

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

GUILHERME FUHRMEISTER VARGAS

OSCILLATING WAVE SURGE CONVERTERS: MODELAGEM DA HIDRODINÂMICA E
DO POTENCIAL ENERGÉTICO EM PARQUES DE GERAÇÃO POR SIMULAÇÃO
NUMÉRICA DE GRANDES ESCALAS

PORTO ALEGRE

2022

GUILHERME FUHRMEISTER VARGAS

OSCILLATING WAVE SURGE CONVERTERS: MODELAGEM DA HIDRODINÂMICA E DO POTENCIAL ENERGÉTICO EM PARQUES DE GERAÇÃO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE GRANDES ESCALAS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de doutor.

Orientadores: Edith Beatriz Camaño Schettini e Alexandre Beluco

PORTO ALEGRE

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Fuhrmeister Vargas, Guilherme
Oscillating Wave Surge Converters: Modelagem da
Hidrodinâmica e do Potencial Energético em Parques de
Geração por Simulação Numérica de Grandes Escalas /
Guilherme Fuhrmeister Vargas. -- 2022.
214 f.
Orientadores: Edith Beatriz Camaño Schettini,
Alexandre Beluco.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Conversor de energia das Ondas. 2. Computational
Fluid Dynamics. 3. Modelagem Numérica. 4. Large Eddy
Simulation. 5. OpenFOAM. I. Camaño Schettini, Edith
Beatriz, orient. II. Beluco, Alexandre, orient. III.
Título.

GUILHERME FUHRMEISTER VARGAS

OSCILLATING WAVE SURGE CONVERTERS: MODELAGEM DA HIDRODINÂMICA E DO POTENCIAL ENERGÉTICO EM PARQUES DE GERAÇÃO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE GRANDES ESCALAS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de doutor.

Defendido e aprovado em: Porto Alegre, 03 de outubro de 2022.

Profa. Dra. Edith Beatriz Camaño Schettini – IPH – UFRGS
Orientadora

Prof. Dr. Alexandre Beluco – IPH – UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Elton Gimenez Rossini – UERGS
Examinador

Profa. Dra. Andrea Fischer – IFSul
Examinadora

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira – IPH – UFRGS
Examinador

Dedico este trabalho à minha querida mãe Elizabeth Fuhrmeister, aos meus avós, Vitor Fuhrmeister (*in memoriam*) e Vilma Schröder Fuhrmeister, ao meu companheiro Matheus Martins Alves, aos meus orientadores e aos meus amigos, todos estes que estiveram comigo durante esta jornada, me dando forças e me incentivando a nunca desistir dos meus sonhos e objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha amada mãe Elizabeth Fuhrmeister, por todo o carinho e suporte dado ao longo de toda a minha vida, principalmente por fazer de mim o homem que sou hoje, com princípios, valores, ética, caráter e um guerreiro que nunca desiste.

Agradeço aos meus queridos avós do coração, Vitor Fuhrmeister (*in memoriam*) e Vilma Schröder Fuhrmeister, por todo o carinho, amor e dedicação em etapas fundamentais da minha vida, celebrando comigo cada pequena vitória e me incentivando a nunca desistir.

Agradeço ao meu companheiro e amigo, Matheus Martins Alves, por todo o carinho, apoio, incentivo, dedicação e suporte em diversos obstáculos e dificuldades enfrentados durante esta jornada, principalmente por me dar forças quando tudo parecia não ter solução.

Agradeço aos meus queridos amigos Ivocir Paulo Souza Oliveira e Maria Regina Ferreira, por me acolherem, respectivamente, como filho e afilhado de coração, sempre me dando forças e me incentivando a nunca deixar de ter fé e a acreditar em mim mesmo.

Agradeço aos meus tios, Evelise Biavaschi e Hugo Biavaschi, por todo o apoio e carinho.

Agradeço à minha sogra Bernardina Rodrigues Martins, pelo carinho, incentivo, apoio e força, durante diversas etapas desta jornada.

Agradeço aos meus amigos do coração, André Tofoli Paschoal e Guilherme Peretti, por estarem sempre comigo desde a minha graduação, me apoiando, aconselhando e incentivando a nunca desistir e me dando forças para vencer os desafios da vida.

Agradeço aos meus orientadores, Edith Beatriz Camaño Schettini e Alexandre Beluco, por todo o carinho, apoio, ajuda, aconselhamento e incentivo, valores estes fundamentais em todas as etapas da pós-graduação, muito obrigado por acreditarem em mim e me darem forças, nunca me deixando desistir.

Agradeço ao meu colega de laboratório, Bruno Alvarez Scapin, por todo o apoio, ajuda, incentivo e companheirismo, principalmente durante o final do meu doutorado.

Agradeço a todos meus amigos, em especial à Luísa Vieira Lucchese, que, independente da distância, sempre torceu e me apoiou durante a graduação e a pós-graduação.

Você é incrível, insubstituível, é forte. Não acredite quando disserem que não pode ir além, porque você pode. Você vai lutar, às vezes vai desanimar, querer fracassar, fugir, esconder do mundo e de si, mas você vai vencer!

Leonardo da Vinci

RESUMO

No contexto atual do cenário global, o *Oscillating Wave Surge Converter* (OWSC) representa um dos sistemas mais promissores para a geração de energia elétrica por meio das ondas dos mares e oceanos. Esta tecnologia, baseada na captação do movimento horizontal das ondas, encontra-se em escala pré-comercial de desenvolvimento e pode, inclusive, ser associada com outras fontes de energia renováveis, como as energias eólica e solar. Atualmente, a modelagem numérica computacional corresponde à principal ferramenta utilizada para o estudo e o desenvolvimento desta e de diversas outras tecnologias. Sendo assim, pode ser observado que os trabalhos já realizados, acerca do assunto, ainda não apresentaram a aplicação da modelagem da turbulência segundo o método *Large Eddy Simulation* (LES) na análise destes conversores. Por outro lado, os estudos existentes voltados à hidrodinâmica de vários dispositivos atuando em conjunto baseiam-se, em sua grande maioria, em modelos simplificados de escoamento potencial. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo principal utilizar a abordagem numérica em LES para a modelar e estudar a ação de ondas regulares sobre um sistema composto por três placas iguais, que representam o comportamento hidrodinâmico presente nos parques de geração de energia (constituídos por vários conversores similares em movimento). As simulações são realizadas por meio do código computacional *OpenFOAM* v. 4.1, em conjunto com sua extensão *OlaFlow*, que possibilitam o tratamento da superfície livre pelo método conhecido como *Volume of Fluid* (VOF), bem como o movimento de corpo rígido pela metodologia *Mesh Morphing Method*. Validações numéricas permitiram concluir que o modelo *Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity* (WALE) é aquele que se mostra mais adequado para as simulações propostas. Por meio dos resultados obtidos, verificou-se que o aumento da altura e do período de onda resultam em uma maior turbulência na região entre as placas, efeitos estes, que, quando combinados, podem ocasionar a diminuição do comportamento oscilatório das estruturas. A ocorrência de ondas estacionárias demonstrou ser benéfica para a geração de energia, pois estas potencializam a oscilação dos conversores. Diversos testes realizados permitiram identificar que o espaçamento ideal entre as estruturas deva ser igual a 1,5 vezes a altura das placas destes conversores. Observa-se, também, que os parques devem ser construídos em terrenos com declividades de fundo inferiores a 10°, uma vez que, em declividades superiores, o sistema tem a sua captação de energia reduzida. Certas modificações no *layout* dos parques podem resultar em um aumento de até 30% sobre a energia captada pelas placas, sendo, portanto, fundamentais para um projeto adequado de um parque de ondas constituído por vários OWSC's.

ABSTRACT

In the current global scenario, the Oscillating Wave Surge Converter (OWSC) represents one of the most relevant systems for converting the ocean wave energy into electricity. This technology is based on capturing the horizontal movement of water waves and is at a pre-commercial scale of development. It can also be associated with other renewable energy sources, such as wind and solar energy. Computational numerical modelling is currently the main tool used for the analysis and development of this and several other technologies. Therefore, it can be observed that the research carried out on this subject did not present the application of turbulence modelling according to the Large Eddy Simulation (LES) method in the study of these converters. On the other hand, current studies focused on the hydrodynamics of several converters oscillating together are mostly based on simplified models of potential flow. In this context, the main goal of the present work is to apply the LES modelling to study the influence of water waves on a system composed of three equal flaps, which represent the hydrodynamic behavior existing in the OWSC's farms (composed of several converters in motion). The simulations are performed using OpenFOAM v. 4.1 and its extension OlaFlow, which use the Volume of Fluid (VOF) method for the free surface modelling, while the rigid body dynamics is represented by the Mesh Morphing Method. Numerical validations led to the conclusion that the Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE) model is the most suitable for the simulations presented in this work. It is observed that the increase in wave height and period result in greater turbulence in the region between the flaps, these effects, when combined with each other, can cause a decrease in the oscillatory behavior of these structures. The occurrence of standing waves proved to be important for energy generation, as they intensify the oscillatory behavior of the converters. Several experiments allowed the identification of the ideal spacing, which must be considered in the design of the farms, this value must be equal to 1.5 times the height of the flaps of these converters. It is also observed that the farms must be located on bottoms with slopes lower than 10° , considering that, in the case of higher slopes, the system presents a reduction in the generation potential. Certain modifications applied to the layout of the OWSC's farms can result in an increase of up to 30% on the energy captured by the flaps, being fundamental for a proper design of the system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Divisão dos investimentos em energias oceânicas nos EUA entre os anos de 2008 e 2017	29
Figura 1.2 – Densidade da energia em kW/m ao longo do planeta	31
Figura 1.3 – Principais sistemas de conversão de energia das ondas e seu respectivo grau de amadurecimento como tecnologia	32
Figura 1.4 – Principais exemplos de OWSC's	34
Figura 1.5 – Sistema híbrido flutuante de conversão formado por OWSC's e uma turbina eólica.	34
Figura 2.1 – Principais zonas do relevo marinho.	38
Figura 2.2 – Detalhamento da plataforma continental.	39
Figura 2.3 – Períodos típicos e espectro de frequências dos principais tipos de onda	41
Figura 2.4 – Geração e dinâmica de ondas progressivas a partir da ação dos ventos	42
Figura 2.5 – Classificação das águas do oceano.....	43
Figura 2.6 – Elementos principais de uma onda progressiva	44
Figura 2.7 – Ábaco para a estimativa de H_b , supondo conhecidos o período, a altura de geração da onda em águas profundas e o ângulo de inclinação da praia	49
Figura 2.8 – Ábaco para a estimativa de hb , supondo conhecidos o período, a altura de quebra da onda e o ângulo de inclinação da praia	50
Figura 2.9 – Detalhes de uma onda estacionária	50
Figura 2.10 – Ábaco para determinação da teoria de onda a ser utilizada	53
Figura 2.11 – Comparação visual do aspecto da onda gerada segundo as diferentes teorias...54	
Figura 2.12 – Parâmetros utilizados nas expressões polinomiais da Teoria de Stokes de 5ª ordem.....	56
Figura 2.13 – Visualização de diferentes escalas de turbulência em um jato	59
Figura 2.14 – Esquema de uma cascata de energia típica de um escoamento turbulento e suas diferentes regiões.....	61
Figura 2.15 – Comparação visual entre as metodologias RANS, LES e DNS na representação de um campo de velocidades	63
Figura 2.16 – Comparação entre RANS, LES e DNS da velocidade instantânea em um ponto do escoamento turbulento.....	64
Figura 2.17 – Regiões de separação do escoamento, em função de gradientes adversos de pressão, ocasionadas pela presença de um obstáculo	65
Figura 2.18 – Lei da parede para o caso do escoamento sobre uma placa plana	67
Figura 2.19 – Detalhamento da região próxima à parede.....	67
Figura 2.20 – Etapas da modelagem numérica.....	69
Figura 2.21 – Tipos de malhas numéricas	71
Figura 2.22 – Exemplo de difusão numérica e do processo da atenuação da mesma pelo refinamento da malha de cálculo.....	75

Figura 2.23 – Principais modelos em RANS utilizados atualmente.....	79
Figura 2.24 – Princípio de funcionamento de um OWSC.....	82
Figura 2.25 – Esquema de funcionamento de um <i>Pendulor</i>	83
Figura 2.26 – Modelos de (a) <i>Oyster</i> , (b) <i>Waveroller</i> , (c) <i>Langlee</i>	85
Figura 2.27 – Campo de velocidades em torno de um módulo de <i>Waveroller</i> composto por três placas, sob diferentes alturas e períodos de onda.....	87
Figura 2.28 – Deformação da superfície da água e geração de vórtices durante um ciclo de oscilação da placa de um modelo experimental do <i>Oyster</i> , sob ação de uma onda com $H = 1,25\text{ m}$ e $T = 12,5\text{ s}$	88
Figura 2.29 – Variação da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada de OWSC's do tipo <i>Waveroller</i> e <i>Langlee</i> , em função do aumento de profundidade.....	90
Figura 2.30 – Variação da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função do aumento da altura de onda.....	91
Figura 2.31 – Variação da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função do aumento do período de onda.....	91
Figura 2.32 – Variação da potência captada por um OWSC de 18 m de largura em função do ângulo de propagação da onda incidente.....	92
Figura 2.33 – Eficiência dos OWSC's em função do seu grau de submergência.....	93
Figura 2.34 – Variação dos valores RMS do momento de inércia de massa adicionada e do momento de excitação, em função do aumento da largura de placa, considerando $H = 1,2\text{ m}$, $h = 10,9\text{ m}$, e períodos de onda entre 4 s e 14 s.....	95
Figura 2.35 – Variação da potência captada por um OWSC, em três profundidades distintas, com a espessura da placa.....	96
Figura 2.36 – Variação no fator de captura de um OWSC em função da espessura de placa..	96
Figura 2.37 – Influência da posição do centroide de um OWSC sobre seu fator de captura ...	97
Figura 2.38 – Variação do fator de captura de um OWSC em função da variação da massa da placa.....	98
Figura 2.39 – OWSC de estrutura formada por um semicone de seção oca.....	99
Figura 2.40 – Sequência de imagens demonstrando o fenômeno <i>Slamming</i> sobre um modelo reduzido (escala 1:40) de um OWSC do tipo <i>Oyster</i>	101
Figura 2.41 – Associação da amplitude angular atingida pela placa com a pressão dinâmica envolvida durante um evento do fenômeno de <i>Slamming</i>	103
Figura 2.42 – Comparação entre os campos de vorticidade e valores de pressão dinâmica em diferentes escalas geométricas.....	105
Figura 2.43 – Comparação entre a superfície livre da água em escala real e em escala reduzida.....	105
Figura 2.44 – Porcentagem de modificação nas alturas significativas de onda em função da construção de um parque de conversores.....	106
Figura 2.45 –Diferentes <i>layouts</i> de um parque de geração composto por 12 OWSC's.....	107

Figura 2.46 – Espaçamentos ideais para os diferentes tipos de <i>layout</i> , considerando dois modelos de OWSC e que a onda regular incide perpendicularmente à face frontal da placa.....	108
Figura 2.47 – <i>Layout</i> do novo parque de geração composto por 12 OWSC's	109
Figura 3.1 – Principais diretórios e arquivos do código <i>OpenFOAM</i> , necessários para rodar uma simulação típica deste trabalho em LES	118
Figura 3.2 – Domínio genérico utilizado nas simulações.....	123
Figura 3.3 – Forma genérica das placas retangulares utilizadas no trabalho	124
Figura 3.4 – Divisão do domínio de cálculo para discretização da malha numérica	125
Figura 4.1 – Domínio, características de placa e sondas de nível d'água utilizados na validação do modelo 2D.....	138
Figura 4.2 – Convergência da malha numérica com base nos valores RMS, <i>R2</i> e <i>NRMSE</i> da velocidade angular da placa, segundo os resultados experimentais apresentados por Wei et al. (2016).....	140
Figura 4.3 – Tempo total de simulação e respectivo espaço ocupado em disco rígido, em gigabytes, para cada grau de refinamento da malha numérica.....	141
Figura 4.4 – Comparação visual dos campos de velocidade, durante o instante de lançamento do jato observado em um caso de <i>Slamming</i> , considerando diferentes modelos de LES.....	144
Figura 4.5 – Comparação visual dos campos de velocidade, durante o instante da passagem de uma crista de onda sobre o OWSC em um caso de <i>Slamming</i> , para diferentes modelos de LES.....	145
Figura 4.6 – Comparação entre as séries temporais da amplitude angular e velocidade angular da placa, levando em consideração os modelos de Smagorinsky II, WALE e os resultados experimentais de Wei et al. (2016)	146
Figura 4.7 – Comparação entre as séries temporais do momento de excitação do conversor, levando em consideração os modelos de Smagorinsky II, WALE e os resultados numéricos de Wei et al. (2016)	147
Figura 4.8 – Comparação entre as séries temporais das sondas de nível A e B, levando em consideração os modelos Smagorinsky II, WALE e os resultados experimentais ajustados de Wei et al. (2016)	148
Figura 4.9 – Comparação entre os instantes do evento <i>slamming</i> , abordado pelos autores Henry et al. (2014b) e Wei et al. (2016), com o modelo WALE 2D adotado no presente trabalho.....	149
Figura 4.10 – Adaptações realizadas na largura do domínio da Figura 4.1, no intuito de possibilitar uma validação numérica tridimensional do modelo de LES	150
Figura 4.11 – Comparação entre as séries temporais da amplitude angular e velocidade angular da placa, levando em consideração o modelo WALE 3D e os resultados experimentais de Wei et al. (2016).....	151
Figura 4.12 – Comparação visual dos campos de velocidade, durante os instantes que demarcam a passagem de uma crista de onda sobre o OWSC e o lançamento de um jato para longe da estrutura, durante um evento de <i>Slamming</i> (Modelo 3D).....	153

Figura 4.13 – Comparação entre os instantes do evento <i>slamming</i> , abordado pelos autores Henry et al. (2014b) e Wei et al. (2016), com o modelo WALE 3D adotado no presente trabalho.....	154
Figura 4.14 – Detalhamento do domínio utilizado na etapa de comparação entre os modelos 2D e 3D, considerando três placas dispostas em série.....	156
Figura 4.15 – Comparação entre os campos de velocidade dos modelos WALE 2D e 3D, durante a passagem de uma crista de onda sobre três placas iguais dispostas em série	156
Figura 4.16 – Comparação entre as séries temporais da amplitude angular atingida por três placas iguais dispostas em série, obtidas por meio dos modelos 2D e 3D.....	157
Figura 4.17 – Comparação entre as séries temporais da velocidade angular atingida por três placas iguais dispostas em série, obtidas por meio dos modelos 2D e 3D.....	157
Figura 4.18 – Comparação entre as séries temporais da força horizontal atuante em três placas iguais dispostas em série, obtidas por meio dos modelos 2D e 3D.....	158
Figura 4.19 – Comparação entre as séries temporais da força vertical atuante em três placas iguais dispostas em série, obtidas por meio dos modelos 2D e 3D.....	158
Figura 4.20 – Comparação entre as séries temporais do momento de excitação experimentado pelas três placas iguais dispostas em série, obtidas por meio dos modelos 2D e 3D	159
Figura 4.21 – Variação observada nos campos de velocidade em função do aumento da altura de onda, considerando a ação de três conversores iguais dispostos em série	163
Figura 4.22 – Valores RMS obtidos para a amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e força vertical, considerando a ação de três placas iguais dispostas em série, sob o efeito da variação da altura de onda.	164
Figura 4.23 – Valores RMS do momento de excitação e da potência captada por três placas iguais associadas em série, bem como a estimativa da potência total absorvida pelo sistema, diante do efeito da variação da altura de onda.	164
Figura 4.24 – Variação observada nos campos de velocidade em função do aumento do período de onda, considerando a ação de três conversores iguais dispostos em série	166
Figura 4.25 – Valores RMS obtidos para a amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e força vertical, considerando a ação de três placas iguais dispostas em série, sob o efeito da variação do período de onda.....	166
Figura 4.26 – Valores RMS do momento de excitação e da potência captada por três placas iguais associadas em série, bem como a estimativa da potência total absorvida pelo sistema, diante do efeito da variação do período de onda.....	167
Figura 4.27 – Campos de velocidade observados durante a passagem de uma crista de onda sobre três OWSC's iguais e dispostos em série, considerando os graus de submersão de 0,70, 1,00 e 1,30	168
Figura 4.28 – Valores RMS obtidos para a amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e força vertical, considerando a ação de três placas iguais dispostas em série, sob o efeito da variação grau de submersão.	169

Figura 4.29 – Valores RMS do momento de excitação e da potência captada por três placas iguais associadas em série, bem como a estimativa da potência total absorvida pelo sistema, diante do efeito da variação da altura de onda.	170
Figura 4.30 – Detalhamento das características do domínio utilizado na análise da influência da declividade de fundo sobre a hidrodinâmica de 3 conversores dispostos em série	171
Figura 4.31 – Campos de escoamento observados em dois instantes distintos da dinâmica de 3 OWSC's iguais dispostos em série, considerando as declividades de fundo de 7,50°, 15,00° e 20,00°	172
Figura 4.32 – Valores RMS obtidos para a amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e força vertical, considerando a ação de três placas iguais dispostas em série, sob o efeito da variação da declividade de fundo	172
Figura 4.33 – Valores RMS do momento de excitação e da potência captada por três placas iguais associadas em série, bem como a estimativa da potência total absorvida pelo sistema, diante do efeito da variação da declividade de fundo	173
Figura 4.34 – Detalhamento do domínio e dos casos de estudo considerados na análise do efeito de ondas estacionárias sobre a hidrodinâmica de três conversores dispostos em série	174
Figura 4.35 – Detalhamento dos campos de velocidade, durante a ação de uma onda estacionária (formada pela reflexão sobre uma parede vertical), no caso de um sistema composto por três placas dispostas em série	175
Figura 4.36 Campos de velocidade para três casos diferentes de onda estacionária, nos instantes de formação da crista e da cava de onda, levando em consideração um sistema composto por três placas iguais e dispostas em série	176
Figura 4.37 Valores RMS da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal, força vertical, momento de excitação e potência captada, considerando a ação de ondas estacionárias sobre um sistema composto por três placas em série.	177
Figura 4.38 – Casos de análise realizados na etapa do estudo do espaçamento entre placas no plano	178
Figura 4.39 – Valor RMS da amplitude angular atingida por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas	179
Figura 4.40– Valor RMS da velocidade angular atingida por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas	180
Figura 4.41– Valor RMS da força horizontal atingida por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas	181
Figura 4.42– Valor RMS da força vertical atingida por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas	181
Figura 4.43– Valor RMS do momento de excitação atingido por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas	182

Figura 4.44– Valor RMS da potência captada por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas	182
Figura 4.45 – Potência total captada teórica obtida em cada caso de espaçamento entre placas no plano	183
Figura 4.46 – Campos de velocidade observados nos caso de espaçamento entre placas 1, 4 e 5, durante a passagem de uma crista de onda sobre um sistema composto por 3 OWSC's dispostos em série	184
Figura 4.47 – Casos de estudo realizados na etapa da análise do espaçamento entre placas no espaço	185
Figura 4.48 – Valores RMS das amplitudes angulares e velocidades angulares atingidas pelas placas, nos dois casos de distanciamento tridimensional estudados	186
Figura 4.49 – Valores RMS das forças horizontais e momento de excitação atingidos pelas placas, nos dois casos de distanciamento tridimensional estudados	186
Figura 4.50 – Valor RMS das potências captadas, bem como estimativa da potência total captada, nos dois casos de distanciamento tridimensional estudados	187
Figura 4.51 – Campo de velocidades observado durante a passagem de uma crista de onda sobre uma fileira composta por 3 OWSC's iguais	187
Figura 4.52 – Configuração do domínio e características aplicadas no <i>Layout 1</i> de três OWSC's.....	188
Figura 4.53 – Configuração do domínio e características aplicadas no <i>Layout 2</i> de três OWSC's.....	188
Figura 4.54 – Configuração do domínio e características aplicadas no <i>Layout 3</i> de três OWSC's.....	189
Figura 4.55 – Configuração do domínio e características aplicadas no <i>Layout 4</i> de três OWSC's.....	189
Figura 4.56 – Valores RMS das amplitudes angulares, velocidades angulares, forças horizontais e momentos de excitação experimentados pelas 3 placas em 4 <i>layouts</i> distintos	190
Figura 4.57 – Valor RMS das potências captadas pelas 3 placas em 4 <i>layouts</i> distintos.....	191
Figura 4.58 – Campos de velocidade observados nos <i>layouts 3</i> e 4, durante a passagem de uma crista de onda.....	192
Figura 4.59 – Domínio numérico e características geométricas do OWSC utilizado nas simulações referentes à variação da declividade de fundo (caso de uma placa unitária)	193
Figura 4.60 – Campos de velocidade para as máximas amplitudes angulares atingidas nos sentidos <i>landward</i> e <i>seaward</i> (casos 1, 2, 4 e 7)	194
Figura 4.61 – Magnitudes das máximas amplitudes positivas (sentido positivo ou <i>landward</i>) e das máximas amplitudes negativas (sentido negativo ou <i>seaward</i>), em função da declividade do fundo, considerando a amplitude angular (a), a velocidade angular (b), a força horizontal (c), a força vertical (d) e o momento de excitação (e).....	195
Figura 4.62 – Variação do valor RMS da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e força vertical experimentadas pelo OWSC, em função da declividade do fundo.....	196

Figura 4.63 – Variação do valor RMS do momento de excitação e da potência média captada, em função da declividade do fundo..... 198

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Tipos de energia dos oceanos	28
Tabela 1.2 – Comparação entre as energias solar, eólica e das ondas.....	29
Tabela 1.3 – Comparação entre os custos envolvidos na exploração de energia das ondas, eólica e solar	30
Tabela 1.4 – Distribuição do potencial de energia das ondas ao longo do globo terrestre.....	31
Tabela 1.5 – Fatores de captura dos principais sistemas de conversão de energia das ondas..	33
Tabela 1.6 – Comparações entre as tecnologias de conversão do tipo absorção pontual, coluna de água oscilante e de translação de ondas.....	33
Tabela 2.1 – Principais vantagens e limitações da ferramenta CFD	69
Tabela 2.2 – Principais códigos de CFD atualmente utilizados	70
Tabela 2.3 – Valores aproximados para estimativa da intensidade de turbulência conforme o tipo de escoamento estudado	78
Tabela 2.4 – Características dos OWSC's aplicados no estudo dos <i>layouts</i> de um parque de geração.....	108
Tabela 3.1 – Esquemas numéricos utilizados nas simulações do presente trabalho	122
Tabela 3.2 – Dimensões e características de discretização da malha dos domínios numéricos utilizados na tese	126
Tabela 3.3 – Condições de contorno aplicadas nas simulações da tese, segundo suas nomenclaturas no código <i>OpenFOAM</i>	127
Tabela 3.4 – Características e configurações dos casos de estudo da tese (Parte 1)	129
Tabela 3.5 – Características e configurações dos casos de estudo da tese (Parte 2)	130
Tabela 3.6 – Características e configurações dos casos de estudo da tese (Parte 3)	131
Tabela 3.7 – Características e configurações dos casos de estudo da tese (Parte 4)	132
Tabela 3.8 – Características e configurações dos casos de estudo da tese (Parte 5)	133
Tabela 4.1 – Características de onda e de placa utilizadas nas simulações referentes à validação do modelo 2D.....	138
Tabela 4.2 – Níveis de refinamento utilizados na etapa do estudo de convergência da malha numérica	140
Tabela 4.3 – Investigação dos modelos de LES mais adequados à proposta do presente trabalho	142
Tabela 4.4 – Valores de R^2 e NRMSE, obtidos para os modelos Smagorinsky II e WALE nas comparações realizadas com o experimento apresentado por Wei et al. (2016).....	148
Tabela 4.5 – Valores de R^2 e NRMSE, obtidos para o modelo WALE 3D nas comparações realizadas com o experimento apresentado por Wei et al. (2016).....	152
Tabela 4.6 – Comparação entre os valores máximos, mínimos e RMS da amplitude angular, velocidade angular e momento de excitação, obtidos pelo modelo WALE 3D e aqueles presentes no trabalho de Wei et al. (2016)	152
Tabela 4.7 – Valores de R^2 e NRMSE resultantes da comparação dos resultados obtidos pelos modelos 2D e 3D, para o caso de 3 placas iguais dispostas em série	160

Tabela 4.8 – Casos de análise no estudo da influência da declividade de fundo sobre a dinâmica de um único OWSC	193
---	-----

LISTA DE SIGLAS

AMI – *Arbitrary Mesh Interface*
BEM – *Boundary Element Method*
CFD – *Computational Fluid Dynamics*
DNS – *Direct Numerical Simulation*
FDM – *Finite Difference Method*
FEM – *Finite Element Method*
FVM – *Finite Volume Method*
GA – *Genetic Algorithm*
IBM – *Immersed Boundary Method*
LCOE – *Levelized Cost of Energy*
LES – *Large Eddy Simulation*
MULES – *Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*
NRMSE – *Normalized Root Mean Square Error*
NWM – *Near Wall Modelling*
NWR – *Near Wall Resolution*
OWSC – *Oscillating Wave Surge Converter*
PISO – *Pressure Implicit with Splitting of Operators*
PTO – *Power Take Off*
RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*
RNG – *Renormalization Group*
RMS – *Root Mean Square*
SGS – *Subgrading Scale*
SIMPLE – *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*
SPH – *Smoothed Particle Hydrodynamics*
SST – *Shear Stress Transport*
VARANS – *Volume Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes*
VLES – *Very Large Eddy Simulation*
VOF – *Volume of Fluid*
WALE – *Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity*

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Amplitude de onda (m)
- A_{ij}, B_{ij}, C_i – Coeficientes de expressão polinomial, utilizados na Teoria de Stokes de quinta ordem (adimensionais)
- a_i – Amplitude dos termos de velocidade da Teoria de Stokes de quinta ordem (m/s)
- A^+ – Parâmetro de entrada da função amortecedora de Van Driest (adimensional)
- C – Velocidade de propagação da onda (m/s)
- C_{ad} – Coeficiente de amortecimento imposto pelo sistema mecânico de PTO (kg.m²/s)
- C_{ar} – Coeficiente de amortecimento devido à radiação de ondas (kg.m²/s)
- CFL_n – Número de Courant (adimensional)
- C_g – Velocidade de grupo de onda (m/s)
- C_{gr} – Velocidade de grupo de onda em uma região mais rasa (m/s)
- C_r – Velocidade de propagação da onda em uma região mais rasa (m/s)
- C_{sgs} – Constante do modelo de LES (adimensional)
- C_α – Fator de compressão (adimensional)
- C_ϵ – Constante dinâmica do modelo de LES (adimensional)
- C_κ – Constante do escoamento, associada à sub-região inercial (adimensional)
- C_{0s} – Valor inicial de C_{sgs} , utilizado pela função amortecedora de Van Driest (s⁻¹)
- d – Profundidade relativa (adimensional)
- d_p – Distância entre placas (m)
- d_{p_1}, d_{p_2} – Distância entre as placas 1 e 2 e entre 2 e 3, respectivamente (m)
- dV – Parcela infinitesimal de volume (m³)
- E_j, B_j – Coeficientes das séries de Fourier utilizados na *Stream Function* (adimensionais)
- E_s – Energia superficial de onda (J/m²)
- $E(\kappa)$ – Energia do espectro de turbulência, associada à escala turbulenta (m³/s²)
- e_p – Espessura da placa (m)
- \vec{F}_b – Parcela de força que atua sobre o corpo considerado (N)
- F_x – Força horizontal experimentada pela placa do OWSC (N)
- \vec{F}_v – Campo vetorial qualquer (unidade do campo abordado)
- f_{abs} – Fator de captura do OWSC (adimensional)
- f_e – Comprimento médio do *fetch* (m)
- \vec{f}_i – Parcela referente às forças gravitacionais na equação LES de Navier-Stokes (m/s²)
- G – Função de filtragem utilizada nos modelos em LES (m⁻³)

G_{sub} – Grau de submergência da placa do OWSC (adimensional)
 g – Aceleração da gravidade (m/s²)
 g_i – Componentes da aceleração da gravidade nas três dimensões (m/s²)
 H – Altura da onda (m)
 H_b – Altura máxima que a onda atinge antes de quebrar (m)
 $H_{b_{ep}}$ – Altura de quebra em águas profundas, para o caso de ondas estacionárias (m)
 $H_{b_{er}}$ – Altura de quebra em águas rasas, para o caso de ondas estacionárias (m)
 H_e – Altura da onda estacionária (m)
 H_r – Altura da onda em uma região mais rasa (m)
 H_s – Altura de onda significativa (m)
 H_0 – Altura da onda em águas profundas (m)
 h – Profundidade média ou nível de repouso das águas do oceano (m)
 h_b – Profundidade em que a onda irá quebrar (m)
 h_p – Altura da placa (m)
 h_{pi} – Altura de placa ideal para um dispositivo do tipo *Langlee* (m)
 h_{sub} – Altura submersa da placa (m)
 h_t – Altura da elevação do fundo do domínio (m)
 I – Intensidade de turbulência (adimensional)
 I_b – Tensor de inércia do corpo considerado (kg.m²)
 I_m – Momento de inércia de massa do OWSC em torno do eixo de giro (kg.m²)
 I_{ma} – Momento de inércia de massa adicionada em torno do eixo de giro (kg.m²)
 K – Energia cinética turbulenta (m²/s²)
 K_r – Coeficiente de refração da onda (adimensional)
 K_s – Coeficiente de empolamento da onda (adimensional)
 k – Número de onda (m⁻¹)
 k_{sgs} – Energia cinética de submalha (m²/s²)
 L – Comprimento da onda (m)
 L_c – Comprimento característico do problema estudado (m)
 L_e – Comprimento da onda estacionária (m)
 L_p – Largura da placa (m)
 L_x, L_y, L_z – Dimensões do domínio numérico nas direções x, y e z (m)
 L_0 – Comprimento da onda em águas profundas (m)
 l – Comprimento de mistura ou escala de turbulência (m)
 l_{DI} – Limite inferior da sub-região inercial (m)

l_{ge} – Comprimento característico das grandes escalas (m)
 l_K – Comprimento característico das pequenas escalas, ou escala de Kolmogorov (m)
 l_{PI} – Limite superior da sub-região inercial (m)
 Max_{AMP+} – Máxima amplitude atingida no sentido *landward* (unidade da variável)
 Max_{AMP-} – Mínima amplitude atingida no sentido *seaward* (unidade da variável)
 $Máx_{x_{exp}}$ – Máximo valor da série experimental (unidade da variável)
 \vec{M}_b – Parcela de momento que atua sobre o corpo considerado (N.m)
 $Mín_{x_{exp}}$ – Mínimo valor da série experimental (unidade da variável)
 M_t – Momento de excitação (N.m)
 m_b – Massa do corpo considerado (kg)
 m_p – Massa da placa (kg)
 N – Número total de dados analisados (adimensional)
 OP – Operador do modelo de LES (s^{-1})
 P – Pressão do fluido (Pa)
 \bar{P} – Parcela de pressão filtrada na metodologia em LES (Pa)
 P_{abs} – Potência captada/absorvida pelo OWSC (W)
 $P_{abs_{tot}}$ – Potência total captada/absorvida por um sistema composto por 3 OWSC's (W)
 P_{din} – Pressão dinâmica da onda sobre a placa (Pa)
 P_k – Pico de pressão dinâmica experimentado pela placa durante o fenômeno *Slamming* (Pa)
 P_{tot} – Pressão total da onda (Pa)
 P_u – Potência unitária de onda (W/m)
 Q_ϕ – Fonte da propriedade intensiva ϕ ([unidade da propriedade extensiva associada]. $m^{-3}.s^{-1}$)
 R – Momento de restauração do OWSC em função do empuxo (N.m)
 R_e – Número de Reynolds (adimensional)
 R_{ege} – Número de Reynolds das grandes escalas (adimensional)
 R_{es} – Reynolds de superfície, característico da região adjacente à parede (adimensional)
 R^2 – Coeficiente de determinação (adimensional)
 \bar{S}_{ij} – Taxa de deformação das grandes escalas (s^{-1})
 S_{ij}^d – Quadrado do tensor do gradiente de velocidades (s^{-2})
 T – Período da onda (s)
 T_n – Período de oscilação natural da placa (s)
 T_s – Período de onda significativo (s)
 t – Instante de tempo (s)

t_{min} – Tempo mínimo de duração do vento (s)
 t_{sim} – Tempo total de simulação (s)
 \bar{U} – Velocidade média da corrente existente na geração de propagação da onda (m/s)
 U_{rs} – Número de Ursell (adimensional)
 \vec{u}_c – Velocidade de compressão no método VOF (m/s)
 u_{eq} – Velocidade resultante da equação diferencial governante (m/s)
 u_{ge} – Velocidade característica das grandes escalas (m/s)
 \bar{u}_i – Parcela da velocidade resolvida diretamente para as grandes escalas (m/s)
 u_i' – Velocidade das escalas de submalha, modeladas em LES (m/s)
 $u_{i,j}$ – Componentes da velocidade nas três dimensões (m/s)
 u_K – Velocidade característica das pequenas escalas (m/s)
 u_w – Velocidade adjacente à parede (m/s)
 u^+ – Velocidade adimensional da parede (adimensional)
 u_* – Velocidade de cisalhamento (m/s)
 \vec{V}_b – Velocidade linear do corpo considerado (m/s)
 V_c – Velocidade característica do escoamento (m/s)
 \bar{V}_c – Velocidade média característica do escoamento (m/s)
 V_{cr} – Velocidade característica da região adjacente à parede (m/s)
 V_{jr} – Velocidade característica do jato durante o evento de *Slamming* (m/s)
 V_{m_v} – Velocidade média do vento (m/s)
 V_x – Componente horizontal da velocidade das partículas (m/s)
 V_z – Componente vertical da velocidade das partículas (m/s)
 x, y, z – Coordenadas espaciais (m)
 x_{exp} – Valores dos elementos da série experimental (unidade da variável)
 $x_{g_i}, y_{g_i}, z_{g_i}$ – Coordenadas centrais do eixo de giro das placas utilizadas nas simulações (m)
 $x_{i,j}$ – Componentes da posição nas três dimensões (m)
 x_{mod} – Valores dos elementos da série numérica (unidade da variável)
 x_p – Espaçamento entre placas transversal (m)
 y^+ – Distância adimensional da parede (adimensional)
 y_{cp} – Distância vertical até o centroide da placa (m)
 y_p – Espaçamento entre placas longitudinal (m)
 α – Ângulo de propagação da onda (°)
 $\vec{\alpha}_b$ – Aceleração angular do corpo considerado (rad/s²)
 α_f – Inclinação do fundo do domínio [caso com 3 OWSC's] (°)

α_{fs} – Indicador de fase no método VOF (adimensional)
 α_r – Ângulo de propagação da onda em uma região mais rasa (°)
 α_0 – Ângulo de propagação da onda em uma região mais profunda (°)
 β – Inclinação do fundo do domínio [caso com OWSC único] (°)
 Γ – Coeficiente de difusão ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
 Δ – Tamanho característico do filtro utilizado no modelo em LES (m)
 Δ_{gr} – Tamanho característico de malha adimensionalizado (adimensional)
 Δl – Distância perpendicular à parede (m)
 Δl_c – Comprimento característico de um elemento de malha (m)
 ΔT – Intervalo de tempo de uma série temporal referente a alguma característica do OWSC (s)
 Δt – Passo de tempo adotado (s)
 Δx_i ou $\Delta x, \Delta y$ e Δz – Discretização espacial dos elementos de malha nas três dimensões (m)
 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ – Dimensões de malha utilizadas nas regiões 1, 2 e 3 do domínio utilizado na validação numérica, ao longo da direção x (m)
 $\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3$ – Dimensões de malha utilizadas nas regiões 1, 2 e 3 do domínio utilizado na validação numérica, ao longo da direção y (m)
 $\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3$ – Dimensões de malha utilizadas nas regiões 1, 2 e 3 do domínio utilizado na validação numérica, ao longo da direção z (m)
 ε – Taxa de dissipação da turbulência (m^2/s^3)
 ζ_x – Deslocamento horizontal da partícula (m)
 ζ_z – Deslocamento vertical da partícula (m)
 η – Variação da superfície livre ou nível d'água (m)
 η_A, η_B – Sondas de nível d'água utilizadas na etapa de validação numérica (m)
 θ – Amplitude angular atingida pela placa do OWSC (°)
 θ_p – Ângulo de inclinação da praia (°)
 κ – Número de onda das escalas turbulentas (m^{-1})
 κ_{nv} – Número adimensional utilizado na etapa de validação numérica para garantir a similaridade após as modificações de placa (adimensional)
 λ – Parâmetro de cálculo da Teoria de Stokes de 5ª ordem (adimensional)
 ν – Viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)
 ν_t – Viscosidade turbulenta (m^2/s)
 ρ – Massa específica do fluido em questão (kg/m^3)
 ρ_{fs} – Massa específica da região de interface segundo o método VOF (kg/m^3)
 ρ_p – Massa específica da placa (kg/m^3)
 σ – Frequência angular de onda (s^{-1})

τ_{ge} – Tempo característico das grandes escalas (s)

τ_{ij}^{sgs} – Tensor de tensões das escalas de submalha (m^2/s^2)

τ_K – Tempo característico das pequenas escalas (s)

ω – Taxa de dissipação específica (s^{-1})

ϕ – Propriedade intensiva transportada pelo escoamento ([unidade da propriedade extensiva associada]. kg^{-1})

$\vec{\omega}_b$ – Velocidade angular do corpo considerado (rad/s)

ω_p – Velocidade angular da placa do OWSC (rad/s)

\forall_c – Volume do elemento de volume (m^3)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	28
1.1 OBJETIVOS.....	36
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	36
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
2.1 CONCEITOS DE ENGENHARIA COSTEIRA.....	37
2.1.1 Regiões e divisões do oceano	37
2.1.2 Formação e principais tipos de ondas oceânicas	40
2.1.3 Tópicos importantes sobre a hidrodinâmica das ondas	41
2.1.3.1 Formação e dinâmica de ondas progressivas	42
2.1.3.2 Teoria de ondas de pequena amplitude (Teoria Linear)	44
2.1.3.2.1 Principais fenômenos envolvidos na propagação de uma onda	47
2.1.3.2.2 Adaptações da Teoria Linear para ondas estacionárias.....	50
2.1.3.3 Outras teorias de onda	52
2.1.3.3.1 Teoria de Stokes de quinta ordem.....	54
2.1.3.3.2 Stream Function.....	55
2.2 TÓPICOS SOBRE A MODELAGEM NUMÉRICA DOS ESCOAMENTOS TURBULENTOS	57
2.2.1 Principais noções sobre os escoamentos turbulentos	57
2.2.1.1 Escalas de turbulência e a cascata de energia	59
2.2.1.2 Principais metodologias de modelagem da turbulência	61
2.2.1.3 O escoamento próximo aos contornos sólidos.....	64
2.2.2 Principais noções sobre fluidodinâmica computacional (<i>Computational Fluid Dynamics – CFD</i>)	68
2.2.2.1 Considerações a respeito da malha de cálculo	70
2.2.2.2 Principais metodologias para modelagem de corpos em movimento	72
2.2.2.3 Propriedades dos métodos numéricos.....	73
2.2.2.4 Principais métodos de discretização numérica	75
2.2.2.5 Considerações a respeito dos modelos de turbulência.....	77
2.2.2.5.1 Principais modelos de turbulência em RANS.....	78
2.2.2.5.2 Principais modelos de LES	80
2.3 REVISÃO SOBRE A TECNOLOGIA <i>OSCILLATING WAVE SURGE CONVERTER</i> ...	81
2.3.1 Princípio de funcionamento e sistema de conversão de energia de um OWSC	81
2.3.2 Principais modelos de conversores	83
2.3.3 Forças e características de onda influentes na hidrodinâmica do conversor	86
2.3.4 Influência das características geométricas das placas	93
2.3.4.1 Influência da largura da placa.....	93
2.3.4.2 Influência da espessura da placa.....	94
2.3.4.3 Modificações ocasionadas em função da variação do centroide e da massa da placa	97

2.3.4.4	Influência ocasionada pelo <i>design</i> da placa	98
2.3.5	O período de oscilação natural de um OWSC (Ressonância)	99
2.3.6	O fenômeno da batida (<i>Slamming</i>)	100
2.3.7	O efeito da utilização da semelhança de Froude no estudo da hidrodinâmica de um OWSC	104
2.3.8	Parques de OWSC's	106
3	METODOLOGIA	111
3.1	EQUAÇÕES GOVERNANTES	111
3.1.1	Modelo de Smagorinsky	113
3.1.2	Modelo dinâmico de uma equação	114
3.1.3	Modelo WALE	114
3.2	O CÓDIGO <i>OPENFOAM</i>	115
3.2.1	Discretização em volumes finitos	115
3.2.2	Estrutura do código	117
3.2.3	Extensão <i>OlaFlow</i>	118
3.2.4	Métodos de resolução do problema	120
3.3	ESQUEMAS NUMÉRICOS E CONTROLES DE SIMULAÇÃO UTILIZADOS	121
3.4	DOMÍNIOS NUMÉRICOS E SUAS RESPECTIVAS MALHAS	123
3.5	CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO APLICADAS	126
3.6	CASOS DE ESTUDO	127
4	RESULTADOS	134
4.1	CONSIDERAÇÕES E OBSERVAÇÕES IMPORTANTES ACERCA DOS CASOS DE ESTUDO DO PRESENTE TRABALHO	134
4.2	VALIDAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO BIDIMENSIONAL	136
4.2.1	Teste de convergência da malha numérica	139
4.2.2	Avaliação do comportamento de diferentes modelos em LES	142
4.2.3	Validação final do modelo bidimensional	145
4.3	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL	150
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D E 3D	155
4.5	INVESTIGAÇÃO DOS FENÔMENOS DE ESCOAMENTO ASSOCIADOS À HIDRODINÂMICA DE TRÊS OWSC'S DISPOSTOS EM SÉRIE	161
4.5.1	Influência da altura de onda	162
4.5.2	Modificações ocasionadas por variações no período de onda	165
4.5.3	Influência do grau de submersão das placas	168
4.5.4	Modificações hidrodinâmicas decorrentes da variação da declividade de fundo	170
4.5.5	Influência de ondas estacionárias geradas por reflexão	174
4.6	ESTUDO DO ESPAÇAMENTO ENTRE PLACAS NO PLANO	178
4.7	ESTUDO DO ESPAÇAMENTO ENTRE PLACAS NO ESPAÇO	184

4.8 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES LAYOUTS DE PLACAS NO ESPAÇO	187
4.9 INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE DE FUNDO SOBRE A HIDRODINÂMICA DE UM ÚNICO OWSC	192
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	199
6 SUGESTÕES DE PESQUISA	202
REFERÊNCIAS	204

1 INTRODUÇÃO

Recentes estudos e avanços tecnológicos demonstram o constante investimento em energias alternativas, destacando as energias eólica e solar como as principais fontes. Segundo Ritchie e Roser (2020), estas duas últimas representaram o investimento de aproximadamente 94% do recurso financeiro mundial dedicado às energias alternativas em 2016. Por outro lado, os mesmos autores relatam que, entre os anos de 2006 e 2016, as energias oriundas do oceano experimentaram, em média, investimentos dez vezes menores que as energias eólica e solar, o que representa ainda o menor dos investimentos dentre as principais fontes alternativas. De forma similar, a *International Renewable Energy Agency* (2018) estima que as fontes renováveis irão contribuir com cerca de 85% de energia para a geração de eletricidade até o ano de 2050, ao passo que as energias oriundas dos mares e oceanos representarão apenas 4% desta contribuição. Entretanto, estima-se que a potência média existente nos oceanos esteja em torno de 32 TW (WAHYUDIE et al., 2017), o que é um número bastante significativo e expressivo. O potencial de energia relacionado encontra-se dividido entre as energias das marés, das correntes oceânicas, do gradiente salino, gradiente térmico e das ondas (Tabela 1.1).

