a divergência numérica.

Utilizando o gráfico da FIGURA 5 através das correlações entre a altura da onda, profundidade e período encontra-se os parâmetros adimensionais e determina-se a teoria que melhor representa a propagação da onda a ser simulada. A TABELA 2 traz os valores dos parâmetros adimensionais com a respectiva teoria encontrada.

A interação entre onda e pilar requer conhecimento do número de Keulegan-Carpenter, descrito pela equação (3.1.4), para que se possa determinar as forças transversais além de

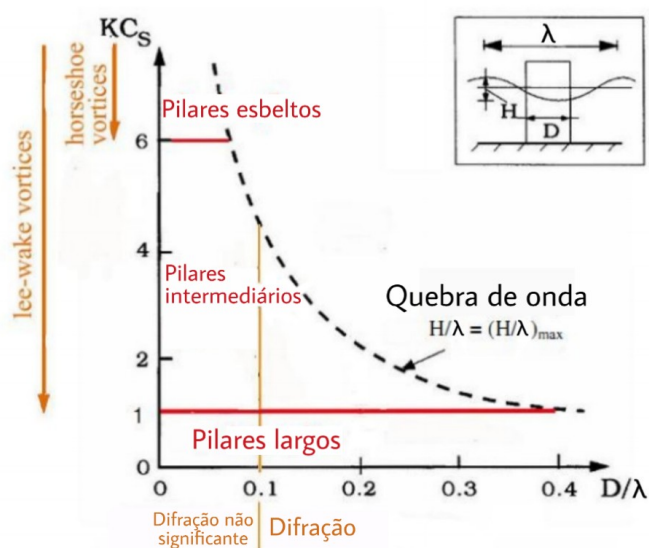
estabelecer critérios de simulação de difração das ondas no pilar. Sendo assim, através da equação (3.10) determina-se a velocidade horizontal das partículas para cada tipo de interação e, com essa, obtêm-se os parâmetros KC 's. As velocidades com os respectivos parâmetros para calculá-las estão apresentados na TABELA 2, e foram obtidas pela equação (3.10).

4.1.3 Pilares

Para conhecer a influência da difração e/ou reflexão da onda sobre um pilar torna-se necessário avaliar as relações entre as características da onda e as características geométricas do pilar, para isso Sumer, Fredsøe e Christiansen (1992) desenvolveram um diagrama (FIGURA 21) que identifica a esbeltez do pilar em relação a onda e o classifica como sendo delgado, intermediário ou largo. Conhecendo-se a característica da onda basta encontrar uma relação entre o diâmetro do pilar e o comprimento da onda de tal forma que o diagrama indique um ponto de baixa reflexão.

Os dois pilares utilizados nas simulações são perpendiculares ao fundo, com diâmetro de 1,0m e considerados feitos em concreto armado.

FIGURA 21 – RELAÇÃO KC E D/λ



FONTE: Adaptado de Sumer, Fredsøe e Christiansen (1992).

As forças viscosas dependem de parâmetros adimensionais como, por exemplo, a relação entre rugosidade e diâmetro, chamado de rugosidade relativa (e/D), mostrado na subseção 3.1.4. Com o objetivo de comparar as diferentes simulações, é importante definir a variável que será alterada para determinar sua implicação nos resultados. Sendo assim, adotou-se um diâmetro constante para os pilares e variou-se a rugosidade absoluta para manter o número KC igual em 3 das 4 simulações e ainda observar as mudanças no comportamento das forças viscosas.

De acordo com Neto (2015) a rugosidade do tubo de concreto varia com o tempo de uso, onde o concreto novo tem rugosidade absoluta de 0,10mm e o concreto com anos de uso chega a ter rugosidade de 0,30mm. Adotou-se rugosidade de 0,16mm para o pilar 1 e 0,30mm para o pilar 2. A TABELA 3 resume os parâmetros a serem implementados para os pilares. Nas simulações os pilares não sofrem deformações, mesmo sendo submetidos a forças causadas pelas ondas, dessa forma considera-se que são estruturas rígidas e indeformáveis.

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DOS PILARES

Pilar	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Rugosidade absoluta (mm)
Pilar 1	15,0	1,0	0,16
Pilar 2	35,0	1,0	0,30

FONTE: O autor (2019).

4.1.4 Malha

Na construção das malhas para discretização dos domínios foram utilizados grades mistas de triângulos e quadriláteros tendo um maior refinamento no entorno do pilar. Ambas malhas contam com seis faces, as quais são atribuídas condições de contorno, além da superfície do pilar e do interior do tanque de ondas.

A TABELA 4 apresenta algumas informações das malhas, referente a quantidade de volumes de controle necessários para criar as malhas. O número total de elementos permitido na versão acadêmica do *FLUENT* é de 512.000 por malha.

TABELA 4 – INFORMAÇÕES DAS MALHAS

Malha	Número de células	Número de faces	Número de nós
Malha 1	31.650	98.860	35.680
Malha 2	64.736	199.988	70.630

FONTE: O autor (2019).

4.2 SETUP DAS SIMULAÇÕES

A entrada de dados para as simulações está resumida na TABELA 5, que são separadas pelo *software* pelas seguintes pastas de entrada de dados.

Para a execução do *setup* das simulações é necessária a criação do domínio e da malha.

No presente trabalho as simulações tratam de problemas 3D em regime transiente com fluxo oscilante. Para isso, é necessário informar a aceleração da gravidade segundo a direção e sentido a qual atua, portanto entrada de $-9,81m/s^2$ em y .

TABELA 5 – SIMULAÇÕES IMPLEMENTADAS

	Parâmetro	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
Domínio	Comprimento (m)	100,0	100,0	100,0	100,0
	Largura (m)	20,0	20,0	20,0	20,0
	Altura (m)	15,0	15,0	35,0	35,0
	λ (m)	39,0	77,0	56,0	56,0
Onda	H (m)	3,0	4,0	3,0	3,0
	d (m)	7,0	7,0	29,0	29,0
	T (s)	5	7	6	6
	Propagação em águas	Intermediárias	Intermediárias	Profundas	Profundas
	Teoria de Stokes	3a ordem	2a ordem	3a ordem	3a ordem
	u_m (m/s)	1,89	1,79	1,57	1,57
Pilar	Diâmetro (m)	1,0	1,0	1,0	1,0
	Submersão (m)	7,0	7,0	29,0	29,0
	Rugosidade (mm)	0,16	0,16	0,16	0,30
Interação	Número KC	9,43	12,58	9,43	9,43
	Refração	Insignificante	Insignificante	Insignificante	Insignificante
	Número de Reynolds	$2,8 \times 10^3$	$2,4 \times 10^3$	$2,5 \times 10^3$	$8,1 \times 10^3$

FONTE: O autor (2019).

4.2.1 Modelo bifásico

Escolheu-se o método VOF para o tratamento da interface. Para todas as simulações foram utilizados ar como sendo a fase primária e água salgada como fase secundária. As características dos fluidos estão apresentadas na TABELA 6, onde a densidade da água foi retirada do trabalho de Munson, Young e Okiishi (1997), que segundo os autores a densidade média da água do mar é de $1030kg/m^3$.

O *software* traz diversos modelo de turbulência com qual o solucionador numérico trabalha. Para o modelo bifásico foi utilizado o modelo de turbulência $k-\omega$ e dentro dele o

submodelo denominado *Shear-Stress Transport* (SST) .

TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS

Fluido	Temperatura (°C)	Massa específica ρ (kg/m ³)	viscosidade cinemática ν (N.s/m ²)
Ar	15,0	1,23	$1,79.10^{-5}$
Água do mar	15,6	1030	$1,20.10^{-3}$

FONTE: O autor (2019).

4.2.2 Condições de contorno

Todas as simulações trabalham com seis condições de contorno, são elas: (i) Entrada de ondas; (ii) Atmosfera; (iii) Paredes laterais; (iv) Fundo; (v) Pilar.

Entrada de ondas: Definida como uma condição de velocidade e tem como parâmetros de entrada o comprimento da onda, a altura da onda e a condição de propagação da onda e a teoria das ondas que melhor representa seu comportamento.

Atmosfera: Definida como uma condição de saída de pressão e tendo como parâmetro de entrada a altura de superfície livre.

Paredes laterais: Definida como uma condição de parede com rugosidade absoluta de 0,001mm, ou seja, com baixa influencia de forças viscosas.

Fundo: Assim como as paredes laterais, definida como uma condição de parede com rugosidade absoluta de 0,001mm.

Saída de ondas: Assim como a atmosfera definida como condição de saída de pressão e tendo como parâmetro de entrada a altura de superfície livre.

Pilar: Definida como condição de parede com rugosidade absoluta de acordo com a TABELA 5.

4.2.3 Absorção de ondas

Nos casos de simulações em que as ondas se propagam em águas intermediárias, ou seja, nas simulações 1 e 2 no tanque de ondas foi implementado zona de relaxação de geração de ondas na entrada e na saída de ondas com o recurso de praia numérica (*numerical beach*). Nos casos das simulações 3 e 4 as zonas de relaxação de entrada e saída foram suprimidas, pois segundo Windt et al. (2019) ondas que se propagam em águas profundas com domínios curtos o tratamento de absorção de ondas tem efeitos pouco significativo nos resultados simulados quando comparado aos medidos em modelos reduzidos.

4.2.4 Execução da simulação

Ao finalizar a entrada de dados deve-se inicializar a simulação com condição de água parada, ou seja, com a superfície livre no estado plano de forma a monitorar o processo de

entrada da onda no domínio.

O tempo total de cada simulação foi de 40 segundos com passo de tempo de 0,1 segundo. Esse tempo é suficiente para que a onda passe pelo pilar ao menos seis vezes antes do término da simulação, assim tem-se garantido ao menos três ciclos completos de onda interagindo com o pilar.

O computador utilizado para as simulações conta com um processador Ryzen 7 1700 com oito núcleos de 3,0GHz, 16Gb de memória RAM, placa de vídeo dedicada de 2Gb e armazenamento de 3,0Tb. O tempo de cada simulação durou entre 4h00 e 5h30.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das forças em x , y e z , os esforços em termos de momentos na base do pilar gerados por essas forças, os centros de pressão de cada uma das forças, os vórtices gerados a jusante do pilar e o formato da onda.

Os sinais positivo e negativo dos resultados seguem o sistema de coordenadas da seção 4.1.1.1. Para as forças o sinal positivo é adotado na direção crescente dos eixos x , y e z e para os momentos segue-se a convenção dextrogiro.

5.1 FORÇAS HORIZONTAIS

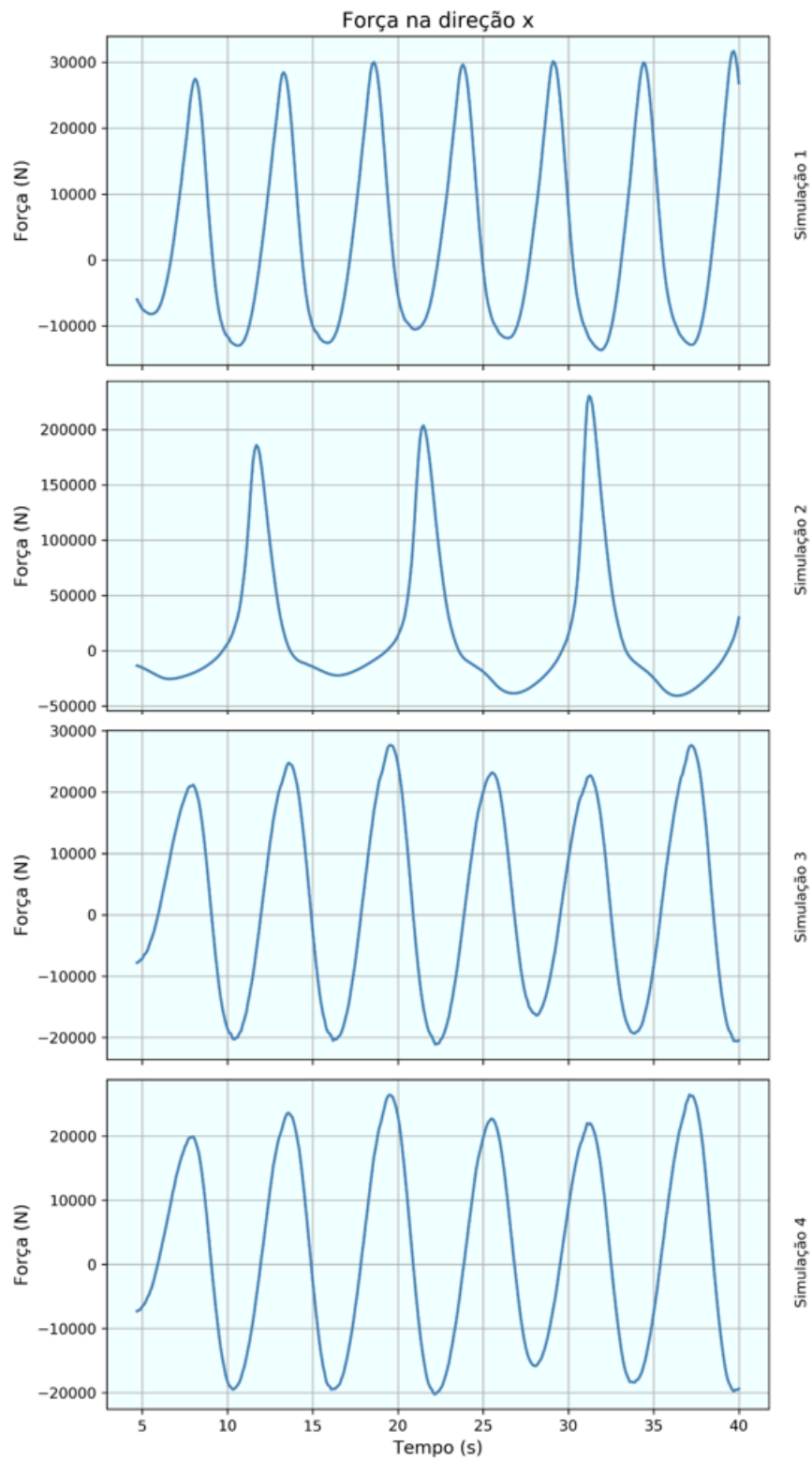
As forças que atuam no plano horizontal são combinações de ações em x e z . Essas forças compõem parcelas inercias e viscosas.

5.1.1 Forças em x

Têm-se representadas na FIGURA 22 as forças totais (soma das parcelas inerciais e viscosas) em x das simulações 1, 2, 3 e 4. Observa-se na figura que a variação das forças horizontais ocorre de forma uniforme e com frequência igual à da onda, sem qualquer perturbação. Esse comportamento era esperado, uma vez que se trata de ondas regulares. As forças que atuam em paralelo a propagação das ondas também têm como característica sua elevada magnitude em relação as forças nas outras direções. Isso se dá em decorrência da parcela de força inercial (vide TABELA 7).

Nas simulações onde a onda se propaga em águas intermediárias, ou seja nas simulações 1 e 2, são observadas assimetrias na intensidade em que a força atua, preponderando a que atua no mesmo sentido da propagação. Nas simulações 3 e 4 essa assimetria é atenuada.

A parcela das forças viscosas é quase insignificante para forças nesse sentido. Contudo, quando há aumento na rugosidade relativa, as forças viscosas aumentam significativamente. Este efeito pode ser observado quando comparam-se as simulações 3 e 4. Ao se dobrar a rugosidade absoluta, ocorre um acréscimo de 7,5 vezes nas forças viscosas. Como o diâmetro do pilar é constante, ao se dobrar a rugosidade absoluta, a rugosidade relativa também tem seu valor duas vezes maior.

FIGURA 22 – FORÇAS TOTAIS EM x 

FONTE: O autor (2019).

O ponto de atuação da resultante da força distribuída ficou abaixo da superfície livre em todas as simulações. Portanto, para as simulações 1 e 2 ficaram as ordenadas abaixo dos 6,0m e, para as simulações 3 e 4, o centro de pressão não ultrapassou os 23,0m. Quando comparados a altura da onda com o centro de pressão observa-se que a amplitude da onda é proporcional à amplitude do centro de pressão. Ou seja, quando há incremento de 1,0m na amplitude da onda, a diferença entre os centros de pressão cresceu para 0,87cm. Como demonstrado na FIGURA 12 o centro de pressão, quando a crista da onda está sobre o pilar, fica mais próximo à superfície livre e, quando a cava da onda esta sobre o pilar, esta distância cresce.

TABELA 7 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DAS FORÇAS EM x E CENTROS DE PRESSÃO

Simulação		Tempo (s)	Força (N)			Centro de pressão (m)	
			Inercial	Viscosa	Total	z	y
S1	Máx	39,7	31.626,11	56,04	31.682,15	10,00	5,30
S1	Mín	31,9	-13.633,25	-23,67	-13.656,92	10,00	3,11
S2	Máx	31,2	229.978,33	249,11	230.227,44	10,00	5,92
S2	Mín	36,4	-40.614,60	-79,69	-40.694,29	10,00	2,87
S3	Máx	19,6	27.617,14	19,03	27.636,17	10,00	22,93
S3	Mín	22,2	-21.118,51	-7,05	-21.125,56	10,00	19,69
S4	Máx	37,1	26.277,07	142,79	26.419,85	10,00	22,69
S4	Mín	22,2	-20.190,29	-41,23	-20.231,51	10,00	19,77

FONTE: O autor (2019).