Fonte de energia oceânica	Produção anual estimada (TWh)
Marés	300
Correntes oceânicas	800
Gradiente salino	2000
Gradiente térmico	10000
Ondas	entre 8000 e 80000

Tabela 1.1 – Tipos de energia dos oceanos
(fonte: adaptado de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2007)

A tabela anterior demonstra o importante papel das ondas dos mares e oceanos na produção energética, o que, ao longo dos últimos anos, tem motivado a pesquisa e o desenvolvimento de diversas tecnologias capazes de transformar este tipo de energia em eletricidade. Os Estados Unidos, entre os anos de 2008 e 2017, por exemplo, dedicaram cerca de 47% do recurso disponível para as energias oceânicas ao desenvolvimento e à pesquisa de tecnologias capazes de captar a energia das ondas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017). O investimento total foi dividido, principalmente, entre a indústria privada, os laboratórios nacionais e a pesquisa em universidades, conforme mostra a Figura 1.1.

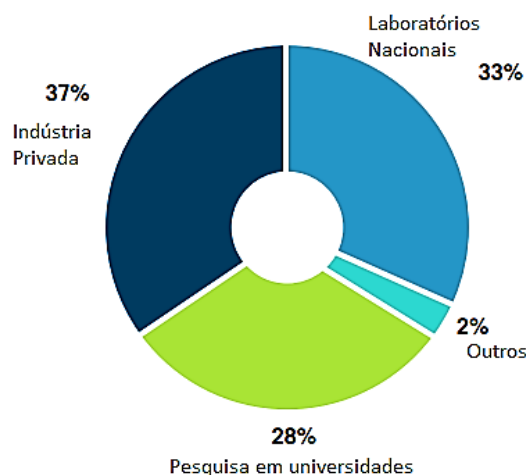


Figura 1.1 – Divisão dos investimentos em energias oceânicas nos EUA entre os anos de 2008 e 2017 (fonte: adaptado de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017)

Narula (2019) aborda que o Reino Unido, Portugal, Espanha, Suécia, Noruega, Canadá, China, Coreia do Sul e Cingapura possuem protótipos instalados e em funcionamento de diferentes sistemas de conversão de energia das ondas, que juntos resultam em uma potência nominal de aproximadamente 3 MW.

O principal interesse em investir em sistemas de conversão deste tipo reside no fato de que a energia das ondas possui algumas vantagens sobre as fontes eólica e solar, dentre as quais destacam-se, essencialmente, o grande potencial de aproveitamento e a considerável disponibilidade de energia ao longo do tempo (Tabela 1.2).

Fonte de energia	Solar	Eólica	Ondas do mar
Status	Comercial (recente).	Comercial.	Pré-Comercial.
Variabilidade	Dependente das horas de insolação e da presença de nuvens.	Dependente da ocorrência e da intensidade dos ventos.	24 h ao dia, com bastante variabilidade de alturas e períodos de onda.
Previsibilidade	Difícil (muitos fatores envolvidos)	Horária	Diária
Disponibilidade ao longo do tempo	25%	35%	85%
Potencial médio de geração	Adaptável até 5 MW.	Adaptável até 30 MW.	Adaptável até 100 MW.

Tabela 1.2 – Comparação entre as energias solar, eólica e das ondas (fonte: adaptado de HOSSAIN, J.; HOSSAIN, E.; SIKANDER, 2016)

Hossain J., Hossain E. e Sikander (2016) afirmam que a densidade de energia transportada pelas ondas é quase cinco vezes maior que aquela contida no ar em uma altitude de 20 m, o que

ressalta sua importância como recurso energético. Por outro lado, Guiberteau et al. (2014) abordam que os custos envolvidos no aproveitamento de energia das ondas equiparam-se àqueles referentes às energias solar e eólica (Tabela 1.3), podendo, inclusive, serem reduzidos ao se otimizar a distância entre o local de captação da energia e a central de distribuição da eletricidade gerada.

Fonte de energia	Custo envolvido em cada kWh (\$)
Ondas	0,015
Eólica	0,05 a 0,24
Solar	0,09 a 0,19

Tabela 1.3 – Comparação entre os custos envolvidos na exploração de energia das ondas, eólica e solar (fonte: adaptado de GUIBERTEAU et al., 2014)

Uma análise mais aprofundada, realizada com base nos dados disponibilizados pela *International Renewable Energy Agency* (2022), revela que, atualmente, o LCOE (*Levelized Cost of Energy* – Custo Nivelado de Energia) associado às energias eólica e solar podem atingir, respectivamente, valores da ordem de 0,033 \$/kWh e 0,048 \$/kWh. Entretanto, Baca et al. (2022) ressaltam que, hoje em dia, o LCOE associado aos conversores de energia das ondas gira em torno de 0,30 \$/kWh, mostrando que esta tecnologia ainda não atingiu o mesmo grau de maturidade das fontes renováveis supracitadas. Porém, os mesmos autores demonstram que esta tecnologia, caso experimente um importante desenvolvimento e investimento, pode resultar em um LCOE próximo de 0,070 \$/kWh, valor este que, aliado às diversas vantagens da energia das ondas, torna-se bastante expressivo e competitivo dentro do mercado das energias renováveis.

Edenhofer et al. (2011) estimam que o potencial teórico energético mundial das ondas esteja próximo de 29.500 TWh/ano, o qual se encontra disperso pelo globo terrestre segundo a distribuição mostrada na Tabela 1.4.

Região	Potencial (TWh/ano)
Ásia	6200
Austrália, Nova Zelândia e Ilhas do Pacífico	5600
América do Sul	4600
América do Norte e Groenlândia	4000
África	3500
Norte e Oeste da Europa	2800
América Central	1500
Mar Mediterrâneo e Arquipélagos Atlânticos	1300
TOTAL	29.500

Tabela 1.4 – Distribuição do potencial de energia das ondas ao longo do globo terrestre
(fonte: adaptado de STEFEN, 2015)

As regiões do globo sujeitas aos maiores potenciais de energia das ondas são a Austrália, a América do Sul e a costa sul da África, onde são encontradas áreas cuja densidade de energia (potência por metro de costa) atinge valores próximos a 90 kW/m (YOUNESIAN; ALAM, 2017). Uma distribuição estimada da densidade de energia no planeta é apresentada no mapa disposto na Figura 1.2, de onde se observa que a mesma varia entre 7 kW/m e 100 kW/m.



Figura 1.2 – Densidade da energia em kW/m ao longo do planeta
(fonte: adaptado de ASTARIZ; IGLESIAS, 2015)

O trabalho de Lehmann et al. (2017) aborda que com uma densidade energética de 8 kW/m seja possível produzir um potencial de 899 TWh/ano. Estes autores ressaltam que o potencial útil de geração de energia das ondas nos EUA esteja em torno de 522 TWh/ano, o que corresponde

a 12,9% da energia total produzida em um ano neste mesmo país. Ainda neste trabalho, é apresentada a importante informação de que, ao se utilizar cerca de 5% do potencial total da energia do país (26,1 TWh/ano), é possível suprir a demanda energética de, aproximadamente, 7 milhões de residências, número este consideravelmente expressivo.

Tendo em vista os distintos potenciais energéticos ao longo do globo, muitas empresas e cientistas vêm desenvolvendo diversas tecnologias para captação de energia das ondas, sendo estas diferenciadas entre si pelos seus princípios de funcionamento e pela distância dos conversores à costa (ADERINTO; LI, 2019). Shadman et al. (2019) abordam que, atualmente, existem três tecnologias de conversão das ondas que se destacam dentre as demais, estando, portanto, em estágios mais avançados de desenvolvimento (testes em laboratórios, numerosos estudos acadêmicos e, inclusive, testes em escala real *in situ*): os conversores de absorção pontual, de coluna de água oscilante e oscilantes por translação de ondas (Figura 1.3).

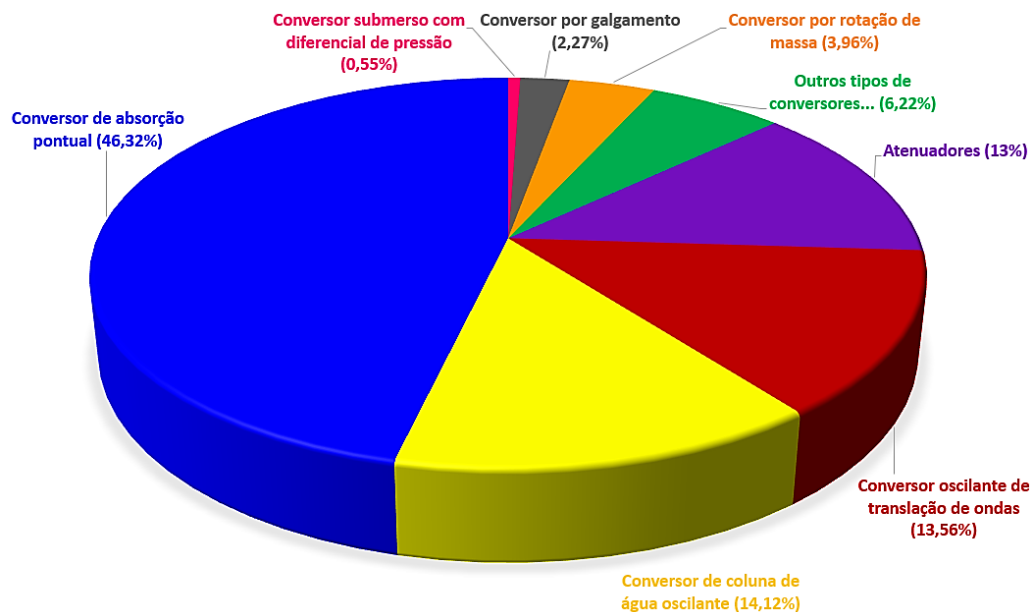


Figura 1.3 – Principais sistemas de conversão de energia das ondas e seu respectivo grau de amadurecimento como tecnologia (fonte: adaptado de SHADMAN et al., 2019)

De acordo com Pecher e Kofoed (2017), a eficiência da conversão em energia de um dispositivo, a partir de ondas, está diretamente ligada ao *design* hidrodinâmico do mesmo, que, por sua vez, reflete nas principais etapas de transformação energética: captação de energia, sistema de conversão (PTO – *Power Take Off*), componentes elétricos, subestação elétrica e distribuição de energia. Os autores ainda ressaltam que, dentre as principais tecnologias de

aproveitamento de ondas, a que detém o maior fator de captura (maior capacidade de captação de energia das ondas) é o sistema de conversão por translação de ondas (*Oscillating Wave Surge Converter* – OWSC), como pode ser observado na Tabela 1.5.

Sistema	Fator de captura (%)
Conversor por galgamento	17
Dispositivo de coluna de água oscilante	29
Conversor de absorção pontual	16
Conversor oscilante por translação de ondas	37

Tabela 1.5 – Fatores de captura dos principais sistemas de conversão de energia das ondas (fonte: adaptado de PECHER; KOFOED, 2017)

Recentemente, o estudo de Lehmann et al. (2017) trouxe alguns resultados dos diversos experimentos realizados pelos Laboratórios Nacionais Sandia (SANDIA NATIONAL LABORATORIES, 2015), por meio dos quais destaca-se o grande potencial dos conversores oscilantes por translação de ondas e o provável valor do custo da energia gerada por estes, quando comparados às tecnologias de absorção pontual e de coluna de água oscilante (Tabela 1.6).

Sistema	Produção média anual (MWh/ano)	Potência gerada (kW)	Massa (ton)	Preço provável de custo de energia para 1 único módulo de conversor (\$)
Conversor de absorção pontual	701	286	674	4,36
Conversor oscilante por translação de ondas	881	373	820	3,59
Dispositivo de coluna de água oscilante	904	373	100	4,79

Tabela 1.6 – Comparações entre as tecnologias de conversão do tipo absorção pontual, coluna de água oscilante e de translação de ondas (fonte: adaptado de LEHMANN et al., 2017)

O sistema OWSC é composto por uma placa aproximadamente retangular, de densidade inferior à da água, que oscila para frente e para trás, em função da componente horizontal do movimento das ondas, impulsionando um gerador interno, responsável pelo fornecimento de eletricidade (DHANAK; XIROS; DARWISH, 2016). Atualmente, existem três tipos de conversores oscilantes por translação de ondas (Figura 1.4): o *Oyster* (parcialmente submerso e ancorado ao

fundo do oceano), o *Waveroller* (totalmente submerso e ancorado ao fundo do oceano) e o *Langlee* (parcialmente submerso e assentado sobre uma plataforma flutuante).



Figura 1.4 – Principais exemplos de OWSC's
(fonte: adaptado de SINGH, 2011; ENERGY-MAG., 2013; PECHER; KOFOED, 2017)

Peiffer e Roddier (2012) apresentaram dados obtidos em modelos numéricos e experimentais realizados em uma estrutura flutuante (Figura 1.5), onde, na parte externa superior, poderia ser instalada uma turbina eólica, enquanto na parte inferior, submersa, são instaladas algumas placas oscilantes por translação. Os resultados, ainda que preliminares e muito limitados, demonstram que este tipo de tecnologia pode ser combinado com geradores eólicos em alto mar, dando origem a um sistema híbrido de conversão, o que ressalta ainda mais sua importância como recurso para geração de energia.

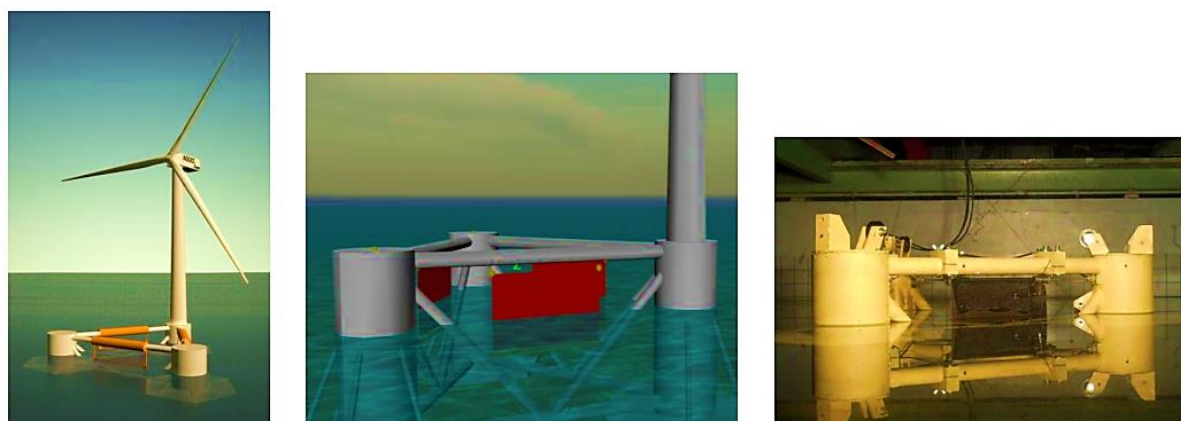


Figura 1.5 – Sistema híbrido flutuante de conversão formado por OWSC's e uma turbina eólica.
(fonte: PEIFFER; RODDIER, 2012)

Considerando os diversos pontos positivos e o grande potencial do sistema OWSC como gerador de energia elétrica, muitos estudos recentes vem utilizando a ferramenta de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) para a análise destes conversores (DIAS et al., 2017). Esta ferramenta representa um importante meio de

compreensão dos complexos fenômenos de escoamento envolvidos na hidrodinâmica destes dispositivos, auxiliando também os estudos experimentais realizados em modelos reduzidos.

Recentemente, Davidson e Costello (2020) realizaram uma extensa revisão acerca dos diversos métodos de modelagem numérica dos dispositivos conversores de ondas, de onde se identifica que o método dos volumes finitos (FVM – *Finite Volume Method*), com modelagem em termos médios (RANS – *Reynolds Average Navier-Stokes*), e dos elementos de contorno (BEM – *Boundary Element Method*) são os mais utilizados nos estudos sobre os OWSC's. Windt, Davidson e Ringwood (2018) também ressaltam a importância dos modelos em RANS para o estudo e avaliação de um conversor de ondas. Entretanto, estes autores relatam que esta metodologia, por outro lado, não consegue fornecer dados mais detalhados sobre a hidrodinâmica dos dispositivos, sendo necessária a aplicação da modelagem numérica de grandes escalas (LES – *Large Eddy Simulation*) ou da simulação numérica direta (DNS – *Direct Numerical Simulation*).

O trabalho de Simonetti et al. (2017) demonstra a aplicação da metodologia LES na análise de um conversor do tipo coluna de água oscilante, em que se verifica a qualidade e a aderência dos resultados aos estudos experimentais previamente realizados. Entretanto, esta metodologia de modelagem ainda é muito pouco utilizada na área de conversão de energia por ondas (DAVIDSON; COSTELLO, 2020), representando uma importante lacuna a ser preenchida.

Tendo em vista o papel da CFD no estudo dos conversores de energia das ondas, aliado ao fato de que a maioria dos estudos já realizados não contemplam uma análise detalhada de mais de um conversor atuando em conjunto com outros nas proximidades (WINDT; DAVIDSON; RINGWOOD, 2018), bem como o pequeno número de trabalhos da área que utilizaram modelos de LES em seus estudos, surge a principal motivação do presente trabalho: estudar, por meio da metodologia de modelagem de grandes escalas, como a ação de ondas regulares, sob diferentes condições de altura, período, profundidade e características de fundo, modifica a dinâmica e a geração de energia de um parque composto por mais de um OWSC.

1.1 OBJETIVOS

O **objetivo principal** do presente trabalho consiste em aplicar a metodologia de modelagem em grandes escalas para estudar como diferentes estados de onda modificam a hidrodinâmica e a geração de energia de um parque composto por mais de um OWSC.

Os **objetivos secundários** são:

- a) verificar e validar o modelo numérico a ser utilizado, para casos bidimensionais e tridimensionais de escoamento;
- b) estudar diferentes modelos de LES, visando aquele que fornece o melhor custo benefício, em termos computacionais e de simulação;
- c) realizar uma comparação entre os modelos 2D e 3D;
- d) analisar e compreender os fenômenos de escoamento associados à dinâmica de três conversores em sequência, em duas e três dimensões, sob diferentes condições da onda incidente;
- e) estimar a captação de energia dos conversores, possibilitando avaliar o potencial dos parques de geração propostos;
- f) investigar as configurações do parque que otimizam a geração de energia;

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O conteúdo foi dividido em sete capítulos principais:

- a) **Introdução** – corresponde a apresentação, contextualização e justificativa do tema proposto, ressaltando também os objetivos do trabalho.
- b) **Revisão bibliográfica** – capítulo responsável por reunir toda fundamentação teórica, científica e industrial que sustenta e norteia a tese.
- c) **Metodologia** – contempla os métodos numéricos e simplificações adotados para estudar a temática proposta.
- d) **Resultados** – reúne desde as validações numéricas dos modelos adotados, até os resultados, discussões e análises a respeito das variáveis mais influentes na hidrodinâmica de um parque de OWSC's.
- e) **Considerações finais** – responsável pelas observações finais, reunindo os principais pontos abordados ao longo do trabalho e realizando o fechamento dos objetivos propostos.
- f) **Sugestões de pesquisa** – fornece algumas sugestões de continuidade do trabalho e cita algumas lacunas deixadas em aberto para guiar futuros pesquisadores, bem como nortear o estudo de novas linhas de pesquisa sobre este sistema de conversão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo fundamentar todo o conhecimento teórico-científico necessário para o correto desenvolvimento e análise do presente trabalho. Sendo assim, a revisão bibliográfica se inicia com uma concisa abordagem sobre os principais pontos da engenharia costeira. Em seguida, uma seção sobre conceitos importantes de modelagem numérica de escoamentos turbulentos é apresentada. Por fim, a última parte do capítulo é dedicada ao estado da arte do sistema de conversão por translação de ondas, contemplando os tópicos e os resultados científicos mais relevantes sobre esta tecnologia.

2.1 CONCEITOS DE ENGENHARIA COSTEIRA

A hidrodinâmica das ondas dos mares e oceanos é bastante diferente dos escoamentos clássicos em condutos e canais, tanto em termos de movimento quanto em complexidade. Além disto, a dinâmica do escoamento envolvido possui uma grande variabilidade no tempo e no espaço. Levando em consideração estes pontos, esta seção contempla, em ordem, os seguintes tópicos: zonas do oceano, formação e principais tipos de ondas oceânicas e hidrodinâmica de ondas.

2.1.1 Regiões e divisões do oceano

O ambiente marinho corresponde a, aproximadamente, 70% da superfície do globo terrestre, o que representa 361 milhões de km². Estima-se que grande parte do oceano possua profundidades em torno de 1 km a 3 km, o que permite dividi-lo em diferentes zonas (ACQUA, [2000?]), como pode ser observado na Figura 2.1.

Segundo Branco ([2013?]), o relevo marinho compreende cinco formas principais:

- a) **Plataforma continental:** é a porção do oceano mais próxima do continente, que pode atingir profundidades de até 200 m. Possui uma inclinação geralmente suave (em torno de 1 m na vertical para 1000 m na horizontal). Esta zona é a mais importante do relevo submarino, pois possui muitos recursos naturais, em razão da luz conseguir atingir o fundo, permitindo a fotossíntese (motivo pelo qual também é conhecida por zona fótica).
- b) **Talude continental:** é uma região com inclinação bastante pronunciada (1 m na vertical para 40 m na horizontal, em média), além de apresentar um relevo muito irregular, o que favorece as correntes de turbidez e os depósitos

sedimentares do tipo turbidito. A base do talude (sopé continental) localiza-se em profundidades entre 3000 m e 5000 m.

- c) **Planície abissal**: região extensa, consideravelmente plana e horizontal, localizada em torno de 4000 m de profundidade. Podem ser interrompidas localmente por montanhas ou montes submarinos (que podem atingir até 1000 m de altura). Em termos biológicos, é conhecida como domínio pelágico, e pode ser subdividido em zona epipelágica (até 200 m de profundidade, onde apenas 1% da luz penetra), mesopelágica (até 1000 m de profundidade), batipelágica (até 4000 m de profundidade, região sem presença de luz), abissopelágica (região onde a pressão de água é muito grande, dificultando as formas de vida; os seres vivos dessa região possuem adaptações especiais, podendo atingir tamanhos gigantes) e hadopelágica (possui mais de 6000 m de profundidade, como, por exemplo, as Fossas Marianas, com 11000 m e 1100 atmosferas de pressão).
- d) **Fossas submarinas**: correspondem as zonas mais profundas do oceano, de forma alongada, estreitas e com grandes declividades. São formadas onde ocorre o encontro de duas placas tectônicas.
- e) **Cordilheiras oceânicas**: são zonas alongadas, formadas por processos vulcânicos e de movimento das placas tectônicas. Cita-se, como exemplo, a Dorsal Mesoatlântica.

A figura 2.1 mostra, de forma esquemática, a divisão das principais regiões do oceano.

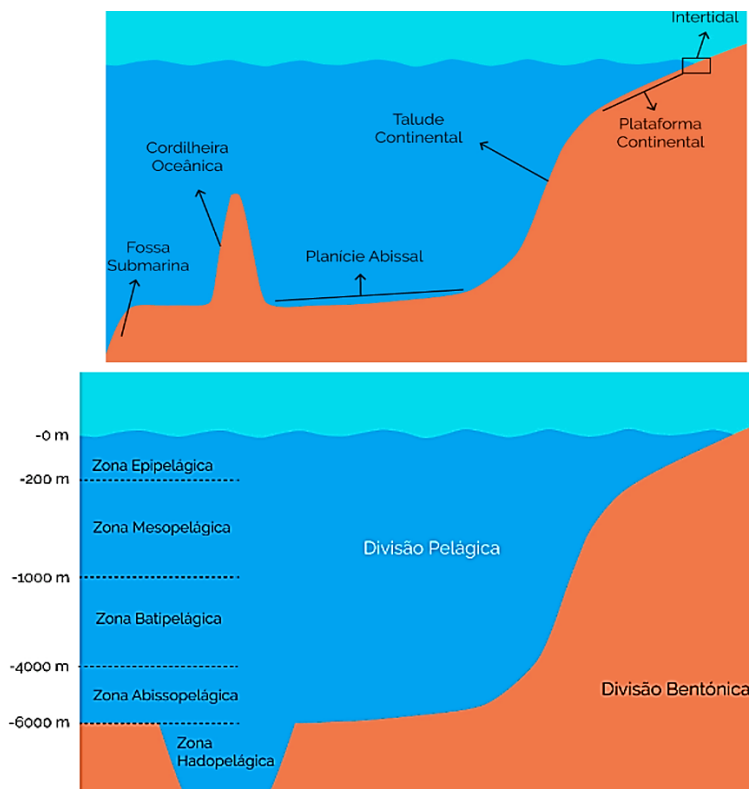


Figura 2.1 – Principais zonas do relevo marinho.
(fonte: MAR DE VIDA MUSEU, 2017)

A plataforma continental representa a região do oceano de maior importância em termos econômicos e de relevo, em função dos diversos fenômenos biológicos e hidrodinâmicos associados (NEW WORLD ENCYCLOPEDIA, 2017). Esta zona (Figura 2.2) costuma ser subdividida em três regiões principais (BLACKLEDGE et al., 2013):

- Região *onshore***: região onde a hidrodinâmica é fortemente influenciada pela quebra das ondas e pela proximidade com o fundo do oceano e com a praia. Contempla regiões de até 10 m de profundidade, com alturas máximas de onda de até 7,8 m.
- Região *nearshore***: região onde a hidrodinâmica das ondas começa a ser influenciada pela ação do fundo. Esta zona possui até 30 m de profundidade e nela podem ocorrer ondas de até 15,6 m de altura.
- Região *offshore***: corresponde a região mais afastada da praia (com profundidades superiores a 30 m), onde a influência do fundo é desprezível. Alturas de onda de até 30 m podem ocorrer nesta zona.

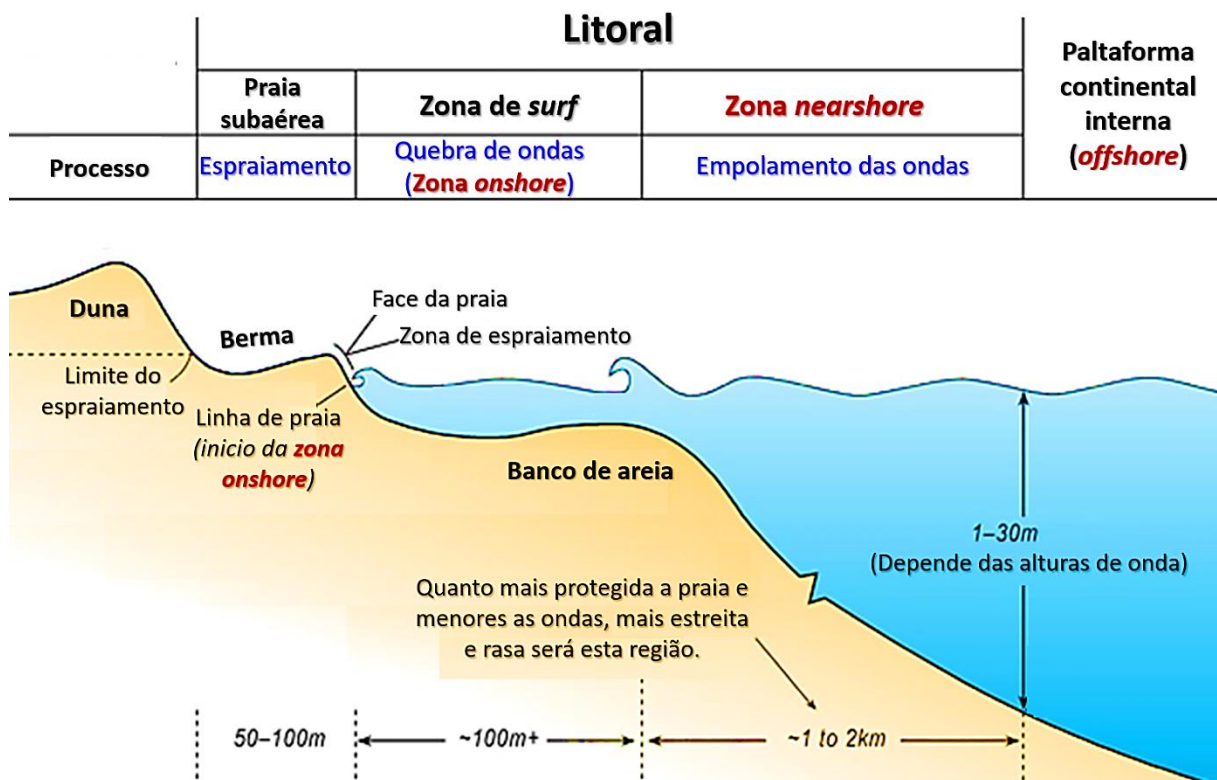


Figura 2.2 – Detalhamento da plataforma continental.
(fonte: adaptado de KNOWLEDGE PROJECT, 2014)

2.1.2 Formação e principais tipos de ondas oceânicas

As ondas do oceano podem ser formadas de diversas maneiras distintas, sendo estas diferenciadas entre si pelas forças geradoras e restauradoras de ondas. O princípio de formação consiste na deformação de uma massa líquida por uma força geradora, em razão da ação dos ventos, dos deslocamentos de terra, das ações de vulcões ou de impactos sobre a superfície da água. A partir de sua geração, as ondas adquirem movimento e começam a agir as forças restauradoras, tais como a força da gravidade, a tensão superficial e o efeito de rotação da terra (DEAN; DALRYMPLE, 2004). A seguir são apresentados os principais tipos de onda existentes nos mares e oceanos (MEI; STIASSNIE; YUE, 2005):

- a) **Ondas capilares:** provocadas por ventos de baixa intensidade, responsáveis por ocasionar pequenas perturbações na superfície da água. Possuem períodos típicos menores que 0,1 s e a força restauradora atuante é a tensão superficial da água.
- b) **Ondas de vento:** são formadas pela ação direta dos ventos que exercem tensões cisalhantes na superfície da água, dando origem a ondas com diversas amplitudes, períodos e comprimentos. Ventos mais intensos são responsáveis por gerar ondas com maiores alturas, que se caracterizam por cristas com forma de picos inclinados para a direção de propagação (que representa a superposição de diferentes ondas). Estas ondas costumam ser classificadas em termos de parâmetros médios, como a altura e o período de onda significativos.
- c) **Ondas de swell:** também conhecidas como “marulhos”, são ondas formadas pelo vento em áreas de geração, entretanto, possuem energia suficiente para percorrer grandes distâncias, independente da ação eólica. Estas podem se mover em direções diferentes à propagação dos ventos e possuem períodos típicos entre 5 s e 30 s.
- d) **Ondas de seiche:** corresponde à formação de ondas estacionárias, em função do princípio de reflexão de ondas, o que acaba gerando um movimento aparente para cima e para baixo na superfície da água. Podem ser ocasionadas por deslizamentos de terra, terremotos, ou, ainda, por ventos de grande intensidade que, em um curto período de tempo, cessam ou diminuem. Ocorrem geralmente em lagos, baías e portos.
- e) **Tsunamis:** esta onda é gerada por perturbações de terra no fundo marinho, responsáveis por fornecer bastante energia. Em zonas menos profundas, podem atingir alturas da ordem de 10 m e causar grandes desastres. Seus períodos típicos variam entre 10 min e 30 min, enquanto seus comprimentos de onda podem atingir centenas de quilômetros.
- f) **Ondas de maré:** resultantes da atração gravitacional do Sol e da Lua. Possuem longos períodos (da ordem de horas) e são fortemente influenciadas pelas configurações dos corpos de água e da aceleração de coriolis.

As ondas de vento, *swell* e tsunamis possuem como força restauradora a gravidade, razão pela qual são conhecidas por ondas de gravidade (MEI; STIASSNIE; YUE, 2005). A Figura 2.3 apresenta os períodos típicos e o espectro de frequências dos principais tipos de onda do oceano, de onde se observa que as ondas de gravidade são as mais frequentes.

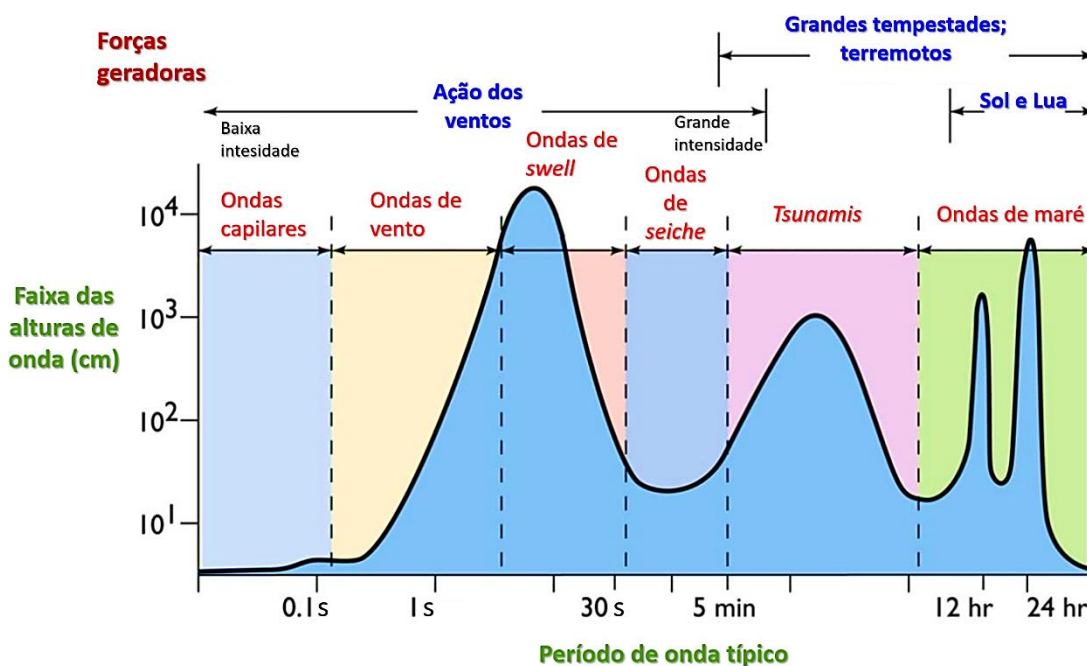


Figura 2.3 – Períodos típicos e espectro de frequências dos principais tipos de onda (fonte: SINGH, 2019)

2.1.3 Tópicos importantes sobre a hidrodinâmica das ondas

As ondas geralmente são formadas em zonas mais profundas do oceano, a partir das quais adquirem energia cinética pela ação dos ventos e passam a se movimentar em direção à costa, sendo denominadas ondas progressivas. Ao longo da linha de movimento de uma onda, diversos fatores, como a mudança da profundidade, o relevo de fundo, a geometria da praia e a direção de propagação da onda, são responsáveis por modificar a hidrodinâmica da mesma. Desta maneira, a altura e o período de onda, a energia transportada e a região de ocorrência da rebentação (fenômeno dissipativo), podem ser modificados ao longo do percurso. Buscando fornecer algumas noções importantes, os seguintes tópicos trazem, de forma resumida, os pontos mais importantes a respeito da hidrodinâmica de ondas, reunindo uma descrição das principais teorias e dos fenômenos envolvidos.

2.1.3.1 Formação e dinâmica de ondas progressivas

Segundo Xie e Zuo (2013), o vento exerce tensões cisalhantes sobre a superfície do oceano, transferindo energia para uma grande quantidade de água, que passa a se movimentar em direção à costa. No início deste processo, são formadas as ondas capilares, que, em função do fornecimento de energia, sofrem um aumento de amplitude, até a condição de oceano plenamente desenvolvido ser atingida. A partir deste instante, as ondas adquirem energia suficiente para continuar seu movimento independentemente da força dos ventos (ondas de *swell*), sendo influenciadas pela ação da gravidade, que passa a atuar como força restauradora, ocasionando a quebra das mesmas (dissipação) em regiões mais rasas. A zona onde os efeitos eólicos exercem forte influência na geração de ondas é denominada *fetch*, e sua extensão, juntamente com a velocidade e com a duração dos ventos, representa um dos fatores determinantes nas características (altura e período) das ondas formadas. O referido processo encontra-se esquematizado na Figura 2.4.