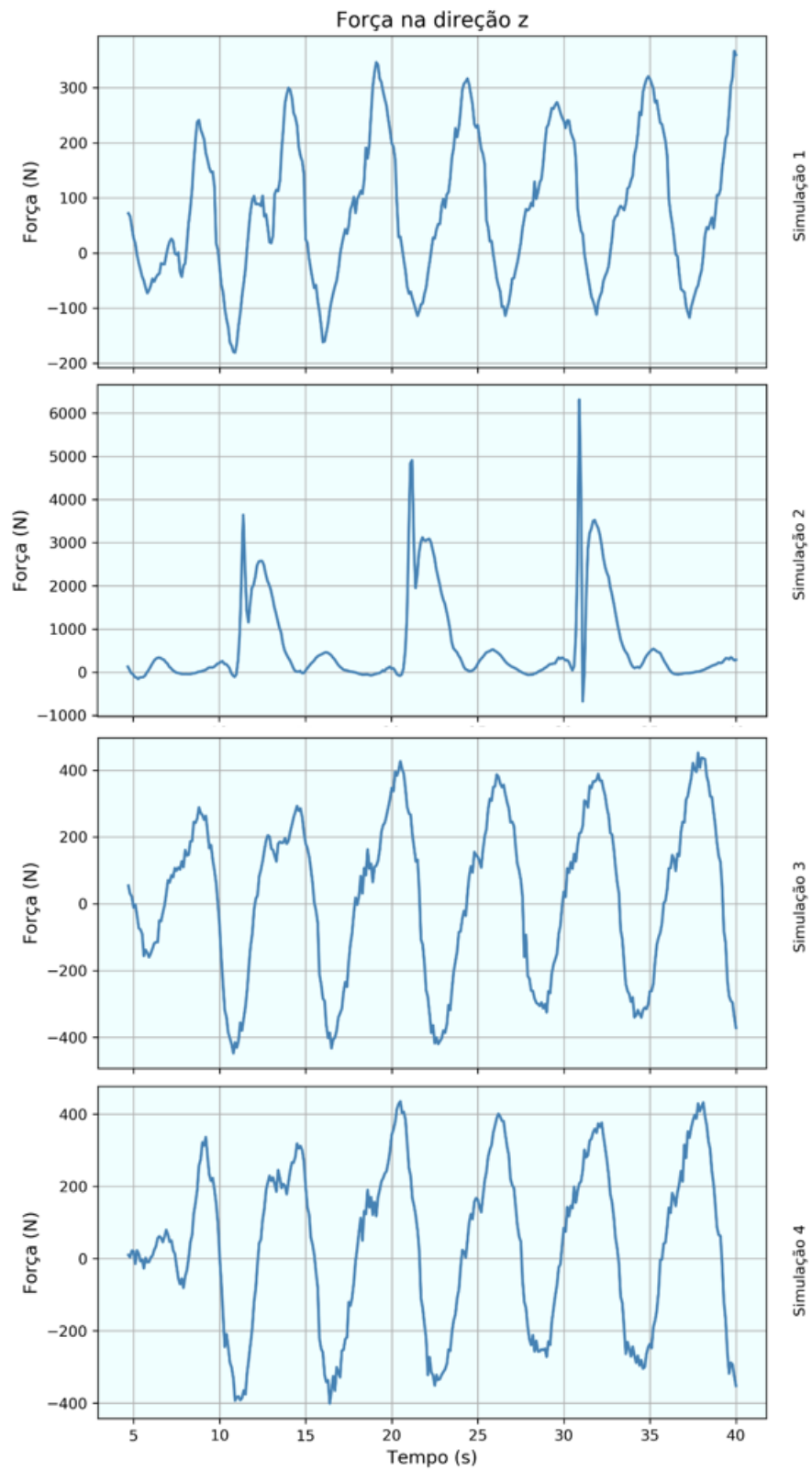
5.1.2 Forças em z

No plano horizontal atuam, além das forças em x , forças na direção z que são perpendiculares as forças de maior ação no pilar. As forças em z também são chamadas de força transversais.

Os resultados das forças transversais para as simulações 1, 2, 3 e 4, são mostrados na FIGURA 23. Analisando esta figura, observam-se perturbações de frequência mais altas em todas simulações.

Isto ocorre, provavelmente, por causa dos efeitos dos vórtices. Para as simulações 1, 3 e 4 têm-se baixos números de Reynolds, respectivamente, $2,8 \times 10^3$, $2,4 \times 10^3$ e $2,5 \times 10^3$. Portanto com distribuição de pressão seguindo a FIGURA 13. Para a simulação 2 o número de Reynolds é mais alto ($8,1 \times 10^3$), induzindo a distribuição da pressão como apresentado na FIGURA 14.

A magnitude das forças transversais (z) não ultrapassa 3% das forças paralelas (x ou y), o que apresenta baixo efeito sobre o pilar. Como essas forças são induzidas pelos mesmos fenômenos das forças paralelas, o comportamento é similar entre elas.

FIGURA 23 – FORÇAS TOTAIS EM z 

FONTE: O autor (2019).

Destacam-se, entre as forças horizontais, as posições dos centros de pressão. Para forças paralelas o centro de pressão está um pouco mais afastado da superfície livre. Já nas forças transversais, nota-se que estas ocorrem predominantemente próximo a superfície (TABELA 8). Isso se explica pelo perfil de velocidade sob a coluna d'água, pois as maiores velocidades se encontram próximas à superfície o que, por sua vez, induz a geração de vórtices.

As simulações 1, 3 e 4 tem o mesmo número KC, que é um dos parâmetros adimensionais que influenciam nas forças transversais. A TABELA 8 mostra que essas simulações tiveram forças com magnitudes próximas. Além de indicar que a rugosidade tem menor efeito sobre as forças viscosas do que a velocidade, esta situação é perceptível ao comparar as simulações 2 e 4.

TABELA 8 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DAS FORÇAS EM z E CENTROS DE PRESSÃO

Simulação		Tempo (s)	Força (N)			Centro de pressão (m)	
			Inercial	Viscosa	Total	x	y
S1	Máx	39,9	366,76	-0,09	366,67	25,00	6,16
S1	Mín	10,9	-180,63	-0,02	-180,64	25,00	4,02
S2	Máx	30,9	6.310,39	2,73	6.313,12	25,00	7,83
S2	Mín	31,1	-676,41	3,58	-672,83	25,00	5,82
S3	Máx	37,8	451,97	0,21	452,18	25,00	25,41
S3	Mín	10,8	-447,31	-0,18	-447,49	25,00	22,91
S4	Máx	20,5	433,37	1,14	434,51	25,00	26,32
S4	Mín	16,4	-399,55	-1,19	-400,74	25,00	22,07

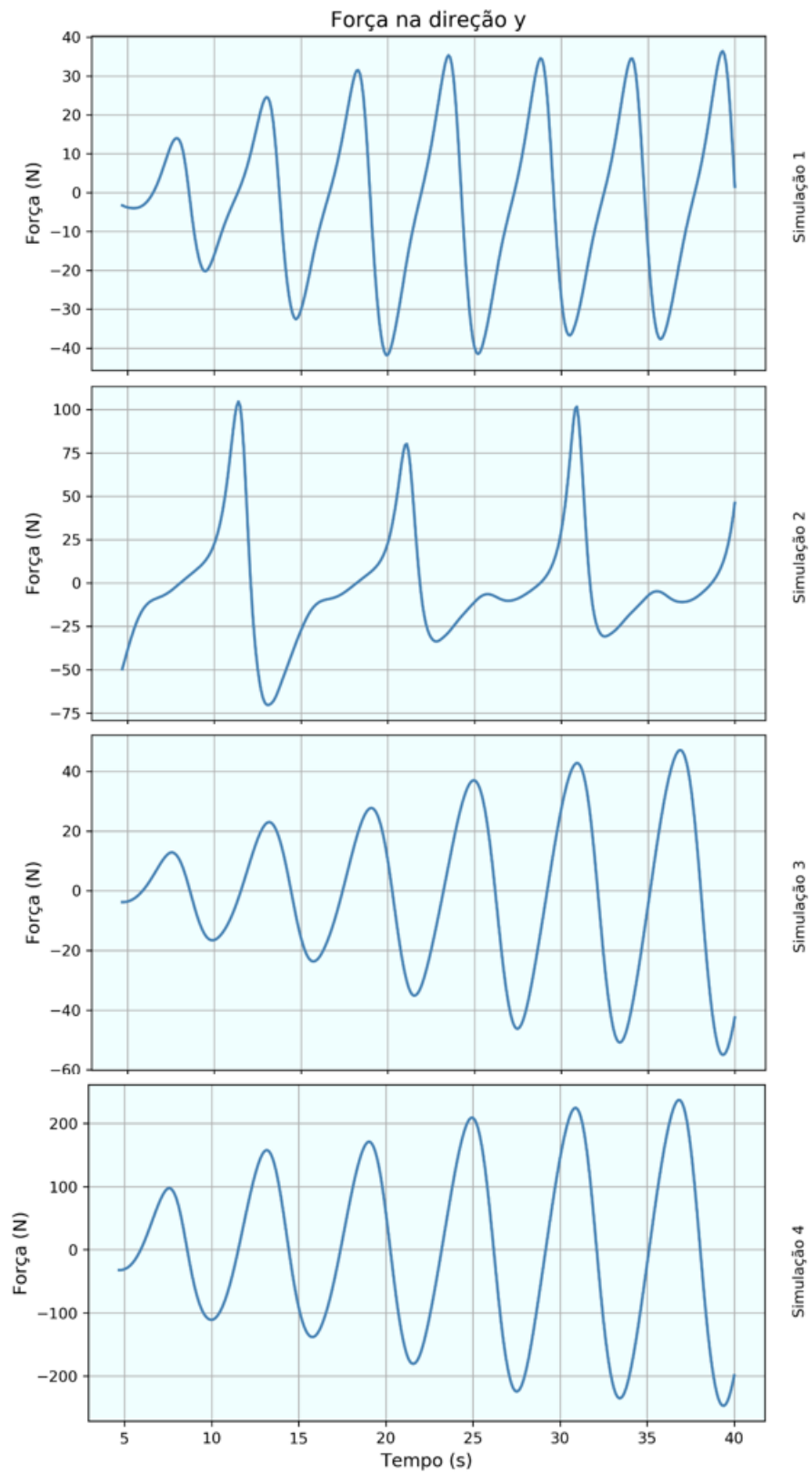
FONTE: O autor (2019).

5.2 FORÇA VERTICAL

As forças que atuam normalmente ao plano xz estão representadas na FIGURA 24 e correspondem as simulações 1, 2, 3 e 4. O comportamento dessas forças, assim como as forças paralelas, são uniformes e regulares representando o mesmo comportamento da onda.

As forças verticais estão associadas diretamente à elevação da onda, ou seja, quanto maior a elevação desta, maior serão as forças atuando no pilar. Isso se explica pelo fato de não haver forças inerciais atuando no sentido vertical. O mesmo motivo explica a diferença das forças entre as simulações 2 e 4, onde as forças verticais da simulação 4 são 2 vezes maiores do que as forças na simulação 2, embora a simulação 2 tenha 1,0m a mais na amplitude da onda. Isso ocorre pela influência do parâmetro adimensional de rugosidade na simulação 4 ser 2 vezes maior que na simulação 2.

A elevação da onda se dá de forma gradativa e é observado pelo comportamento crescente das forças verticais em todos os cenários. A simulação 2 apresenta um padrão diferente das outras três simulações devido ao maior período da onda em relação ao comprimento.

FIGURA 24 – FORÇAS TOTAIS EM y 

FONTE: O autor (2019).

Diferentemente das forças horizontais, para as forças verticais não há relevância em se saber o centro de pressão no plano horizontal, pois toda força vertical ocorre na superfície do pilar e tem como resultante uma força com distância igual ao raio atuando sobre o centro do pilar, sendo essa força geradora parcial do momento em z .