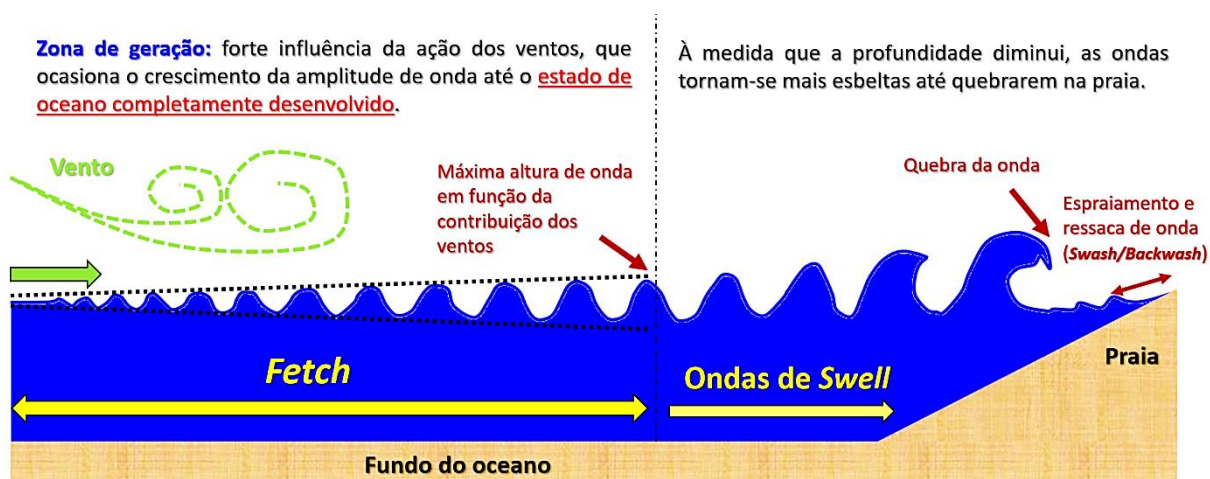


Figura 2.4 – Geração e dinâmica de ondas progressivas a partir da ação dos ventos (fonte: desenvolvida pelo autor)

A perturbação exercida pela força eólica sobre a superfície ocasiona um movimento de partículas de fluido em trajetórias orbitais. Em zonas muito profundas, estas trajetórias são circulares, entretanto, à medida que a profundidade diminui, o fundo e as margens passam a exercer influência sobre a hidrodinâmica, resultando em trajetórias mais alongadas, similares a elipses (SORENSEN, 2005). Desta maneira, as águas do oceano podem ser classificadas em três regiões principais (Figura 2.5), com base no comportamento das ondas em cada uma delas (DEAN; DARLYMPLE, 1991):

- a) **Águas profundas**: esta região não sofre influência do fundo do oceano, possibilitando a ocorrência de trajetórias circulares, que diminuem de tamanho com o aumento da profundidade. Para profundidades superiores à metade de um comprimento de onda, as velocidades das partículas são consideravelmente baixas, levando a uma distribuição hidrostática da pressão.
- b) **Águas intermediárias**: nesta zona o fundo passa a exercer certa influência, modificando as trajetórias das partículas relativamente próximas a ele, que adquirem um formato mais alongado. Observa-se, então, que a presença do fundo diminui a componente vertical e potencializa a componente horizontal do movimento das ondas.
- d) **Águas rasas**: região onde a presença dos contornos sólidos ocasiona a formação de trajetórias bastante elípticas, destacando a forte influência da componente horizontal no movimento. Observa-se ainda, que, em regiões muito próxima ao fundo, as partículas adquirem movimentos praticamente horizontais, ora para frente, ora para trás.

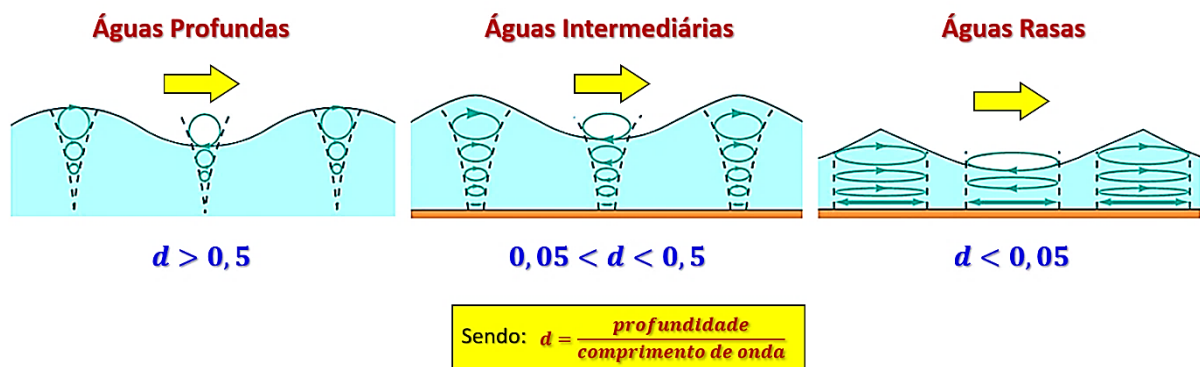


Figura 2.5 – Classificação das águas do oceano.
(fonte: adaptado de MELDAHL, 2002)

Conhecendo-se a velocidade média do vento (V_{m_v}), o comprimento médio do *fetch* (f_e) e a aceleração da gravidade (g), é possível estimar a altura (H_s) e o período (T_s) de onda significativos, assim como o tempo mínimo de duração (t_{min}) para que estas características sejam estabelecidas (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1984):

$$H_s = 0,0016 V_{m_v} \sqrt{\frac{f_e}{g}}, \quad (1)$$

$$T_s = 0,286 \sqrt[3]{\frac{V_{m_v} f_e}{g^2}}, \quad (2)$$

$$t_{min} = 68,8 \sqrt[3]{\frac{f_e^2}{gV_{m_v}}}. \quad (3)$$

2.1.3.2 Teoria de ondas de pequena amplitude (Teoria Linear)

A hidrodinâmica de ondas é bastante complexa, tendo em vista o comportamento irregular e variável do oceano, entretanto, a Teoria Linear de ondas, ainda que simplificada, é uma ferramenta frequentemente utilizada pelos profissionais e pesquisadores (XIE; ZUO, 2013). Esta teoria, também chamada de Teoria de Airy ou Teoria de Stokes de primeira ordem, está fundamentada na hipótese de que a amplitude da onda é consideravelmente pequena, quando comparada ao comprimento da mesma, possibilitando diversas hipóteses simplificadoras, o que não invalida sua grande importância e aplicação em diversos casos de engenharia (SORENSEN, 2005). Uma extensa revisão e grande parte da fundamentação a respeito desta teoria pode ser encontrada na obra de Dean e Dalrymple (1991), na qual toda esta seção está baseada.

Todas as teorias de onda utilizam alguns parâmetros principais como a altura de onda (H), o período (T), o comprimento (L) e a profundidade (h). Um esquema ilustrando estes parâmetros é apresentado na Figura 2.6.

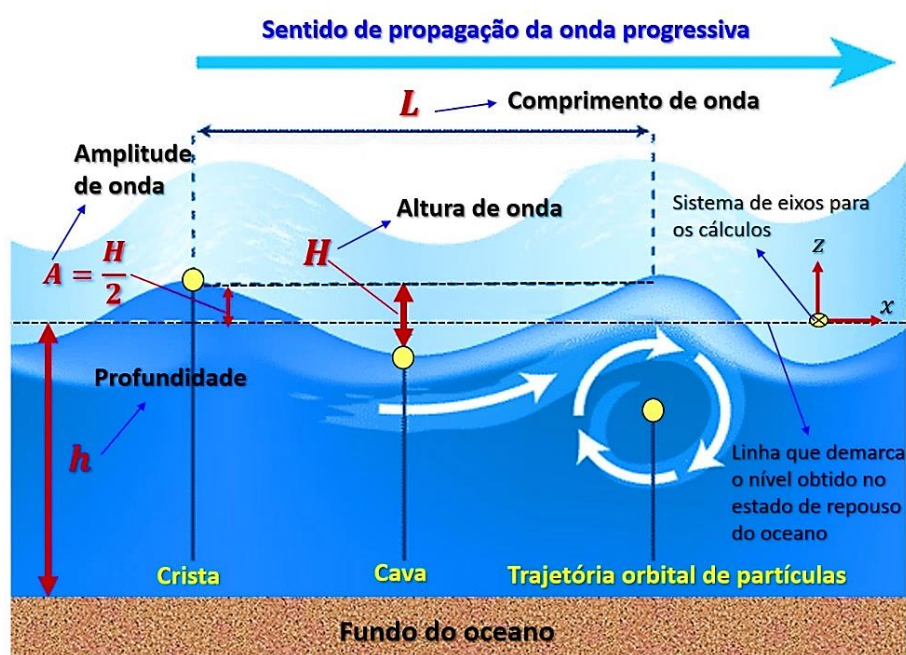


Figura 2.6 – Elementos principais de uma onda progressiva
(fonte: adaptado de CK-12 FOUNDATION, 2020)

A seguintes expressões possibilitam o cálculo do comprimento de onda, da sua celeridade ou velocidade de propagação (C), da frequência angular (σ), do número de onda (k) e da variação da superfície (η) em relação a linha de repouso:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right), \quad (4)$$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right), \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T}, \quad (6)$$

$$k = \frac{2\pi}{L}, \quad (7)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t), \quad (8)$$

onde x corresponde a uma posição arbitrária na horizontal, ao longo do movimento da onda.

Em águas profundas, as expressões 4 e 5 podem ser simplificadas, dando origem às fórmulas que calculam o comprimento (L_0) e a celeridade (C_0) para esta região:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}, \quad (9)$$

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi}. \quad (10)$$

A componentes horizontais (V_x) e verticais (V_z) da velocidade das partículas podem ser calculadas da seguinte maneira:

$$V_x = \frac{gHk}{2\sigma} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t), \quad (11)$$

$$V_z = \frac{H\sigma}{2} \frac{\sinh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \sin(kx - \sigma t), \quad (12)$$

em que z e t representam, respectivamente, uma posição arbitrária na direção vertical e um determinado instante de tempo, medido a partir do repouso (onde $t = 0$).

A trajetória das partículas pode ser obtida por meio da integração das fórmulas 11 e 12 ao longo do tempo, o que resulta nas expressões para o cálculo dos deslocamentos horizontal e vertical, respectivamente:

$$\zeta_x = \frac{-H}{2} \left[\frac{\cosh k(h+z)}{\operatorname{sen} kh} \right] \operatorname{sen}(kx - \sigma t), \quad (13)$$

$$\zeta_z = \frac{H}{2} \left[\frac{\operatorname{senh} k(h+z)}{\operatorname{sen} kh} \right] \operatorname{cos}(kx - \sigma t). \quad (14)$$

A expressão 15 pode ser utilizada para calcular a pressão total (P_{tot}) em um determinado ponto ao longo do movimento da onda:

$$P_{tot} = -\rho g z + \frac{\rho g H}{2} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \operatorname{cos}(kx - \sigma t), \quad (15)$$

onde ρ corresponde à massa específica da água. Salienta-se ainda que, nesta expressão, a primeira parcela da soma corresponde à **parte hidrostática** da pressão, ao passo que a segunda representa a **pressão dinâmica** contida em uma onda.

A energia superficial (E_s), com dimensões em termos de energia por área superficial, transportada por uma onda progressiva pode ser estimada pela seguinte fórmula:

$$E_s = \frac{\rho g H^2}{8}. \quad (16)$$

A velocidade de grupo (C_g), em conjunto com a expressão 16, possibilita o cálculo aproximado da potência unitária (P_u), em unidades de potência por comprimento de crista de onda:

$$C_g = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\operatorname{senh}(2kh)} \right), \quad (17)$$

$$P_u = E_s C_g . \quad (18)$$

2.1.3.2.1 Principais fenômenos envolvidos na propagação de uma onda

Ao viajarem em direção à costa, as ondas experimentam diversas variações hidrodinâmicas em função da profundidade, das irregularidades do fundo do oceano e do relevo da região. Estes fatores são responsáveis por modificar a altura, o período, a celeridade e a velocidade de partículas das ondas. De uma forma geral, podem ser citados três fenômenos hidrodinâmicos principais:

- a) **Empolamento (Shoaling)**: as ondas geradas em regiões mais profundas, ao entrarem em zonas mais rasas, tornam-se mais esbeltas e apresentam comprimentos de onda menores.
- b) **Refração**: este fenômeno ocorre como consequência direta da combinação da variação de profundidade e das mudanças no relevo. Desta maneira, a onda pode ser desviada da sua direção de propagação inicial (em relação à zona em que foi gerada), buscando o alinhamento com a linha de costa.
- c) **Quebra (Rebentação ou Breaking)**: em grandes tempestades ou em regiões muito rasas, a onda torna-se muito esbelta até que, em um determinado instante, a gravidade não consegue mais atuar como força restauradora. Neste momento, ocorre a rebentação da onda, em que se observa intensa turbulência e bastante dissipação de energia.

Em casos onde o relevo de fundo é aproximadamente paralelo à linha de costa, a refração pode ser explicada pela Lei da Refração (também conhecida como Lei de Snell):

$$\frac{\text{sen}\alpha_0}{C_0} = \frac{\text{sen}\alpha_r}{C_r} , \quad (19)$$

onde α_0 , α_r e C_r são, respectivamente, o ângulo de propagação da onda em águas mais profundas, o ângulo de propagação e a celeridade em uma região mais rasa.

De maneira similar, é possível estimar a altura (H_r) que a onda terá em uma região mais rasa, com base na altura da mesma em uma zona mais profunda (H_0). As seguintes expressões podem ser utilizadas para o cálculo desta altura:

$$K_s = \sqrt{\frac{C_0}{2C_{gr}}}, \quad (20)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha_r}}, \quad (21)$$

$$H_r = H_0 \cdot K_s \cdot K_r, \quad (22)$$

em que K_s , K_r e C_{gr} correspondem, respectivamente, ao coeficiente de empolamento, ao coeficiente de refração e à velocidade de grupo em uma região mais rasa.

Xie e Zuo (2013) abordam que o valor de H_r também pode ser determinado, de forma prática, pela expressão que segue:

$$H_r = H_0 \sqrt{\frac{2 (\cosh kh)^2}{\sinh (2kh) + kh}}. \quad (23)$$

Supondo conhecida a altura de geração de uma determinada onda em águas profundas, é possível estimar a profundidade (h_b) em que a mesma irá quebrar, assim como a sua altura máxima (H_b) atingida neste instante:

$$h_b = \frac{1}{0,84g^{1/5}} \left(\frac{H_0^2 C_0 \cos\alpha_0}{2} \right)^{2/5}, \quad (24)$$

$$H_b = \left(\frac{0,8}{g} \right)^{1/5} \left(\frac{H_0^2 C_0 \cos\alpha_0}{2} \right)^{2/5}. \quad (25)$$

A expressão a seguir consiste em um método alternativo para o cálculo de H_b , razoavelmente aproximado para diversas profundidades (ORCAFLEX, 2019a):

$$H_b = \frac{0,88}{k} \tanh(0,89kh) . \quad (26)$$

É importante salientar que as expressões anteriores não levam em consideração a declividade da região de praia. Nestes últimos, é necessário utilizar os ábacos, resultantes de diversos estudos experimentais, disposto nas Figuras 2.7 e 2.8, para a estimativa de h_b e H_b (SORENSEN, 2005).

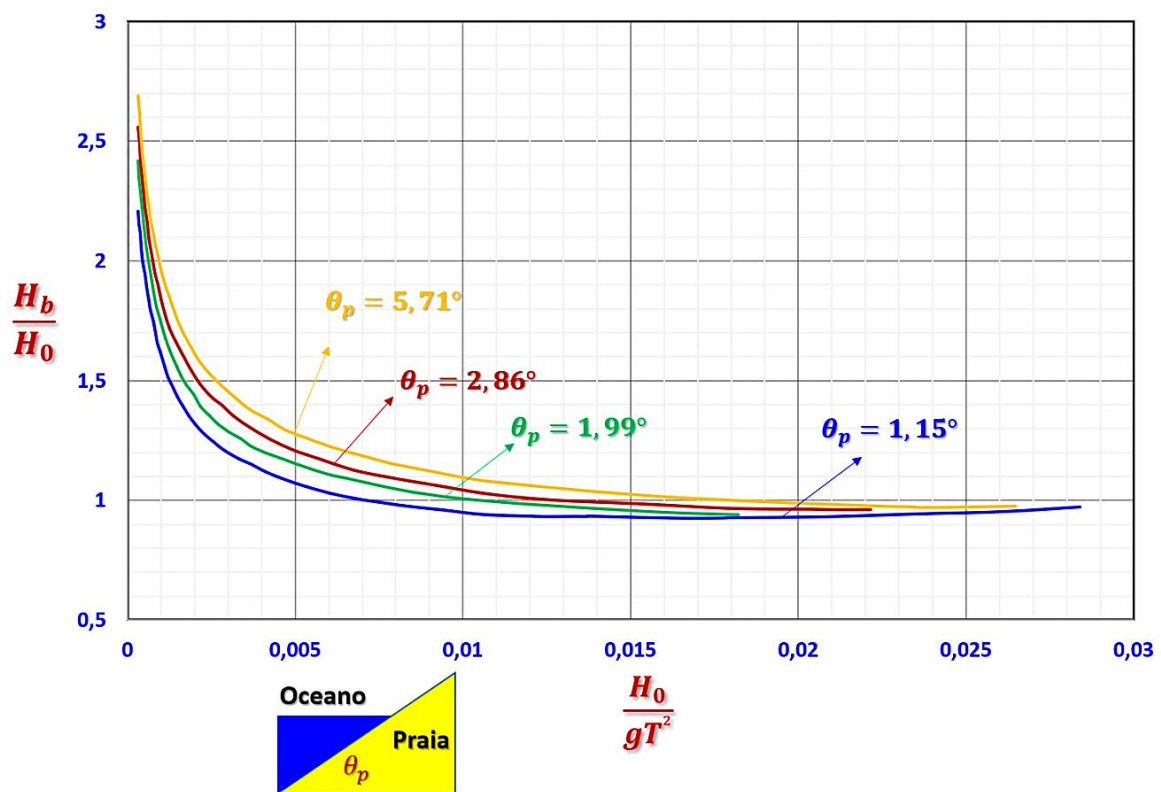


Figura 2.7 – Ábaco para a estimativa de H_b , supondo conhecidos o período, a altura de geração da onda em águas profundas e o ângulo de inclinação da praia (fonte: adaptado de SORENSEN, 2005)

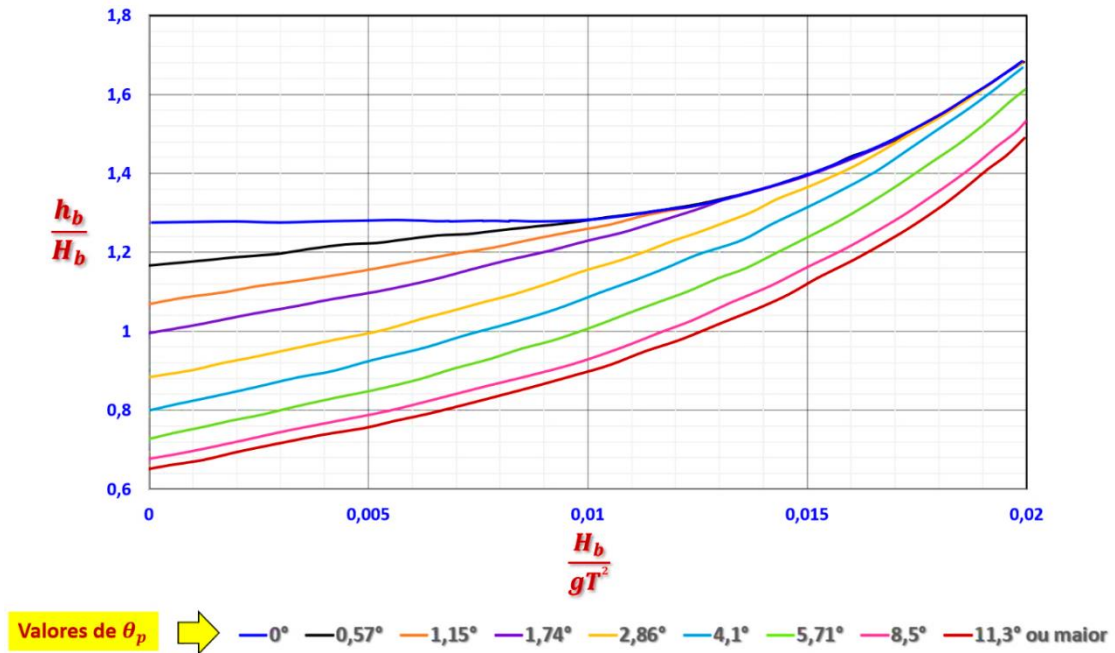


Figura 2.8 – Ábaco para a estimativa de h_b , supondo conhecidos o período, a altura de quebra da onda e o ângulo de inclinação da praia (fonte: adaptado de SORENSEN, 2005)

2.1.3.2.2 Adaptações da Teoria Linear para ondas estacionárias

Quando uma onda atinge uma parede praticamente vertical, a mesma é refletida no sentido contrário, com a mesma amplitude e período, encontrando parte da onda incidente, momento no qual se origina a onda estacionária. A altura, neste caso, é igual a duas vezes a altura da onda incidente, em função do efeito de superposição. Esta onda, em termos visuais, permanece parada, ocorrendo somente movimentos aparentes para cima e para baixo, o que evidencia o aumento da componente vertical do movimento, como apresentado na Figura 2.9.

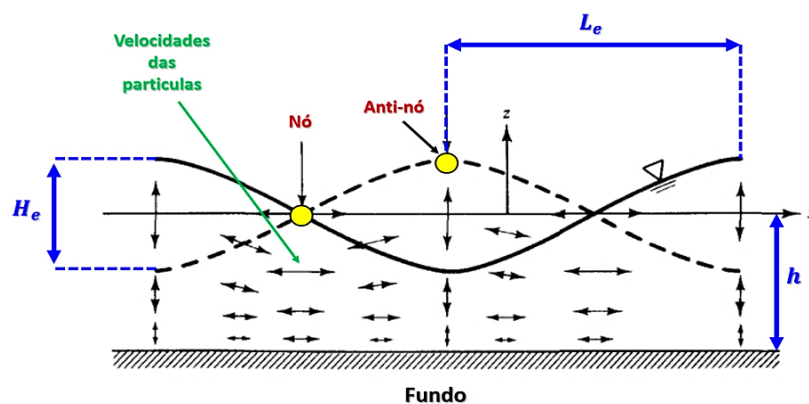


Figura 2.9 – Detalhes de uma onda estacionária (fonte: adaptado de DEAN; DALRYMPLE, 1991)

Este tipo de onda, também conhecida como *seiche*, é bastante importante, pois modela o comportamento de corpos d'água fechados como, por exemplo, portos, baías, grandes lagos e estuários (SORENSEN, 2005). Entretanto, suas propriedades são diretamente influenciadas pela caracterização geométrica e pela capacidade de reflexão da costa, o que pode resultar em ondas parcialmente estacionárias.

De maneira similar às ondas progressivas, podem ser estabelecidas expressões que permitem estimar a variação da superfície, as componentes da velocidade, os deslocamentos de partículas e a pressão total:

$$\eta = \frac{H_e}{2} \cos(kx) \cos(\sigma t), \quad (27)$$

$$V_x = \frac{H_e}{2} \sigma \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx) \sin(\sigma t), \quad (28)$$

$$V_z = -\frac{H_e}{2} \sigma \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx) \sin(\sigma t), \quad (29)$$

$$\zeta_x = -\frac{H_e}{2} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx) \cos(\sigma t), \quad (30)$$

$$\zeta_z = \frac{H_e}{2} \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx) \cos(\sigma t), \quad (31)$$

$$P_{tot} = -\rho g z + \frac{\rho g H}{2} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx) \cos(\sigma t), \quad (32)$$

onde H_e corresponde a altura da onda estacionária.

As alturas de quebra das ondas estacionárias, para o caso de águas profundas (H_{bep}) e águas rasas (H_{ber}), podem ser estimadas pelas seguintes expressões:

$$H_{bep} = 0,218 L_0, \quad (33)$$

$$H_{ber} = 1,37 h. \quad (34)$$

2.1.3.3 Outras teorias de onda

Em razão da complexidade dos fenômenos e variáveis envolvidas no movimento e ação das ondas (em especial, as modificações decorrentes da variação da profundidade), surge a necessidade de adotar diferentes considerações e simplificações em um determinado caso de estudo, o que, conseqüentemente, leva à utilização de diferentes teorias de onda (KARADENIZ, 2012). Kamphuis (2010) aborda que existem três classes de teorias de onda principais:

- a) **Teoria de Stokes**: esta teoria assume que o potencial de velocidades e a elevação da superfície da água podem ser representados por uma série de potências, as quais estão baseadas em um parâmetro adimensional de perturbação, que leva em conta a amplitude e o número de onda da mesma. Assim, esta teoria contempla diversas ordens, dependendo do número de parcelas utilizadas na série, sendo a teoria mais abrangente desta família a **Teoria de Stokes de 5ª Ordem**. Este grupo de equações se mostra bem adequado para o tratamento de ondas em águas intermediárias e profundas.
- b) **Teoria de onda Cnoidal**: uma onda do tipo cnoidal corresponde a uma solução não linear cuja elevação da superfície é proporcional ao quadrado da função jacobiana elíptica “cn”, obtida por Korteweg e de Vries (1895). Esta teoria é recomendada para representar ondas de comprimentos relativamente maiores que a profundidade, comportamento típico de ondas em águas rasas (FENTON, 1999).
- c) **Stream Function**: diferente dos tipos anteriores, esta teoria está baseada em uma metodologia puramente numérica, considerando os casos de ondas completamente não-lineares, os quais envolvem a resolução da equação de Laplace com duas condições de contorno não-lineares para a superfície da água (DEAN, 1965). Mais tarde esta metodologia, originalmente desenvolvida por Dean (1965), foi aperfeiçoada por Rienecker e Fenton (1981), que propuseram a representação da solução da função potencial, de alta complexidade, por meio de séries de Fourier. Esta teoria detém uma significativa importância, tendo em vista que é capaz de modelar ondas em águas profundas, intermediárias e rasas, inclusive em estados muito próximos à rebentação (HIGUERA, 2016).

Segundo o manual do código OrcaFlex v.11.0b (ORCAFLEX, 2019b), as teorias de onda devem ser escolhidas segundo o número adimensional de Ursell (U_{rs}):

$$U_{rs} = \frac{HL^2}{h^3}, \quad (35)$$

de onde recomendam-se as seguintes faixas de aplicação:

$U_{rs} < 40$ – Utilizar a teoria de Stokes de 5ª ordem ou a *Stream Function*;

$U_{rs} = 40$ – Utilizar a *Stream Function*;

$U_{rs} > 40$ – Utilizar a teoria de onda Cnoidal ou a *Stream Function*.

Outra maneira, muito utilizada para determinar qual teoria de onda deve ser aplicada, consiste na utilização do ábaco de Le Méhauté (KAMPHUIS, 2010), apresentado na Figura 2.10.

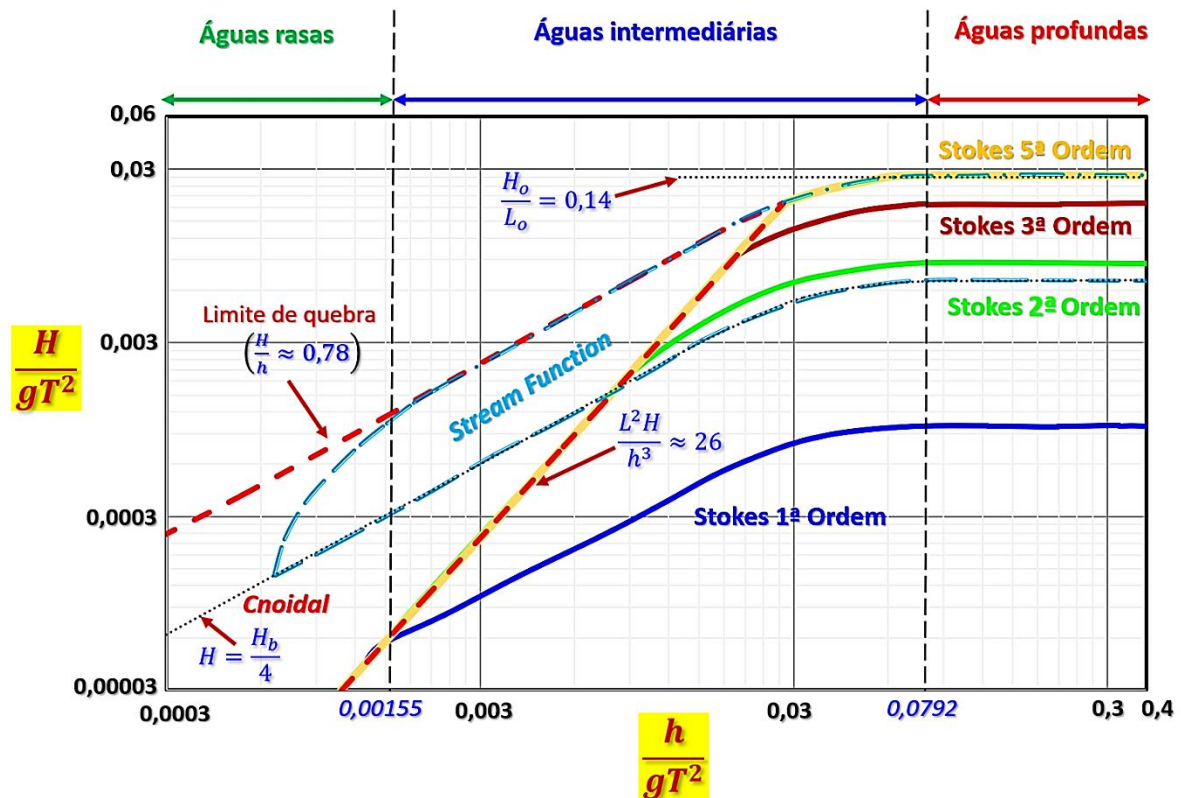


Figura 2.10 – Ábaco para determinação da teoria de onda a ser utilizada (fonte: adaptado de LE MÉHAUTÉ, 1976)

Sorensen (2005) ressalta que, considerando as diversas teorias de onda disponíveis, dois pontos devem ser considerados em uma dada análise, tendo em vista a correta modelagem de um fenômeno real. O primeiro diz respeito a qual teoria melhor se adapta ao caso de estudo, ao passo que o segundo refere-se a qual das teorias representará, de forma satisfatória, toda a propagação da onda ao longo de diversas profundidades diferentes. A Figura 2.11 apresenta uma comparação visual do aspecto da onda gerada segundo as diferentes teorias, o que demonstra como a aplicação inadequada de uma teoria poderá modificar os resultados finais.

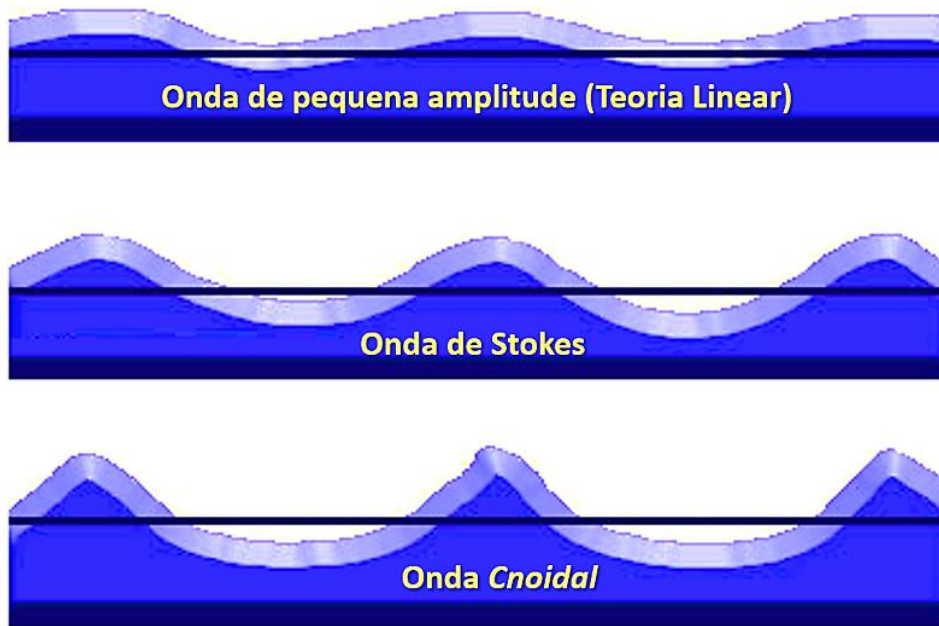


Figura 2.11 – Comparação visual do aspecto da onda gerada segundo as diferentes teorias (fonte: adaptado de HANSON, 2003)

2.1.3.3.1 Teoria de Stokes de quinta ordem

A forma mais adequada desta teoria, recomendada para ondas de grande amplitude em águas intermediárias ou profundas, foi desenvolvida por Fenton (1985). Suas equações para o cálculo do comprimento de onda, da variação da superfície e das velocidades das partículas baseiam-se em expressões polinomiais (cujos coeficientes são apresentados na Figura 2.12), e são apresentadas a seguir:

$$\frac{\pi H}{h} = \frac{L}{h} [\lambda + \lambda^3 B_{33} + \lambda^5 (B_{35} + B_{55})], \quad (36)$$

$$L = L_0 \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) (1 + \lambda^2 C_1 + \lambda^4 C_2), \quad (37)$$

$$\eta = \frac{\lambda \cos(\phi)}{k} + (\lambda^2 B_{22} + \lambda^4 B_{24}) \frac{\cos(2\phi)}{k} + (\lambda^3 B_{33} + \lambda^5 B_{35}) \frac{\cos(3\phi)}{k} + \frac{\lambda^4 B_{44} \cos(4\phi)}{k} + \frac{\lambda^5 B_{55} \cos(5\phi)}{k}, \quad (38)$$

$$V_x = a_1 \cosh(kz) \cos(\phi) + a_2 \cosh(2kz) \cos(2\phi) + a_3 \cosh(3kz) \cos(3\phi) + a_4 \cosh(4kz) \cos(4\phi) + a_5 \cosh(5kz) \cos(5\phi), \quad (39)$$

$$V_z = a_1 \sinh(kz) \sin(\phi) + a_2 \sinh(2kz) \sin(2\phi) \\ + a_3 \sinh(3kz) \sin(3\phi) + a_4 \sinh(4kz) \sin(4\phi) \\ + a_5 \sinh(5kz) \sin(5\phi), \quad (40)$$

$$a_1 = \frac{2\pi}{Tk} (\lambda A_{11} + \lambda^3 A_{13} + \lambda^5 A_{15}), \quad (41)$$

$$a_2 = \frac{4\pi}{Tk} (\lambda^2 A_{22} + \lambda^4 A_{24}), \quad (42)$$

$$a_3 = \frac{6\pi}{Tk} (\lambda^3 A_{33} + \lambda^5 A_{35}), \quad (43)$$

$$a_4 = \frac{8\pi}{Tk} (\lambda^4 A_{44}), \quad (44)$$

$$a_5 = \frac{10\pi}{Tk} (\lambda^5 A_{55}), \quad (45)$$

em que ϕ corresponde à fase da onda (definida como $\phi = kx - \sigma t$), A_{ij} , B_{ij} e C_i aos coeficientes das expressões polinomiais (dependentes de L) de variável λ , e a_i à amplitude dos termos de velocidade.

2.1.3.3.2 Stream Function

Segundo Higuera (2016), em situações onde as teorias de Stokes não são recomendadas, como em águas muito rasas e em casos muito próximos à rebentação, faz-se necessário a utilização da metodologia numérica da *Stream Function*, a qual escreve as soluções em termos de séries de Fourier. Determina-se, primeiramente, o número de parcelas que irão compor cada somatório, e, a partir daí, de maneira similar à forma proposta por Fenton (1988), resolve-se a função potencial, determinando os coeficientes E_j e B_j , que precedem cada parcela da série. Geralmente, um número de 10 a 32 componentes de somatório são suficientes para uma correta representação da onda.

Coeficientes propostos por Fenton (1985)

$$A_{11} = \frac{1}{\operatorname{sen} kh}$$

$$A_{13} = \frac{(-4 - 20S + 10S^2 - 13S^3)}{8 \operatorname{sen} kh(1-S)^3}$$

$$A_{15} = \frac{(-1,184 + 32S + 13,232S^2 + 21,715S^3 + 20,940S^4 + 12,554S^5 - 500S^6 - 3,341S^7 - 670S^8)}{64 \operatorname{sen} kh(3+2S)(4+S)(1-S)^6}$$

$$A_{22} = \frac{3S^2}{2(1-S)^2}$$

$$A_{24} = \frac{(12S - 14S^2 - 264S^3 - 45S^4 - 13S^5)}{24(1-S)^5}$$

$$A_{33} = \frac{(-2S^2 + 11S^3)}{8 \operatorname{sen} kh(1-S)^3}$$

$$A_{35} = \frac{(4S + 105S^2 + 198S^3 - 1,376S^4 - 1,302S^5 - 117S^6 + 58S^7)}{32 \operatorname{sen} kh(3+2S)(1-S)^6}$$

$$A_{44} = \frac{(10S^3 - 174S^4 + 291S^5 + 278S^6)}{48(3+2S)(1-S)^5}$$

$$A_{55} = \frac{(-6S^3 + 272S^4 - 1,552S^5 + 852S^6 + 2,029S^7 + 430S^8)}{6 \operatorname{sen} kh(3+2S)(4+S)(1-S)^6}$$

$$B_{22} = \operatorname{cot} gh kh \frac{(1+2S)}{2(1-S)}$$

$$B_{24} = \operatorname{cot} gh kh \frac{(6 - 26S - 182S^2 - 204S^3 - 25S^4 + 26S^5)}{6(3+2S)(1-S)^4}$$

$$B_{33} = \frac{-3(1+3S+3S^2+2S^3)}{8(1-S)^3}$$

$$B_{35} = \frac{9(132 + 17S - 2,216S^2 - 5,897S^3 - 6,292S^4 - 2,687S^5 + 194S^6 + 467S^7 + 82S^8)}{128(3+2S)(4+S)(1-S)^6}$$

$$B_{44} = \operatorname{cot} gh kh \frac{(24 + 92S + 122S^2 + 66S^3 + 67S^4 + 34S^5)}{24(3+2S)(1-S)^4}$$

$$B_{55} = \frac{5(300 + 1,579S + 3,176S^2 + 2,949S^3 + 1,188S^4 + 675S^5 + 1,326S^6 + 827S^7 + 130S^8)}{384(3+2S)(4+S)(1-S)^6}$$

$$C_1 = (\operatorname{tgh} kh)^{0,5} \left(\frac{2+7S^2}{4(1-S)^2} \right)$$

$$C_4 = (\operatorname{tgh} kh)^{0,5} \left(\frac{4+32S-116S^2-400S^3-71S^4+146S^5}{32(1-S)^5} \right)$$

onde $S = \operatorname{sech} 2kh$

Figura 2.12 – Parâmetros utilizados nas expressões polinomiais da Teoria de Stokes de 5ª ordem
(fonte: adaptado de FENTON, 1985)

A variação da superfície livre e as componentes de velocidade das partículas podem ser determinadas pelas expressões que seguem (HIGUERA, 2016):

$$\eta = h \sum_{j=1}^n E_j \cos[j(kx - \sigma t)], \quad (46)$$

$$V_x = C - \bar{U} + \sqrt{gh^3k^2} \sum_{j=1}^n j B_j \frac{\cosh(jkz)}{\cosh(jkh)} \cos[j(kx - \sigma t)], \quad (47)$$

$$V_z = \sqrt{gh^3k^2} \sum_{j=1}^n j B_j \frac{\sinh(jkz)}{\cosh(jkh)} \sin[j(kx - \sigma t)], \quad (48)$$

em que \bar{U} corresponde à velocidade média de uma eventual corrente, existente na zona de geração, na direção de propagação da onda.

2.2 TÓPICOS SOBRE A MODELAGEM NUMÉRICA DOS ESCOAMENTOS TURBULENTOS

A turbulência está presente em praticamente todos os escoamentos de fluidos, sendo assim, é muito importante conhecer os fenômenos e características a ela associados, visando o correto dimensionamento de estruturas hidráulicas, assim como o cálculo da magnitude e das faixas de oscilações das variáveis envolvidas para compreensão e caracterização dos escoamentos. Além disto, é necessário o desenvolvimento de ferramentas matemáticas de simulação, responsáveis por auxiliar os estudos experimentais e os projetos industriais. Tendo em vista estes pontos, as seções que seguem destinam-se a uma apresentação concisa dos principais tópicos sobre os escoamentos turbulentos, apresentando também algumas metodologias numéricas de modelagem computacional.

2.2.1 Principais noções sobre os escoamentos turbulentos

Diversos são os exemplos de escoamentos turbulentos, dentre os quais citam-se os escoamentos em condutos forçados, em canais e em torno de corpos imersos (ÇENGEL; CIMBALA, 2017). Estes são caracterizados por flutuações instantâneas de velocidade, temperatura, pressão e

outras diversas grandezas, o que ocasiona a contínua transferência de quantidade de movimento, energia e outras propriedades, influenciando significativamente na distribuição destas ao longo do escoamento (SOUZA et al., 2011). Möller e Silvestrini (2004) relatam que a ocorrência destas flutuações está diretamente ligada à existência de vórtices de diversas escalas. Os mesmos autores associam a turbulência a uma intensificação da resistência ao escoamento (similar a um efeito de aumento da viscosidade de um fluido) e a uma diminuição das forças de arraste sobre corpos imersos (como pilares de ponte, veículos, etc.).

Tennekes e Lumley (1972) relatam a grande complexidade dos escoamentos turbulentos, o que torna difícil uma abordagem estritamente analítica para o tratamento dos mesmos. Estes autores abordam que o fenômeno da turbulência possui algumas características básicas:

- a) **Irregularidade**: escoamentos turbulentos são bastante irregulares, o que torna inviável o tratamento através de um modelo determinístico, sendo necessário, portanto, um tratamento estatístico.
- b) **Grande difusão**: ocorre a intensa mistura entre as camadas de fluido, promovendo a transferência de massa, quantidade de movimento e energia, além de retardar a separação da camada limite.
- c) **Dissipação**: a turbulência é um fenômeno altamente dissipativo, o que, em outras palavras, significa que a mesma necessita de um contínuo fornecimento de energia para suprir as perdas viscosas, ao passo que, se este não existir ou cessar, a turbulência decairá rapidamente.
- d) **Meio contínuo**: as escalas de comprimento dos menores vórtices envolvidos no fenômeno são consideravelmente maiores que as escalas de comprimento molecular, sugerindo, portanto, que a hipótese de contínuo seja válida, implicando que as equações de Navier-Stokes e da Continuidade possam ser aplicadas.
- e) **Vorticidade**: escoamentos turbulentos apresentam grande flutuação da vorticidade em três dimensões, impossibilitando a aplicação da teoria do escoamento potencial nestes casos.

Além das propriedades anteriormente abordadas, um escoamento turbulento é caracterizado por apresentar um elevado número de Reynolds (R_e), sendo este último definido como a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas (ÇENGEL; CIMBALA, 2017):

$$Re = \frac{V_c L_c}{\nu}, \quad (49)$$

em que V_c , L_c e ν correspondem, respectivamente, à velocidade característica do escoamento, ao comprimento característico do problema estudado e à viscosidade cinemática do fluido envolvido.

2.2.1.1 Escalas de turbulência e a cascata de energia

O escoamento turbulento é caracterizado por apresentar a formação de vórtices de diferentes tamanhos característicos, desde aqueles que possuem um tamanho da ordem do comprimento característico do objeto estudado até escalas de comprimento muito menores. Isto equivale a dizer, em outras palavras, que este escoamento apresenta diversas escalas de turbulência (SOUZA et al., 2011). A Figura 2.13 mostra um jato turbulento no qual podem ser observadas diversas escalas de turbulência.

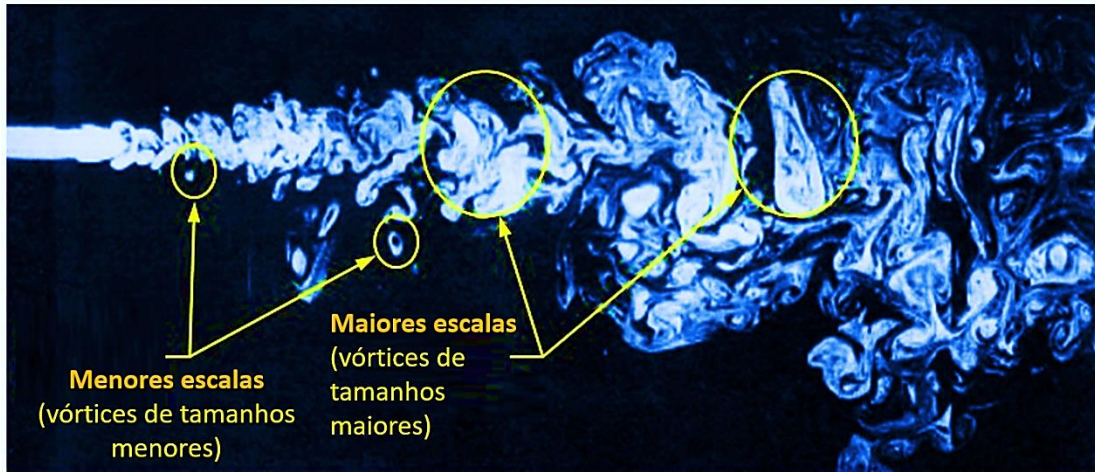


Figura 2.13 – Visualização de diferentes escalas de turbulência em um jato (fonte: adaptado de KESSLER, 2016)

Richardson (1922) percebeu que os maiores vórtices são instáveis e tendem a transferir energia para os vórtices menores, que continuam este processo até que o número de Reynolds característico do vórtice seja suficientemente pequeno para que seu movimento estabilize, possibilitando que a sua energia cinética seja dissipada pela ação viscosa. Tal processo de

transferência de energia, das grandes escalas para as pequenas escalas, ficou conhecido como **cascata de energia** (KOLMOGOROV, 1941).

Segundo Souza et al. (2011), as maiores escalas turbulentas dependem da geometria do escoamento e da maneira como as mesmas são geradas, apresentando também características anisotrópicas (que variam conforme a direção). À medida que as escalas diminuem, passam a depender cada vez menos da geometria do escoamento, apresentando, portanto, comportamentos aleatórios e, conseqüentemente, isotropia. As grandes escalas podem ser associadas às pequenas escalas por meio das seguintes relações (POPE, 2000):

$$l_K = l_{ge} Re_{ge}^{-3/4}, \quad (50)$$

$$u_K = u_{ge} Re_{ge}^{-1/4}, \quad (51)$$

$$\tau_K = \tau_{ge} Re_{ge}^{-1/2}, \quad (52)$$

onde os termos l_i , u_i e τ_i , referem-se, respectivamente, aos comprimentos, velocidades e tempos característicos das pequenas (índice “K”) e das grandes escalas (índice “ge”). Re_{ge} corresponde ao número de Reynolds das grandes escalas.

Uma cascata de energia pode ser criada por meio da confecção de um espectro de frequências, em função das escalas turbulentas, onde, no eixo horizontal, plotam-se os números de onda (κ) dos comprimentos característicos e, no eixo vertical, a energia do espectro ($E(\kappa)$) associada (SILVEIRA NETO, 2002). Segundo Pope (2000), a cascata de energia pode ser dividida em três partes principais: região de produção de energia, sub-região inercial e região de dissipação energética. As duas últimas regiões contemplam a zona do equilíbrio universal, estando presentes em todos os escoamentos turbulentos (KOLMOGOROV, 1941). Möller e Silvestrini (2004) abordam que os vórtices associados à sub-região inercial giram por inércia, transferindo energia para os menores vórtices a uma taxa de dissipação ε . Os mesmos autores também ressaltam que é possível identificar, nesta região, um ajuste de curvas proporcional à quantidade $\varepsilon^{2/3} \kappa^{-5/3}$, diferenciado, para cada escoamento, por uma constante C_κ .

De acordo com Pope (2000), as maiores escalas turbulentas são da ordem das dimensões geométricas do escoamento (como por exemplo, o diâmetro de um pilar de seção cilíndrica), ao

passo que as menores escalas turbulentas são da ordem da **escala de Kolmogorov** (l_K), o que possibilita a divisão da cascata de energia nas três regiões citadas anteriormente. Este autor propõe que a sub-região inercial esteja limitada inferiormente por l_{DI} (onde $l_{DI} \approx 60 l_K$) e superiormente por l_{PI} (sendo $l_{PI} \approx \frac{l_{ge}}{6}$).

A Figura 2.14 mostra, de forma esquemática, uma cascata de energia típica dos escoamentos turbulentos e suas diferentes regiões.

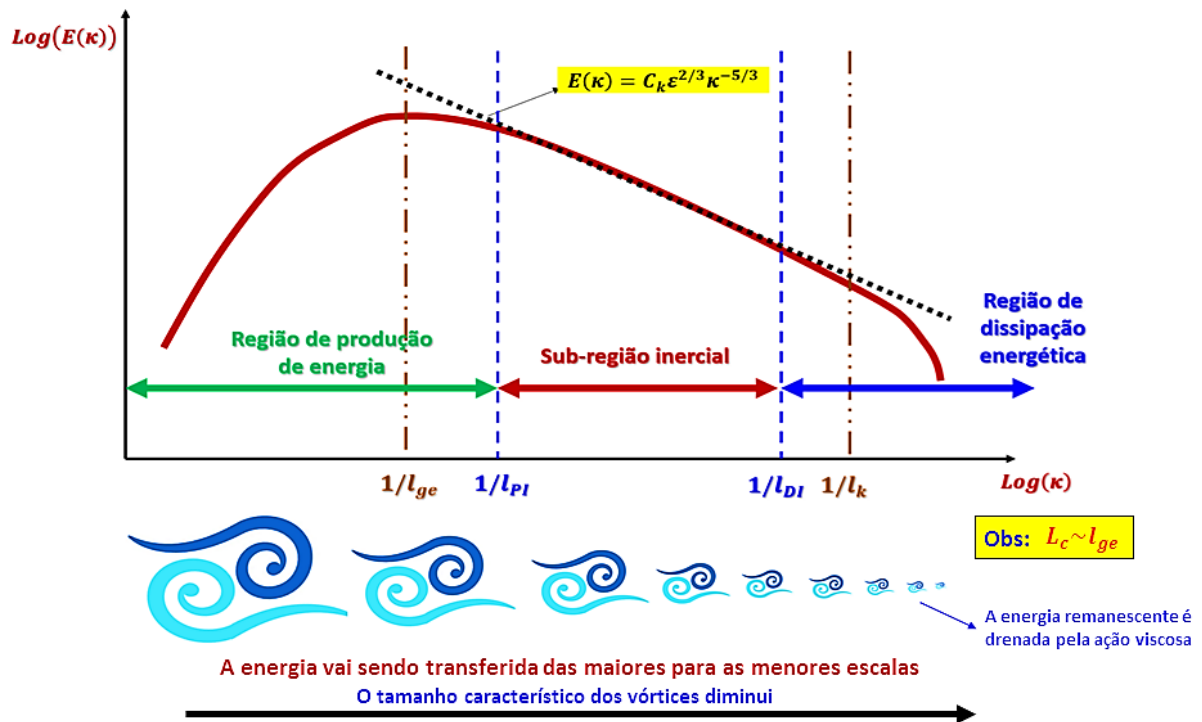


Figura 2.14 – Esquema de uma cascata de energia típica de um escoamento turbulento e suas diferentes regiões (fonte: elaborado pelo autor)

2.2.1.2 Principais metodologias de modelagem da turbulência

As diversas escalas presentes em um fluxo turbulento estão diretamente relacionadas ao número de Reynolds do escoamento, implicando que, em fluxos cujo valor de R_e é suficientemente elevado, existirá maior dispersão das escalas turbulentas, que, por sua vez, estão relacionadas a vórtices de tamanhos diversificados (SILVEIRA NETO, 2002). A modelagem da turbulência consiste basicamente na representação matemática das escalas turbulentas associadas, as quais dependem de um determinado número de pontos para serem reproduzidas. Estes últimos necessitam da utilização de malhas numéricas mais refinadas, as quais demandam maiores custos computacionais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

De uma forma geral, a modelagem da turbulência leva em consideração que uma maior riqueza de detalhes, a respeito do escoamento turbulento, demandará um elevado custo computacional. Fato este que representa uma limitação em diversos estudos científicos e industriais, necessitando, portanto, da utilização de modelos numéricos simplificados capazes de modelar o comportamento total, ou de uma dada parte, das escalas turbulentas envolvidas (RODRIGUEZ, 2019).

Existem três metodologias principais que são utilizadas para a modelagem da turbulência (TU; YEOH; LIU, 2018):

- a) **Simulação Numérica Direta (Direct Numerical Simulation – DNS)**: esta metodologia consiste em resolver numericamente todas as escalas de turbulência envolvidas no escoamento. Isto implica que a malha numérica deve ser suficientemente refinada, para capturar desde os maiores vórtices até os menores, em outras palavras, deve ser capaz de representar todo o processo de transferência da cascata de energia até uma escala próxima a de Kolmogorov. Desta forma, a DNS apresenta uma grande riqueza de detalhes do escoamento, o que, por outro lado, representa um custo computacional muito elevado, dificultando sua aplicação em fluxos com grandes números de Reynolds. Apesar dos grandes avanços computacionais, esta metodologia ainda é inviável para as aplicações práticas na engenharia, ficando restritas a estudos mais detalhados para fins de pesquisa.
- b) **Simulação de grandes escalas (Large Eddy Simulation – LES)**: tendo em vista que as grandes escalas relacionam-se aos vórtices mais energéticos e com tendências anisotrópicas, esta metodologia consiste na resolução matemática das grandes escalas, ao passo que o comportamento das pequenas escalas é reproduzido por meio de um modelo numérico simplificado, dispensando a resolução direta das mesmas. Sendo assim, é necessária a utilização de um filtro numérico pré-determinado para separar as grandes das pequenas escalas, resultando na resolução de apenas uma parte da cascata de energia, a qual é determinada em função da necessidade de detalhes do escoamento para o caso considerado. Este processo resulta em uma descrição satisfatória do escoamento, sem a necessidade de um custo computacional tão elevado quanto o de uma DNS. As simulações em LES vem experimentando um grande crescimento nos últimos anos, porém ainda estão em uma fase inicial e representam a metodologia de maior potencial para um futuro próximo. Pope (2000) afirma que existem três tipos de LES: **LES-NWR** (na qual o filtro e a malha numérica são capazes de capturar 80% da energia da cascata, apresentando resolução próxima às paredes), **LES-NWM** (a malha de cálculo e o filtro utilizados são capazes de capturar 80% da energia contida na região afastada da parede, ao passo que a energia próxima a esta é modelada por funções matemáticas) e **VLES** (na qual o filtro e a malha aplicados são mais grosseiros, capturando menos que 80% da energia total da cascata).

- c) **Simulação com médias de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes* – RANS)**: este método, diferentemente dos dois anteriores, não resolve diretamente nenhuma escala de turbulência, pois todo o processo da cascata de energia é representado por um modelo de turbulência, o que resulta em uma considerável diminuição do custo computacional. As modelagens deste tipo baseiam-se na decomposição em termos médios das equações governantes, ou seja, as flutuações instantâneas das propriedades do escoamento passam a ser tratadas em médias, resultando na perda de detalhamento do escoamento. Para fins de abordagens e estudos práticos da maioria dos casos de engenharia, tal metodologia é suficientemente adequada, o que reflete no seu frequente uso e no desenvolvimento de novos modelos de turbulência ao longo dos anos. Tendo em vista seu baixo custo computacional, este tipo de modelagem é bastante utilizado nos principais estudos acadêmicos e aplicações industriais.

A Figura 2.15 mostra uma comparação visual, para o campo de velocidades de um escoamento, entre as três metodologias básicas de modelagem da turbulência. Nela é possível observar a riqueza de detalhes existentes em uma DNS e LES, ao passo que a modelagem em RANS representa o comportamento médio do escoamento.

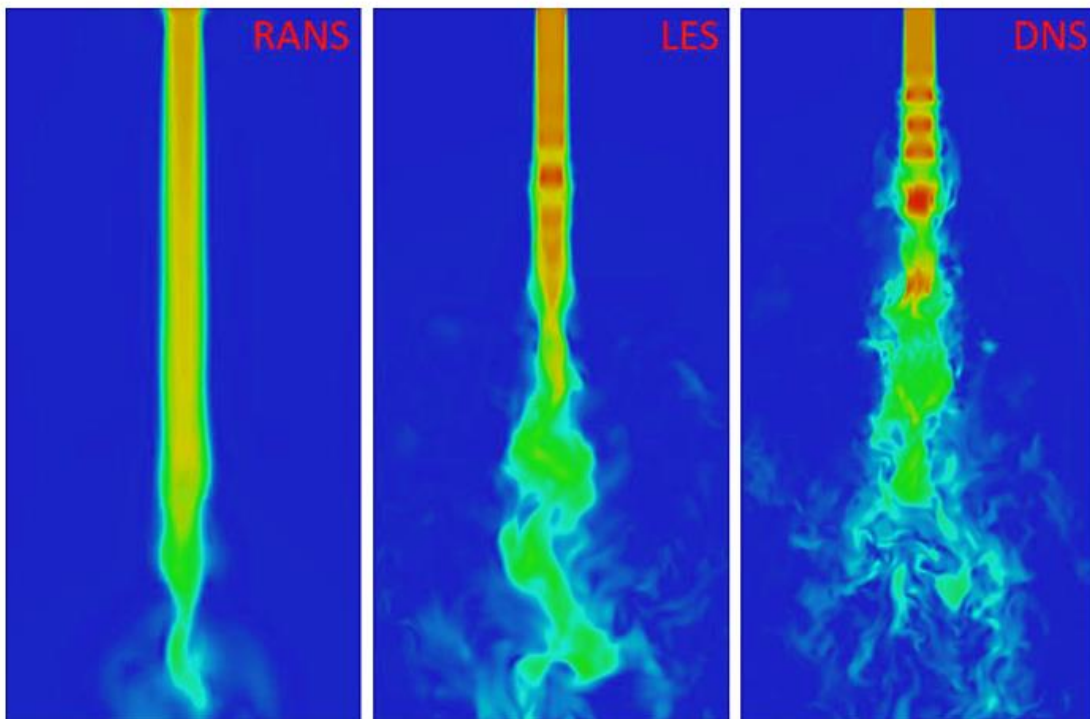


Figura 2.15 – Comparação visual entre as metodologias RANS, LES e DNS na representação de um campo de velocidades (fonte: RODRIGUEZ, 2019)

Uma comparação entre as três metodologias, para o caso da velocidade instantânea em um dado ponto do escoamento turbulento ao longo do tempo, é apresentada na Figura 2.16. Nela se pode observar que as flutuações de velocidade somente são reproduzidas, em sua totalidade, em uma DNS.

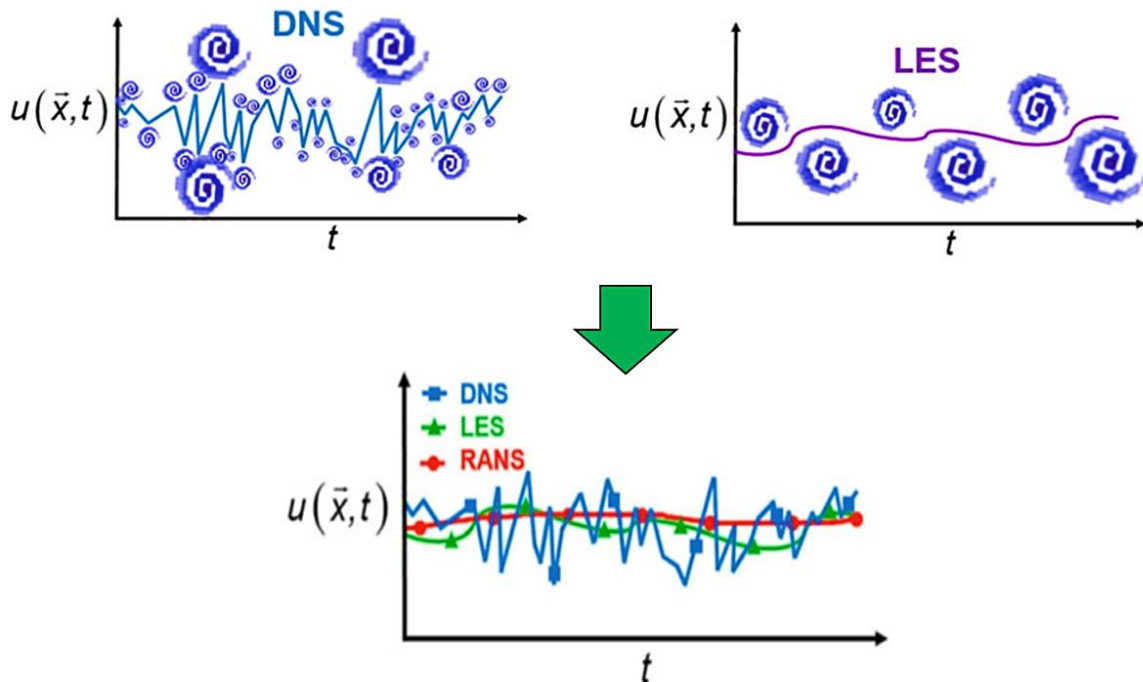


Figura 2.16 – Comparação entre RANS, LES e DNS da velocidade instantânea em um ponto do escoamento turbulento (fonte: adaptado de RODRIGUEZ, 2019)

2.2.1.3 O escoamento próximo aos contornos sólidos

Em qualquer escoamento, as partículas de fluido em contato com superfícies sólidas adquirem, nesta região, velocidades iguais às destes contornos. Na maioria dos casos, as paredes não se movimentam, ocasionando uma velocidade nula nos pontos de contato com estas superfícies, dando origem a uma propriedade conhecida como **condição de não-deslizamento** (ÇENGEL; CIMBALA, 2017).

De uma forma geral, a presença das paredes provoca perturbações no movimento das partículas de fluido, modificando, principalmente, o campo de velocidades do escoamento (WHITE, 2016). Como consequência, é possível verificar a formação de uma camada, geralmente muito fina, localizada em uma região adjacente à parede, denominada camada limite. Esta última é fortemente influenciada pelas forças de atrito, responsável por retardar o escoamento e ocasionar fortes gradientes de velocidade (GERHART P.; GERHART A.; HOCHSTEIN,

2016). Nela podem ocorrer fluxos de características laminares, turbulentas ou ambos, além de, em muitos casos, estar sujeita à gradientes adversos de pressão, que são responsáveis por originar os pontos de separação no escoamento (Figura 2.17).

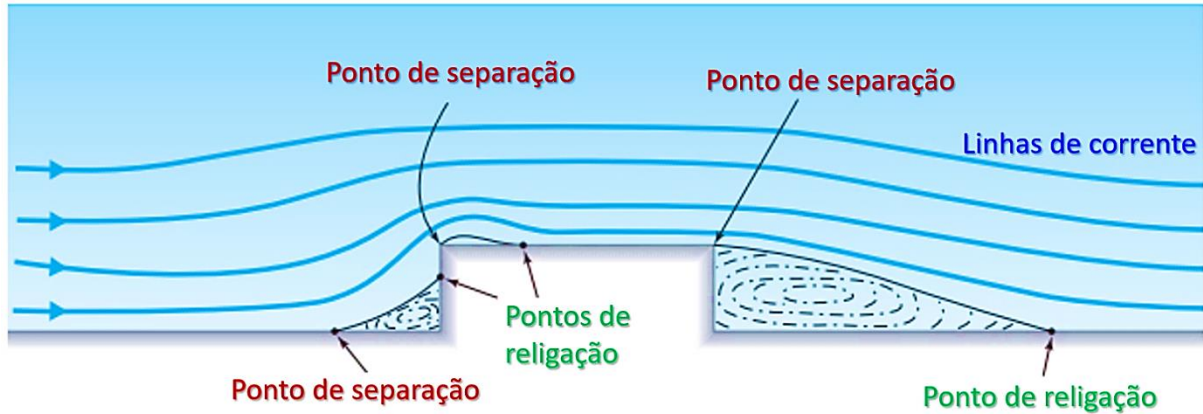


Figura 2.17 – Regiões de separação do escoamento, em função de gradientes adversos de pressão, ocasionadas pela presença de um obstáculo
(fonte: adaptado de POTTER; WIGGERT; RAMADAN, 2016)

Souza et al. (2011) ressalta que, nas regiões adjacentes às paredes, ocorre uma diminuição na transferência da quantidade de movimento entre as camadas de fluido, ocasionando uma diminuição nas escalas de comprimento dos vórtices. Dessa maneira, o tamanho característico dos vórtices aumenta conforme o afastamento do contorno sólido, e tende para a dimensão característica do escoamento em uma região muito distante, onde a parede deixa de influenciar a turbulência local.

Segundo Rodriguez (2019), em um escoamento externo, a região próxima à parede pode ser estudada, com base na teoria do comprimento de mistura proposta por Prandtl (1925), por meio de uma distância Δl (perpendicular à parede), da velocidade característica da região (V_{cr}) e do número de Reynolds característico da superfície (Re_s). O mesmo autor ressalta que estas variáveis possibilitam uma estimativa da distância adimensional da parede (y^+), baseada na teoria da camada limite sobre placas planas:

$$y^+ = \frac{\Delta l}{\nu} \sqrt{\frac{V_{cr}^2}{2} [2 \log(Re_s) - 0,65]^{-2,3}}. \quad (53)$$

Este parâmetro é muito importante para a modelagem numérica computacional, pois o mesmo relaciona-se à correta representação do escoamento nas regiões próximas às paredes (KHAMLAJ, 2018). Sendo assim, o valor de y^+ geralmente está associado à distância adimensional do elemento da malha numérica mais próximo ao contorno sólido. Isto implica que Δl seja igual a distância perpendicular que liga o centro deste elemento à parede, que V_{cr} represente a velocidade característica de uma região muito próxima à parede, e que R_{e_s} seja calculado com base no comprimento longitudinal do contorno sólido (RODRIGUEZ, 2019).

Na expressão (53), o termo $\sqrt{\frac{V_{cr}^2}{2} [2\log(R_{e_s}) - 0,65]^{-2,3}}$ representa a velocidade de cisalhamento u_* , a qual, em conjunto com a velocidade adjacente à parede u_w , possibilita o cálculo da velocidade adimensional da parede u^+ (RODRIGUEZ, 2019):

$$u^+ = \frac{u_w}{u_*}. \quad (54)$$

Com base no parâmetro y^+ , a região próxima ao contorno sólido pode ser dividida em três partes principais (POPE, 2000):

- a) **Subcamada viscosa ($y^+ < 7$):** nesta zona os efeitos viscosos são dominantes, apresentando comportamento tipicamente laminar, de tal forma que $u^+ \approx y^+$.
- b) **Camada de transição ($7 < y^+ < 30$):** uma transição entre escoamento laminar e turbulento é observada nesta região, na qual ocorre o maior grau de mistura turbulenta. A relação entre u^+ e y^+ é dada por (RODRIGUEZ, 2019): $u^+ = 5 \ln(y^+) - 3,05$.
- c) **Camada logarítmica ($30 < y^+ < 700$):** esta região é caracterizada por grande intensidade e produção de turbulência, fazendo com que a tensão de cisalhamento varie suavemente com a distância da parede. A seguinte expressão é válida nesta zona (SOUZA et al., 2011): $u^+ = \frac{1}{0,4} \ln(y^+) + 5$.

Na Figura 2.18, é mostrada uma curva conhecida como lei da parede, típica de escoamentos em placas planas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Esta, segundo Rodriguez (2019), é utilizada como base para outros tipos de escoamento em regiões adjacentes aos contornos sólidos.

Um detalhamento da região da parede é apresentado na Figura 2.19, na qual é possível observar que as maiores escalas turbulentas são formadas em zonas mais afastadas. Nesta figura, também é apresentado um exemplo de refinamento da malha numérica em torno do contorno sólido, de tal forma que as diferentes escalas de turbulência sejam captadas, sem a necessidade da utilização de leis de parede para o cálculo da velocidade.

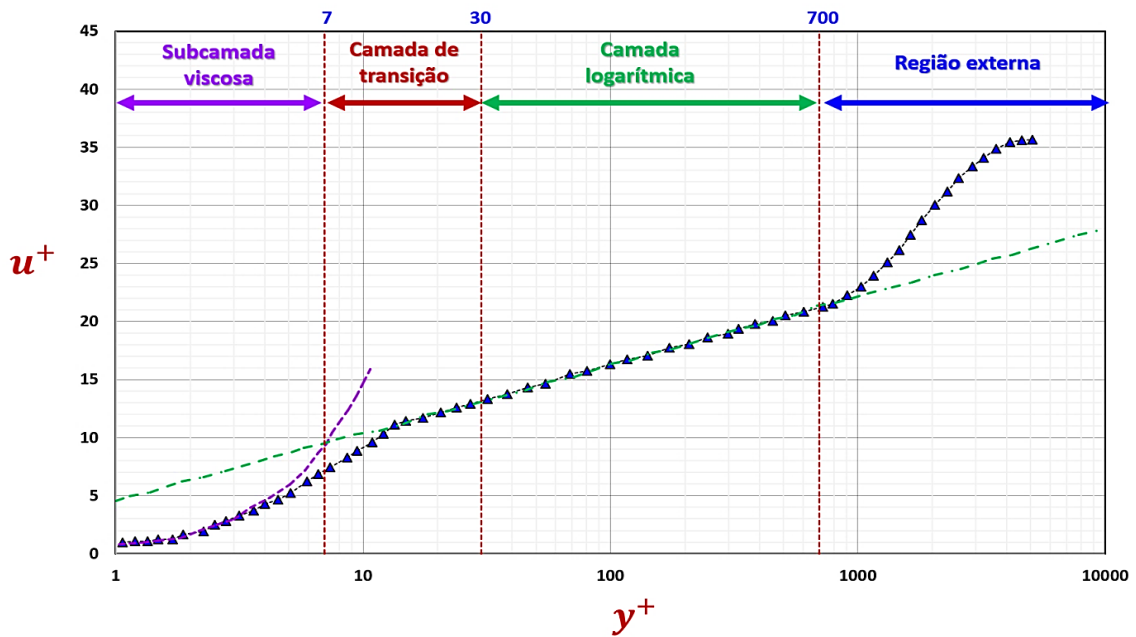


Figura 2.18 – Lei da parede para o caso do escoamento sobre uma placa plana (fonte: adaptado de RODRIGUEZ, 2019)

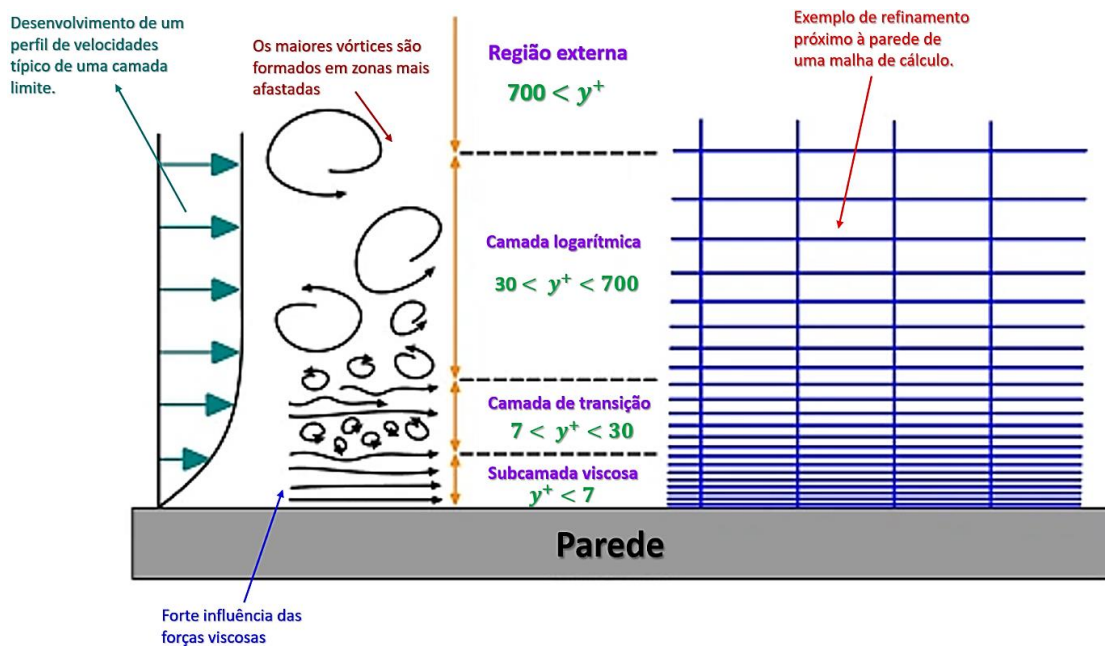


Figura 2.19 – Detalhamento da região próxima à parede (fonte: adaptado de KAHMLAJ, 2018)

2.2.2 Principais noções sobre fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD)

A fluidodinâmica computacional representa, junto com as metodologias analíticas e experimentais, uma das principais ferramentas utilizadas em pesquisas, em aplicações industriais, em projetos de engenharia e em atividades educacionais para o estudo de fenômenos relacionados à Mecânica dos Fluidos (ÇENGEL; CIMBALA, 2017).

Tu, Yeoh e Liu (2018) abordam que a CFD vem crescendo muito ao longo dos últimos anos, tendo em vista o aperfeiçoamento das ferramentas computacionais, complementando os estudos experimentais e analíticos nas mais diversas áreas da engenharia. Estes autores destacam que as principais aplicações desta ferramenta estão na pesquisa (no estudo e compreensão dos fenômenos de escoamento), no design aerodinâmico e automotivo (para o estudo de forças e pressões atuantes sobre os objetos), no projeto de estruturas hidráulicas (como por exemplo, condutos forçados, canais e represas), no ensino educacional (como ferramenta visual, favorecendo a compreensão dos alunos), nas ciências médicas (são exemplos os estudos das artérias e a dispersão de medicamentos no sangue), na indústria química, no desenvolvimento de tecnologias renováveis de geração de energia, entre diversas outras. A Tabela 2.1 traz as principais vantagens e limitações da fluidodinâmica computacional.

A modelagem numérica computacional de um determinado caso de estudo pode ser dividida em três etapas principais: pré-processamento, *solvers* e pós-processamento (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2020). Estas são apresentadas, de forma sucinta, no fluxograma disposto na Figura 2.20.

Windt, Davidson e Ringwood (2018) salientam que, atualmente, existem diversos códigos numéricos disponíveis no mercado destinados às análises em Mecânica dos Fluidos (Tabela 2.2), sendo estes divididos em códigos comerciais (que necessitam de uma licença paga) e livres (não necessitando de licenças). Os autores também abordam que os códigos comerciais mais utilizados são o *FLUENT* e o *STAR-CCM+*, ao passo que o código livre e aberto *OpenFOAM* é o mais utilizado dentre todos atualmente (considerando tanto os códigos livres quanto os comerciais).

Vantagens da CFD	Principais limitações da CFD
Possibilidade de estudar de forma mais prática termos específicos das equações governantes;	Forte dependência da experiência do operador;
Complementação aos estudos analíticos e experimentais;	As condições de estabilidade, precisão e convergência dos esquemas numéricos utilizados afetam os resultados;
Redução de tempo e custo nos projetos de engenharia;	Os resultados dependem principalmente das condições e variáveis de entrada no código numérico, bem como das simplificações e dos modelos adotados;
Permite a análise de escoamentos mais complexos, onde estudos experimentais e/ou analíticos são complicados;	Necessidade da realização de uma verificação numérica com um caso similar, porém realizado experimentalmente (validação numérica);
Promove o estudo de condições de escoamento que não são reproduzíveis em estudos experimentais, como alguns casos da dinâmica de fluidos geofísica e biológica.	As variáveis de saída dependem, principalmente, do grau de refinamento da malha de cálculo (número de pontos utilizados) e das limitações e erros do computador empregado.

Tabela 2.1 – Principais vantagens e limitações da ferramenta CFD
(fonte: TU; YEOH; LIU, 2018; PERITUS, 2019)



Figura 2.20 – Etapas da modelagem numérica
(fonte: adaptado de TU; YEOH; LIU, 2018)

Desenvolvedor	Código	Necessita de licença?	Website
Ansys Inc.	CFX	Sim	https://www.ansys.com/
Ansys Inc.	FLUENT	Sim	https://www.fluent.com/
CD-adapco.	STAR-CCM+	Sim	http://www.cd-adapco.com/
CHAM	PHOENICS	Sim	http://www.cham.co.uk/
COMSOL, Inc.	COMSOL	Sim	http://www.comsol.com/
ESI Group	CFD-ACE+	Sim	http://www.esi-group.com/
Flow Science	FLOW-3D	Sim	http://www.flow3d.com/
Imperial College London; University of Poitiers	Incompact3D	Não	https://www.incompact3d.com/
¹ OpenCFD Ltd.; ² OpenFOAM Foundation	OpenFOAM	Não	1. https://www.openfoam.com/ 2. https://openfoam.org/

Tabela 2.2 – Principais códigos de CFD atualmente utilizados
(fonte: adaptado de WINDT; DAVIDSON; RINGWOOD, 2018)

2.2.2.1 Considerações a respeito da malha de cálculo

A malha ou grade de cálculo consiste em uma subdivisão do domínio considerado em pequenas regiões (também chamadas de elementos), nos quais são realizados os cálculos das equações governantes, possibilitando, ao final, uma visualização completa do escoamento envolvido (ÇENGEL; CIMBALA, 2017). Quanto maior o número de elementos existentes em uma malha (grade mais refinada), melhor será a precisão e o detalhamento do fenômeno estudado, entretanto, também será consideravelmente maior o custo computacional envolvido (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Dessa forma, cabe ao profissional o uso do bom senso e de seu conhecimento para julgar o grau de refinamento de malha mais adequado, em função das suas necessidades (RODRIGUEZ, 2019).

Existem basicamente três tipos de malhas numéricas (Figura 2.21) frequentemente utilizadas (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2020), são elas:

- a) **Malha estruturada:** tipo de grade onde é possível realizar uma enumeração sucessiva de elementos, podendo ser identificadas linhas e/ou colunas. Seus elementos são tipicamente retângulos (em duas dimensões) ou hexaedros (em três dimensões).
- b) **Malha não-estruturada:** neste tipo de malha não é possível realizar a enumeração sucessivas de elementos. Estes, em duas dimensões, são tipicamente triangulares e/ou hexagonais. É frequentemente utilizada em casos onde a geometria envolvida é bastante complexa, dotada de muitas curvaturas.

- c) **Malha híbrida:** este terceiro tipo consiste na utilização combinada das duas grades anteriores, resultando em uma malha bastante versátil, que pode, inclusive, otimizar o custo computacional. Possibilita a utilização de uma grade estruturada nas regiões onde a geometria é menos complexa, e de outra não-estruturada em zonas mais detalhadas.

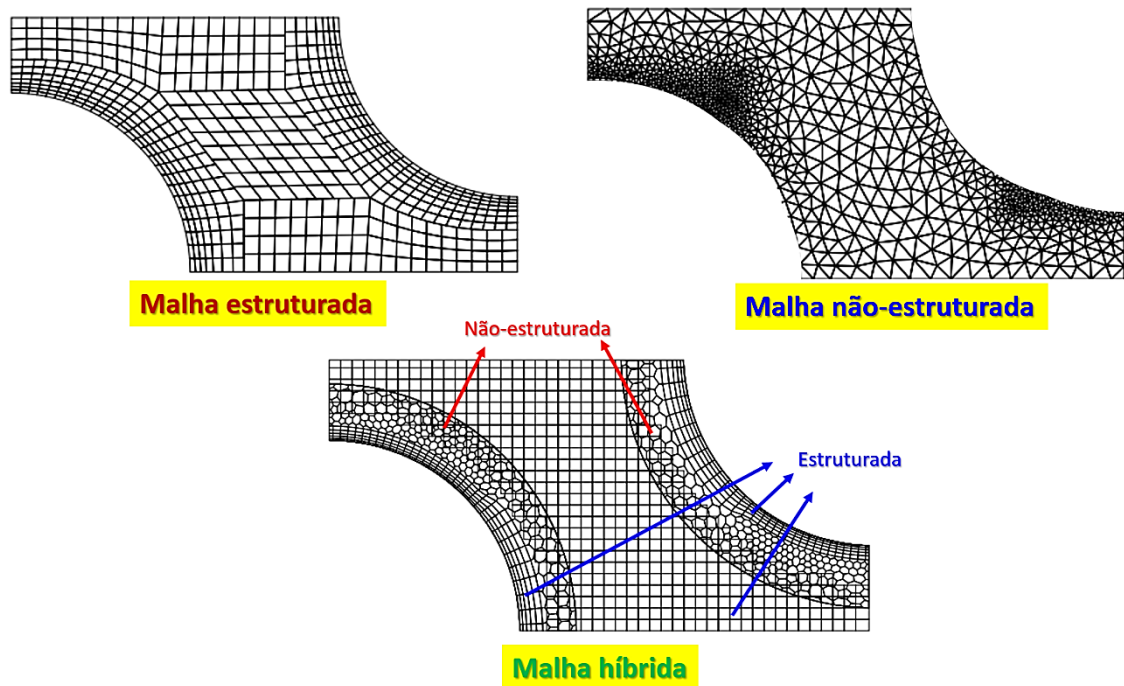


Figura 2.21 – Tipos de malhas numéricas
(fonte: adaptado de FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2020)

Na maioria dos casos de estudo e de aplicações industriais, é desejável trabalhar com uma malha que seja suficientemente refinada, sem, necessariamente, demandar um custo computacional extremamente elevado. Desta maneira, recomenda-se que a malha seja refinada conforme as zonas de interesse no domínio, como, por exemplo, as regiões próximas aos contornos sólidos, para uma suficiente captura das escalas turbulentas (RODRIGUEZ, 2019).

Moukalled, Mangani e Darwish (2016) abordam que em todos os casos de estudo em CFD deve ser realizado o **teste de independência das malhas**. Este consiste em escolher uma determinada característica do fenômeno existente e estudar, por meio de um gráfico, o comportamento da mesma em diferentes estágios de refinamento da malha, até um determinado nível, a partir do qual esta característica não irá mais variar significativamente em função da grade de cálculo. Por outro lado, Rodriguez (2019) ressalta que o grau de refinamento da malha também pode ser determinado por meio de uma comparação com estudos experimentais (em situações similares),

além de levar em consideração o nível de detalhamento visual dos campos do escoamento para cada caso.

2.2.2.2 Principais metodologias para modelagem de corpos em movimento

Em casos onde existe algum movimento de corpo rígido associado ao escoamento, é necessário utilizar uma metodologia numérica capaz de representar corretamente a hidrodinâmica envolvida. Nesse contexto, existem algumas metodologias principais para o tratamento da dinâmica dos corpos rígidos em CFD (SCHMITT; ELSAESSER, 2015): método da deformação da malha de cálculo (*Mesh Morphing/Distortion Method*), método de reconstrução da malha (*Remeshing Method*), interface de malha arbitrária (*AMI – Arbitrary Mesh Interface*) e o método da hidrodinâmica de partículas (*SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics*).

O método de deformação da malha de cálculo consiste na deformação dos seus elementos, os quais podem ser alongados ou comprimidos, conforme o corpo considerado se movimentar. Esta metodologia busca preservar a topologia de um objeto sólido, ao mesmo tempo em que reproduz satisfatoriamente a dinâmica de corpo rígido envolvida (DANIELS et al., 2019).

Segundo Schmitt e Elsaesser (2015), o método de reconstrução da grade numérica está baseado na confecção de uma nova malha a cada instante de tempo, a fim de adaptar as posições atingidas pelo corpo ao domínio de cálculo. Estes autores destacam que esta metodologia é bastante adequada, porém exige um custo computacional elevado, o que, muitas vezes, a torna inviável.

Conforme a OpenFOAM Foundation (2017), a metodologia da interface de malha arbitrária corresponde à utilização de dois domínios independentes que, em um segundo instante, são acoplados. Neste método, o primeiro domínio é responsável pelo escoamento do fluido, enquanto o segundo representa o movimento do corpo rígido, não existindo uma modificação dos elementos de malha. Em outras palavras, pode-se dizer que ocorre uma troca de informações entre os dois domínios, permitindo que ambos sejam sobrepostos. Recentemente, o trabalho de Wilhelm (2017) mostrou que a metodologia AMI pode subestimar o movimento de rotação de um corpo rígido, além de ser um método difícil de aplicar quando o objeto considerado está localizado muito próximo ao fundo do domínio.

O método da hidrodinâmica de partículas é em realidade uma metodologia de discretização numérica, a qual está baseada em uma descrição lagrangeana do escoamento (onde o fluxo é modelado como um conjunto de partículas que interagem entre si). Nesta metodologia, não existe uma malha numérica, assim, o movimento do corpo rígido é uma consequência direta da interação das partículas de fluido com o objeto (MONAGHAN, 2005).

Yao (2016) ressalta ainda o método das fronteiras imersas (*IBM – Immersed Boundary Method*), que consiste na inserção de uma fronteira sólida (representativa de um corpo rígido) dentro de um domínio principal, dotado de uma malha cartesiana fixa, por meio da utilização de uma condição de contorno que ocasiona forças fictícias no escoamento. Esta fronteira também pode ser criada por meio de modificações numéricas nos sistemas de equações existentes. Daniels et al. (2019) destacam que esta metodologia, apesar de não modificar a malha de cálculo, possui alguns problemas como dificuldades de convergência e de reprodução da camada limite, o que exige certos cuidados em sua implementação.