TABELA 9 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DAS FORÇAS EM y

Simulação		Tempo (s)	Força (N)		
			Inercial	Viscosa	Total
S1	Máx	39,3	0,00	36,40	36,40
S1	Mín	19,9	0,00	-41,78	-41,78
S2	Máx	11,4	0,00	104,56	104,56
S2	Mín	13,1	0,00	-70,37	-70,37
S3	Máx	36,9	0,00	47,07	47,07
S3	Mín	39,3	0,00	-54,97	-54,97
S4	Máx	36,8	0,00	236,92	236,92
S4	Mín	39,4	0,00	-247,10	-247,10

FONTE: O autor (2019).

5.3 MOMENTOS

A seguir são apresentados os esforços em termos de momentos provenientes das forças contidas em cada um dos planos. Sendo o centro de apoio do momento localizado na base do pilar, ou seja, nas coordenadas (25,0,10).

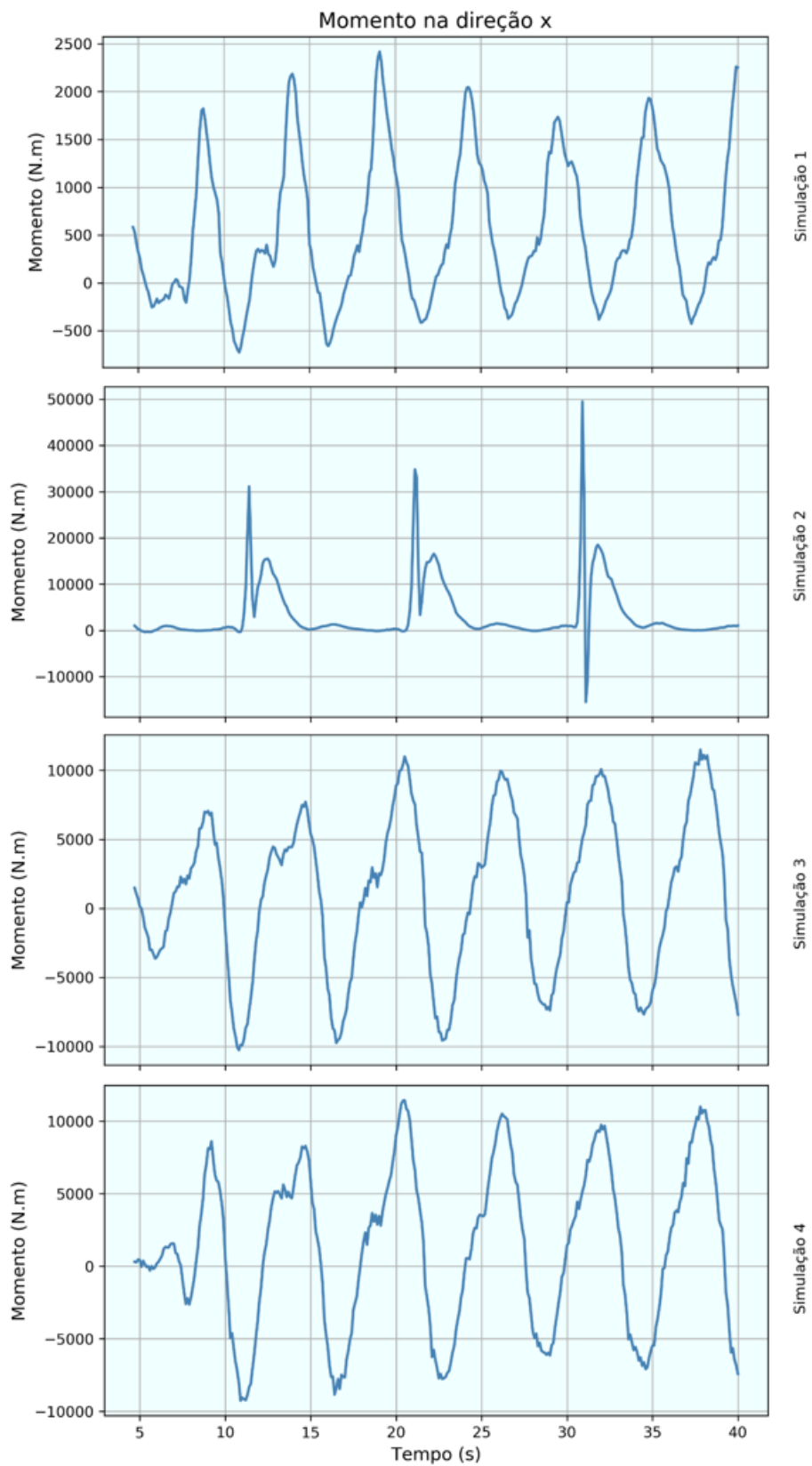
5.3.1 Momento em x

Momentos gerados em x são combinações de forças em y e z e portanto, seguem o comportamento da força predominante que atua em tal direção. Neste caso, as forças em z superam as forças em y . Sendo assim os momentos em x seguem o mesmo comportamento de assimetria e irregularidade das forças em z .

A FIGURA 25 apresenta a variação do momento em x ao longo do tempo e se referem às simulações 1, 2, 3 e 4.

Os extremos dos esforços de cada simulação estão presentes na TABELA 10 e ocorrem no mesmo instante dos extremos das forças em z , corroborando com a informação descrita anteriormente.

Como os centros de pressão ficam entre 6,0m e 23,0m tem-se maior braço de alavanca nas simulações 3 e 4 e, conseqüentemente, maiores momentos quando comparado com o mesmo tipo de onda (simulação 1).

FIGURA 25 – MOMENTO EM x 

FONTE: O autor (2019).

TABELA 10 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DOS MOMENTOS EM x

Simulação		Tempo (s)	Momento (N.m)		
			Inercial	Viscosa	Total
S1	Máx	19,1	2.417,81	-0,33	2.417,48
S1	Mín	10,9	-726,50	-0,01	-726,50
S2	Máx	30,9	49.434,57	21,84	49.456,41
S2	Mín	31,1	-15.481,99	28,59	-15.453,40
S3	Máx	37,8	11.485,64	6,07	11.491,71
S3	Mín	10,8	-10.246,83	-4,77	-10.251,60
S4	Máx	20,5	11.405,12	30,40	11.435,51
S4	Mín	10,9	-9.241,65	-28,85	-9.270,50

FONTE: O autor (2019).

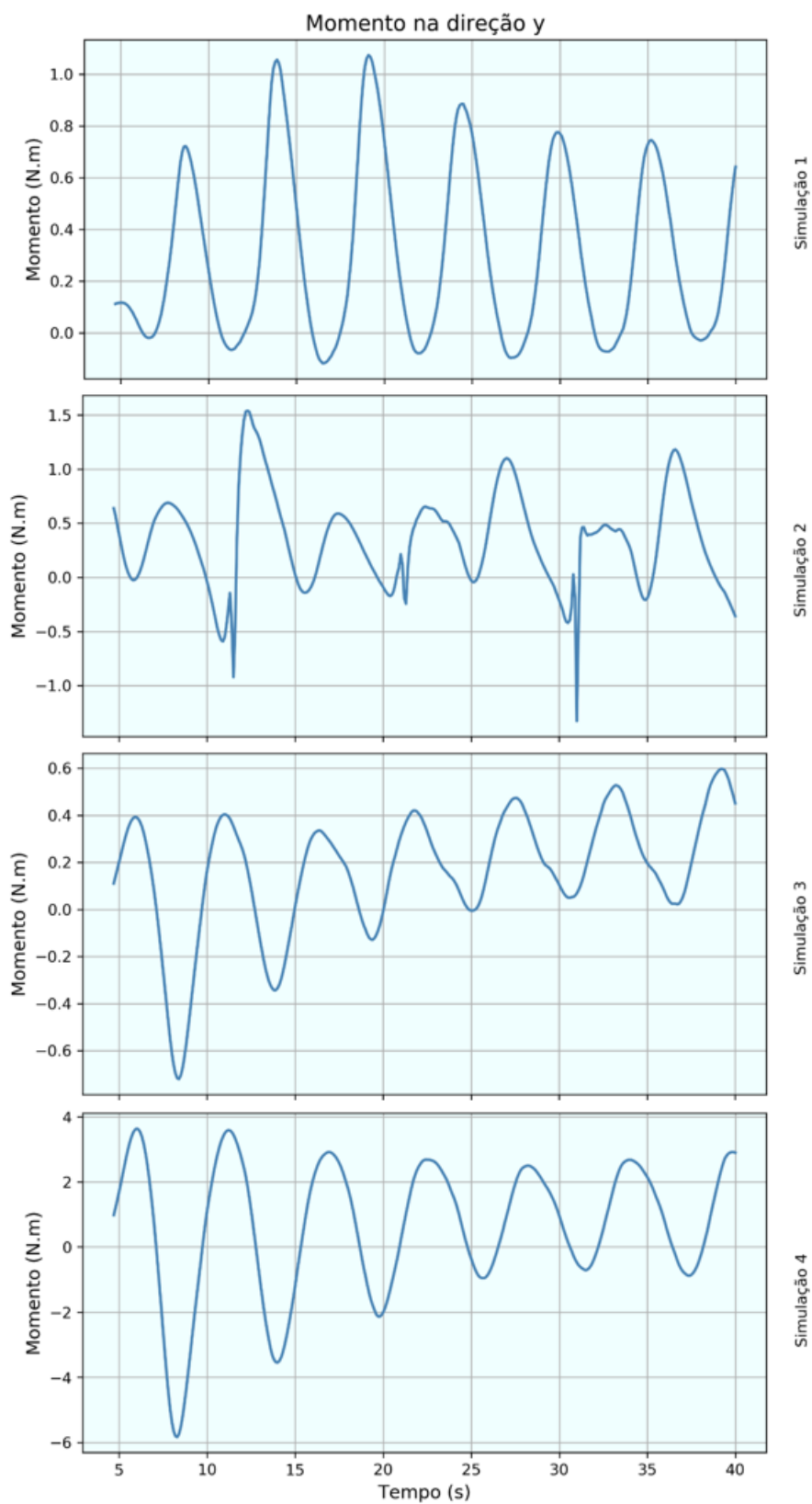
5.3.2 Momento em y

Momentos gerados entorno do eixo y causam esforços de torção sobre o eixo axial do pilar, sendo esses torsões provenientes das forças no plano horizontal.