2.2.2.3 Propriedades dos métodos numéricos

De acordo com Ferziger, Perić e Street (2020), as metodologias numéricas de resolução possuem algumas características que podem afetar consideravelmente os resultados. Dentre estas, destacam-se as seguintes:

- a) **Consistência:** levando em consideração que as equações diferenciais governantes geralmente são substituídas por aproximações discretas em séries de Taylor, existirá sempre uma diferença entre o valor aproximado e o exato de uma solução, o que é denominado erro de truncamento. Para um método ser consistente, é necessário que este erro tenda a zero à medida que as discretizações espacial Δx_i (Δ_x , Δ_y e Δ_z) e temporal Δt se aproximam de zero. Entretanto, o fato de um método ser consistente não garante que a solução obtida por ele seja, de fato, muito próxima à solução exata da equação no limite de Δx_i e Δt . Recomenda-se, de preferência, que a ordem dos esquemas utilizados em todas as equações seja a mesma.
- b) **Estabilidade:** um método numérico é dito estável quando, à medida que os cálculos iterativos avançarem, os erros envolvidos não crescerem de forma significativa. Esta é uma propriedade bem complicada de ser analisada, porém pode ser estudada por meio do método de Von Neumann. Muitos esquemas de resolução necessitam que o passo de tempo Δt seja inferior a um dado limite, ou que sejam aplicados coeficientes de relaxação para a metodologia ser estável.
- c) **Convergência:** uma metodologia é convergente quando as soluções obtidas pelas equações discretizadas tendem para o seu valor exato à medida que Δx_i se

aproxima de zero. O teste da independência das malhas é um exemplo de estudo da convergência.

- d) **Conservação:** um esquema numérico, ao modelar um escoamento fluido, deve garantir que as propriedades envolvidas, como massa, quantidade de movimento e energia, sejam conservadas. Erros de conservação geralmente estão associados à utilização de malhas muito grosseiras.
- e) **Limitação:** algumas propriedades do escoamento encontram-se limitadas em um dado intervalo, como, por exemplo, a densidade do fluido (que é sempre positiva) e a concentração (a qual deve variar entre 0% e 100%). Este fato determina que os métodos numéricos utilizados respeitem esses limites, o que, na maioria das vezes, é difícil de garantir em esquemas numéricos de alta ordem. Salienta-se que, em diversos casos, ao se utilizar uma limitação em alguns métodos numéricos, podem ocorrer problemas de estabilidade e convergência.
- f) **Acurácia:** esta propriedade refere-se ao quão próximo da solução real está a solução obtida pelo método numérico. Depende, principalmente, dos erros envolvidos no processo de resolução pelo modelo numérico, dentre os quais destacam-se os erros de modelagem (diferença final entre o modelo e a solução exata), erros de discretização (relacionado à metodologia de discretização utilizada) e erros de iteração (erros cometidos em cada etapa iterativa de resolução).

Karadimou e Markatos (2018) ressaltam outra característica bastante importante nas simulações numéricas que utilizam malhas de cálculo: a **difusão numérica**. Segundo os autores, este fenômeno é ocasionado quando gradientes de uma determinada propriedade (como a temperatura e a concentração, por exemplo) existem e são transversais à direção do escoamento e este, por sua vez, é oblíquo a um elemento de malha. Esta propriedade, também conhecida como viscosidade numérica ou erro difusivo, é uma característica puramente numérica e está diretamente associada aos esquemas numéricos utilizados na discretização das equações diferenciais governantes, em conjunto com os métodos de interpolação empregados (CONVERGE CFD SOFTWARE, 2018). A Figura 2.22 demonstra um exemplo de difusão numérica (cores verde, amarela e azul-clara), em um caso onde existe fluxo em uma direção a 45° com os elementos de malha. Nesta figura, também é possível observar que, ao se executar um refinamento da malha de (a) para (d), a difusão é atenuada.

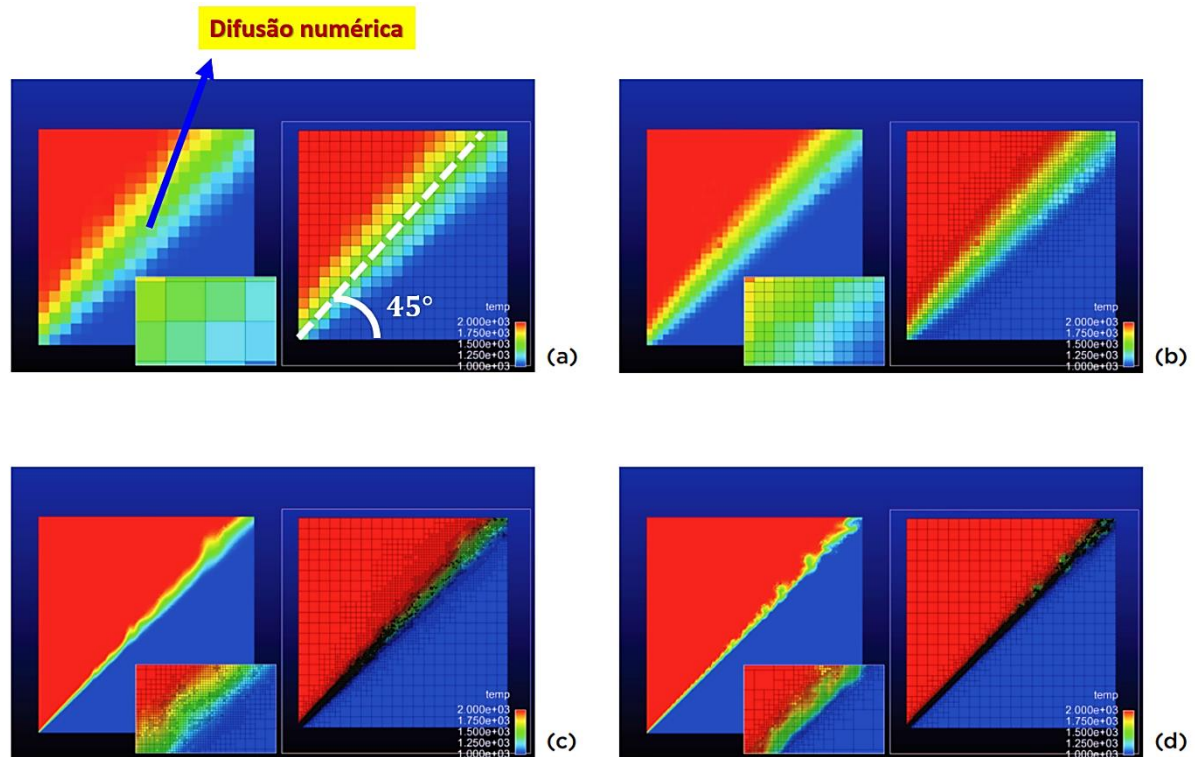


Figura 2.22 – Exemplo de difusão numérica e do processo da atenuação da mesma pelo refinamento da malha de cálculo (fonte: adaptado de CONVERGE CFD SOFTWARE, 2018)

Segundo o manual do código CONVERGE (CONVERGE CFD SOFTWARE, 2018), a difusão numérica pode ser suavizada pela utilização de esquemas numéricos de diferenças centradas, pela aplicação de uma malha mais refinada em regiões de gradientes significativos e, por fim, pela utilização de malhas estacionárias (tendo em vista que as malhas dinâmicas favorecem o erro difusivo).

2.2.2.4 Principais métodos de discretização numérica

As equações governantes que fundamentam a modelagem numérica necessitam de uma metodologia de discretização para os cálculos. Nesse contexto, existem quatro abordagens principais muito utilizadas (FADAEI-KERMANI et al., 2019):

- a) **Método das diferenças finitas (*Finite Difference Method – FDM*)**: nesta metodologia as equações diferenciais são expressas em aproximações finitas, baseadas em diferenças, para a resolução dos sistemas. Geralmente, estas diferenças são obtidas por meio da utilização de séries de Taylor, simplificando as equações diferenciais. Estas séries originam as diferenças finitas e os termos de erro, decorrentes do truncamento das mesmas, que caracterizam a ordem do esquema numérico. Existem diferentes esquemas numéricos para a resolução por diferenças finitas, o que, muitas vezes, dependerá do caso a ser estudado.

Sua principal desvantagem reside no fato de que as leis de conservação não são garantidas, necessitando de tratamentos especiais (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2020).

- b) **Método dos volumes finitos (*Finite Volume Method – FVM*)**: este método de discretização consiste na divisão do domínio de cálculo em pequenos elementos de volume, denominados volumes de controle, de formatos tridimensionais característicos, os quais constituem uma malha numérica. As informações a respeito das propriedades do escoamento são computadas nos centros de gravidade destes volumes, ao passo que os valores das mesmas nas faces dos elementos são obtidos por meio de interpolações. A seguir, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, assim como as equações de transporte, são descritas em sua formulação integral para cada volume de controle, possibilitando a utilização do Teorema de Gauss para a transformação das integrais de volume em integrais de superfície, as quais são solucionadas numericamente na sequência (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Osse (2016) ressalta que esta metodologia de discretização é, atualmente, a mais utilizada pelos principais códigos numéricos de modelagem, sendo capaz de lidar com geometrias e casos de escoamento bastante complexos.
- c) **Método dos elementos finitos (*Finite Element Method – FEM*)**: nesta abordagem o domínio numérico é dividido em partes menores, de comportamento bem definidos e de diversos formatos (como o triangular, quadrilateral, hexagonal e outros), as quais são denominadas elementos finitos. Similar aos métodos anteriores, as equações governantes são resolvidas de forma aproximada, de tal forma que a eficiência da metodologia seja bastante afetada em função do número de nós (vértices que conectam um elemento a outro) utilizados no problema. Esta metodologia é capaz de lidar com geometrias do mais alto grau de complexidade, além de possibilitar a imposição direta de condições de contorno em suas formulações matemáticas, o que representa sua principal vantagem (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; NITHIARASU, 2015).
- d) **Método dos elementos de contorno (*Boundary Element Method – BEM*)**: esta metodologia surge como uma alternativa ao método dos elementos finitos, em casos onde estes não apresentam boa acurácia e necessitam de consideráveis refinamentos de malha, que ocasionam um elevado custo computacional. Sua fundamentação está baseada na descrição dos contornos por meio de integrais de fronteira, o que implica somente na discretização das superfícies, ao invés de volumes, diminuindo uma dimensão dos casos de estudo. Desta forma, as malhas são formuladas de uma maneira mais robusta e acessível, o que faz com que esta metodologia seja bastante adequada aos problemas com domínios infinitos ou semi-infinitos. As principais desvantagens da metodologia residem na complexidade das equações governantes e na forma como as integrais de fronteira são solucionadas, além de apresentar algumas restrições em problemas não-lineares (ANTES, 2010).

- e) ***Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)***: este método, diferente das metodologias anteriores, não necessita da utilização de uma malha numérica (*meshfree method*), pois corresponde a uma abordagem completamente lagrangeana do escoamento, permitindo o tratamento do mesmo por meio da interação de partículas de fluido. Estas últimas possuem as características dos fluidos modelados, como a viscosidade e a massa específica, e são responsáveis por reproduzir casos bastante similares aos escoamentos reais. As propriedades físicas existentes nas regiões entre as partículas são tratadas por meio de funções atenuadoras, denominadas *Kernel*. Tendo em vista a fundamentação do método, as leis de conservação da mecânica dos fluidos são garantidas, tornando esta metodologia bastante atrativa para os casos onde se deseja avaliar o comportamento da superfície livre do escoamento e/ou a interação fluido-estrutura. Dependendo da complexidade do fenômeno envolvido, poderá ser necessária a utilização de um grande número de partículas, o que aumentará consideravelmente o custo computacional (LIU M.; LIU G.; 2010).

2.2.2.5 Considerações a respeito dos modelos de turbulência

Considerando que a metodologia das médias de Reynolds é a mais utilizada na grande maioria dos estudos em CFD, e que determinados modelos em LES possuem similaridades com certos modelos de RANS, é necessário determinar alguns parâmetros que servirão como variáveis de entrada para tais modelos (TU; YEOH; LIU, 2018). Rodriguez (2019) ressalta que os principais parâmetros utilizados nos modelos de turbulência são o comprimento de mistura ou escala de turbulência (l), a energia cinética turbulenta (K), a taxa de dissipação específica (ω) e a viscosidade turbulenta (ν_t). Segundo o mesmo autor, estas variáveis podem ser calculadas pelas seguintes expressões:

$$l = 0,07 L_c, \quad (55)$$

$$K = 1,5 (\bar{V}_c I)^2, \quad (56)$$

$$\varepsilon = \frac{0,09 K^{1,5}}{l}, \quad (57)$$

$$\omega = \frac{11,11 \varepsilon}{K}, \quad (58)$$

$$\nu_t = \frac{0,09 K^2}{\varepsilon}, \quad (59)$$

em que \bar{V}_c , I e ε correspondem, respectivamente, à velocidade média característica do escoamento, à intensidade de turbulência (estimada com base na Tabela 2.3) e à taxa de dissipação da turbulência.

Caso de estudo	Valores aproximados de I
Aerodinâmica de aerofólios	0,003
Escoamentos em condutos forçados, escoamentos internos com número de Reynolds médio ou alto	0,02 à 0,12
Escoamentos de alta velocidade em sistemas complexos (turbo máquinas, trocadores de calor, defletores, dispositivos com grande rotação e regiões próximas às paredes)	0,05 à 0,2
Camada limite atmosférica, ventos fortes, tornados, corpos oscilantes	0,3

Tabela 2.3 – Valores aproximados para estimativa da intensidade de turbulência conforme o tipo de escoamento estudado (fonte: adaptado de RODRIGUEZ, 2019)

2.2.2.5.1 Principais modelos de turbulência em RANS

De acordo com o manual introdutório ao código numérico ANSYS (ANSYS, 2014), a abordagem da turbulência em médias de Reynolds conta com diversos modelos de turbulência, dentre os quais destacam-se os seguintes:

- a) **Spalart-Allmaras**: modelo de uma única equação de transporte para modelar diretamente a viscosidade turbulenta. Foi desenvolvido especialmente para casos aerodinâmicos sob influências de contornos sólidos, apresentando resultados satisfatórios nas regiões de camada limite sujeitas a médios gradientes adversos de pressão. É também bastante utilizado na modelagem de turbo máquinas. Este modelo é mais adequado aos casos de escoamentos bidimensionais, ao passo que em problemas tridimensionais e/ou sujeitos a uma intensa região de separação, seus resultados são imprecisos.
- b) **$K - \epsilon$** : corresponde a um dos modelos de duas equações de transporte mais utilizados para as aplicações industriais. Seus parâmetros foram calibrados com base em diversos estudos experimentais, sendo adequado em muitos casos de engenharia. Suas limitações residem em sua baixa capacidade de modelar escoamentos sujeitos a intensos gradientes de pressões, fortes regiões de separação e áreas com grande curvatura nas linhas de corrente.
- c) **Realizable $K - \epsilon$** : este modelo é uma adaptação do modelo $K - \epsilon$ clássico. Nele, a taxa de dissipação está relacionada ao quadrado médio da flutuação da vorticidade, além de diversas condições matemáticas que são aplicadas para melhorar o tratamento das tensões de Reynolds. Dessa forma, se mostra adequado aos escoamentos mais complexos, sujeitos a fortes zonas de separação e regiões de transição.
- d) **RNG $K - \epsilon$** : nesta metodologia, as constantes do modelo são calculadas com base na teoria do grupo de renormalização (*Renormalization Group* – RNG), ao contrário do modelo $K - \epsilon$ clássico. Tendo em vista sua formulação, apresenta vantagens bastantes semelhantes ao modelo *Realizable $K - \epsilon$* , possibilitando uma modelagem mais adequada dos escoamentos mais complexos.

- e) **$K - \omega$** : é um modelo de duas equações de transporte capaz de modelar, de forma mais adequada que o modelo $K - \varepsilon$, o escoamento em regiões próximas aos contornos sólidos. Sua formulação é bastante robusta e se mostra adequada ao estudo de camadas limite sujeitas a fortes gradientes de pressão.
- f) **$K - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*)**: corresponde a um dos modelos mais utilizados em CFD, juntamente com o modelo $K - \varepsilon$ clássico. Sua formulação combina os benefícios do modelo $K - \omega$ com o modelo $K - \varepsilon$, o que permite uma modelagem adequada do escoamento em regiões próximas às paredes e em zonas de fluxo livre. Para uma modelagem mais realista, é recomendado que $y^+ \approx 1$. Entretanto, quando y^+ está localizado dentro da camada logarítmica da parede, o modelo ainda é capaz de reproduzir resultados bastante satisfatórios.
- g) **RSM (*Reynolds Stress Model*)**: este modelo de turbulência, diferentemente dos anteriores, resolve uma equação de transporte para cada tensão de Reynolds individualmente, evitando a hipótese de turbulência isotrópica. Tendo em vista estas propriedades, pode ser considerado o modelo de RANS mais completo, motivo pelo qual é adequado à modelagem de escoamentos tridimensionais complexos, com linhas de corrente de grandes curvaturas e de grande vorticidade. Por estas razões, é esperado que a aplicação deste modelo resulte em um custo computacional elevado, podendo, ainda, apresentar problemas de convergência.

O gráfico disposto na Figura 2.23 apresenta uma estimativa dos principais modelos de turbulência utilizados atualmente.

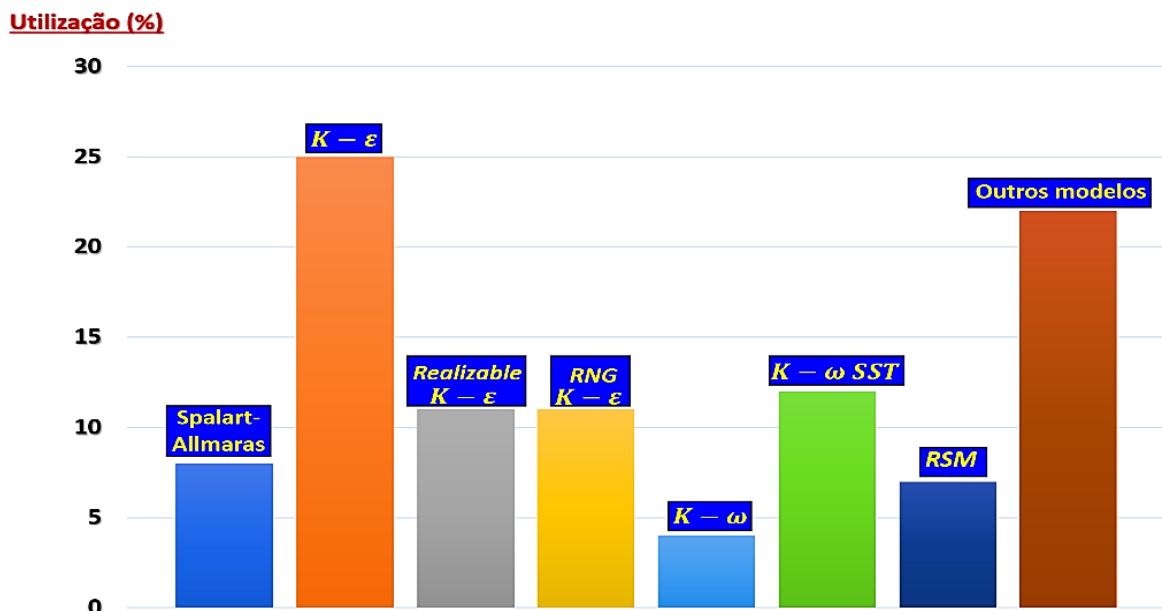


Figura 2.23 – Principais modelos em RANS utilizados atualmente
(fonte: adaptado de DAVOUDABADI, 2012)

2.2.2.5.2 Principais modelos de LES

Diferente da metodologia RANS, a modelagem da turbulência nas simulações em LES é efetuada por meio de filtros numéricos. Assim, são aplicados os modelos de escala de submalha (*Subgrading Scale Models – SGS Models*), responsáveis pelo tratamento matemático das menores escalas turbulentas (RODRIGUEZ, 2019). Segundo Launchbury (2016), existem três modelos principais em LES: Smagorinsky, os modelos dinâmicos e WALE.

O modelo **Smagorinsky** foi o modelo pioneiro de LES (SMAGORINSKY, 1963), desenvolvido inicialmente para o estudo de condições atmosféricas, o qual é ainda utilizado em diversas aplicações em CFD. De acordo com Blazek (2015), este modelo está fundamentado na hipótese de equilíbrio local para as pequenas escalas, implicando que a produção das tensões turbulentas de submalha seja igual à dissipação. O autor também ressalta que este modelo é fácil de implementar e possui um baixo custo computacional, entretanto possui algumas desvantagens, dentre as quais destacam-se: bastante dissipação em alguns casos de camada limite, necessidade de um tratamento especial em regiões próximas às paredes e em zonas de transição, o fato de que a constante aplicada no modelo depende do caso de estudo e que o processo da cascata de energia pode ser mascarado.

Segundo Fernando (2012), os coeficientes geralmente utilizados nos modelos SGS são determinados com base em uma turbulência homogênea e isotrópica. Entretanto, estes parâmetros dependem fortemente das tensões cisalhantes e das estratificações existentes no escoamento, sendo necessário, portanto, utilizar funções atenuadoras e corretoras para representar o fluxo de forma mais adequada. Uma forma de contornar esta problemática foi proposta por Germano et al. (1991), na qual os coeficientes do modelo são calculados em cada posição espacial da malha numérica e a cada passo de tempo. Dessa maneira, são aplicados dois filtros em sequência, permitindo a determinação dos coeficientes com base nas características do próprio escoamento e da resolução de malha utilizada. Os modelos que utilizam metodologias similares a esta são denominados **modelos dinâmicos** (FERNANDO, 2012). Launchbury (2016) cita, como exemplos desta metodologia, o **Modelo Dinâmico de Smagorinsky** (LILLY, 1992), o **Modelo Lagrangeano Dinâmico** (MENEVEAU; LUND; CABOT, 1996) e o **Modelo Dinâmico de Uma Equação** (KIM; MENON, 1997).

O modelo **WALE** (*Wall-Adapting Local Eddy-viscosity*), desenvolvido por Nicoud e Ducros (1999), baseia-se no quadrado do tensor do gradiente de velocidades, além de considerar os

efeitos das taxas de deformação e rotação simultaneamente (LIU et al., 2018). Sendo assim, este método é capaz de modelar satisfatoriamente as regiões próximas aos contornos sólidos e as zonas de transição do escoamento, sem a necessidade da utilização de funções de atenuação ou de modelos dinâmicos (CHATZIMICHAILIDIS et al., 2019). Considerando suas vantagens, este modelo de LES é, atualmente, um dos mais utilizados (LAUNCHBURY, 2016).

2.3 REVISÃO SOBRE A TECNOLOGIA *OSCILLATING WAVE SURGE CONVERTER*

Ao longo dos últimos anos, diversos estudos sobre os conversores oscilantes por translação de ondas vêm sendo realizados, em função do grande potencial de geração desta tecnologia. Mudanças na geometria do dispositivo, estudos da pressão ocasionada pelo impacto das ondas, métodos de modelagem em BEM e em FVM, efeitos de escala, forças hidrodinâmicas e influência do estado de oceano, são apenas alguns dos diversos temas abordados pelos recentes trabalhos. Os tópicos presentes nas próximas seções buscam fornecer as principais noções sobre esta tecnologia, desde a descrição do seu princípio de funcionamento até os estudos mais recentes, presentes no meio científico.

2.3.1 Princípio de funcionamento e sistema de conversão de energia de um OWSC

O princípio de funcionamento dos conversores oscilantes por translação de ondas está baseado na captação do movimento horizontal das ondas. Este é responsável pelo comportamento oscilatório de uma placa (cuja seção frontal é aproximadamente retangular), que se move para frente e para trás. Esta estrutura encontra-se acoplada a um pistão, ou outro dispositivo mecânico similar, que passa a bombear um fluido em alta pressão dentro de um sistema secundário, onde existe uma turbina responsável por gerar eletricidade (DHANAK; XIROS; DARWISH, 2016). Um esquema ilustrando este sistema de conversão é apresentado na Figura 2.24.



Figura 2.24 – Princípio de funcionamento de um OWSC
(fonte: adaptado de NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2018)

Segundo Renzi et al. (2012), o movimento oscilante da placa pode ser descrito por meio da seguinte equação diferencial, a qual descreve o momento de excitação (M_t) do corpo em torno de um eixo:

$$(I_m + I_{ma}) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + (C_{ar} + C_{ad}) \frac{\partial \theta}{\partial t} + R\theta = M_t, \quad (60)$$

em que I_m , I_{ma} , C_{ar} , C_{ad} , R , e θ correspondem, respectivamente, ao momento de inércia de massa da placa (em relação ao eixo de giro), ao momento de inércia de massa adicionada (em função da aceleração que ocorre no fluido devido ao movimento do corpo rígido, com base no eixo de rotação), ao coeficiente de amortecimento referente à radiação das ondas, ao coeficiente de amortecimento devido ao mecanismo mecânico utilizado no sistema de conversão (PTO), ao momento de restauração ocasionado pelo empuxo e à amplitude angular atingida.

O momento de inércia central de massa (I_{mc}) de uma placa prismática retangular (em relação a um eixo transversal que passa em seu centroide), assim como o valor de I_m (obtido pela aplicação do teorema dos eixos paralelos), podem ser calculados pelas seguintes expressões (JAYAKUMAR, 2012):

$$I_{mc} = \frac{\rho_p h_p L_p e_p}{12} (e_p^2 + h_p^2), \quad (61)$$

$$I_m = \frac{\rho_p h_p L_p e_p}{12} (e_p^2 + 4h_p^2), \quad (62)$$

onde ρ_p , h_p , L_p e e_p representam, nesta ordem, a massa específica, a altura, a largura e a espessura da placa do OWSC.

Conforme Dhanak, Xiros e Darwish (2016), R pode ser estimado por:

$$R = 0,5\rho g e_p L_p h_p^2 \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho}\right). \quad (63)$$

A potência captada (ou absorvida) pelo dispositivo durante um intervalo de tempo ΔT depende, principalmente, da velocidade angular atingida pela placa $\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)$ e do coeficiente de amortecimento resultante do sistema de conversão. A mesma pode ser calculada, de forma aproximada, pela seguinte expressão (WENG et al., 2019):

$$P_{abs} = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} C_{ad} \left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)^2 dt. \quad (64)$$

2.3.2 Principais modelos de conversores

No trabalho de Watabe, Kondo e Yano (1985) é apresentada uma tecnologia inovadora para a época, denominada *Pendulor*, que, teoricamente, poderia ser acoplada às estruturas de proteção costeira. Esta consistia em uma placa retangular ligada a um eixo superior, a qual se movimentava em função da ação das ondas incidentes e de suas reflexões nas estruturas costeiras, possibilitando a geração de eletricidade. Um esquema representativo deste sistema é mostrado na Figura 2.25.

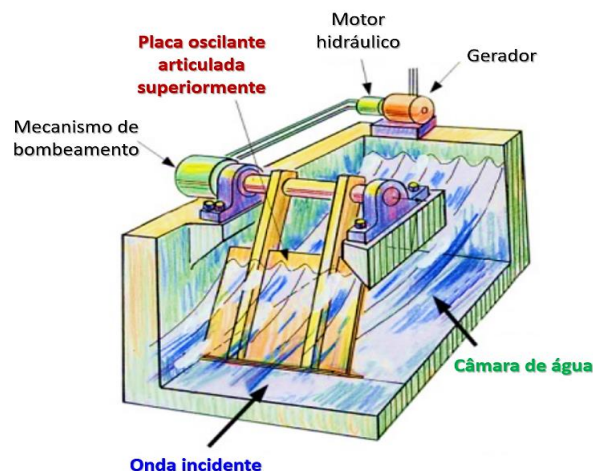


Figura 2.25 – Esquema de funcionamento de um *Pendulor*
(fonte: adaptado de GUNAWARDANE; FOLLEY; KANKANAMGE, 2019)

Recentemente, o estudo realizado por Watabe e Gunawardane (2017) ressalta que os conversores usuais do tipo *Pendulor* não resistiriam em situações mais agitadas do oceano, típicas de grandes tempestades. Como alternativa, os autores propuseram uma mudança no sistema de ancoragem mecânica e no sistema de bombeamento, atingindo um módulo cujo potencial de geração aproxima-se de 50 kW.

Folley, Whittaker e Osterried (2004) realizaram um dos primeiros estudos experimentais sobre os conversores oscilantes por translação. O modelo inicial de OWSC, proposto pelos autores, de maneira similar ao sistema *Pendulor*, possuía um eixo de rotação superior, localizado acima da superfície da água. A diferença principal entre estes dois sistemas reside no fato de que o OWSC baseia-se na oscilação da coluna de água, ao passo que o *Pendulor* depende da ocorrência de ondas estacionárias, o que leva à necessidade da construção de uma câmara fechada (similar à apresentada na Figura 2.25). Os autores ressaltam que o eixo de giro do OWSC poderia ser colocado na sua parte inferior, o que mostraria uma melhor adaptação ao movimento horizontal das ondas na maioria dos casos. Por outro lado, em águas rasas, a utilização de um eixo superior maximiza os momentos resultantes das regiões inferiores da placa, o que pode ser bastante atrativo para regiões muito próximas à costa.

Com o passar dos anos, em função dos resultados bastante promissores dos estudos iniciais, diversos pesquisadores e empresas dedicaram-se à compreensão e ao desenvolvimento dos OWSC's com eixos de giro inferiores (DIAS et al., 2017). Atualmente, existem três tipos de dispositivos conversores por translação (KUMAWAT; KARMAKAR; SOARES, 2019): o *Oyster*, o *Waveroller* e o *Langlee*.

O *Oyster* corresponde a um OWSC parcialmente submerso ancorado ao fundo do oceano. Sua placa oscilante está em contato com toda lâmina de água existente e possui uma pequena parte externa à superfície livre. Este conversor foi desenvolvido pela empresa *Aquamarine Power Ltd.* e seu protótipo mais atual (*Oyster 800*) possui um potencial de geração nominal de 800 kW (O'BOYLE et al., 2015).

A empresa *AW-Energy* é a responsável pelo desenvolvimento do *Waveroller*, o qual é bastante similar ao *Oyster*, com a diferença de que este conversor é instalado em zonas um pouco mais profundas (entre 8 e 20 m, afastados em até 2 km da costa), ficando totalmente submerso.

Estima-se que um único módulo deste dispositivo seja capaz de gerar entre 500 kW e 1000 kW (AW-ENERGY, 2019).

O conversor *Langlee* (criado pela empresa *Langlee Wavepower AS*) corresponde a um tipo de OWSC instalado em zonas *offshore*, em profundidades entre 40 m e 100 m, sobre estruturas flutuantes. O modelo mais recente (*Langlee Robusto*) consiste em um módulo flutuante de dimensões 30 m x 50 m, composto por duas placas oscilantes, que juntas resultam em um potencial de geração em torno de 132 kW (LANGLEE WAVE POWER, 2013).

A Figura 2.26 reúne os diversos modelos dos conversores descritos anteriormente, os quais vêm sendo otimizados com o passar dos anos.

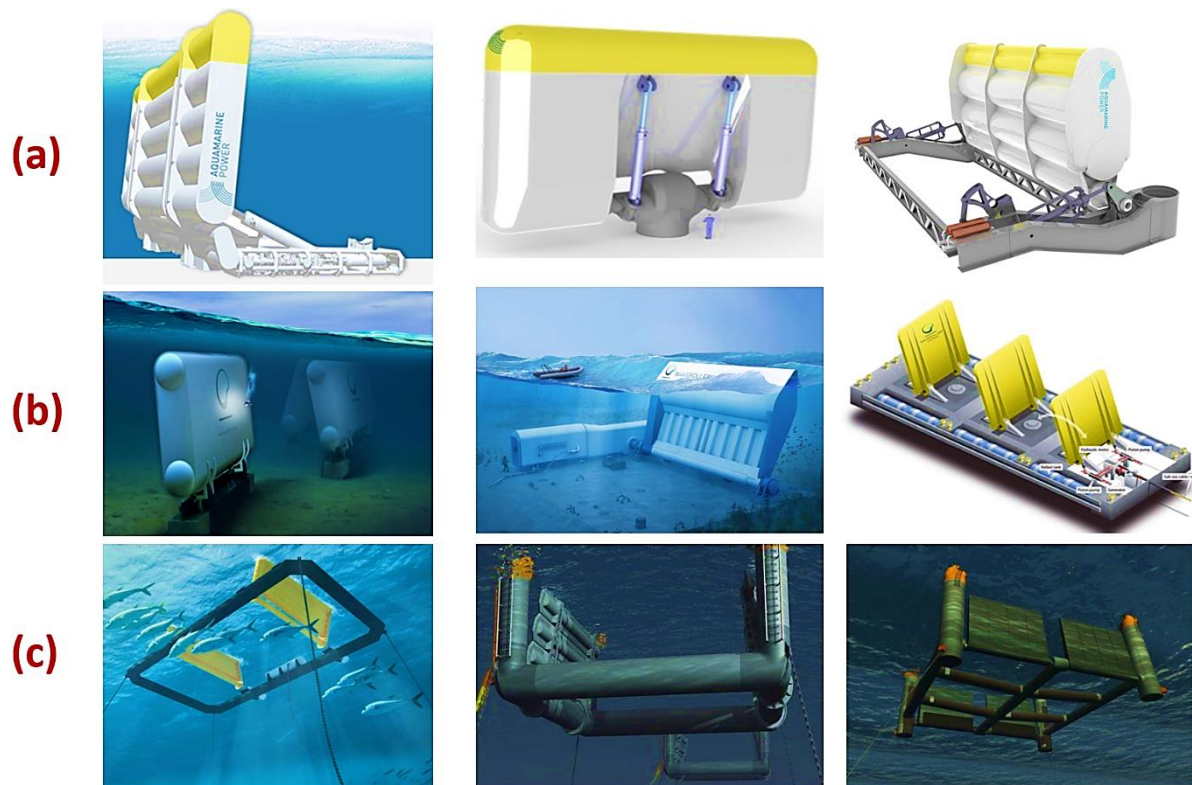


Figura 2.26 – Modelos de (a) *Oyster*, (b) *Waveroller*, (c) *Langlee*
 (fonte: MASIVA ECOLÓGICA, 2015; HEMPEL, 2012; AW-ENERGY, 2019; YONEDA, 2009-2010;
 OPTIMISED ENVIRONMENTS, [2010?]; LANGLEE WAVE POWER, 2013; SNIECKUS, 2011;
 TODALSHAUG et al., 2011)

2.3.3 Forças e características de onda influentes na hidrodinâmica do conversor

Sultan (2013) ressalta que a dinâmica de um OWSC é influenciada por diversas condições hidrodinâmicas, as quais resultam em esforços responsáveis por potencializar ou diminuir a eficiência do conversor. Dentre estes, destaca-se:

- a) **Força das ondas**: compostas por forças inerciais e forças de arraste, que são consequências diretas do impacto das ondas sobre a estrutura e promovem o comportamento oscilatório da placa.
- b) **Força amortecedora**: são as forças relacionadas aos coeficientes de amortecimento, resultantes do amortecimento ocasionado pela massa adicionada ao movimento (função da aceleração do corpo rígido) e pelo sistema mecânico, utilizado para impulsionar o gerador interno.
- c) **Força restauradora**: corresponde à força de empuxo de um corpo imerso em um fluido, a qual tende a trazer a placa do OWSC de volta à sua posição de equilíbrio.
- d) **Força de radiação**: ocasionada pela transferência de quantidade de movimento à coluna de água em zonas de rebentação, ou em grandes tempestades. Este fenômeno é responsável pela formação de correntes secundárias na zona *nearshore*.
- e) **Forças dissipativas**: contemplam as forças relacionadas ao atrito mecânico e viscoso, assim como a dissipação turbulenta ocorrida na quebra de ondas.

A interação fluido-estrutura, durante o movimento dos conversores, resulta em um tipo de escoamento bastante complexo. Dentre os fenômenos envolvidos, está a ocorrência das zonas de separação do escoamento e a consequente geração de vorticidade nas extremidades da placa. Além disto, existe a possibilidade de galgamento sobre o conversor e a geração de fortes gradientes de pressão, que podem, inclusive, levar ao fenômeno da batida (similar ao fenômeno da batida de proa em navios), o qual representa um caso extremo de operação de um OWSC (WEI et al., 2015).

Uma investigação a respeito do escoamento em torno de um *Waveroller* composto por três placas oscilantes é realizado por Fuhrmeister (2015), que utiliza um modelo estático bidimensional em RANS para compreender a dinâmica do escoamento envolvido. Neste trabalho, é observado que as maiores magnitudes de velocidade estão concentradas nas

extremidades superiores das placas e nas regiões entre as mesmas. O autor também relata que o aumento do período de onda e a diminuição da profundidade resultam em consequências similares no escoamento, em função da maximização das componentes horizontais das ondas, aumentando as magnitudes da velocidade nas regiões citadas. Por fim, uma outra conclusão, bastante importante, é de que o aumento da altura de onda é responsável por uma intensificação dos fenômenos existentes do escoamento, o que pode ou não favorecer a geração de energia por um OWSC. A Figura 2.27 mostra o campo de velocidades em um *Waveroller* composto por três placas, destacando-se os efeitos do aumento do período e da altura de onda sobre o escoamento.

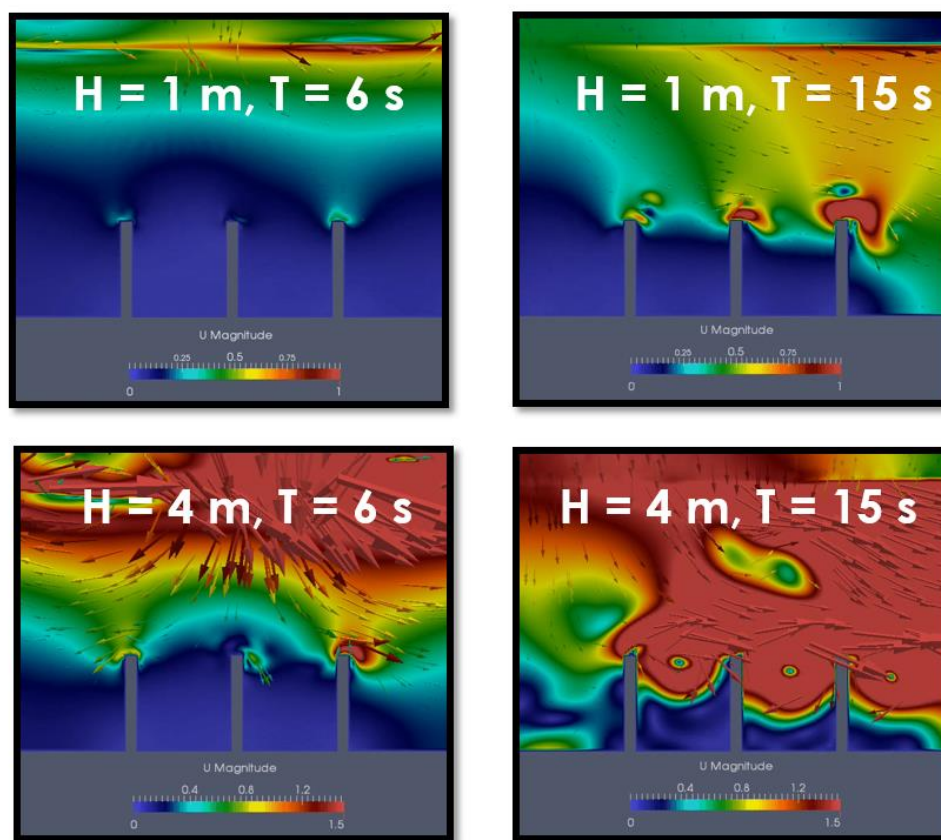


Figura 2.27 – Campo de velocidades em torno de um módulo de *Waveroller* composto por três placas, sob diferentes alturas e períodos de onda
(fonte: adaptado de FUHRMEISTER, 2015)

Wei et al. (2015) estudam, por meio de simulações numéricas tridimensionais em RANS, a deformação da superfície da água e a geração de vórtices durante o movimento da placa do conversor, em uma situação usual de um OWSC do tipo *Oyster*. Os autores relatam que estes parâmetros podem ser analisados em quatro instantes principais, os quais são apresentados na Figura 2.28.