Os momentos torsões apresentados na FIGURA 26 se referem as simulações 1, 2, 3 e 4.

Embora as forças geradoras dos momentos torsões serem de elevada intensidade global, a parcela que atua como causa deste efeito é proveniente das forças viscosas. Portanto, o esforço resultante se torna de baixa magnitude (de 1,0 a 6,0 N.m). Ao se comparar as simulações 3 e 4 percebe-se um aumento expressivo no momento, causado pelo aumento na rugosidade relativa.

O comportamento do esforço ao longo do tempo segue o padrão da força de maior predominância, nesse caso as forças viscosas em x . Sendo observada assimetria na intensidade segundo os sentidos e a irregularidade no ciclo da onda, como na simulação 2.

FIGURA 26 – MOMENTO EM y 

FONTE: O autor (2019).

TABELA 11 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DOS MOMENTOS EM y

Simulação		Tempo (s)	Momento (N.m)		
			Inercial	Viscosa	Total
S1	Máx	19,1	0,12	0,96	1,07
S1	Mín	16,5	0,09	-0,21	-0,12
S2	Máx	12,3	0,00	1,54	1,54
S2	Mín	31,0	0,00	-1,33	-1,33
S3	Máx	39,2	0,00	0,60	0,60
S3	Mín	8,4	0,00	-0,72	-0,72
S4	Máx	6,0	0,00	3,63	3,63
S4	Mín	8,3	0,00	-5,84	-5,84

FONTE: O autor (2019).

A TABELA 11 mostra que ao se dobrar a rugosidade relativa o momento torsor aumenta entre 6 e 8 vezes, apesar da intensidade do esforço continuar insignificante comparado aos outros esforços.

5.3.3 Momento em z

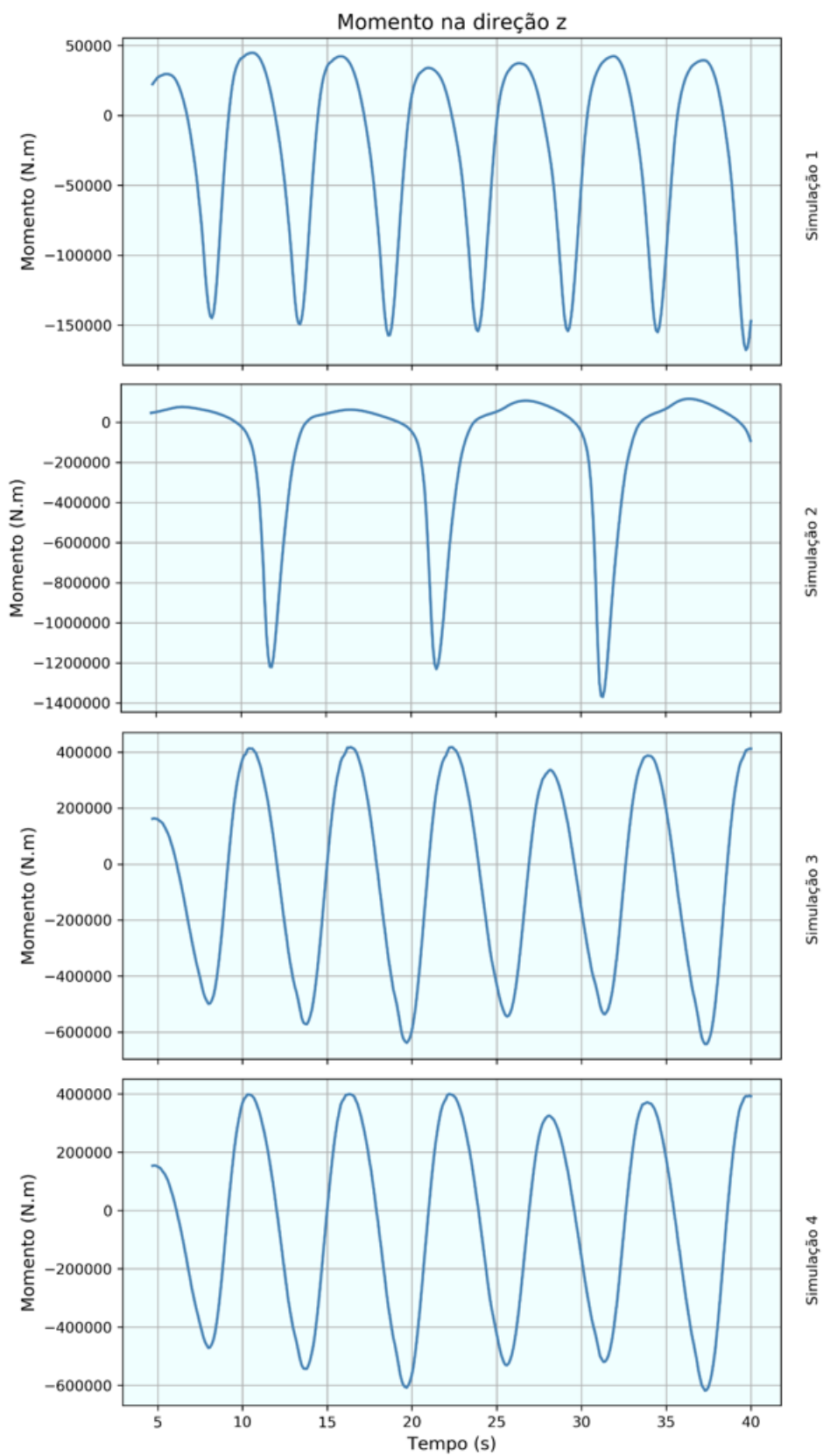
O maior esforço de momento fletor causado pelas ondas é entorno do eixo z , onde as forças em x têm maior intensidade e as duas parcelas (em x e y) contribuem para o momento fletor. Sendo assim, espera-se valores proporcionais as forças globais em x , uma vez que as forças axiais geradas no eixo y implicam em esforços pouco significante.

Os gráficos da FIGURA 27 correspondem as simulações 1, 2, 3 e 4.

O comportamento regular e a assimetria atribuída aos esforços provém das forças geradoras que mais contribuem para estes. Em todos os cenários os momentos têm maiores valores no sentido negativo.

A preponderação das forças inerciais encobrem as características irregulares da força em y da simulação 2, portanto os efeitos viscosos para momentos fletores no eixo perpendicular a propagação das ondas são negligenciáveis.

Considerando o centro de pressão da força em x , as simulações 3 e 4 (apesar de terem maior braço de alavanca) não apresentam os maiores momentos. Isso ocorre porque a força exercida sobre o pilar na simulação 2 é suficiente para gerar momentos fletores ainda maiores. Conclui-se, assim, que a amplitude da onda influencia de forma mais expressiva do que o braço de alavanca.

FIGURA 27 – MOMENTO EM z 

FONTE: O autor (2019).

Os instantes onde ocorrem os maiores e menores momentos fletores, bem como suas intensidades, estão apresentados na TABELA 12.

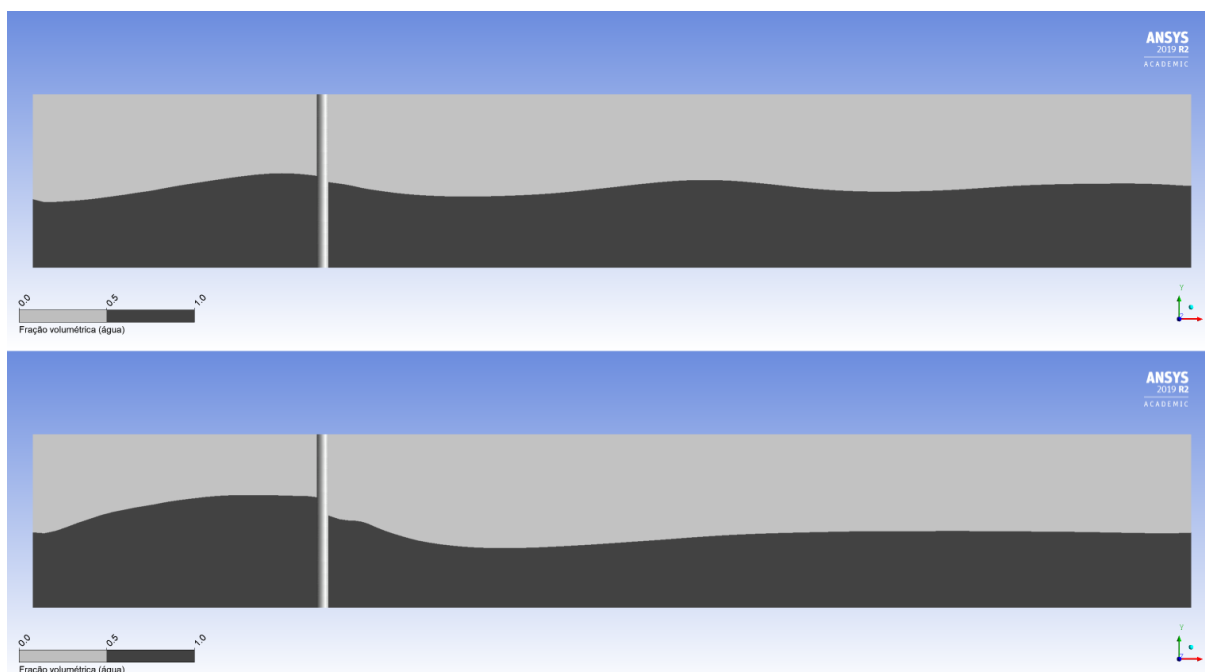
TABELA 12 – MÁXIMOS E MÍNIMOS DOS MOMENTOS EM z

Simulação		Tempo (s)	Momento (N.m)		
			Inercial	Viscosa	Total
S1	Máx	10,6	44.803,94	38,49	44.842,43
S1	Mín	39,7	-167.515,69	-316,64	-167.832,33
S2	Máx	36,4	116.492,96	260,47	116.753,43
S2	Mín	31,3	-1.367.758,70	-1.397,35	-1.369.156,05
S3	Máx	16,4	417.428,18	192,67	417.620,85
S3	Mín	37,3	-642.029,13	-938,64	-642.967,77
S4	Máx	22,2	399.175,29	991,09	400.166,38
S4	Mín	37,3	-613.756,69	-4.574,10	-618.330,79

FONTE: O autor (2019).

A seguir outros resultados são apresentados. Na FIGURA 28 tem-se o formato das ondas simuladas nos cenários 1 e 2. A imagem de cada uma representa o formato da onda no instante de máxima força na direção x , ou seja, tem-se representado o instante 39,7s para a simulação 1 e 31,2s para a simulação 2.

FIGURA 28 – ONDA SIMULAÇÃO 1 E 2

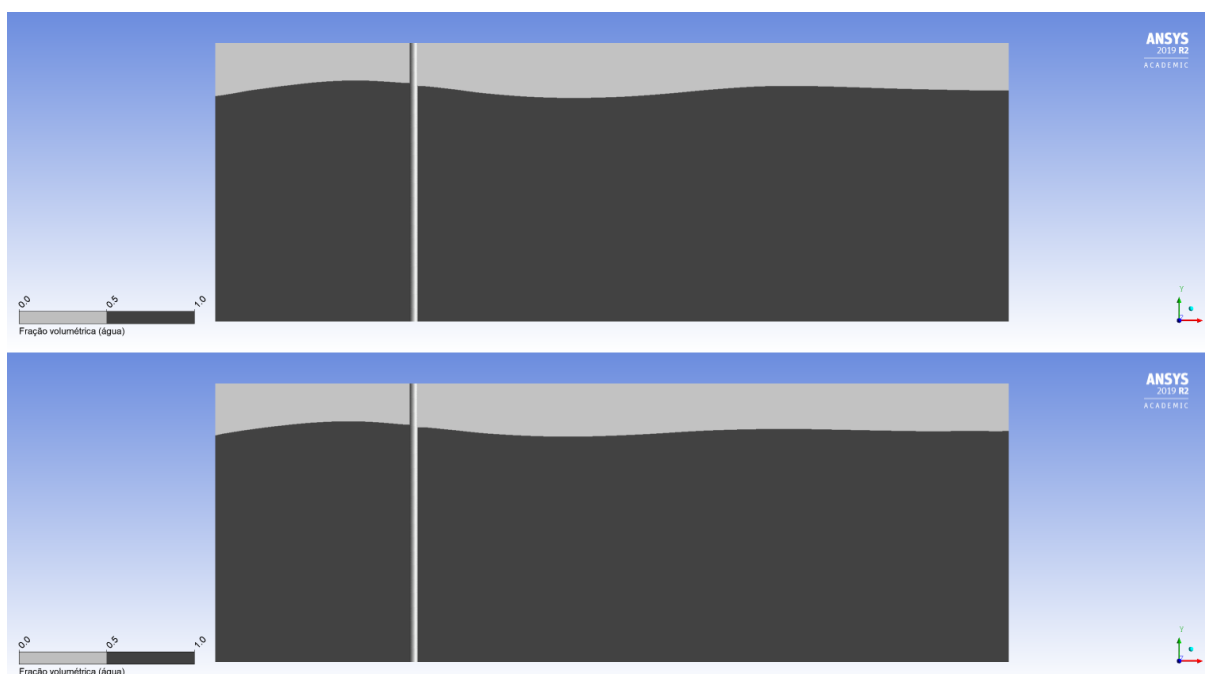


FONTE: O autor (2019).

NOTA: Sup.: Simulação 1; Inf.: Simulação 2

Na FIGURA 29 estão representadas os formatos das ondas da simulação 3 e 4, ambas em seu momento de máxima força em x , ou seja, nos instantes 19,6s e 37,1s respectivamente.

FIGURA 29 – ONDA SIMULAÇÃO 3 E 4



FONTE: O autor (2019).

NOTA: Sup.: Simulação 3; Inf.: Simulação 4

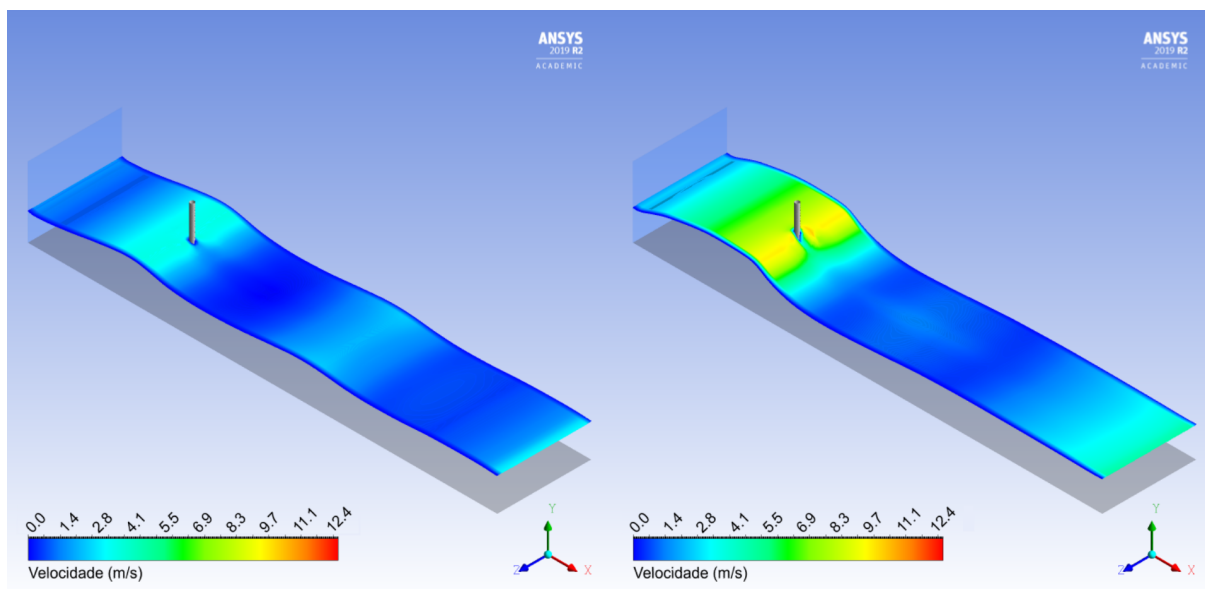
Nas FIGURA 28 e FIGURA 29 estão representados os formatos da onda no plano xy com $z=10$ (centro do pilar).

As maiores velocidades observadas nas simulações estão presentes no contorno logo abaixo da superfície livre, representadas nas FIGURA 30 e FIGURA 31. Observa-se a maior velocidade na simulação 2, sendo esta responsável pelas maiores forças em x dentre todas as simulações.

Embora as vorticidades sejam influenciadas pelas velocidades e geometria do pilar, não houve mudanças significativa nas características do pilar, podendo assim dizer que a vorticidade se comportou proporcionalmente à velocidade.

Estão representadas nas FIGURA 32 e FIGURA 33 as linhas de fluxo, suas velocidades e as regiões de maior intensidade dos vórtices. Na FIGURA 32 estão representadas as simulações 1 e 2. Sendo gerados contornos que contemplam vorticidades de até $2,41\text{s}^{-1}$ para a simulação 1 e $6,13\text{s}^{-1}$ para a simulação 2. Para a FIGURA 33 esses contornos foram limitados em $1,48\text{s}^{-1}$ para a simulação 3 e $1,57\text{s}^{-1}$ para a simulação 4.

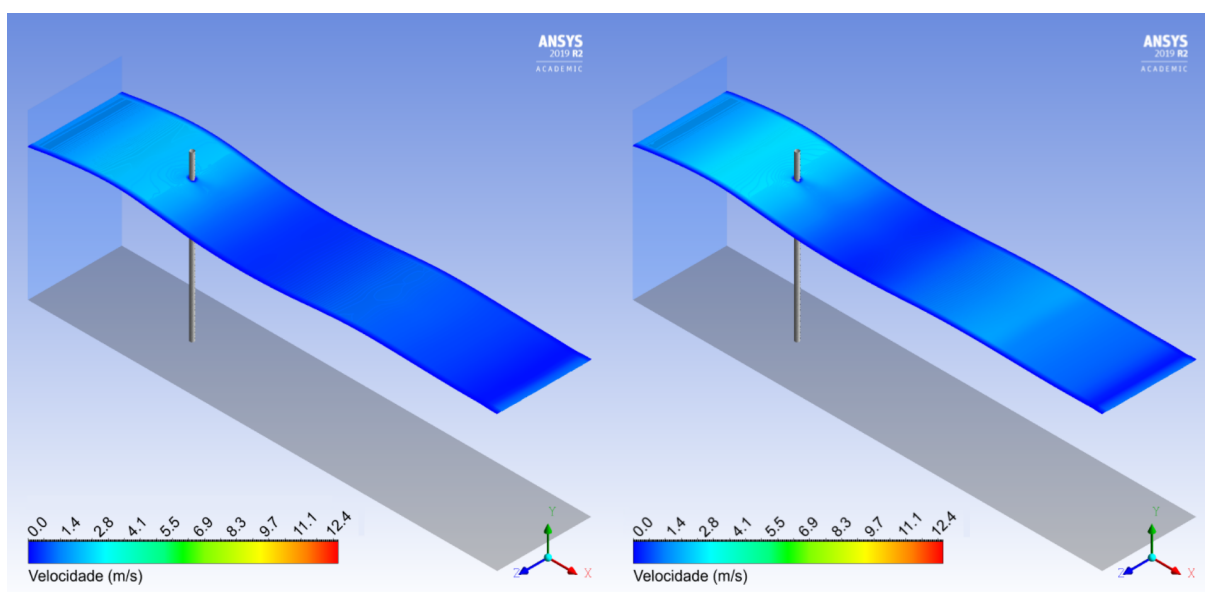
FIGURA 30 – VELOCIDADE SUPERFICIAL SIMULAÇÃO 1 E 2



FONTE: O autor (2019).