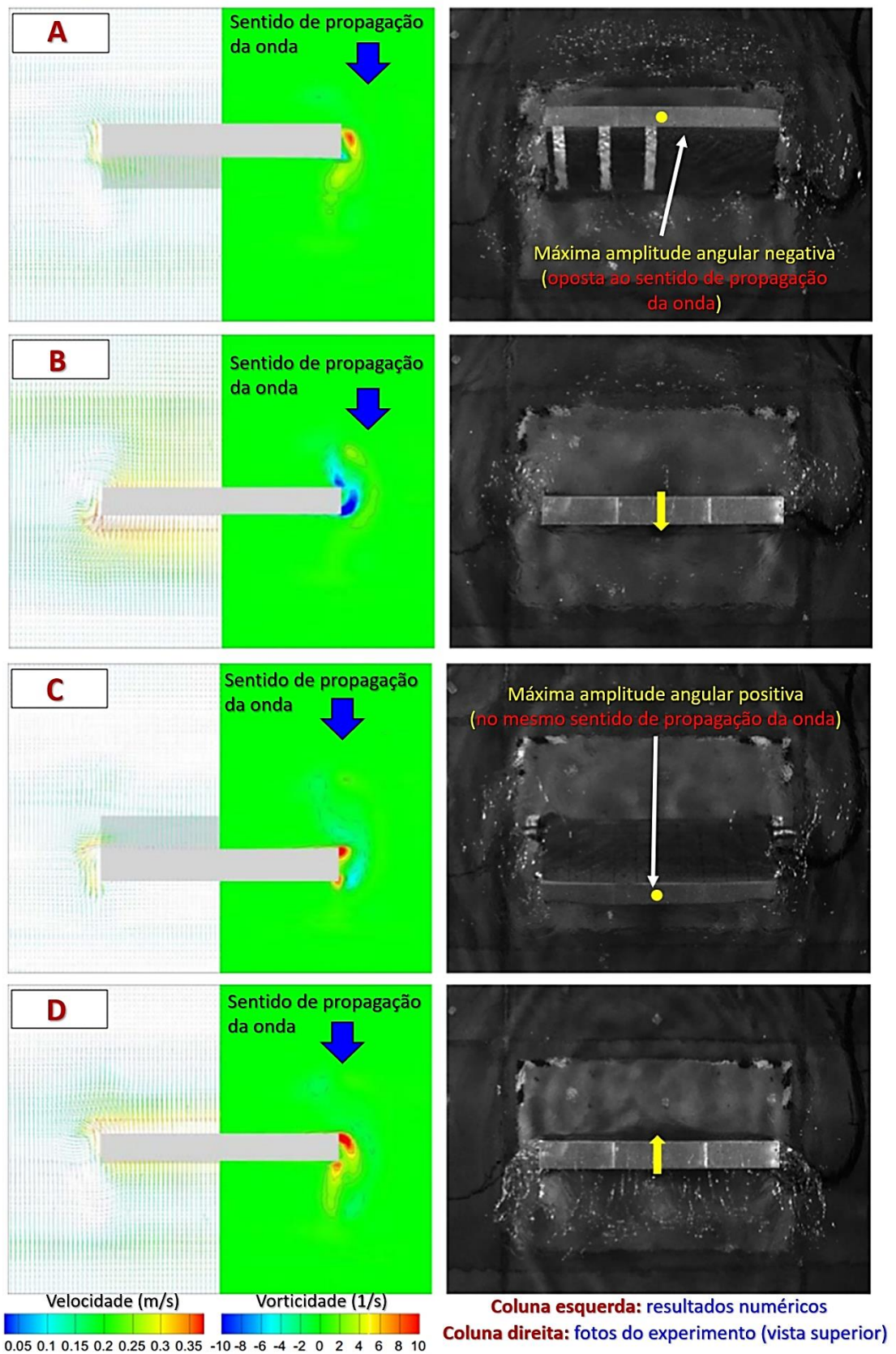


Figura 2.28 – Deformação da superfície da água e geração de vórtices durante um ciclo de oscilação da placa de um modelo experimental do *Oyster*, sob ação de uma onda com $H = 1,25\text{ m}$ e $T = 12,5\text{ s}$ (fonte: adaptado de WEI et al., 2015)

Na figura anterior, é possível observar uma sequência de instantes que demarcam a passagem de uma crista de onda pela placa do conversor. O primeiro instante (A) corresponde a máxima amplitude angular negativa atingida (no sentido oposto ao de propagação da onda), o qual apresenta uma pequena magnitude de velocidade e vorticidade nas regiões próximas à placa. No instante B, a placa, que gira na direção de propagação da onda, atinge uma posição próxima à vertical, apresentando velocidade maior que a do escoamento em seu entorno, resultando em uma grande magnitude da vorticidade. Em C, a máxima amplitude angular positiva é atingida, demarcando o fim da passagem da crista de onda e uma diminuição das magnitudes de velocidade e vorticidade. No instante D, a placa, que desta vez gira no sentido contrário ao de propagação da onda, passa novamente pela posição vertical, apresentando mais uma vez um aumento da vorticidade, além de uma significativa perturbação da superfície da água na região traseira da placa. De uma forma geral, os autores ressaltam que a geração de vórtices (cujas escalas características são da ordem da espessura da placa) durante o processo corresponde a um fenômeno de curta duração, que tende a cessar à medida em que o escoamento inverte seu sentido, após a passagem de uma crista de onda.

A influência da profundidade, da altura e do período de onda sobre a hidrodinâmica e a geração de energia dos OWSC's, do tipo *Waveroller* e *Langlee*, são o objetivo central do trabalho realizado por Fuhrmeister (2018), que também reúne resultados numéricos a partir de um modelo bidimensional em RANS. Na Figura 2.29 é mostrada a variação dos valores RMS da amplitude angular, velocidade angular (ω_p), força horizontal (F_x) e potência captada, para estes conversores, em diferentes profundidades, considerando constantes o período (2,4 s) e a altura de onda (0,1067 m), assim como uma placa de seção quadrada de lado igual a 0,4 m e espessura de 0,08 m. Nesta figura, é possível observar que o dispositivo do tipo *Langlee* apresenta um potencial de geração e desempenho hidrodinâmico (referente à amplitude e à velocidade angular de placa) superiores ao de um *Waveroller*, em situações semelhantes. Além disto, fica evidente que, a partir de uma profundidade superior a, aproximadamente, duas vezes a altura de placa, a variação do potencial de geração com o aumento da profundidade passa a ser pouco expressiva. Este fato implica que ambos os conversores apresentam um melhor desempenho em regiões mais rasas (inferiores ao dobro da altura da placa do conversor).

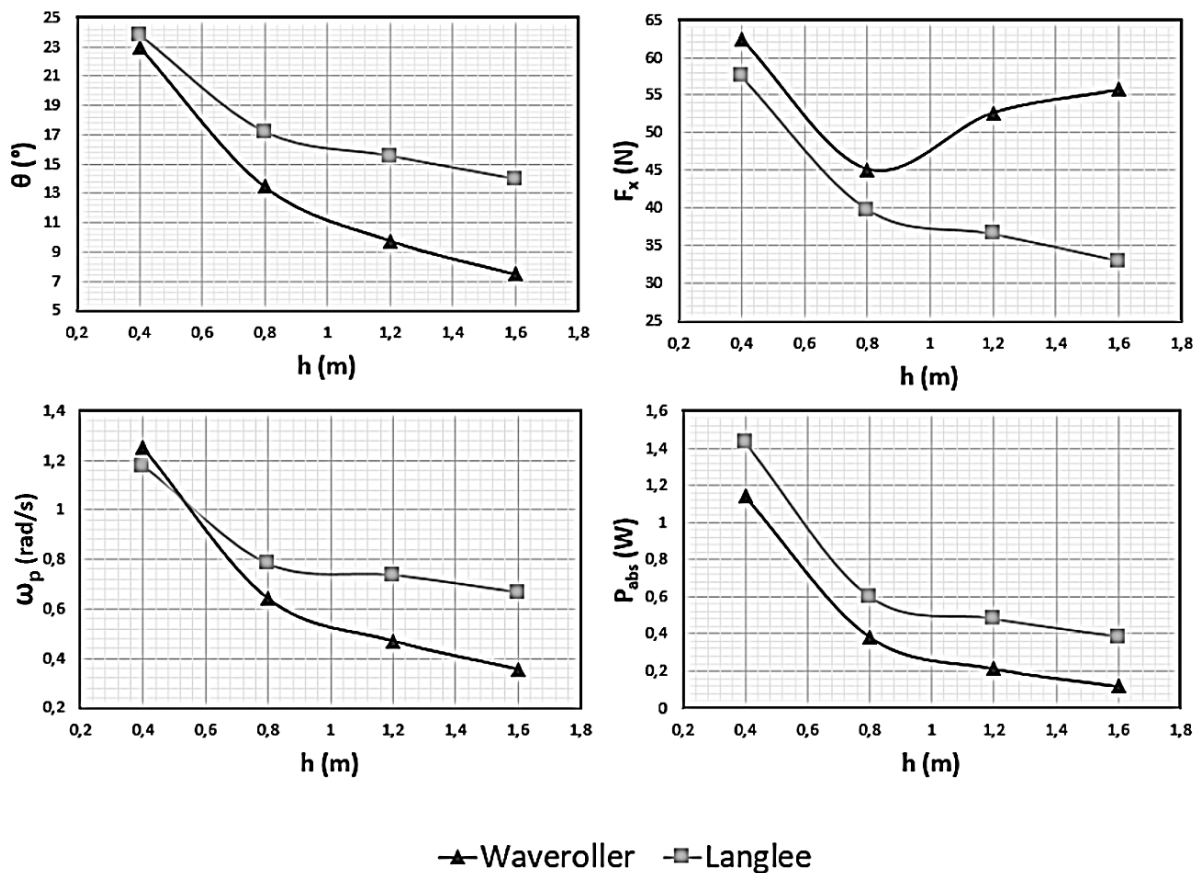


Figura 2.29 – Variação da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada de OWSC's do tipo *Waveroller* e *Langlee*, em função do aumento de profundidade (fonte: adaptado de FUHRMEISTER, 2018)

Ainda no mesmo trabalho, é mostrado que o aumento da altura de onda é responsável por uma intensificação do desempenho hidrodinâmico e pelo conseqüente potencial de geração (Figura 2.30). Por outro lado, a Figura 2.31 demonstra que, para uma altura de onda constante, o potencial de geração tende a atingir seu maior valor entre os períodos de 2 s e 3 s, os quais, levando em consideração a escala de tempo utilizada de 1/5, correspondem aos períodos de onda de 10 s e 15 s, em escala real.

Segundo Henry, Folley e Whittaker (2018), a direção de propagação de uma onda (representada pelo ângulo de propagação α) influencia diretamente a potência captada pelo conversor. Esta é maximizada quando a placa está disposta perpendicularmente à onda incidente, ao passo que, em direções de propagação mais oblíquas, o potencial tende a ser reduzido proporcionalmente ao valor de $\cos^2\alpha$ (Figura 2.32). Os autores salientam que, em placas de largura superior ao comprimento da onda incidente, esta redução do potencial se mostra ainda mais expressiva.

OWSC Langlee

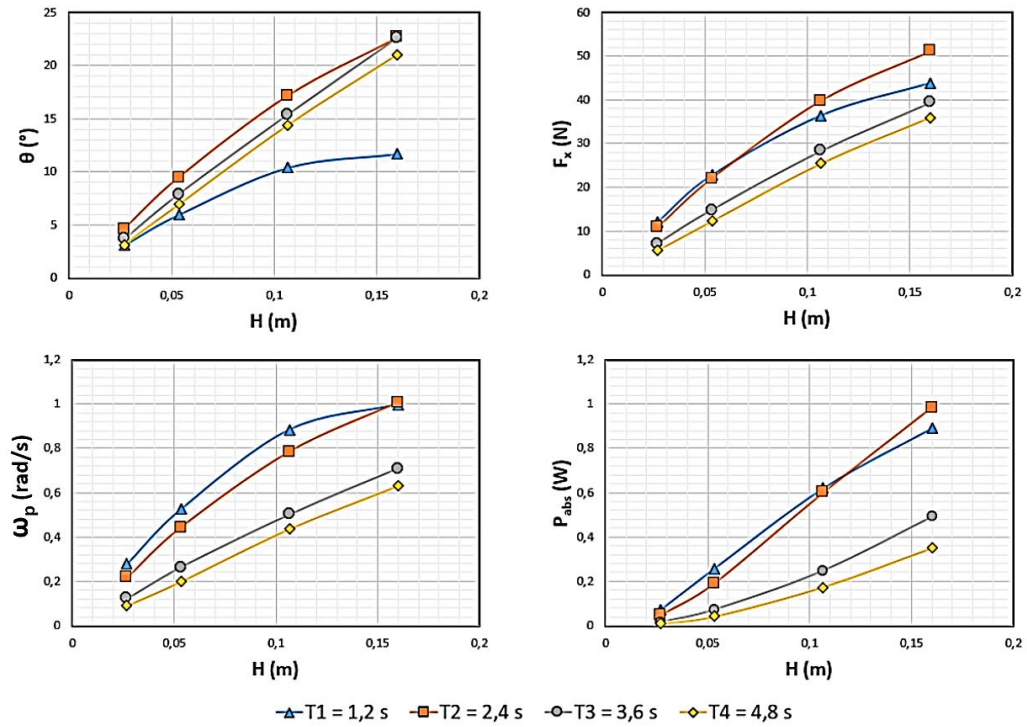


Figura 2.30 – Variação da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função do aumento da altura de onda (fonte: adaptado de FUHRMEISTER, 2018)

OWSC Langlee (H constante)

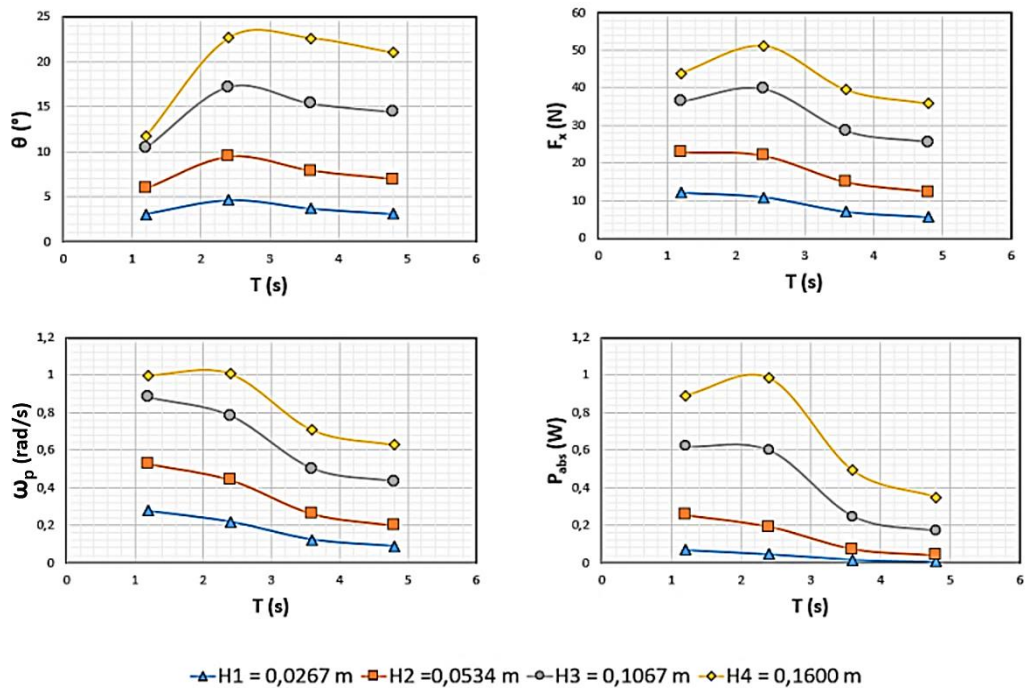


Figura 2.31 – Variação da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e potência captada, em função do aumento do período de onda (fonte: adaptado de FUHRMEISTER, 2018)

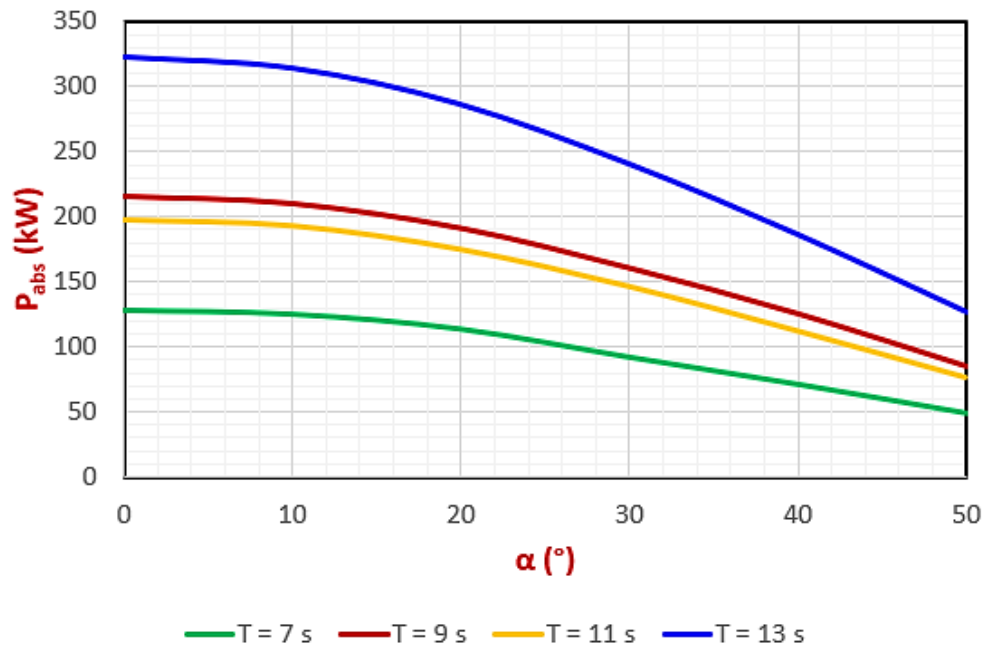


Figura 2.32 – Variação da potência captada por um OWSC de 18 m de largura em função do ângulo de propagação da onda incidente
(fonte: adaptado de HENRY; FOLLEY; WHITTAKER, 2018)

Fuhrmeister e Schettini (2018) realizaram um estudo sobre a variação da posição de instalação de um OWSC (em função da borda livre da placa e da sua distância em relação ao fundo), onde é investigada a configuração ideal para maximizar a eficiência do conversor. Neste estudo, os autores propõem a definição de um grau de submersão (G_{sub}):

$$G_{sub} = \frac{h_{sub}}{h_p}, \quad (65)$$

em que h_{sub} corresponde à profundidade submersa do OWSC, definida como a distância vertical entre a superfície livre da água até o eixo de giro, localizado na base da placa.

O gráfico da Figura 2.33 reúne, de forma compacta, os resultados obtidos pelos autores. Nesta figura é apresentada uma estimativa do desempenho dos conversores em função de G_{sub} , de onde se observa um desempenho máximo quando $G_{sub} \approx 0,9$. Além disso, é possível concluir que o grau de submersão de um *Waveroller* deva ser inferior a 1,4, no intuito de garantir uma eficiência maior que 75%.

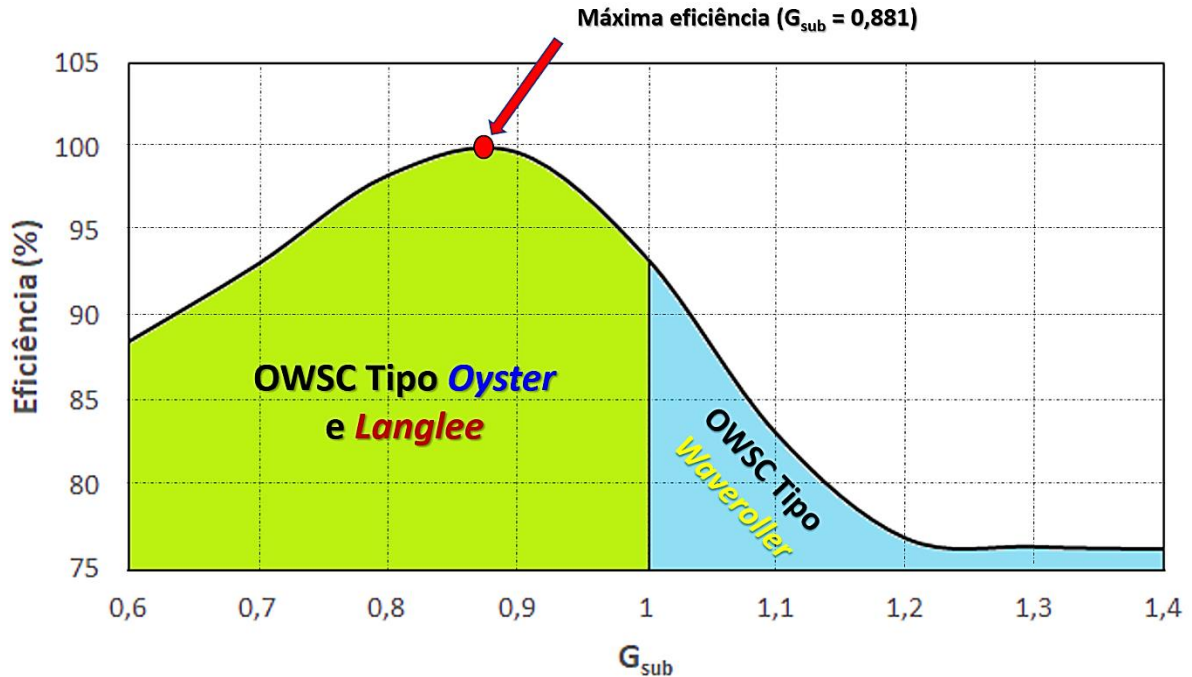


Figura 2.33 – Eficiência dos OWSC's em função do seu grau de submersão (fonte: adaptado de FUHRMEISTER; SCHETTINI, 2018)

No mesmo trabalho, os autores propõem ainda uma estimativa da altura de placa ideal (h_{pi}), a ser utilizada em um conversor do tipo *Langlee*, quando conhecidos os valores de profundidade, altura e comprimento de onda:

$$h_{pi} = \frac{h - 0,2518\sqrt{HL}}{0,9} . \quad (66)$$

2.3.4 Influência das características geométricas das placas

Nos tópicos seguintes, serão discutidas as principais variáveis geométricas responsáveis por modificar a hidrodinâmica dos conversores oscilantes por translação. O enfoque principal será dado às influências da largura, da espessura, da inércia, do coeficiente de amortecimento aplicado e da variação no *design* da estrutura.

2.3.4.1 Influência da largura da placa

A largura da placa de um OWSC é um dos parâmetros mais influentes na sua hidrodinâmica e geração de energia. Segundo Whittaker e Folley (2012), a largura da placa está diretamente relacionada à força da onda incidente (responsável pelo momento de excitação em torno do eixo

de giro), de tal forma que esta última apresente uma relação, aproximadamente, proporcional ao quadrado da primeira. Os autores atribuem a variação nos valores das forças ao momento de inércia de massa adicionada, que ocorre em função da presença do corpo rígido, responsável por acelerar as partículas da água nas regiões muito próximas à placa. Este comportamento é mostrado nos gráficos da Figura 2.34, onde é possível verificar a semelhança entre a variação dos valores RMS do momento de inércia de massa adicionada e do momento de excitação, em função da largura da placa.

De acordo com Gomes et al. (2015), em casos onde a largura do conversor é consideravelmente maior que o comprimento da onda incidente, a hidrodinâmica adquire um comportamento bidimensional e, como consequência, o OWSC poderá captar, no máximo, metade da energia disponível nesta onda. Whittaker e Folley (2012) afirmam que, nestas condições, a relação entre a força da onda e a largura da placa é, aproximadamente, linear. Por outro lado, estes autores ressaltam que, nos casos onde a largura de placa é inferior ao comprimento da onda, a força da onda incidente varia com o quadrado da largura. Considerando estas informações, é altamente recomendável estabelecer um limite superior para a largura da placa, pois uma largura extremamente grande resultará em maiores esforços estruturais e, conseqüentemente, em um maior coeficiente de amortecimento a ser aplicado pelo sistema de PTO, resultando em um custo bastante elevado (RAHUMA.; YAAKOB, 2015). Fuhrmeister (2018) observa que, em larguras de placa maiores que três vezes a sua altura, a variação da amplitude angular atingida pelo OWSC tende a ser cada vez menos expressiva. Assim, o autor sugere que a largura de placa ideal de um OWSC seja de duas a três vezes o valor da altura da mesma.

2.3.4.2 Influência da espessura da placa

Lin et al. (2018) abordam que a espessura da placa oscilante é uma característica bastante dominante na hidrodinâmica e no potencial de geração do conversor. Esta importância é justificada em função de uma potencialização das forças de arrasto na superfície da placa, ocasionando uma aceleração do seu movimento. Segundo Folley, Whittaker e Van't Hoff (2007) um aumento da espessura de placa é responsável por uma diminuição relativa das perdas viscosas durante a sua oscilação, além de aumentar a rigidez da estrutura, o que favorece o momento de excitação do conversor, intensificando o seu potencial de captação de energia.

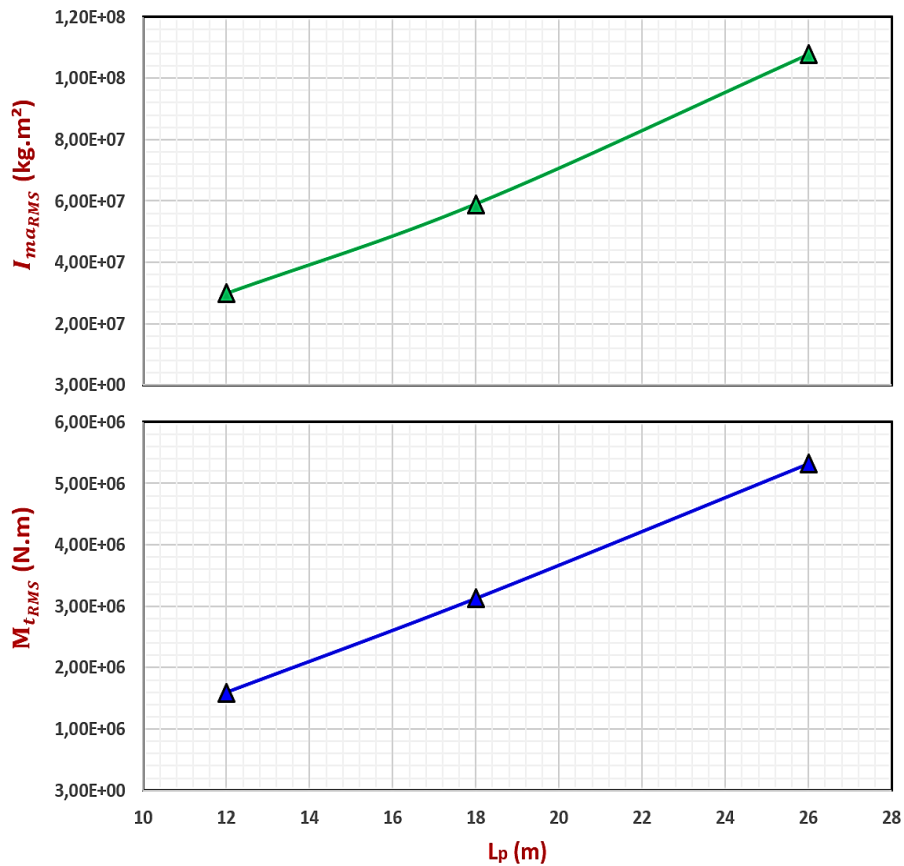


Figura 2.34 – Variação dos valores RMS do momento de inércia de massa adicionada e do momento de excitação, em função do aumento da largura de placa, considerando $H = 1,2$ m, $h = 10,9$ m, e períodos de onda entre 4 s e 14 s (fonte: baseado nos resultados de RENZI et al., 2014)

Na Figura 2.35 são mostrados, de forma resumida, alguns resultados do trabalho de Folley, Whittaker e Van't Hoff (2007) para o caso de um OWSC do tipo *Oyster*, de largura de placa igual a 10 m, sujeito a uma onda regular de 2 m e altura e 10 s de período. Nela é possível observar claramente que um aumento da espessura da placa possibilita uma maior captação da energia pelo conversor. Além disto, pode-se concluir, por meio da comparação das curvas referentes às profundidades de 18 m e 6 m, que é necessário aumentar a espessura da placa em regiões mais rasas, no intuito de ocasionar a mesma potência captada, em situações semelhantes, em uma zona profunda.

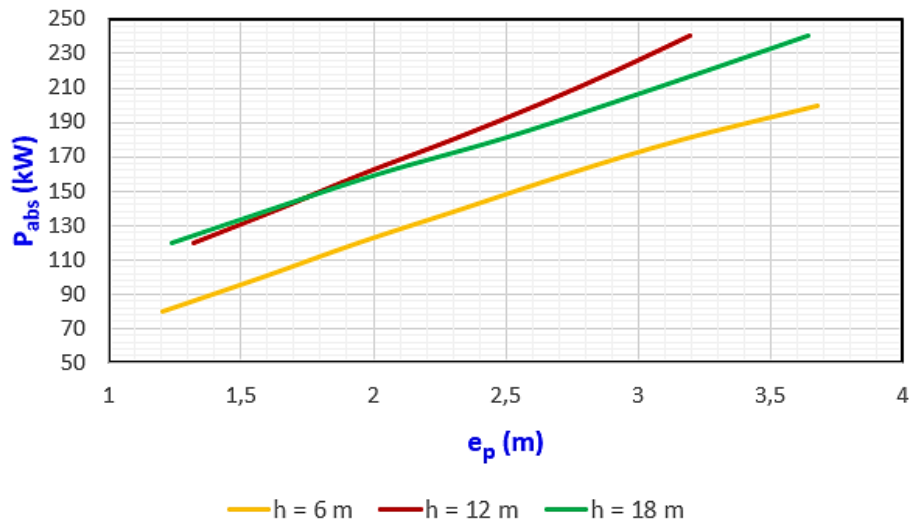


Figura 2.35 – Variação da potência captada por um OWSC, em três profundidades distintas, com a espessura da placa (fonte: baseado nos resultados de FOLLEY; WHITTAKER; VAN'T HOFF, 2018)

O estudo recente realizado por Brito et al. (2020) reforça que a potência captada pelo conversor cresce com o aumento da espessura de placa. Entretanto, os autores ressaltam que, sob as condições analisadas, a variação da espessura não ocasionou intensificações expressivas no fator de captura de energia (f_{abs}) do OWSC (definido como a relação entre a potência captada pelo dispositivo e a potência disponível na onda incidente), ao mesmo tempo em que outras variáveis, como a altura da placa, se mostraram mais significativas. Estes resultados podem ser observados na Figura 2.36, na qual são mostradas duas curvas, referentes às alturas de onda de 0,15 m e 0,25 m, que demonstra a pequena variação no fator de captura em função da espessura.

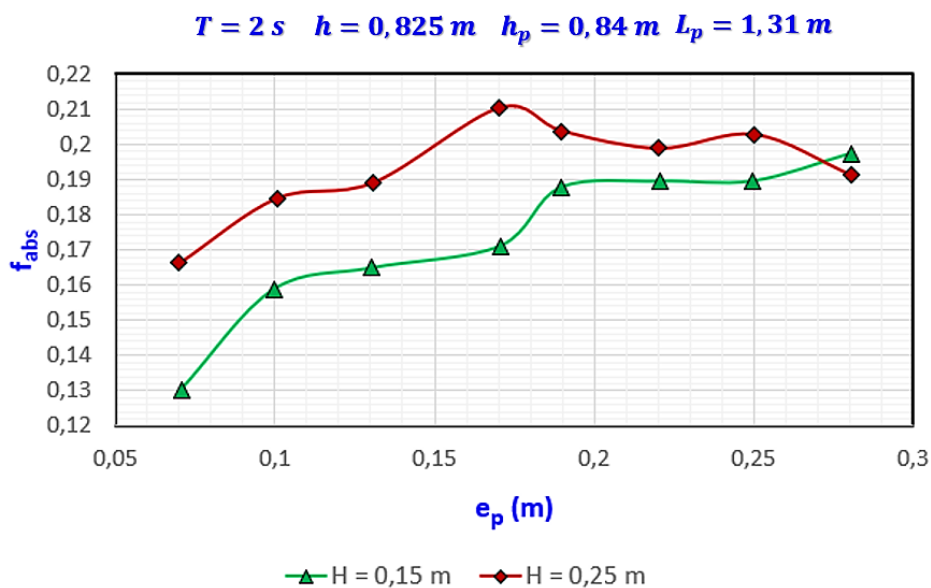


Figura 2.36 – Variação no fator de captura de um OWSC em função da espessura de placa (fonte: adaptado de BRITO et al., 2020)

Por outro lado, Cheng et al. (2020) ressaltam que para todos os casos hidrodinâmicos, inclusive para aqueles com a presença de correntes secundárias, existe uma espessura de placa ideal que otimizará a captação de energia. Esta espessura geralmente encontra-se próxima da condição de ressonância da estrutura.

Renzi et al. (2014) aborda que, para o bom funcionamento de um OWSC, a relação entre a espessura e a largura da placa deva ser significativamente inferior a 1. Seguindo esta condição, Fuhrmeister (2018) recomenda que a dimensão da espessura ideal esteja entre 10% e 20% da altura de placa.

2.3.4.3 Modificações ocasionadas em função da variação do centroide e da massa da placa

A influência da posição do centroide (y_{c_p}), em relação ao fundo do domínio, e da massa da placa (m_p) de um OWSC foram alguns dos pontos estudados no trabalho de Brito et al. (2020). Para a avaliação do primeiro destes parâmetros, foram consideradas constantes a geometria, a massa da placa e as condições de onda. Desta maneira, foi observado que, com o aumento da distância do centroide, ocorre uma diminuição do fator de captura de energia do conversor. Esta conclusão pode ser obtida por meio da análise do gráfico disposto na Figura 2.37.

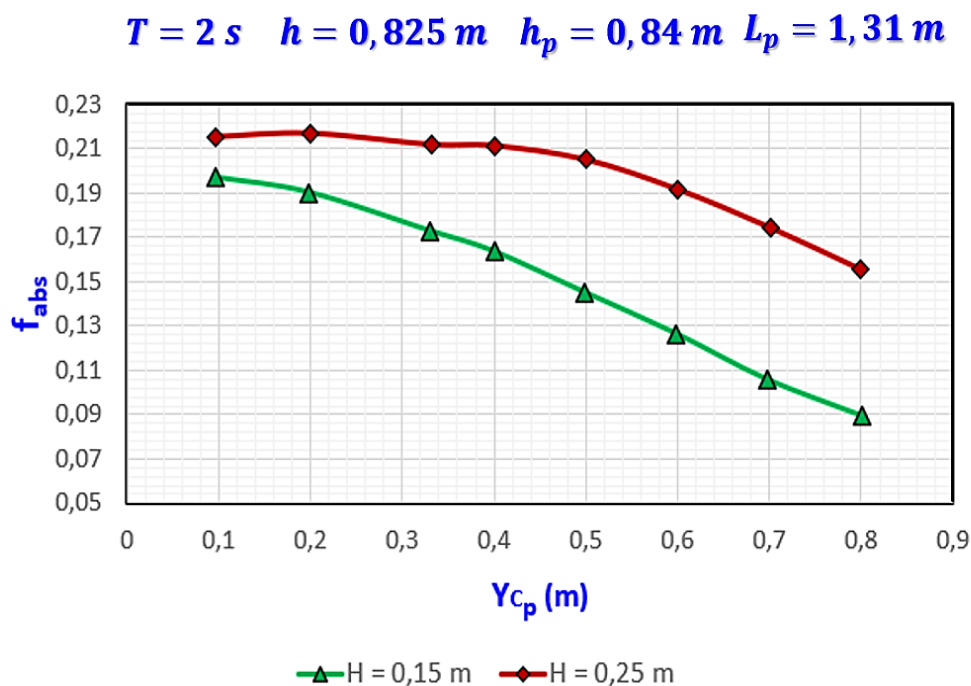


Figura 2.37 – Influência da posição do centroide de um OWSC sobre seu fator de captura (fonte: adaptado de BRITO et al., 2020)

No estudo sobre a influência da variação da massa de placa, foram considerados constantes o centroide, a geometria da placa e as condições da onda. É importante ressaltar que, como todos os parâmetros geométricos da placa são mantidos constantes, um aumento de sua massa representa, em realidade, um aumento na massa específica de placa. Assim, conclui-se que um aumento da massa da placa (neste caso, um aumento de ρ_p) ocasiona uma diminuição do fator de captura do OWSC (Figura 2.38).

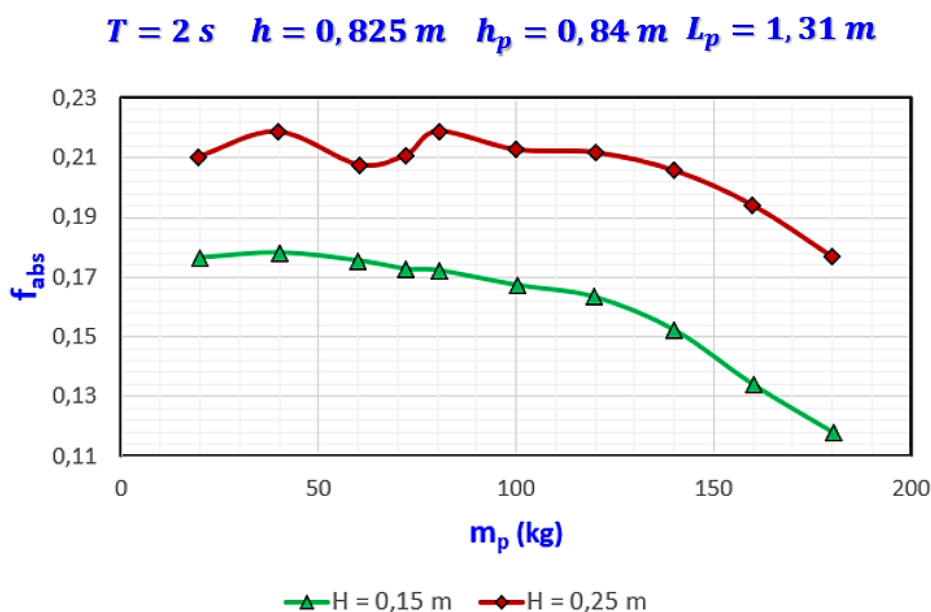


Figura 2.38 – Variação do fator de captura de um OWSC em função da variação da massa da placa (fonte: adaptado de BRITO et al., 2020)

2.3.4.4 Influência ocasionada pelo *design* da placa

O trabalho realizado por Nair e Kesavan (2019) fornece alguns resultados importantes sobre a influência da mudança do *design* de placa, no que diz respeito à sua hidrodinâmica e consequente geração de energia. É relatado que as estruturas canônicas (como o cilindro de seção circular, o cilindro de seção quadrada e o cone) apresentam baixo desempenho hidrodinâmico, quando comparadas às placas de seção plana usuais, como a seção retangular e a triangular. Os autores ressaltam que, ao se utilizar uma placa curva, é possível otimizar a hidrodinâmica do conversor em até 30%. Esta potencialização ocorre em função da curvatura direcionar o fluxo para o núcleo central da placa, favorecendo o movimento oscilatório da mesma. Neste trabalho, o maior potencial foi observado para uma estrutura formada pelo semicone de seção oca mostrado na Figura 2.39.

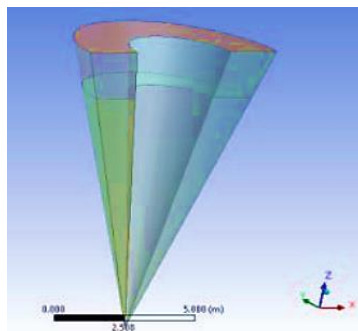


Figura 2.39 – OWSC de estrutura formada por um semicone de seção oca
(fonte: NAIR; KESAVAN., 2019)

2.3.5 O período de oscilação natural de um OWSC (Ressonância)

Uma estrutura sujeita a um movimento oscilatório, de período característico, pode ser colocada em ressonância com o mesmo no momento em que o período de oscilação natural do corpo torna-se igual ao do movimento existente. Neste instante, a estrutura passa a oscilar significativamente o que, no caso de um OWSC, resulta em grandes amplitudes angulares atingidas (RENZI; DIAS, 2012). O período de oscilação natural do conversor (T_n) pode ser determinado pela seguinte expressão (RENZI et al., 2014):

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{I_m + I_{ma}}{R}}. \quad (67)$$

Segundo Renzi et al. (2014), um OWSC como *Oyster* tem sua captação de energia em função do momento de excitação, que é fortemente influenciada pela difração da onda incidente sobre a estrutura. Desta maneira, o potencial de geração de energia deste conversor depende, principalmente, da maximização do momento de excitação, cujo respectivo período de onda geralmente é bastante diferente do período de oscilação natural da placa. Sendo assim, projetar um conversor para que seu período de oscilação natural coincida com o período de onda maximizador do momento de excitação é algo muito difícil, uma vez que os mesmos raramente são iguais. Os autores ressaltam que o valor de T_n pode ser modificado por meio de uma variação no momento de inércia de massa do OWSC, o que implica na diminuição do tamanho do mesmo. Entretanto, uma estrutura menor, colocada em ressonância, estará sujeita a grandes amplitudes angulares atingidas e a possíveis cargas estruturais, o que pode representar uma limitação expressiva. Em razão disto, os OWSC's são projetados para a condição de maximização do momento de excitação.

2.3.6 O fenômeno da batida (*Slamming*)

O impacto de um corpo rígido contra uma superfície líquida ocasiona grandes picos de pressão sobre a estrutura, dando origem a fortes jatos que são impulsionados para longe no momento da colisão. Este fenômeno, denominado “batida” (mais conhecido por *Slamming*, da sua tradução para o inglês), pode ser observado no movimento de navios (batida de proa), no pouso de aviões sobre a água e na hidrodinâmica de conversores de energia das ondas, o que inclui o sistema OWSC (DIAS; GHIDAGLIA, 2018). O *Slamming* está associado ao problema da entrada de um sólido na água (*Water Entry Problem*), o qual pode trazer consequências bastante danosas às estruturas, em função dos esforços dinâmicos envolvidos (GHADIMI; DASHTIMANESH; DJEDDI, 2012). Esta problemática foi o ponto de estudo principal dos trabalhos de Von Kármán (1929) e de Wagner (1932), os quais contribuíram com as primeiras abordagens analíticas do fenômeno, e que representam as bases para diversos casos de aplicações até os dias de hoje (DIAS; GHIDAGLIA, 2018).

O trabalho de Henry et al. (2014a) aborda sobre um estudo experimental tridimensional do impacto das ondas sobre os OWSC's (realizado sobre um modelo de conversor na escala de 1:25), o qual é conduzido no tanque de ondas do laboratório de hidráulica marítima da *Queen's University Belfast* (que possui 18,00 m de extensão e 4,58 m de largura, podendo trabalhar com lâminas d'água entre 0,40 m e 0,80 m). Neste estudo, é observado pela primeira vez a ocorrência do fenômeno de *Slamming* sobre os conversores deste tipo, sendo, portanto, a principal referência sobre esta temática. Nela são encontrados diversos dados de pressão, sondas de níveis d'água e características hidrodinâmicas dos dispositivos, motivo este que coloca o referido trabalho como um dos nortes para validações de modelos numéricos (WEI et al., 2015).

Motivado pelo fenômeno observado, um estudo experimental bastante similar é realizado por Henry et al. (2014b) em um canal de ondas da *École Centrale de Marseille* (que possui 16,77 m de extensão, 0,65 m de largura e 1,50 m de altura), contemplando, desta vez, a análise da batida em um caso bidimensional¹ (sobre um modelo de OWSC na escala de 1:40), o que, segundo esta referência, permite um melhor detalhamento do fenômeno. Desta forma, os mesmos autores apresentam uma sequência de imagens (obtidas por meio da utilização de uma câmera

¹ Maiores detalhes e informações a respeito deste experimento, bem como dos dispositivos de medição utilizados, podem ser encontrados diretamente no trabalho de Henry et al. (2014b).

de alta precisão durante a realização dos experimentos) para descrever o fenômeno, as quais são mostradas na Figura 2.40.

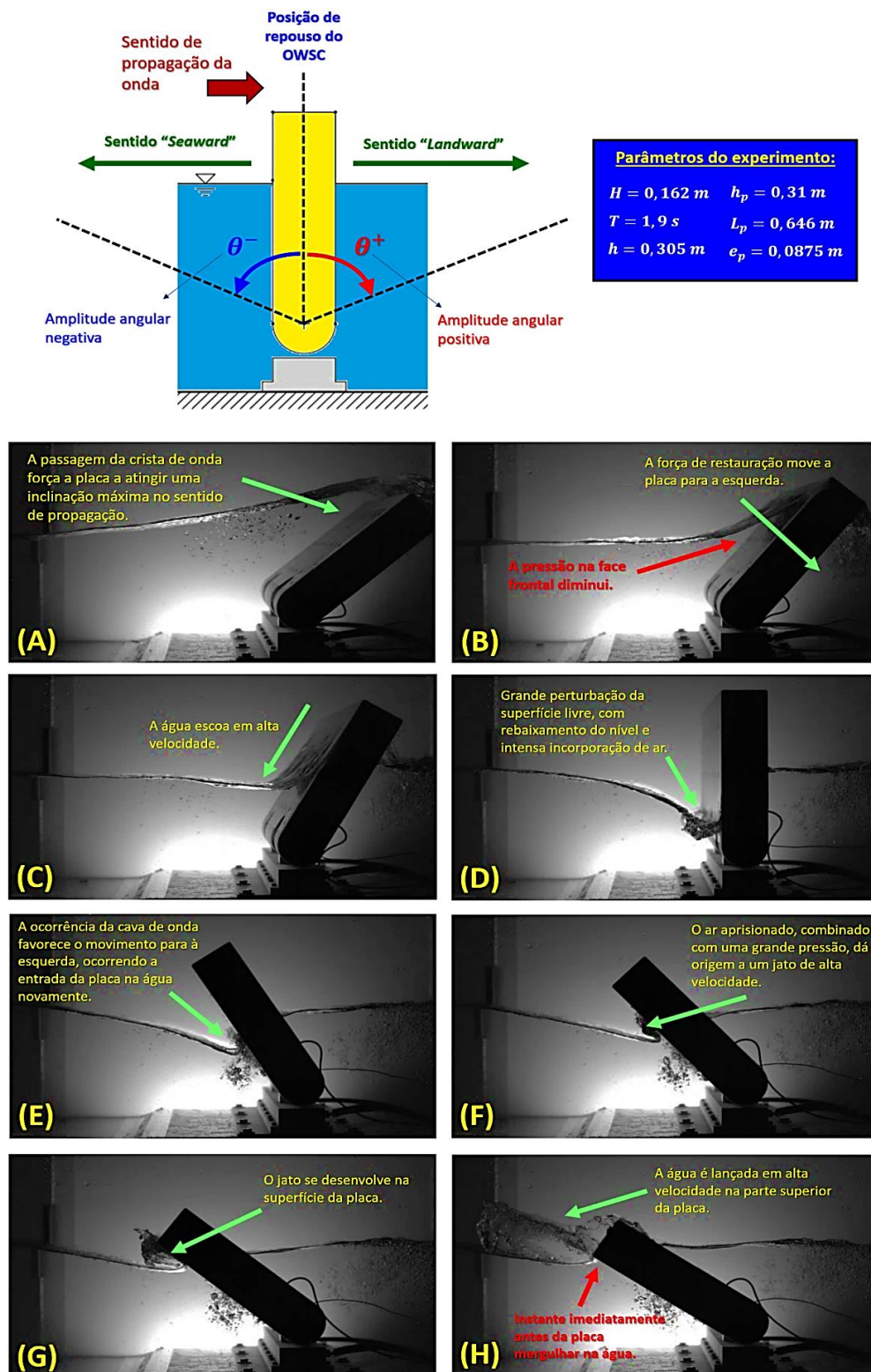


Figura 2.40 – Sequência de imagens demonstrando o fenômeno *Slamming* sobre um modelo reduzido (escala 1:40) de um OWSC do tipo *Oyster* (fonte: adaptado de HENRY et al., 2014b; Wei et al., 2016)

Segundo a figura anterior, os autores descrevem que o fenômeno é iniciado no momento em que a passagem de uma crista de onda impulsiona a placa para frente, a partir de sua posição de repouso (vertical), forçando a mesma a atingir uma máxima amplitude angular positiva (instante A, que demarca o fim da passagem da crista). No instante seguinte, agora demarcado pela cava da onda, o nível de água é rebaixado suavemente, de tal forma que a força de restauração, devido ao empuxo, impulsiona a placa de volta para sua posição de repouso (para a esquerda, no instante B). Durante este movimento, a porção de água que existia acima da placa passa a correr rapidamente no sentido do eixo do conversor (instante C), até que, no momento em que a placa atinge a posição vertical, ocorra um significativo rebaixamento da superfície livre, favorecendo a incorporação de bolhas de ar (instante D). A placa, ainda sob a influência do repuxo decorrente da cava de onda, movimenta-se para a esquerda, ocasionando uma zona de alta pressão em sua região frontal. Neste instante (E), a placa passa a entrar novamente na água e a zona formada por bolhas de ar, em conjunto com uma grande pressão, origina um jato de alta velocidade, que percorre a superfície da placa em direção ao seu topo (instantes F e G). Por fim, no momento imediatamente antes da placa mergulhar totalmente na água (instante H), o jato deixa a superfície do sólido, sendo lançado para longe. Nesse instante, a placa atinge a sua máxima amplitude angular negativa, demarcando o fim da ação da cava de onda e, logo em seguida, ocorre uma nova crista de onda, o que caracteriza a repetição do fenômeno.

Na Figura 2.41 é apresentado um gráfico que contempla a superposição das curvas de amplitude angular e pressão (lida em uma sonda localizada próximo ao centro geométrico da face frontal da placa), obtidas no trabalho de Henry et al. (2014a). O intervalo representado no gráfico corresponde à passagem completa de uma onda regular sobre o OWSC, cujo período é de, aproximadamente, 2 s. Nesta figura, são destacados os instantes correspondentes aos oito *frames* abordados na Figura 2.40, facilitando a compreensão do fenômeno, por meio da relação entre a pressão dinâmica (P_{din}) e o efeito da mesma sobre o movimento da placa. O primeiro pico de pressão ocorre próximo ao instante $t = 0,6$ s, que corresponde ao momento imediatamente após a passagem da crista de onda (instante A). A seguir (em torno de $t \approx 0,7$ s), a placa atinge a sua máxima amplitude angular positiva (instante B), e, logo em seguida, passa a se movimentar no sentido oposto, o que pode ser atribuído à queda de pressão experimentada até $t = 1,2$ s. Este baixo valor de pressão se mantém praticamente constante até $t \approx 1,35$ s (instantes C, D e E), correspondendo ao intervalo onde a placa atinge a posição vertical e se movimenta para a esquerda, dando início à entrada do corpo rígido na água. A partir deste

instante (intervalo entre E e F), é observado um grande pico de pressão que tende a diminuir rapidamente logo em seguida, o que pode ser associado à formação do jato de alta velocidade (entre F e H), o qual é lançado para longe da placa em $t \approx 1,6$ s (instante H, correspondente ao ponto onde P_{din} é mínimo). Por fim, após a placa mergulhar na água, a pressão dinâmica volta a crescer, forçando a placa a se movimentar novamente para a direita, demarcando a passagem de uma nova crista de onda.

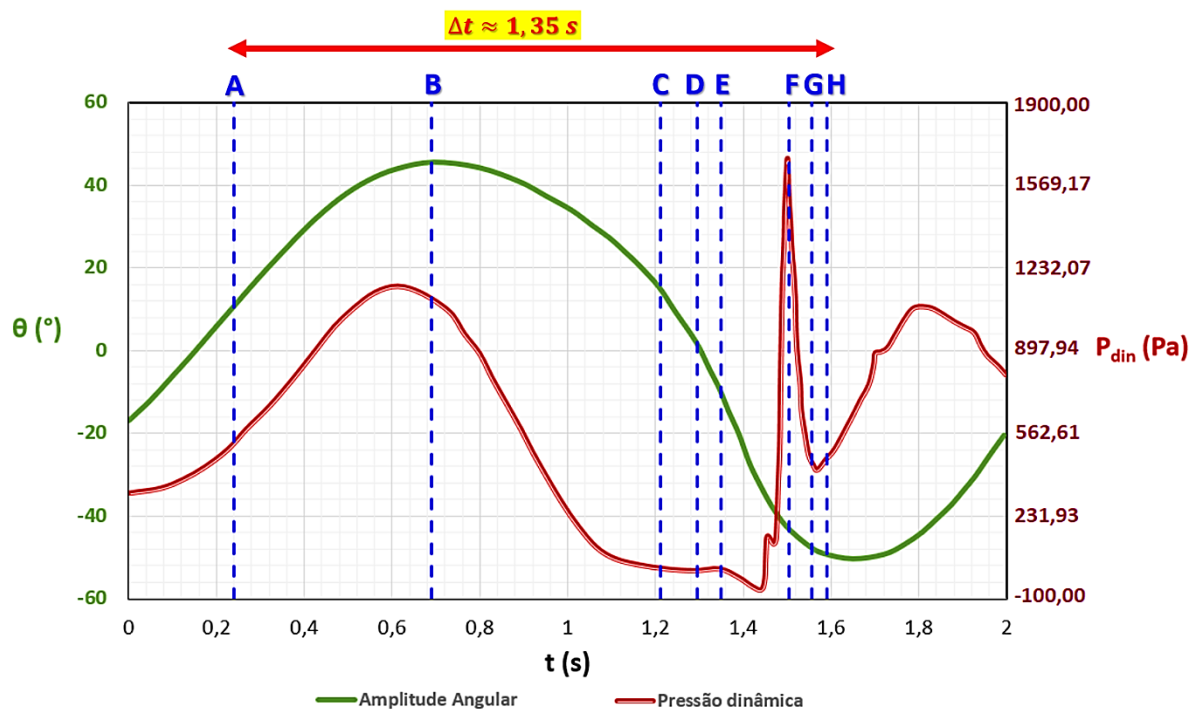


Figura 2.41 – Associação da amplitude angular atingida pela placa com a pressão dinâmica envolvida durante um evento do fenômeno de *Slamming* (fonte: adaptado de HENRY et al., 2014a)

Henry et al. (2015) afirma que a teoria proposta por Wagner (1932) se mostra bastante satisfatória para estimar o pico da pressão dinâmica (instante F), o qual é experimentado pela estrutura durante o fenômeno da batida, e que corresponde à situação mais crítica de operação de um OWSC. Segundo os autores, o pico de pressão dinâmica (P_k) está diretamente associado à velocidade característica do jato (V_{jr}), podendo ser estimado por:

$$P_k = 0,5 \rho V_{jr}^2 . \quad (68)$$

2.3.7 O efeito da utilização da semelhança de Froude no estudo da hidrodinâmica de um OWSC

Levando em consideração que os dados, resultantes da operação em escala real de um OWSC, são bastante escassos na literatura, as principais informações a respeito da hidrodinâmica do conversor são embasadas em modelos reduzidos de laboratório e, principalmente, nos modelos numéricos de CFD. Estes últimos são validados com base em estudos experimentais em escalas reduzidas que, por sua vez, utilizam a semelhança do número de Froude (relação entre as forças de inércia e as forças gravitacionais). Desta forma, é necessário conhecer a influência desta metodologia de similaridade sobre os fenômenos de escoamento, envolvidos na dinâmica do corpo rígido (SCHMITT; ELSÄßER, 2017).

Segundo Wei et al. (2015), a semelhança de Froude dificilmente garantirá semelhança entre os números de Reynolds. Sendo assim, apesar da variação deste último aparentemente não ocasionar mudanças significativas na dinâmica do conversor, certamente resultará em comportamentos diferentes para a velocidade, vorticidade e para a pressão do escoamento envolvido. A Figura 2.42 mostra uma comparação visual da vorticidade e da pressão nos entornos da placa de um OWSC, levando em consideração diferentes escalas geométricas. É possível observar, a partir desta figura, que a vorticidade é um pouco menos expressiva em escalas menores do que na escala real (1:1), implicando que o conversor experimentalizará maiores magnitudes de velocidade nas situações reais. Por outro lado, a pressão dinâmica é potencializada com o aumento da escala. O aumento de velocidade na escala 1:1 também é observado no trabalho de Schmitt e Elsässer (2017). Os mesmos autores ressaltam ainda uma pequena diferença na superfície livre em regiões adjacentes às laterais da placa, como pode ser observado na Figura 2.43.

O trabalho de Wei et al. (2015) aborda que o aumento da largura de placa é responsável por intensificar os efeitos de difração e de radiação das ondas, ao mesmo tempo em que os efeitos viscosos diminuem. Desta forma, podem ocorrer pequenas diferenças na amplitude angular atingida pela placa, não superiores a 4%, em relação a escala de 1:1, ao serem utilizados modelos em escalas reduzidas. Os autores afirmam que, de uma forma geral, a hidrodinâmica de um OWSC não é significativamente modificada ao serem utilizados modelos reduzidos em até 100 vezes (escala 1:/100). Por outro lado, Schmitt e Elsässer (2017) ressaltam que os erros,

ocasionados pela utilização da semelhança de Froude, podem ser intensificados ou atenuados em função da curvatura e/ou da geometria da placa.

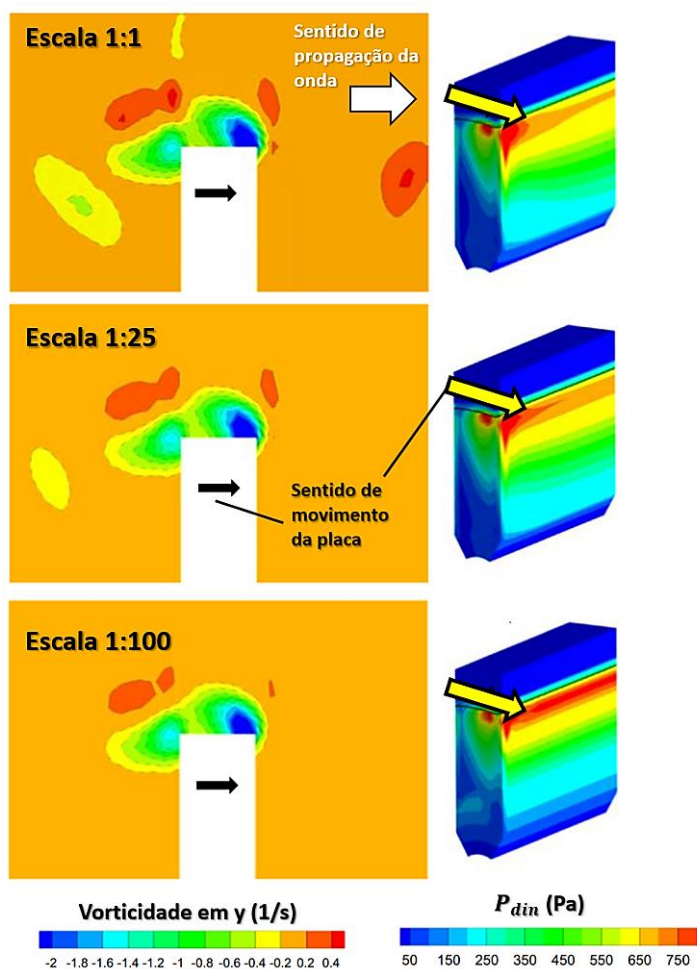


Figura 2.42 – Comparação entre os campos de vorticidade e valores de pressão dinâmica em diferentes escalas geométricas (fonte: adaptado de WEI et al., 2015)

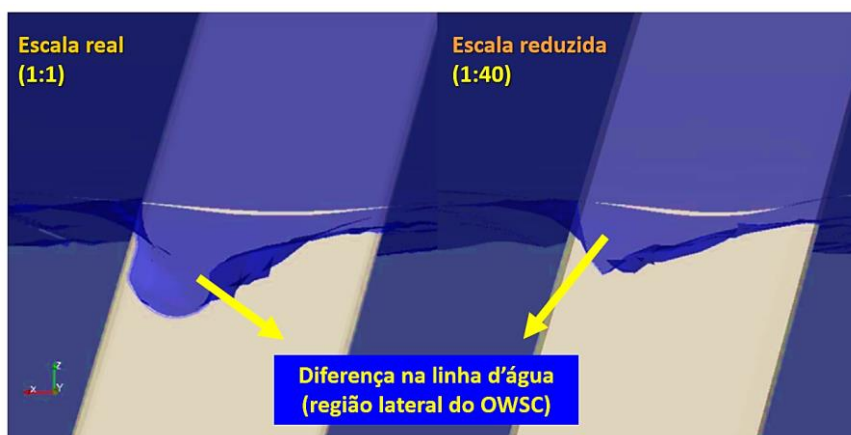


Figura 2.43 – Comparação entre a superfície livre da água em escala real e em escala reduzida (fonte: adaptado de SCHMITT, P.; ELSÄBER, 2017)

2.3.8 Parques de OWSC's

Na prática, a demanda energética de uma determinada região implica na necessidade de instalação de diversos conversores, o que resulta na construção de um parque de geração de energia. Entretanto, a presença de diversos dispositivos em uma mesma região modificará as características do escoamento local, influenciando a hidrodinâmica de todos os conversores na proximidade. Sendo assim, pode-se dizer que o potencial de geração de energia de um parque depende significativamente da distância utilizada entre os conversores, além das características geométricas dos mesmos e do estado de oceano. Este afastamento entre as estruturas pode contribuir de forma construtiva ou destrutiva para o potencial de geração final do parque, o que ressalta a necessidade de um estudo prévio pela busca dos espaçamentos entre placas ideais e das condições mais favoráveis (VENUGOPAL; NEMALIDINNE; VÖGLER, 2017). A Figura 2.44 mostra um mapa da porcentagem de modificação das alturas de onda, típicas de uma dada região, em função da presença de um parque de geração. Uma breve análise neste mapa permite concluir que as regiões mais afetadas são aquelas mais próximas dos conversores, assim como as zonas entre estes. Levando em consideração a área total afetada pela construção do parque, pode-se afirmar que a influência sobre a hidrodinâmica das ondas é bastante significativa, ressaltando a importância de uma correta disposição dos dispositivos.

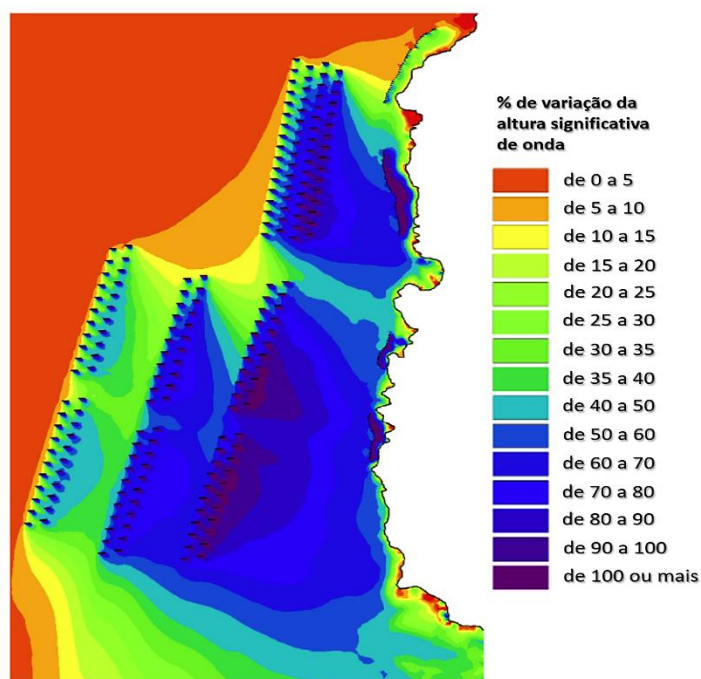


Figura 2.44 – Porcentagem de modificação nas alturas significativas de onda em função da construção de um parque de conversores
(fonte: adaptado de VENUGOPAL; NEMALIDINNE; VÖGLER, 2017)

Tay e Venugopal (2016) realizaram uma análise do espaçamento ideal em três diferentes *layouts* de um parque composto por 12 OWSC's. A metodologia utilizada neste estudo é a do algoritmo genético (*Genetic Algorithm – GA*), baseada na teoria do escoamento potencial e discretizada pelo método BEM. Desta forma, os autores ressaltam que os resultados são bastante limitados, tendo em vista as simplificações intrínsecas ao modelo numérico, além de não existirem resultados experimentais até o momento, o que possibilitaria uma comparação mais detalhada. Na Figura 2.45 são apresentados os *layouts* e os respectivos espaçamentos entre placas, propostos no referido trabalho.

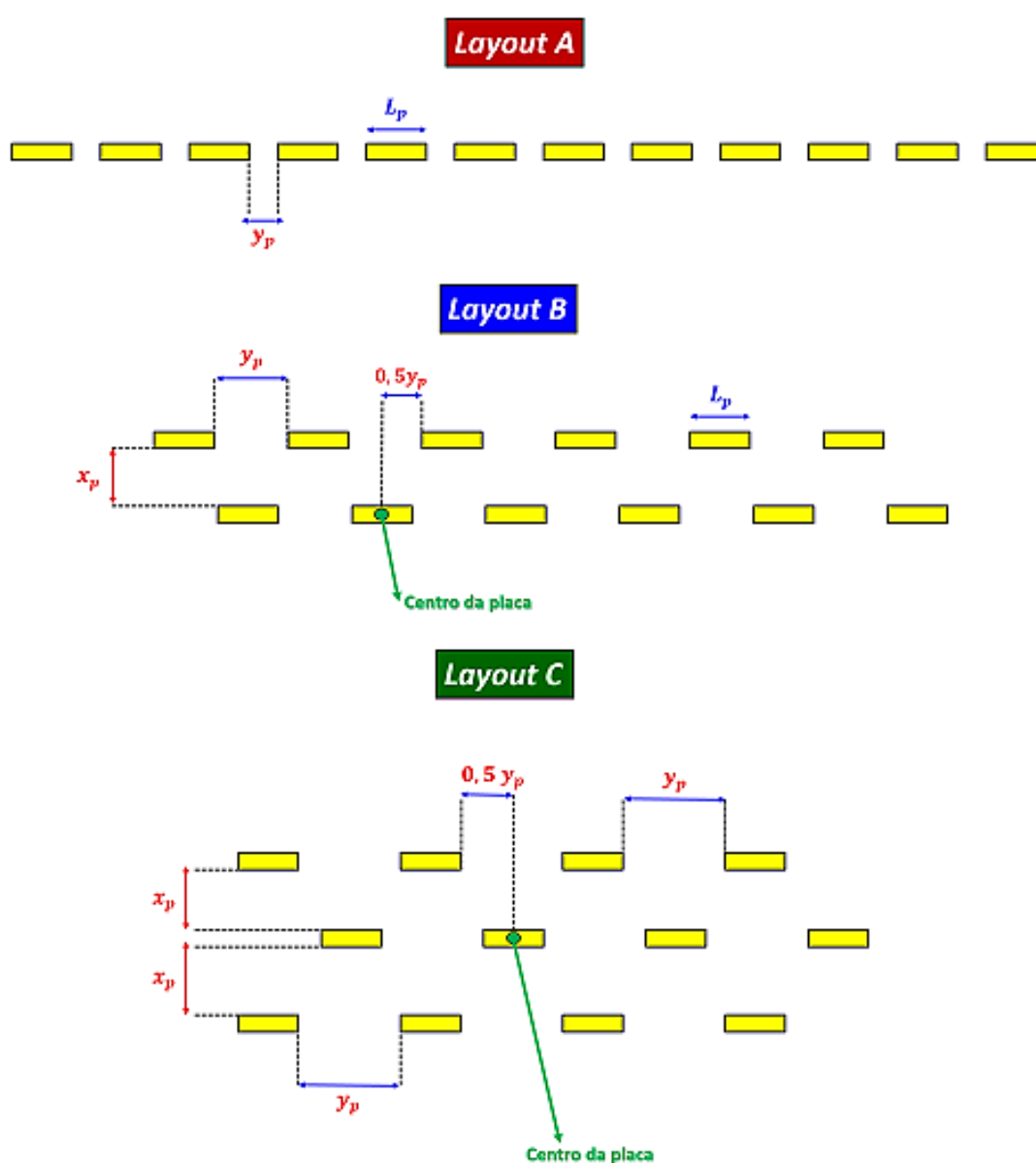


Figura 2.45 –Diferentes *layouts* de um parque de geração composto por 12 OWSC's (fonte: adaptado de TAY; VENUGOPAL, 2016)

Os *layouts* mostrados anteriormente foram testados em dois modelos diferentes de OWSC's, os quais baseiam-se nos protótipos do *Oyster 1* e *Oyster 2* da empresa *Aquamarine* (suas características são apresentadas na Tabela 2.4). Os valores ótimos de x_p e y_p , obtidos para cada caso, encontram-se dispostos nos gráficos da Figura 2.46.

Propriedades	OWSC 1	OWSC 2
L_p (m)	18,00	26,00
h_{sub} (m)	9,40	9,00
e_p (m)	4,00	4,00
h (m)	10,90	12,50
R (N.m)	$7,03 \cdot 10^6$	$12,81 \cdot 10^6$
I_m (kg.m ²)	$6,61 \cdot 10^6$	$9,15 \cdot 10^6$
C_{ad} (kg.m ² /s)	$16 \cdot 10^6$	$16 \cdot 10^6$

Tabela 2.4 – Características dos OWSC's aplicados no estudo dos *layouts* de um parque de geração (fonte: adaptado de TAY; VENUGOPAL, 2016)

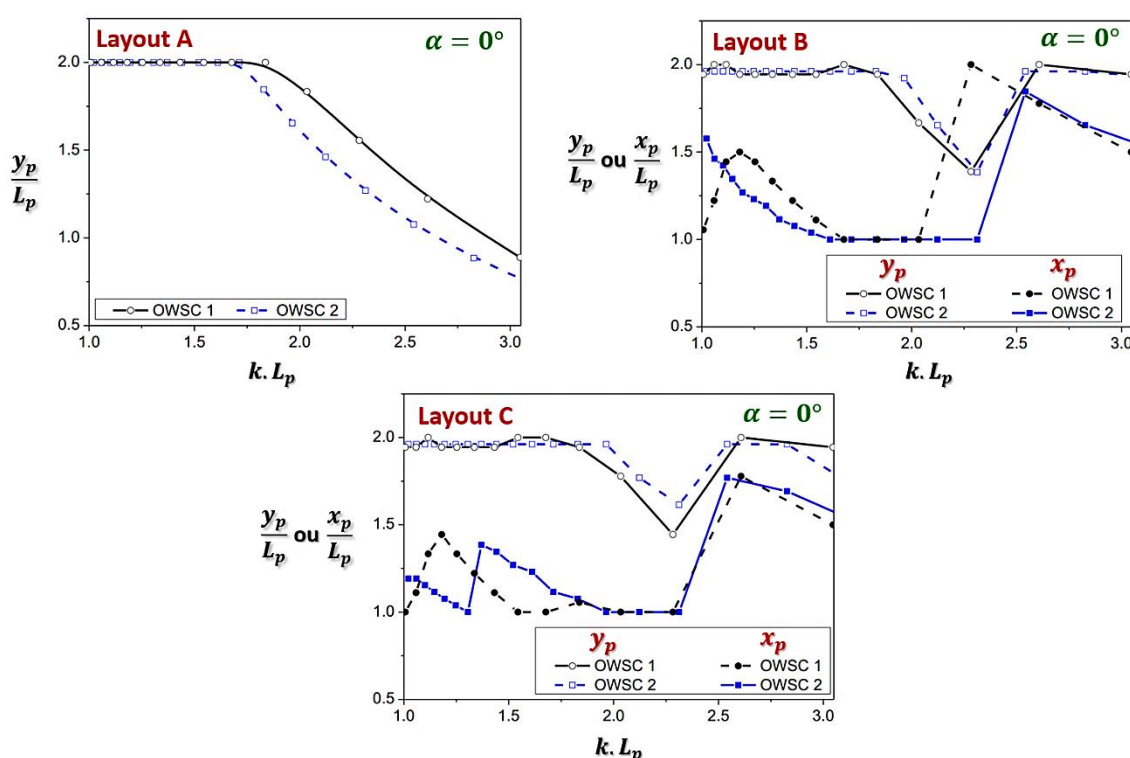


Figura 2.46 – Espaçamentos ideais para os diferentes tipos de *layout*, considerando dois modelos de OWSC e que a onda regular incide perpendicularmente à face frontal da placa (fonte: adaptado de TAY; VENUGOPAL, 2016)

De uma maneira mais conservadora, O'Hara Murray e Gallego (2017) abordam que o espaçamento ideal entre as placas dos OWSC esteja localizado entre $0,96 L_p$ e $2,5 L_p$, com

$x_p = y_p$ (segundo os layouts B e C da Figura 2.45). Neste trabalho, o espaçamento de $1,73 L_p$ é escolhido, sendo este posteriormente confrontado com os estudos de Tay e Venugopal (2017), os quais demonstraram que o mesmo não é o ideal em certas condições.

Em suas análises, Tay e Venugopal (2017) utilizam a mesma metodologia aplicada em seu trabalho anterior, publicado no ano de 2016 (TAY; VENUGOPAL, 2016). Entretanto, empregam uma nova configuração de *layout* para o parque de geração (Figura 2.47), os mesmos modelos de OWSC's (de características apresentadas na Tabela 2.4), e avaliam agora a ação de ondas irregulares.

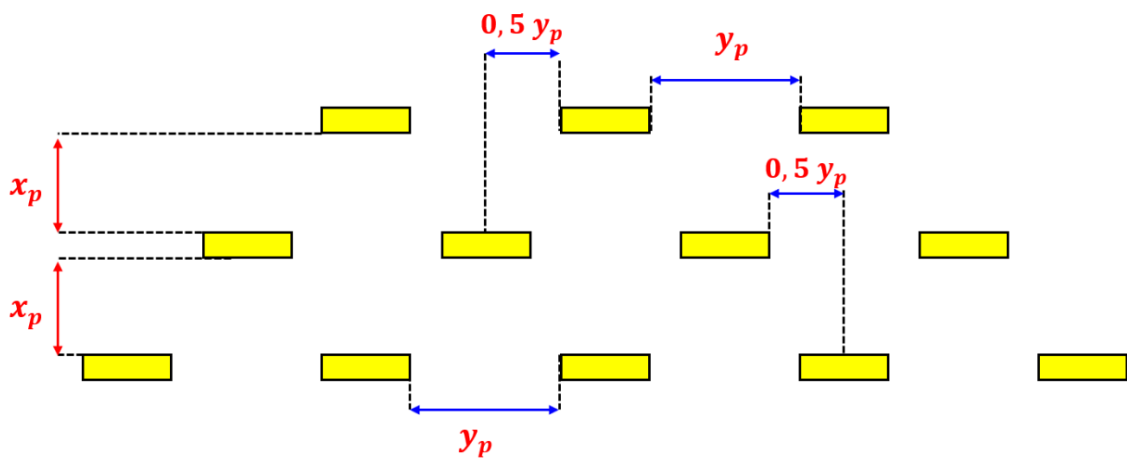


Figura 2.47 – *Layout* do novo parque de geração composto por 12 OWSC's (fonte: adaptado de TAY; VENUGOPAL, 2017)

Neste trabalho também é sugerido que os espaçamentos x_p e y_p possam ser estimados pelas seguintes curvas exponenciais (ajustadas segundo os diversos resultados obtidos):

$$\frac{y_p}{L_p} = 2 - e^{-k.L_p} , \quad (68)$$

$$\frac{x_p}{L_p} = 1 + 2,5e^{-k.L_p} . \quad (69)$$

Ao final, os autores enfatizam que a metodologia aplicada desconsidera os efeitos de viscosidade e da vorticidade, podendo diferir da hidrodinâmica real envolvida. Desta maneira, é recomendado que os resultados, obtidos pelas expressões anteriores, sejam utilizados como estimativas preliminares. Tendo em vista a falta de dados reais sobre o caso de estudo, assim

como o fato do espaçamento ideal não representar, necessariamente, a solução mais viável em termos econômicos, o trabalho deixa como sugestão a realização de uma análise mais detalhada de cada caso.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho utiliza o código livre e aberto *OpenFOAM* v.4.1 e a sua extensão *OlaFlow* para a realização do estudo. Ambos, fundamentados na metodologia de discretização em FVM, modelam numericamente a interação ar/água por meio do método VOF (*Volume of Fluid*), que, associado à modelagem em LES, permite uma abordagem bastante realista da hidrodinâmica dos OWSC's. Assim, as seções a seguir têm como objetivo apresentar o código numérico e a metodologia utilizada no problema, descrevendo sucintamente as equações governantes, o método de modelagem da turbulência empregado e os esquemas de resoluções adotados.

3.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES

De uma forma geral, os problemas em Mecânica dos Fluidos estão baseados nas leis de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. As equações diferenciais da Continuidade e de Navier-Stokes, aplicadas a fluidos incompressíveis e de viscosidade constante, são descritas, nesta ordem e em notação tensorial, pelas seguintes expressões:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (70)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (71)$$

onde, $u_{i,j}$, $x_{i,j}$ e g_i representam, respectivamente, as componentes da velocidade, da posição e da aceleração da gravidade. P corresponde à pressão do fluido e os índices i, j ($= 1,2,3$) denotam três coordenadas espaciais.

Segundo Rodriguez (2019), o fundamento da modelagem em grandes escalas consiste na aplicação de uma função de filtragem G , a qual está baseada em um filtro de tamanho característico Δ , responsável por determinar as escalas dos vórtices a serem calculadas ($\Delta \leq l$) ou modeladas ($\Delta > l$). A função G utiliza como base o volume de um elemento de malha, cujo centro está localizado a uma distância $\frac{\Delta}{2}$ de suas faces. Desta forma, um processo de filtragem em LES, aplicado no campo de velocidades, pode ser descrito da seguinte maneira:

$$\bar{u}_i(\vec{x}, t) = \iiint G(\vec{x}, \vec{x}') u_i(\vec{x}', t) d^3\vec{x}' \quad (72)$$

$$= \int_{x_1 - \frac{\Delta}{2}}^{x_1 + \frac{\Delta}{2}} \int_{y_1 - \frac{\Delta}{2}}^{y_1 + \frac{\Delta}{2}} \int_{z_1 - \frac{\Delta}{2}}^{z_1 + \frac{\Delta}{2}} \frac{1}{\Delta^3} u_i(x_1 - x_1', y_1 - y_1', z_1 - z_1', t) dx_1' dy_1' dz_1', \quad (73)$$

em que

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta_x \Delta_y \Delta_z}. \quad (74)$$

Ao fim do processo, a velocidade pode ser decomposta em duas parcelas:

$$u_i(\vec{x}, t) = \bar{u}_i(\vec{x}, t) + u_i'(\vec{x}, t), \quad (75)$$

onde \bar{u}_i corresponde à parcela da velocidade resolvida diretamente para as maiores escalas, ao passo que u_i' representa a parcela de submalha, modelada para as pequenas escalas.

Com base nesses princípios, as equações 70 e 71 podem ser reescritas em termos da metodologia LES (LAUNCHBURY, 2016):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (76)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \bar{f}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \right) - \frac{\partial \tau_{ij}^{sgs}}{\partial x_j}, \quad (77)$$

Sendo \bar{f}_i a parcela referente às forças gravitacionais e τ_{ij}^{sgs} o tensor de tensões das escalas de submalha, o qual é desconhecido e necessita da aplicação de um modelo SGS para sua resolução.

Uma maneira de tratar o tensor τ_{ij}^{sgs} consiste em utilizar a hipótese de Boussinesq, responsável por assumir que os efeitos de submalha ocasionam uma modificação da viscosidade do fluido,

a qual passa a levar em consideração uma viscosidade turbulenta ν_t (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2020). Esta hipótese pode ser expressa pela seguinte relação:

$$\tau_{ij}^{sgs} - \frac{1}{3}\tau_{kk}^{sgs}\delta_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) = 2\nu_t \bar{S}_{ij} , \quad (78)$$

em que δ_{ij} corresponde ao delta de Kronecker e \bar{S}_{ij} à taxa de deformação das grandes escalas. A parcela $\frac{1}{3}\tau_{kk}^{sgs}\delta_{ij}$ representa o tensor hidrostático, contido na parcela de pressão filtrada \bar{P} .

Assim, os modelos SGS têm como objetivo estimar o valor de ν_t , representando de forma aproximada o comportamento turbulento das pequenas escalas. De uma forma geral, os modelos de LES podem ser expressos em função de uma constante de modelo (C_{sgs}) e de um operador (OP), apresentando o seguinte formato genérico (LAUNCHBURY, 2016):

$$\nu_t = (C_{sgs} \Delta)^2 OP . \quad (79)$$

3.1.1 Modelo de Smagorinsky

Neste modelo, o operador pode ser definido da seguinte maneira (CHATZIMICHAILIDIS et al., 2019):

$$OP = \sqrt{\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} . \quad (80)$$

A constante geralmente aplicada ao modelo tem o valor de 0,18 (NISHAD et al., 2019), entretanto, esta constante pode variar para cada caso, principalmente nas regiões próximas às paredes, onde a viscosidade turbulenta é superestimada (LAUNCHBURY, 2016). Uma das formas de contornar esta problemática consiste na aplicação de uma função amortecedora, que permite um cálculo local para o coeficiente C_{sgs} (VAN DRIEST, 1956):

$$C_{sgs} = C_{0s} \left(1 - e^{-\frac{y^+}{A^+}}\right)^2, \quad (81)$$

onde C_{0s} e A^+ são parâmetros de entrada do modelo.

3.1.2 Modelo dinâmico de uma equação

Esta metodologia adiciona uma equação ao sistema, a qual é responsável por calcular a energia cinética de submalha (k_{sgs}), melhorando a modelagem da viscosidade turbulenta (LAUNCHBURY, 2016). Desta maneira, o operador e a equação de transporte da energia cinética são expressos por (KIM; MENON, 1997):

$$OP = \frac{\sqrt{k_{sgs}}}{C_{sgs} \Delta}, \quad (82)$$

$$\frac{\partial k_{sgs}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k_{sgs}}{\partial x_j} = -\tau_{ij}^{sgs} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - C_\epsilon \frac{k_{sgs}^{1,5}}{\Delta} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_j} \right), \quad (83)$$

sendo a constante C_ϵ determinada de forma dinâmica em cada passo de tempo da simulação. Como consequência, a constante C_{sgs} é atualizada conforme a simulação avança.

3.1.3 Modelo WALE

O modelo *Wall-Adapting Local Eddy-viscosity* não necessita de uma função de amortecimento ou de uma abordagem dinâmica, como os modelos anteriores. Tendo em vista sua formulação, o mesmo possibilita um tratamento bastante adequado do escoamento nas regiões próximas aos contornos sólidos (NISHAD et al., 2019). A constante do modelo possui um valor aproximado de 0,5, ao passo que seu operador está fundamentado na parte simétrica, sem traço, do quadrado do tensor do gradiente de velocidades (S_{ij}^d), podendo ser calculado por meio das seguintes expressões:

$$\bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad (84)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2}(\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3}\delta_{ij}\bar{g}_{kk}^2, \quad (85)$$

$$OP = \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}}, \quad (86)$$

onde \bar{g}_{ij} corresponde ao tensor do gradiente de velocidade.

3.2 O CÓDIGO *OPENFOAM*

O código numérico *OpenFOAM* funciona como uma ampla biblioteca de *solvers* e operadores matemáticos, programados em C++, capazes de resolver numericamente as equações diferenciais governantes do problema. Uma de suas principais vantagens reside no fato deste código ser livre e aberto, o que possibilita a modificação dos *solvers* existentes ou a adição de novos, conforme a necessidade do usuário. Além disto, o código conta com diversas contribuições de instituições e pesquisadores em vários países, assim como numerosos relatos de experiências e discussões em fóruns *online* de CFD. A versão 4.1 do *OpenFOAM*, embora não seja a mais atual, foi adotada para a realização dos estudos no presente trabalho, em função de alguns *solvers*, importantes para o caso de malhas numéricas dinâmicas, terem sido retirados a partir da versão 5.0. Uma breve descrição da estrutura do código e de seus métodos de resolução são apresentados nas subseções a seguir.

3.2.1 Discretização em volumes finitos

Assim como outros códigos comerciais, o *OpenFOAM* é fundamentado na metodologia de discretização em volumes finitos, responsável por dividir o domínio estudado em pequenos volumes de controle. Desta maneira, o código numérico baseia-se na resolução da equação geral de transporte de uma propriedade intensiva ϕ (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016):

$$\iiint \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \iiint \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \phi) dV - \iiint \vec{\nabla} \cdot (\Gamma \vec{\nabla} \phi) dV = \iiint Q_{\phi} dV, \quad (87)$$

onde Γ , Q_ϕ e \vec{u} , correspondem, nesta ordem, ao coeficiente de difusão, à uma fonte da propriedade ϕ e à velocidade. Os termos da equação, da esquerda para a direita, representam, respectivamente, a variação da propriedade com o tempo, o termo convectivo, o termo difusivo e o termo de fonte (referente à criação ou destruição da propriedade).

Levando em consideração a definição dos volumes de controle da Mecânica dos Fluidos, é possível relacionar o fluxo de um campo vetorial \vec{F}_v sobre uma superfície S ao volume por ela englobado, por meio do Teorema de Gauss (também conhecido por Teorema da Divergência):

$$\iiint \vec{\nabla} \cdot \vec{F}_v dV = \oint d\vec{S} \cdot \vec{F}_v. \quad (88)$$

A aplicação deste teorema sobre os termos convectivos e difusivos da equação de transporte resultam na seguinte expressão (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016):

$$\iiint \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint d\vec{S} \cdot (\rho \vec{u} \phi) - \oint d\vec{S} \cdot (\Gamma \vec{\nabla} \phi) = \iiint Q_\phi dV. \quad (89)$$

Todas as propriedades do escoamento são calculadas e armazenadas no centroide de cada volume de controle. Na sequência, é necessário aplicar algum método numérico de interpolação para obter os respectivos valores destas propriedades nas faces dos elementos de volume. Dessa maneira, a equação 89 pode ser aproximada por meio de somatórios, levando à forma discretizada a ser solucionada pelo código numérico (GREENSHIELDS, 2015):

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V_c + \sum_{\text{faces}} \vec{S}_f \cdot (\rho \vec{u} \phi_f) - \sum_{\text{faces}} \vec{S}_f \cdot (\Gamma \vec{\nabla} \phi_f) = Q_\phi V_c. \quad (90)$$

em que V_c corresponde ao volume do elemento. O subíndice “ f ” indica que a variável em questão se refere a cada uma das faces do elemento de volume.

3.2.2 Estrutura do código

O código *OpenFOAM* é formado por uma série de diretórios, que reúnem informações importantes a respeito dos dados de entrada, dos esquemas numéricos, dos *solvers*, das condições iniciais, das condições de contorno, das sondas de medição e dos modelos de turbulência, sendo estas as variáveis necessárias para a realização de uma simulação numérica. Ao fim, a simulação e os campos de escoamento podem ser visualizados por meio do programa *ParaView*, também *open source*, que consiste em um pacote de ferramentas de pós-processamento.