NOTA: Esq.: Simulação 1; Dir.: Simulação 2

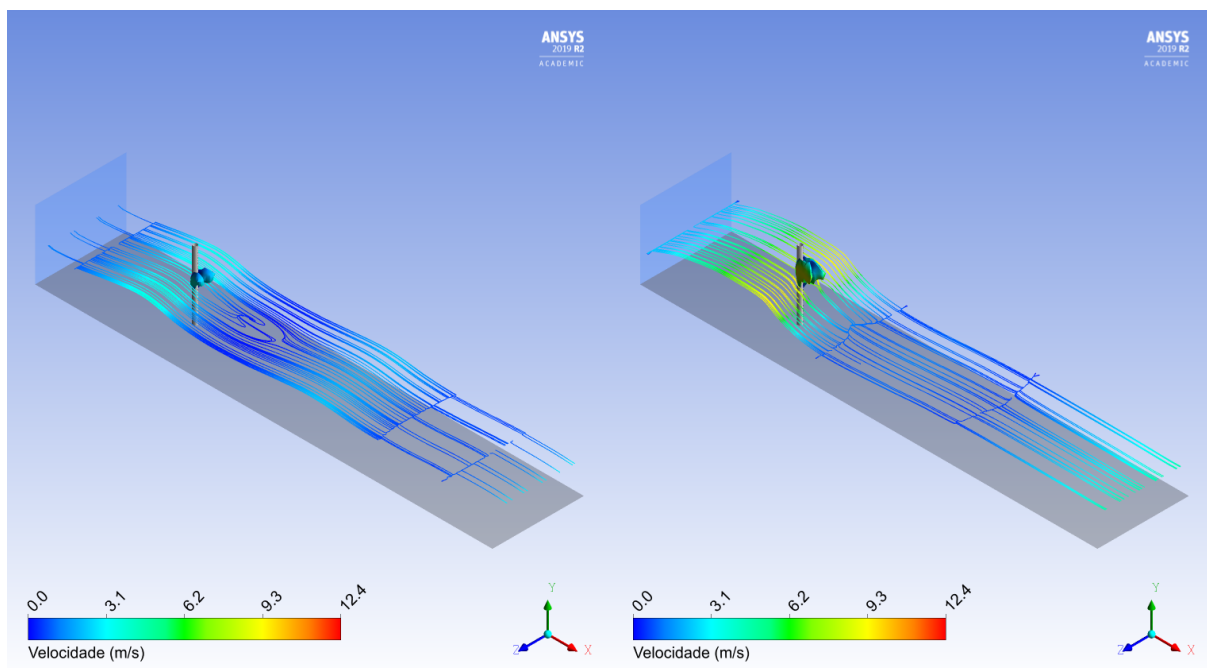
FIGURA 31 – VELOCIDADE SUPERFICIAL SIMULAÇÃO 3 E 4



FONTE: O autor (2019).

NOTA: Esq.: Simulação 3; Dir.: Simulação 4

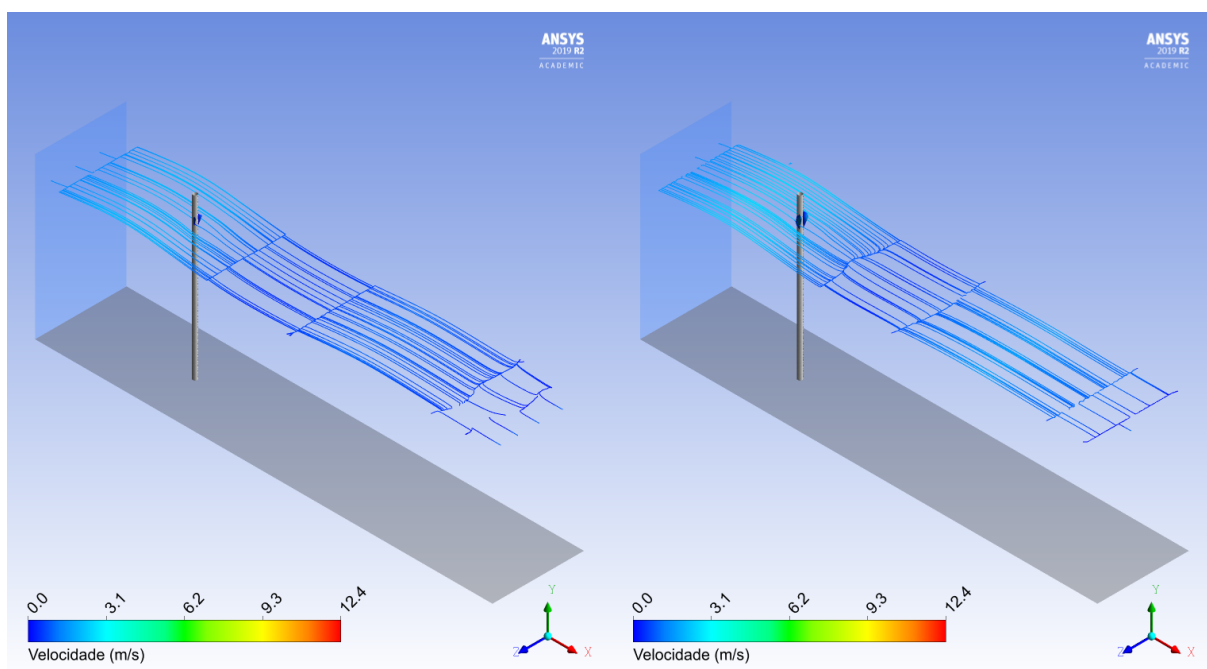
FIGURA 32 – VORTICIDADE SOBRE O PILAR - SIMULAÇÃO 1 E 2



FONTE: O autor (2019).

NOTA: Esq.: Simulação 1; Dir.: Simulação 2

FIGURA 33 – VORTICIDADE SOBRE O PILAR - SIMULAÇÃO 3 E 4



FONTE: O autor (2019).

NOTA: Esq.: Simulação 3; Dir.: Simulação 4

5.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Zang et al. (2010), avaliaram as forças de uma onda sobre um pilar cilíndrico com medição direta das ações no pilar. Bihs et al. (2017) trata da avaliação de um modelo numérico em CFD para determinar as ações sobre um pilar cilíndrico segundo a elevação da superfície livre, sendo que este último utilizou o trabalho de Zang et al. (2010) para comparação.

O tanque de onda utilizado por Zang et al. (2010) tem 10,0m de comprimento, 2,0m de largura e com a lâmina d'água a 0,505m de profundidade. O pilar cilíndrico foi posicionado a 5,5m da face de entrada das ondas e o sistema conta com absorção de ondas. Portanto o gerador de ondas inseriu seis ondas no tanque durante apenas 10s fazendo com que a elevação da superfície tivesse comportamento crescente seguido de uma redução (FIGURA 9).

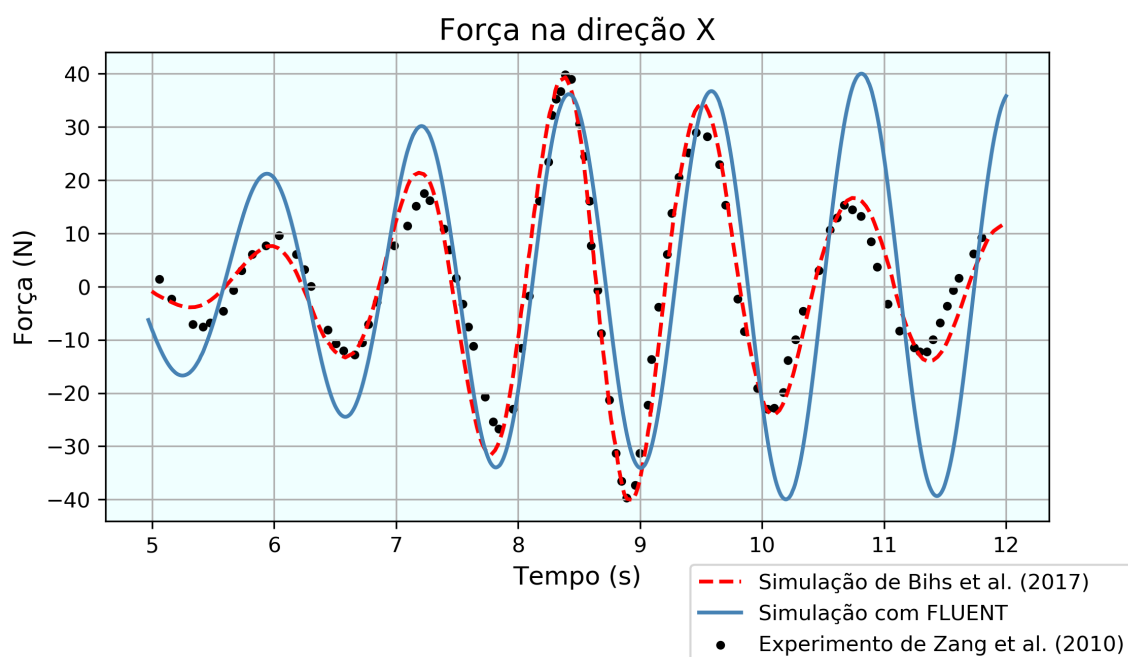
O modelo de onda utilizado no estudo para validação das simulações deste trabalho tem as seguintes características:

TABELA 13 – PARÂMETRO DA ONDA UTILIZADO PARA VALIDAÇÃO

Autores	Período (s)	Comprimento (m)	Altura (m)	Regime de propagação
Zang et al. (2010) e Bihs et al. (2017)	1,22	2,30	0,07	Águas intermediárias

FONTE: O autor (2019).

FIGURA 34 – FORÇA EM x (SIMULAÇÃO DE VALIDAÇÃO)



FONTE: O autor (2019).

A força em x sobre o pilar foi o parâmetro utilizado para comparação dos resultados, pois corresponde a ação de maior magnitude e de menor influência dos efeitos de turbulência, o que torna os dados de melhor visualização.

Para a simulação de validação foram utilizados os dados da TABELA 13 e 0,25m para o diâmetro do pilar. Também foram suprimidos sistemas de absorção de ondas e o parâmetro de rugosidade do pilar. Assim chegou-se aos dados plotados na FIGURA 34.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao comparar as simulações conclui-se que ondas de maior comprimento geram maiores ações sobre o pilar, contudo as forças horizontais estão mais sujeitas à influência da amplitude das ondas, como observou-se na Simulação 2. Ondas de maiores períodos induzem maiores velocidades e, conseqüentemente, geram maiores ações sobre as estruturas.

Observou-se que ondas em regime de propagação de águas intermediárias tendem a ter forças horizontais de maior intensidade no sentido da propagação, já para ondas de águas profundas, essas forças tendem a ser de mesma intensidade em ambos sentidos. Observada a menor variação para as forças em z .

Forças horizontais compõem a maior parcela do carregamento a que um pilar está sujeito principalmente pela componente inercial. As forças horizontais que causam momento torsor no pilar provém principalmente das forças viscosas, embora estes esforços sejam de baixa magnitude.

Os resultados mostraram que forças na direção x têm seu centro de pressão sempre abaixo do nível médio da superfície livre, indicando que a distribuição das forças nessa direção se dá de forma mais homogênea quando comparada à forças na direção z , havendo nessas um predomínio do centro de pressão próximo ao nível médio da superfície. Conclui-se que as forças horizontais em z concentram-se na camada mais superficial. Além disso, conclui-se que ondas com maior velocidade induzem a geração de vórtices causadores de turbulência, fenômeno presente nos resultados das forças em z .

Notou-se que as forças transversais presentes no pilar são pouco influenciadas pelo tipo da onda, levando a entender que o número KC representa de forma mais clara o comportamento da distribuição das forças e, associados a ele, está a geração de vórtices a jusante do pilar, que se tornam mais intensos com o aumento da velocidade da onda. Em nenhum dos cenários o comportamento dos vértices se assemelha, porém as ações continuam proporcionais ao número KC.

As forças verticais presentes no pilar são causadas puramente por forças viscosas, ficando evidenciado nos resultados das simulações que o aumento da rugosidade afeta significativamente a distribuição dessas ações. Porém, sua magnitude permanece insignificante frente as forças em x e z , quase não influenciando nos momentos nessas direções. Os momentos na base do pilar, oriundos das ações no plano xy , são proporcionais às forças em x , devido a insignificância do carregamento vertical.

Por fim, ao se validar o modelo implementado nas simulações, observou-se um desvio maior nas ações nos primeiros segundos de simulação indicando que medidas de calibração devem ser tomadas para melhorar a entrada de ondas, assim como sua saída. Apesar dessa divergência, o modelo entregou resultados satisfatórios quando se refere aos limites das forças, aproximando-se de forma razoável dos valores medidos, além de representar de forma fidedigna

o comportamento da onda.

Tratando-se de cenários hipotéticos, as ondas presentes nas simulações podem não ocorrer em regiões do litoral brasileiro. Em latitudes mais elevadas encontram-se ondas com características mais semelhantes com as ondas implementada nas simulações, como no Golfo do México. Nesta localidade também há campos de exploração de petróleo com estruturas *offshore* sujeitas a ações deste tipo. Recomenda-se, portanto, que simulações dessa natureza sejam implementadas com ondas pertinentes ao local que se deseja analisar, para que os resultados tragam maior confiabilidade.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a adoção de ondas com menores amplitudes e maior variação no período, afim de identificar se o comportamento do carregamento sobre o pilar e verificar se os fenômenos de vorticidade e turbulência permanecem alterando a regularidade das forças em z , podendo também verificar tais condições em águas rasas.

REFERÊNCIAS

- BIHS, Hans et al. Numerical investigation of focused waves and their interaction with a vertical cylinder using REEF3D. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, American Society of Mechanical Engineers.
- BROWN, Evelyn. **Waves, tides and shallow-water processes**. Gulf Professional Publishing, 1999.
- CHANG, Kai S. **Transverse forces on cylinders due to vortex shedding in waves**. 1964. Tese (Doutorado) – Massachusetts Institute of Technology, Department of Naval Architecture.
- CHOI, SJ; GUDMESTAD, OT. Breaking wave forces on a vertical pile. **Volume 129 of WIT Transactions on the Built Environment**, 2013.
- ENGINEERS, US Army Corps Of. Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100. **US Army Corps of Engineers, Washington, DC**, 2002.
- EYMARD, Robert; GALLOUËT, Thierry; HERBIN, Raphaële. Finite volume methods. **Handbook of numerical analysis**, Elsevier, 2000.
- GARRISON, Tom S. **Essentials of oceanography**. Cengage Learning, 2012.
- GENTAZ, Lionel et al. Calculation of high-order wave loads on a vertical circular cylinder using the SWENSE method. **In: 32TH International Workshop on Water Waves and Floating Bodies**, 2017.
- HAIDER, Jibrán. **Numerical Modelling of Evaporation and Condensation Phenomena**, 2013. Tese (Doutorado).
- HAYATDAVOODI, Masoud; SEIFFERT, Betsy; ERTEKIN, R Cengiz. Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. Part II: Deck with girders. **Coastal Engineering**, Elsevier, 2014.
- HERBICH, John B. Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Volume 2: Offshore Structures, Marine Foundations, Sediment Processes and Modeling. **Houston, Texas: Gulf Publishing Company**, 1991.

- HIRT, Cyril W; NICHOLS, Billy D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of computational physics**, Citeseer, 1981.
- JOURNÉE, JMJ; MASSIE, WW. Offshore Hydromechanics, 2001. **Lecture notes on offshore hydromechanics for Offshore Technology students**. 2001.
- KALOFOTIAS, Filippos. **Study for the Hull shape of a wave energy converter-point absorber; design optimization & modeling improvement**. 2016. Diss. (Mestrado) – University of Twente.
- KAMATH, Arun; BIHS, Hans; ARNTSEN, Oivind A. Calculation of wave forces on cylindrical piles using a 3D numerical wave tank. In: **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS**. ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2013.
- KAMPION, Drew. **The Book of Waves: form and beauty on the ocean**. Rinehart, 1997.
- LAIRD, Alan DK; JOHNSON, Charles A; WALKER, Robert W. Water eddy forces on oscillating cylinders. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, 1960.
- LE MEHAUTE, Bernard. **An introduction to hydrodynamics and water waves**. Springer Science & Business Media, 2013.
- LI, Zhaobin et al. Comparison of wave modeling methods in CFD solvers for ocean engineering applications. **Ocean Engineering**, Elsevier, 2019.
- LIU, Zhenghao; WAN, Decheng. **Numerical Simulation of Regular Waves onto a Vertical Circular Cylinder**, 2011.
- LOH, Teng Tan et al. Simulation and analysis of wave-structure interactions for a semi-immersed horizontal cylinder. **Ocean Engineering**, Elsevier, 2018.
- MACCAMY, RC; FUCHS, R Aam. **Wave forces on piles: a diffraction theory**, 1954.
- MALISKA, Clovis Raimundo. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional** . Grupo Gen-LTC, 2004.
- MORISON, JR et al. **The force exerted by surface waves on piles**, **Petroleum Transactions**, **A. 1**. ME, 1950.
- MUNK, Walter H. **Origin and generation of waves**, 1951.

MUNSON, Bruce R; YOUNG, DF; OKIISHI, TH. **Fundamentos de Mecânica dos Fluidos**. 4ª. Ed, 1997.

NETO, M. L. da C. Um estudo do fenômeno explosão e das ondas de choque utilizando a fluidodinâmica computacional, 2015.

OSSES, Juan. **O método dos volumes finitos**, 2016. Disponível em:
<<https://www.esss.co/blog/o-metodo-de-volumes-finitos/>>.

PAULSEN, Bo Terp; BREDMOSE, Henrik; BINGHAM, Harry B. An efficient domain decomposition strategy for wave loads on surface piercing circular cylinders. **Coastal Engineering**, Elsevier, 2014.

POSTERARI, Jessica Borges. Análise da incidência de ondas sobre os pilares de sustentação de uma plataforma de petróleo por meio de simulação numérica, 2015.

RAMIREZ, Jorge. **Wave Run-Up on Offshore Wind Turbines**. River Publishers, 2012.

SKJELBREIA, Lars; HENDRICKSON, James. Fifth order gravity wave theory. **Coastal Engineering Proceedings**, 1960.

SUMER, B Mutlu; FREDSE, Jørgen; CHRISTIANSEN, Niels. Scour around vertical pile in waves. **Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering**, American Society of Civil Engineers, 1992.

VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson education, 2007.

VIEIRA, Débora Gleice da Silva Del et al. Modelagem da interação fluido-estrutura usando o método da fronteira imersa: aplicação ao estudo do escoamento em torno de um cilindro confinado. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2009.

VIERA, Danilo R. **Danilo Viera**. , 2007. Disponível em:
<https://www.danilorvieira.com/disciplinas/iof1202/ofd_capitulo14.php>.

WINDT, Christian et al. On the Assessment of Numerical Wave Makers in CFD Simulations. **Journal of Marine Science and Engineering**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019.

ZANG, Jun et al. Steep wave and breaking wave impact on offshore wind turbine foundations—ringing re-visited. In: INTERNATIONAL Workshop on Water Waves and Floating Bodies (IWWF25), Harbin, China, May, 2010.