Cada caso de simulação corresponde a um diretório principal, dentro do qual existem, ao menos, três outros diretórios importantes (GREENSHIELDS, 2019):

- a) **System**: este diretório é responsável por controlar a simulação. Nele é possível configurar o passo de tempo utilizado, os critérios de convergência, as sondas de medição da velocidade e da pressão, assim como definir o cálculo das forças atuantes. Além disto, neste diretório existe o arquivo “*fvSchemes*”, onde o usuário deve informar os esquemas numéricos a serem utilizados para solucionar as equações governantes. Os métodos de resolução destes esquemas são controlados no arquivo “*fvSolution*”, o qual também está presente neste diretório.
- b) **Constant**: aqui são definidas as propriedades do escoamento como a viscosidade, a massa específica, a aceleração da gravidade e as características de onda. Neste diretório, também existe um arquivo denominado “*dynamicMeshDict*”, responsável por controlar como a malha irá se deformar para representar a dinâmica de corpo rígido. As características da malha numérica devem ser salvas dentro do subdiretório “*polyMesh*”, também encontrado no mesmo diretório.
- c) **Diretórios de tempo**: as características do escoamento, que variam com o passar do tempo da simulação, são salvas nestes diretórios. Inicialmente, existe o diretório “0”, onde são definidas as condições iniciais e de contorno das fronteiras que compõem o domínio, porém, com o avanço da simulação, novos diretórios de tempo vão sendo criados. O tempo de salvamento dos dados, definidos pelo usuário no diretório *System*, irá determinar quantos diretórios de tempo serão criados até o fim da simulação.

Um esquema mais detalhado sobre a estrutura do código e dos diretórios é apresentado na Figura 3.1. Nela, são mostrados os principais arquivos contidos em cada diretório, juntamente com uma breve descrição dos mesmos. Deve ser salientado que estes arquivos são os

necessários para as simulações dinâmicas em LES do presente trabalho, ao passo que alguns arquivos podem ou não serem necessários em outros casos distintos.

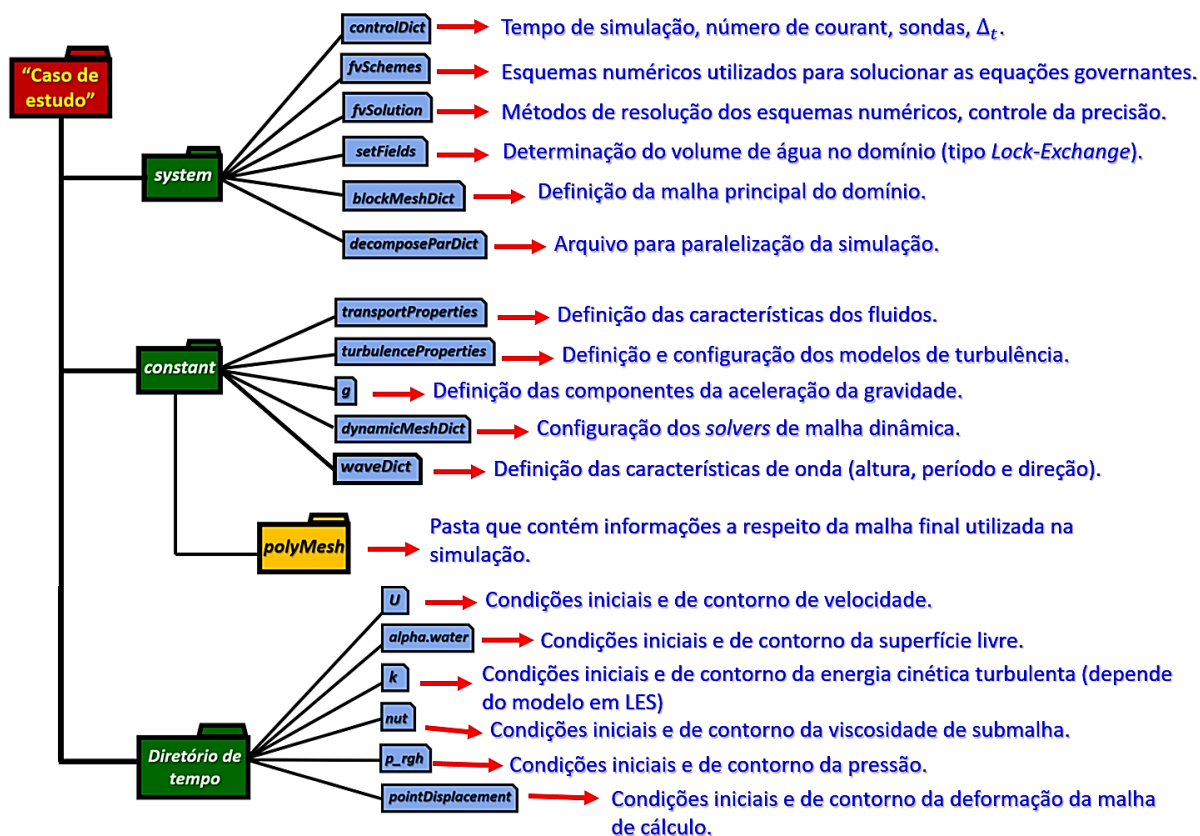


Figura 3.1 – Principais diretórios e arquivos do código *OpenFOAM*, necessários para rodar uma simulação típica deste trabalho em LES (fonte: elaborado pelo autor)

3.2.3 Extensão *OlaFlow*

O complemento *OlaFlow* agrega ao código principal as principais teorias da hidrodinâmica de ondas e novas condições de contorno, como a geração e a absorção de ondas regulares e irregulares. Esta extensão é fruto do longo trabalho numérico desenvolvido por Higuera (2015), na Universidade de Cantabria (Espanha), e, desde o ano de 2015, teve sua nomenclatura modificada duas vezes (*IHFOAM* e *OLAFOAM*) antes de ser denominada *OlaFlow*.

Esta extensão fornece dois novos *solvers* ao *OpenFOAM*, o primeiro, denominado *olaFlow* destina-se aos casos estáticos (onde não existe nenhum movimento de corpo rígido), enquanto o outro (*olaDyMFlow*) é aplicado no estudo de objetos em movimento. Ambos são baseados em *solvers* já existentes no código principal (o *interFoam* e o *interDyMFoam*), os quais são

responsáveis por utilizar a metodologia *Volume of Fluid* (VOF) para o tratamento do escoamento bifásico entre o ar e a água. De acordo com a OPENFOAM WIKI (2019), o *OlaFlow* possibilita o estudo da hidrodinâmica das ondas e da interação destas com meios porosos, por meio da utilização da metodologia dos volumes médios baseados em médias de Reynolds (*Volume Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes* – VARANS). Segundo a mesma referência, este modelo é bastante similar à metodologia VOF clássica, presente no *OpenFOAM*, agregando a esta uma nova parcela referente à porosidade. Entretanto, é importante salientar que, em regiões não-porosas, o método se comporta exatamente igual às metodologias utilizadas pelos *solvers interFoam e interDyMFoam*, implicando que, nestes casos, a superfície livre é modelada pelo método VOF clássico (HIGUERA, 2016).

Esta metodologia consiste na utilização de um indicador de fase α_{fs} , definido como a razão entre a quantidade de água existente e o volume de cada elemento de malha. Isto implica que $\alpha_{fs} = 1$ em um elemento totalmente preenchido por água, enquanto que $\alpha_{fs} = 0$ se este for composto somente por ar. Nos elementos onde existem parcelas de ar e água, α_{fs} irá adquirir valores intermediários, possibilitando a captura da superfície livre (HIGUERA, 2015). Sendo assim, a massa específica ρ_{fs} da região de interface pode ser expressa por:

$$\rho_{fs} = \alpha_{fs}\rho_{\text{água}} + (1 - \alpha_{fs})\rho_{\text{ar}} . \quad (91)$$

A interface é então modelada por meio da equação de advecção somada a um termo de compressão artificial ($\vec{\nabla} \cdot \vec{u}_c \alpha_{fs}(1 - \alpha_{fs})$), responsável pela identificação da superfície livre:

$$\frac{\partial \alpha_{fs}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \alpha_{fs} + \vec{\nabla} \cdot \vec{u}_c \alpha_{fs}(1 - \alpha_{fs}) = 0 , \quad (92)$$

onde \vec{u}_c representa a velocidade de compressão, obtida por $|\vec{u}_c| = \min\{C_\alpha|\vec{u}|; \max(|\vec{u}|)\}$. O valor de C_α corresponde ao fator de compressão, onde 1 é o valor geralmente adotado. Entretanto, valores superiores podem ser aplicados para aumentar o fator de compressão, o que fica a critério do usuário.

3.2.4 Métodos de resolução do problema

As pressões e as velocidades do escoamento são calculadas pelo algoritmo PIMPLE, que consiste em uma combinação entre os algoritmos PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*) e SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). Esta metodologia permite a discretização da equação da quantidade de movimento em forma de matrizes, possibilitando, também, a utilização de coeficientes de relaxamento para melhorar a convergência. O processo iterativo é realizado em conjunto com um método preditor-corretor da quantidade de movimento e da velocidade, o que, segundo o critério de convergência adotado, resulta em valores bastante razoáveis para as pressões e velocidades do escoamento, garantindo uma otimização do custo-benefício computacional (HIGUERA, 2015).

A superfície livre é solucionada pelo método MULES (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*) proposto por Rudman (1997). Este proporciona um *solver* responsável pela correção do fluxo descrito pela equação 92, garantindo a conservação da massa e que os valores de α_{fs} estejam estritamente limitados entre 0 e 1, promovendo uma boa aproximação da interface real entre o ar e a água.

O *solver displacementSBRStress*, responsável por controlar a deformação dos elementos de volume do domínio (em função do movimento de corpo rígido), foi adotado para todos os casos de estudo. Sua principal vantagem consiste na deformação da malha numérica para preservar a topologia do objeto em movimento, sem a necessidade da modificação dos limites do domínio (como o fundo, por exemplo). Entretanto, sua aplicação requer a utilização do *solver sixDoFRigidBodyDisplacement* como condição de contorno do corpo oscilante, a qual deve ser inserida no arquivo “*pointDisplacement*” (mostrado na Figura 3.1). Este último *solver* é responsável por controlar o movimento do objeto estudado, o qual é realizado por meio da aplicação da Segunda Lei de Newton para as forças e momentos resultantes que atuam sobre um determinado corpo (URQUHART, 2016):

$$\sum \vec{F}_b = m_b \vec{a}_b , \quad (93)$$

$$\sum \vec{M}_b = I_b \vec{\alpha}_b , \quad (94)$$

em que $\Sigma \vec{F}_b$, $\Sigma \vec{M}_b$, m_b , \vec{a}_b , $\vec{\alpha}_b$ e I_b correspondem, respectivamente, à força total atuante sobre o corpo, ao momento resultante, à massa, à aceleração linear, à aceleração angular e ao tensor de inércia do objeto considerado.

Os valores obtidos para \vec{a}_b e $\vec{\alpha}_b$ permitem atualizar as velocidades linear (\vec{V}_b) e angular ($\vec{\omega}_b$) atingidas pelo corpo a cada instante de tempo Δ_t :

$$\vec{V}_{b_{atual}} = \vec{V}_{b_{antigo}} + \vec{a}_b \Delta_t , \quad (95)$$

$$\vec{\omega}_{b_{atual}} = \vec{\omega}_{b_{antigo}} + \vec{\alpha}_b \Delta_t . \quad (96)$$

3.3 ESQUEMAS NUMÉRICOS E CONTROLES DE SIMULAÇÃO UTILIZADOS

O *OpenFOAM* possibilita ao usuário diversas opções de esquemas numéricos para a resolução das equações governantes, os quais diferem entre si pela ordem de precisão, difusão numérica e estabilidade (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016). De uma forma geral, pode-se dizer que o código, em função da fundamentação em volumes finitos, apresenta uma precisão de segunda ordem (GUERRERO, [2015?]). Entretanto, para alguns termos e esquemas de interpolação, esta pode chegar até a quarta ordem, dependendo da escolha do usuário, o qual deve ter em mente que a solução deva buscar sempre um equilíbrio entre a difusividade numérica e a estabilidade (OPENCDFD, 2018).

Levando em consideração a proposta do trabalho, a utilização da modelagem numérica em LES e as recomendações sugeridas por Guerrero ([2015?]) e Rodriguez (2019), optou-se por garantir uma precisão mínima de segunda ordem em todas as simulações realizadas no presente estudo. A Tabela 3.1 apresenta os esquemas numéricos aplicados às simulações do trabalho, assim como suas respectivas ordens de precisão.

A metodologia de malha dinâmica, utilizada neste trabalho, baseia-se na deformação dos seus volumes de controle para acompanhar o movimento do OWSC, desta maneira é esperado que os comprimentos característicos dos elementos de malha sejam modificados a cada instante de

Termos	Símbolos	Nomenclatura no OpenFOAM	Esquema utilizado no OpenFOAM	Ordem
Derivadas temporais	$\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial^2}{\partial t^2}$	<i>ddtSchemes</i>	<i>CrankNicolson</i>	2ª
Gradientes	$\vec{\nabla}$	<i>gradSchemes</i>	<i>fourth</i>	4ª
Divergência (\vec{u})	$\vec{\nabla} \cdot [\text{expressão}(\vec{u})]$	<i>divSchemes</i>	<i>Gauss linear</i>	2ª
Divergência (ν_t e k)	$\vec{\nabla} \cdot [\text{expressão}(\nu_t \text{ ou } k)]$	<i>divSchemes</i>	<i>Gauss limitedLinearV 1</i>	2ª
Divergência (α_{fs})	$\vec{\nabla} \cdot [\text{expressão}(\alpha_{fs})]$	<i>divSchemes</i>	<i>Gauss vanLeer</i>	2ª
Laplacianos	$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}$	<i>laplacianSchemes</i>	<i>Gauss linear corrected</i>	2ª
Interpolações	--	<i>interpolationSchemes</i>	<i>Gauss linear corrected</i>	2ª
Componentes dos gradientes normais às superfícies	--	<i>snGradSchemes</i>	<i>corrected</i>	2ª

Tabela 3.1 – Esquemas numéricos utilizados nas simulações do presente trabalho

tempo. Isto implica que o valor adotado inicialmente para o passo de tempo Δt pode não ser o mais adequado em algum ou em vários instantes da simulação, pois o mesmo pode ocasionar problemas de convergência e/ou de estabilidade.

Uma maneira, bastante utilizada em CFD, para garantir a estabilidade dos esquemas numéricos consiste na utilização do número de Courant-Friedrichs-Lewi (CFL_n), ou simplesmente número de Courant. Este parâmetro indica a quantidade de informação que percorre um elemento de malha durante um passo de tempo, podendo ser definido como a relação entre a velocidade resultante da equação diferencial (u_{eq}) e uma velocidade característica de malha (GUERRERO, [2015?]):

$$CFL_n = \frac{u_{eq}}{\frac{\Delta l_c}{\Delta t}}, \quad (97)$$

onde Δl_c representa o comprimento característico de um elemento de malha.

A expressão anterior corresponde a uma definição genérica do número de Courant, ao passo que a definição mais correta, em termos de CFD, leva em consideração as três dimensões de um problema real, e pode ser expressa por (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016):

$$CFL_n = \Delta_t \sum \frac{u_i}{\Delta x_i}. \quad (98)$$

Um valor de CFL_n inferior a 1 é a condição mais difundida na área de modelagem numérica, no intuito de garantir a estabilidade dos esquemas utilizados (RODRIGUEZ, 2019). Assim, o número de Courant representa a principal forma de controlar a convergência dos esquemas utilizados pelo *OpenFOAM*.

O código também permite a utilização de um passo de tempo variável, o qual é ajustado em todos os instantes da simulação, segundo a introdução de um número de Courant máximo e um limite para Δ_t . Tal metodologia é bastante adequada aos problemas dinâmicos, em função da deformação dos elementos, sendo, portanto, adotada para todos os casos do presente trabalho.

3.4 DOMÍNIOS NUMÉRICOS E SUAS RESPECTIVAS MALHAS

O domínio genérico (Figura 3.2), aplicado em todas as simulações do presente trabalho, possui o formato de um paralelepípedo e pode ser dividido em seis partes principais: entrada, saída, fundo, topo, placa(s) e laterais.

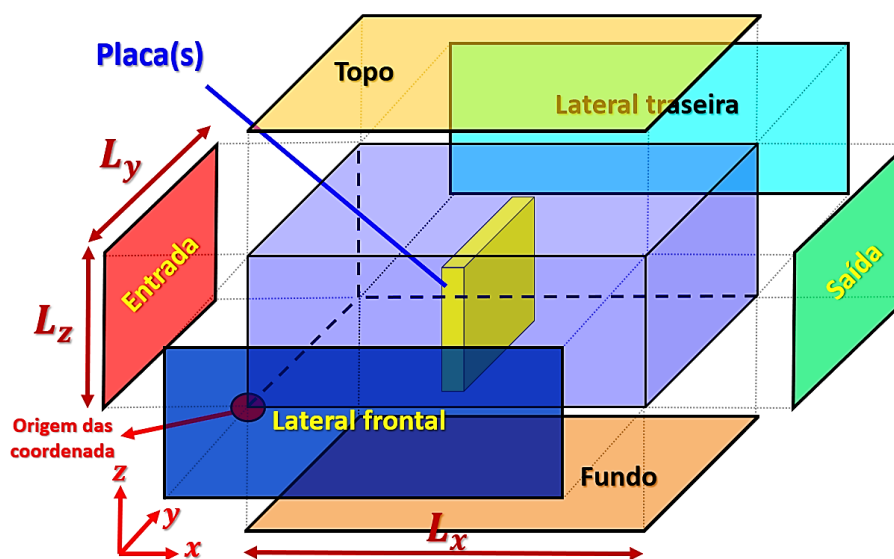


Figura 3.2 – Domínio genérico utilizado nas simulações

As placas (*flaps*) utilizadas em todas as análises possuem a forma de um prisma de base retangular, como demonstra a Figura 3.3. O eixo de rotação de cada placa sempre está localizado no centro de sua base inferior, distanciando-se em meia altura de placa do plano que

passa pelo centroide do *flap*. Os momentos de inércia destas estruturas podem ser calculados pelas expressões 61 e 62.

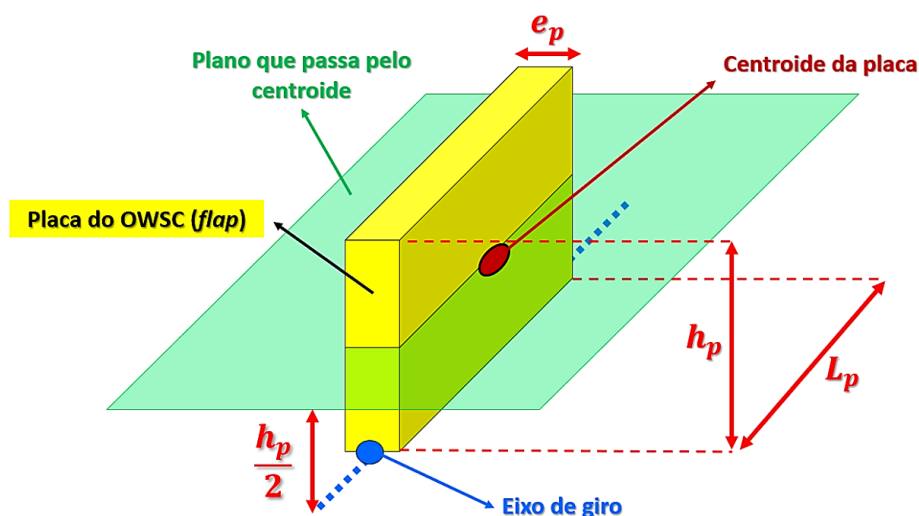


Figura 3.3 – Forma genérica das placas retangulares utilizadas no trabalho

Segundo o estudo realizado por Fuhrmeister (2018), a utilização de uma malha estruturada uniforme (em que $\Delta x = \Delta y = \Delta z$) se mostra bastante adequada às simulações bidimensionais e tridimensionais de um OWSC, uma vez que atenuam os efeitos de difusão numérica na região da superfície livre, razão esta pela qual foi adotada ao longo deste trabalho. Entretanto, é importante salientar que todas as dimensões de comprimento do domínio devem ser múltiplas do valor adotado para Δx , no intuito de evitar possíveis problemas e erros numéricos decorrentes de interpolações.

Buscando reduzir o custo computacional, os domínios numéricos utilizados são divididos em três seções principais (regiões 1, 2 e 3), distribuídas em uma malha estruturada, como mostra a Figura 3.4. A região 2 (intermediária) corresponde a zona onde se localiza(m) a(s) placa(s) estudada(s), exigindo um maior grau de refinamento, sendo, portanto, submetida a uma discretização uniforme em todas as direções (ou seja, $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, nos casos tridimensionais e $\Delta x = \Delta z$, nos casos bidimensionais).

Considerando que Δ_{x_1} , Δ_{x_2} , Δ_{x_3} , Δ_{y_1} , Δ_{y_2} , Δ_{y_3} , Δ_{z_1} , Δ_{z_2} e Δ_{z_3} correspondem aos tamanhos dos elementos de malha utilizados ao longo dos eixos x , y e z (onde os subíndices 1, 2 e 3 identificam, respectivamente, as três regiões da grade), são adotadas as seguintes configurações: $\Delta_{x_1} = \Delta_{x_3} = 5\Delta_{x_2}$ (casos 2D e 3D); $\Delta_{z_1} = \Delta_{z_2} = \Delta_{z_3} = \Delta_z$ (casos 2D e casos 3D);

$\Delta_{y_1} = \Delta_{y_2} = \Delta_{y_3} = \Delta_y$ (casos 2D e casos 3D); $\Delta_z = \Delta_{x_2}$ (casos 2D) e $\Delta_z = \Delta_y = \Delta_{x_2}$ (casos 3D). Além disto, são aplicadas, ao longo do eixo x , condições de refinamento nas regiões 1 e 3, fazendo com que seus elementos mais afastados, em relação à região 2, apresentem tamanhos iguais a $5\Delta_{x_2}$, ao passo que os elementos imediatamente próximos à região 2 apresentem $\Delta_{x_1} = \Delta_{x_2} = \Delta_{x_3}$.

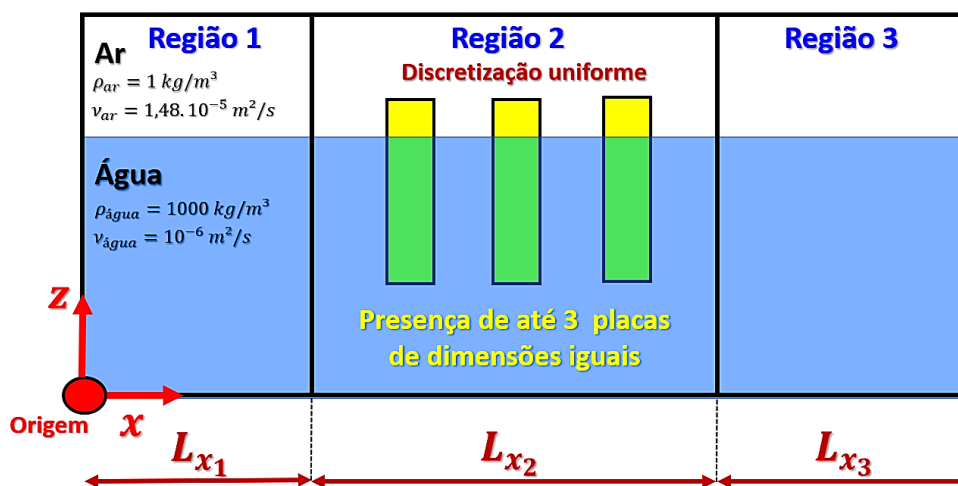


Figura 3.4 – Divisão do domínio de cálculo para discretização da malha numérica

Foram utilizadas 11 configurações diferentes do domínio numérico ao longo deste trabalho, as quais foram cuidadosamente adaptadas em função das características geométricas de cada caso, visando também a diminuição dos efeitos de difusividade numérica. Nas simulações bidimensionais, a largura L_y do domínio é sempre igual à largura da placa. Porém, nas simulações tridimensionais, é necessário manter uma distância mínima de $1,2 \cdot h_p$ entre as extremidades das placas e as laterais do domínio, a fim de permitir uma correta deformação dos elementos de malha, reduzindo as chances de ocorrerem divergências e outros problemas numéricos.

A Tabela 3.2 reúne um resumo detalhado das configurações de todos os domínios numéricos utilizados nesta tese, junto de seus respectivos casos de estudo (que serão abordados e descritos em uma seção subsequente) e das características de discretização da malha de cálculo.

Domínio	Caso de aplicação do domínio	Divisão do domínio na direção x (R1, R2 e R3)			Lx (m)	Ly (m)	Lz (m)	Discretização da malha numérica				
		Lx ₁ (m)	Lx ₂ (m)	Lx ₃ (m)				Δx ₁ (m)	Δx ₂ (m)	Δx ₃ (m)	Δy (m)	Δz (m)
D1	Validação 2D	12,60	1,05	3,00	16,65	0,66	1,44	0,05	0,01	0,05	0,33	0,01
D2	Validação 3D	12,60	1,05	3,00	16,65	1,44	1,44	0,15	0,03	0,15	0,03	0,03
D3	Comparação entre modelos 2D e 3D (Modelagem 2D)	3,00	2,40	3,00	8,40	0,80	1,50	0,05	0,01	0,05	0,40	0,01
D4	Comparação entre modelos 2D e 3D (Modelagem 3D)	3,00	2,40	3,00	8,40	2,00	1,60	0,20	0,04	0,20	0,04	0,04
D5	Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (21 Casos)	3,00	2,40	3,00	8,40	0,80	3,00	0,05	0,01	0,05	0,40	0,01
D6	Avaliação do espaçamento entre placas no plano (14 Casos)	2,40	3,60	2,40	8,40	0,80	1,50	0,05	0,01	0,05	0,40	0,01
D7	Avaliação do espaçamento entre placas no espaço (Caso 1)	2,40	3,60	2,40	8,40	5,20	1,60	0,20	0,04	0,20	0,04	0,04
D8	Avaliação do espaçamento entre placas no espaço (Caso 2)	2,40	3,60	2,40	8,40	4,80	1,60	0,20	0,04	0,20	0,04	0,04
D9	Estudo de diferentes Layouts entre placas (Layouts 1, 2 e 4)	3,00	2,44	3,00	8,44	4,80	1,60	0,20	0,04	0,20	0,04	0,04
D10	Estudo de diferentes Layouts entre placas (Layout 3)	3,00	2,40	3,00	8,40	3,40	1,60	0,20	0,04	0,20	0,04	0,04
D11	Avaliação da influência da declividade do fundo sobre 1 placa (7 Casos)	2,40	3,60	2,40	8,40	0,80	3,88	0,05	0,01	0,05	0,40	0,01

Tabela 3.2 – Dimensões e características de discretização da malha dos domínios numéricos utilizados na tese

3.5 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO APLICADAS

A entrada corresponde a região do domínio na qual a onda é gerada, sendo necessário aplicar a condição de contorno de geração de ondas nesta fronteira. Uma condição de saída livre é aplicada no topo do domínio, ao passo que a condição não-deslizamento é utilizada no fundo. Na saída, uma condição de camada esponja foi adotada, diminuindo o fenômeno de reflexão das ondas. Visando minimizar o efeito de transição de onda da região mais profunda para a mais rasa, adotou-se a condição de deslizamento livre nas fronteiras da elevação de fundo para os casos de validação do modelo numérico, nos demais casos, foi aplicada a condição de não-deslizamento nestes contornos. Sobre a superfície da placa adotou-se a condição de não-deslizamento para corpos em movimento, garantindo que as partículas de fluido em contato com o objeto tenham a mesma velocidade deste. Nas simulações bidimensionais, a condição de “vazio” (*empty*) foi utilizada nas laterais do domínio, pois, nestes casos, os efeitos na direção do eixo y foram desconsiderados. Por outro lado, nas simulações tridimensionais, aplicou-se uma condição de saída livre nas laterais. A Tabela 3.3 apresenta todas as condições de contorno aplicadas em cada fronteira do domínio, com relação aos campos de velocidade, pressão, viscosidade turbulenta, energia cinética turbulenta e superfície livre.

Como condições iniciais, foram considerados campos internos uniformes e nulos para a velocidade, para a pressão e para a superfície livre (em que a água é definida como um *Lock-*

Exchange no arquivo “*setFields*”, mostrado na Figura 3.1). Para a viscosidade turbulenta e para a energia cinética, adotou-se a condição inicial de campo uniforme de valor constante, cujos valores utilizados são, respectivamente, 0,0025 m²/s e 0,008 m²/s². A posição inicial de cada placa é tomada como sendo a vertical (paralela à direção z), estando livre para oscilar sobre seu eixo de rotação. Os valores máximos adotados para Δ_t variam conforme o caso analisado, da mesma maneira que o tamanho dos elementos de malha.

	Condição de contorno				
Fronteira	Velocidade	Pressão	v_t	K	Superfície Livre
Entrada	<i>waveVelocity</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValue</i>	<i>waveAlpha</i>
Saída	<i>waveAbsorption2DVelocity</i> (casos 2D); <i>waveAbsorption3DVelocity</i> (casos 3D)	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>inletOutlet</i>	<i>zeroGradient</i>
Placas	<i>movingWallVelocity</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValue</i>	<i>zeroGradient</i>
Fundo	<i>noSlip</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValue</i>	<i>zeroGradient</i>
Elevação do fundo	<i>slip</i> (casos de validação numérica); <i>noSlip</i> (demais casos)	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValue</i>	<i>zeroGradient</i>
Topo	<i>pressureInletOutletVelocity</i>	<i>totalPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>inletOutlet</i>	<i>inletOutlet</i>
Laterais	<i>empty</i> (casos 2D); <i>inletOutlet</i> (casos 3D)	<i>empty</i> (casos 2D); <i>fixedFluxPressure</i> (casos 3D);	<i>empty</i> (casos 2D); <i>zeroGradient</i> (casos 3D)	<i>empty</i> (casos 2D); <i>inletOutlet</i> (casos 3D)	<i>empty</i> (casos 2D); <i>zeroGradient</i> (casos 3D)

Tabela 3.3 – Condições de contorno aplicadas nas simulações da tese, segundo suas nomenclaturas no código *OpenFOAM*

3.6 CASOS DE ESTUDO

O presente trabalho foi estruturado e dividido em diversas etapas de estudo, reunindo desde testes de convergência da malha numérica, validação dos modelos matemáticos, comparações entre os modelos 2D e 3D, até os estudos associados à hidrodinâmica e à geração de energia dos OWSC's. Ao total, considerando todas estas etapas, estima-se que foram analisados cerca de 52 casos para a obtenção dos resultados desta tese. De uma maneira geral, o trabalho encontra-se dividido em oito etapas:

- a) **Validação numérica do modelo bidimensional** – esta etapa contempla uma das partes mais importantes do trabalho, que consiste na comparação entre o modelo bidimensional em LES utilizado com os resultados experimentais e numéricos apresentados por Henry et al. (2014b) e Wei et al. (2016), por meio da aplicação de parâmetros estatísticos, testes de malhas numéricas e verificações visuais dos campos de escoamento.
- b) **Validação do modelo numérico tridimensional** – apresenta a comparação dos resultados obtidos pelo modelo tridimensional de LES aplicado com os valores experimentais e numéricos presentes nos trabalhos de Henry et al. (2014b) e

Wei et al. (2016), por meio da análise de parâmetros estatísticos e de comparações visuais realizadas nos campos de escoamento.

- c) **Comparação entre os modelos 2D e 3D** – esta comparação tem como objetivo principal avaliar a aderência existente entre os modelos bidimensional e tridimensional de LES utilizados, ao mesmo tempo em que se busca a otimização do custo-benefício computacional.
- d) **Investigação dos fenômenos de escoamento associados à hidrodinâmica de três OWSC's dispostos em série** – este estudo é realizado por meio da aplicação do modelo bidimensional validado e tem como objetivo principal estudar como características de altura e período de onda, diferentes graus de submersão, variações na declividade de fundo e efeito de ondas estacionárias modificam a hidrodinâmica de três placas iguais distribuídas em série.
- e) **Estudo do espaçamento entre placas no plano** – contempla a investigação de como diferentes espaçamentos entre placas (em termos da vista lateral, no plano xz) modificam a hidrodinâmica de 3 conversores dispostos em série, por meio do modelo bidimensional de LES adotado.
- f) **Estudo do espaçamento entre placas no espaço** – no intuito de verificar qual espaçamento entre placas no espaço é responsável por intensificar os fenômenos favoráveis à geração de energia dos conversores, é realizada uma comparação entre dois casos principais de distanciamento entre 3 placas iguais, dispostas lado a lado no espaço (vistas em planta, no plano xy), que é efetuada pela aplicação do modelo de LES tridimensional.
- g) **Análise da aplicação de diferentes Layouts de placas no espaço** – esta etapa tem como objetivo principal identificar qual a configuração espacial (vista em planta, no plano xy) entre 3 placas iguais é responsável por intensificar os fenômenos favoráveis à geração de eletricidade, por meio da utilização do modelo 3D de LES.
- h) **Influência da declividade de fundo sobre a hidrodinâmica de um único OWSC** – visando complementar os resultados obtidos na etapa “d” (para 3 placas dispostas em série), realiza-se, através do modelo 2D, uma análise mais detalhada acerca da variação da declividade de fundo sobre a hidrodinâmica de uma única placa do conversor.

As Tabelas 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 foram elaboradas no intuito de reunir, de forma prática, as principais informações sobre todos os casos estudados nesta tese. Nelas, são apresentadas as dimensões das placas utilizadas, as coordenadas centrais dos eixos de giro das mesmas (x_{g_i} , y_{g_i} e z_{g_i} , em relação à origem demonstrada na Figura 3.2, em que o índice $i = 1, 2, 3$ faz referência às três placas – placa 1, placa 2 e placa 3), as características de onda de cada caso e as configurações do domínio aplicado (segundo as dimensões apresentadas na Tabela 3.2).

Estudo	Modelo	Nº de placas	Domínio	Dimensões da(s) placa(s)			Coordenadas centrais do(s) eixo(s) de giro da(s) placa(s)						Características de onda	
				h_p (m)	L_p (m)	e_p (m)	X_{G_1} (m)	Y_{G_1} (m)	Z_{G_1} (m)	X_{G_2} (m)	Y_{G_2} (m)	Z_{G_2} (m)	X_{G_3} (m)	Y_{G_3} (m)
Validação numérica 2D	2D	1	D1	h_p (m)	0,33	X_{G_1} (m)	13,125	X_{G_2} (m)	-	X_{G_3} (m)	-	H (m)	0,24	
				L_p (m)	0,66	Y_{G_1} (m)	0,330	Y_{G_2} (m)	-	Y_{G_3} (m)	-	T (s)	1,90	
				e_p (m)	0,09	Z_{G_1} (m)	0,690	Z_{G_2} (m)	-	Z_{G_3} (m)	-	h (m)	0,90	
Validação numérica 3D	3D	1	D2	h_p (m)	0,33	X_{G_1} (m)	13,125	X_{G_2} (m)	-	X_{G_3} (m)	-	H (m)	0,24	
				L_p (m)	0,66	Y_{G_1} (m)	0,720	Y_{G_2} (m)	-	Y_{G_3} (m)	-	T (s)	1,90	
				e_p (m)	0,09	Z_{G_1} (m)	0,690	Z_{G_2} (m)	-	Z_{G_3} (m)	-	h (m)	0,90	
Comparação entre modelagens 2D e 3D (Modelo 2D)	2D	3	D3	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10	
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90	
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48	
Comparação entre modelagens 2D e 3D (Modelo 3D)	3D	3	D4	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10	
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	1,000	Y_{G_2} (m)	1,000	Y_{G_3} (m)	1,000	T (s)	1,90	
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48	
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da altura de onda - Caso 1)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,05	
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90	
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48	
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da altura de onda - Caso 2)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10	
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90	
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48	
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da altura de onda - Caso 3)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,20	
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90	
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48	
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da altura de onda - Caso 4)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,30	
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90	
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48	
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação do período de onda - Caso 1)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10	
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	0,95	
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48	
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação do período de onda - Caso 2)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10	
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90	
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48	

Tabela 3.4 – Características e configurações dos casos de estudo da tese (Parte 1)

Estudo	Modelo	Nº de placas	Domínio	Dimensões da(s) placa(s)		Coordenadas centrais do(s) eixo(s) de giro da(s) placa(s)						Características de onda	
				h_p (m)		X_{G_1} (m)	X_{G_2} (m)	X_{G_3} (m)	Y_{G_1} (m)	Y_{G_2} (m)	Y_{G_3} (m)	Z_{G_1} (m)	Z_{G_2} (m)
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação do período de onda - Caso 3)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	3,80
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação do período de onda - Caso 4)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	4,74
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da submergência das placas - Caso 1)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	4,74
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,40
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da submergência das placas - Caso 2)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	4,74
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da submergência das placas - Caso 3)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	4,74
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,52
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da submergência das placas - Caso 4)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	4,74
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,56
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da submergência das placas - Caso 5)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	4,74
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,64
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da inclinação do fundo - Caso 1)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,20
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da inclinação do fundo - Caso 2)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,20
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,762	Z_{G_2} (m)	0,762	Z_{G_3} (m)	0,762	h (m)	1,12

Tabela 3.5 – Características e configurações dos casos de estudo da tese (Parte 2)

Estudo	Modelo	Nº de placas	Domínio	Dimensões da(s) placa(s)		Coordenadas centrais do(s) eixo(s) de giro da(s) placa(s)						Características de onda	
				h_p (m)		X_{G_1} (m)	X_{G_2} (m)	X_{G_3} (m)	Y_{G_1} (m)	Y_{G_2} (m)	Y_{G_3} (m)	Z_{G_1} (m)	Z_{G_2} (m)
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Variação da inclinação do fundo - Caso 3)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,20
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	1,430	Z_{G_2} (m)	1,430	Z_{G_3} (m)	1,430	h (m)	1,79
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Influência da inclinação do fundo - Caso 4)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,20
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	1,896	Z_{G_2} (m)	1,896	Z_{G_3} (m)	1,896	h (m)	2,26
Estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de 3 OWSC's (Influência da geração de ondas estacionárias - 4 casos)	2D	3	D5	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 1)	2D	3	D6	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,520	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 2)	2D	3	D6	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,320	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	5,080	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 3)	2D	3	D6	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,120	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	5,280	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 4)	2D	3	D6	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	2,920	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	5,480	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 5)	2D	3	D6	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	2,920	X_{G_2} (m)	3,600	X_{G_3} (m)	4,480	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 6)	2D	3	D6	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	2,920	X_{G_2} (m)	3,600	X_{G_3} (m)	4,680	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 7)	2D	3	D6	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	2,920	X_{G_2} (m)	3,600	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	0,400	Y_{G_3} (m)	0,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48

Tabela 3.6 – Características e configurações dos casos de estudo da tese (Parte 3)

Estudo	Modelo	Nº de placas	Domínio	Dimensões da(s) placa(s)		Coordenadas centrais do(s) eixo(s) de giro da(s) placa(s)						Características de onda	
				h_p (m)		X_{G_1} (m)		X_{G_2} (m)		X_{G_3} (m)		H (m)	
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 8)	2D	3	D6	L_p (m)	0,4	Y_{G_1} (m)	2,920	Y_{G_2} (m)	3,800	Y_{G_3} (m)	4,480	T (s)	0,10
				e_p (m)	0,8	Z_{G_1} (m)	0,400	Z_{G_2} (m)	0,400	Z_{G_3} (m)	0,400	h (m)	1,90
					0,04		0,120		0,120		0,120		0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 9)	2D	3	D6	L_p (m)	0,4	Y_{G_1} (m)	2,920	Y_{G_2} (m)	4,000	Y_{G_3} (m)	4,680	T (s)	0,10
				e_p (m)	0,8	Z_{G_1} (m)	0,400	Z_{G_2} (m)	0,400	Z_{G_3} (m)	0,400	h (m)	1,90
					0,04		0,120		0,120		0,120		0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 10)	2D	3	D6	L_p (m)	0,4	Y_{G_1} (m)	2,920	Y_{G_2} (m)	4,200	Y_{G_3} (m)	4,880	T (s)	0,10
				e_p (m)	0,8	Z_{G_1} (m)	0,400	Z_{G_2} (m)	0,400	Z_{G_3} (m)	0,400	h (m)	1,90
					0,04		0,120		0,120		0,120		0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 11)	2D	3	D6	L_p (m)	0,4	Y_{G_1} (m)	2,920	Y_{G_2} (m)	3,800	Y_{G_3} (m)	5,080	T (s)	0,10
				e_p (m)	0,8	Z_{G_1} (m)	0,400	Z_{G_2} (m)	0,400	Z_{G_3} (m)	0,400	h (m)	1,90
					0,04		0,120		0,120		0,120		0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 12)	2D	3	D6	L_p (m)	0,4	Y_{G_1} (m)	2,920	Y_{G_2} (m)	4,200	Y_{G_3} (m)	5,080	T (s)	0,10
				e_p (m)	0,8	Z_{G_1} (m)	0,400	Z_{G_2} (m)	0,400	Z_{G_3} (m)	0,400	h (m)	1,90
					0,04		0,120		0,120		0,120		0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 13)	2D	3	D6	L_p (m)	0,4	Y_{G_1} (m)	2,920	Y_{G_2} (m)	4,000	Y_{G_3} (m)	5,280	T (s)	0,10
				e_p (m)	0,8	Z_{G_1} (m)	0,400	Z_{G_2} (m)	0,400	Z_{G_3} (m)	0,400	h (m)	1,90
					0,04		0,120		0,120		0,120		0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no plano (Caso 14)	2D	3	D6	L_p (m)	0,4	Y_{G_1} (m)	2,920	Y_{G_2} (m)	4,200	Y_{G_3} (m)	5,280	T (s)	0,10
				e_p (m)	0,8	Z_{G_1} (m)	0,400	Z_{G_2} (m)	0,400	Z_{G_3} (m)	0,400	h (m)	1,90
					0,04		0,120		0,120		0,120		0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no espaço (Caso 1)	3D	3	D7	L_p (m)	0,4	Y_{G_1} (m)	4,200	Y_{G_2} (m)	4,200	Y_{G_3} (m)	4,200	T (s)	0,10
				e_p (m)	0,8	Z_{G_1} (m)	1,000	Z_{G_2} (m)	2,600	Z_{G_3} (m)	4,200	h (m)	1,90
					0,04		0,120		0,120		0,120		0,48
Avaliação do espaçamento entre placas no espaço (Caso 2)	3D	3	D8	L_p (m)	0,4	Y_{G_1} (m)	4,200	Y_{G_2} (m)	4,200	Y_{G_3} (m)	4,200	T (s)	0,10
				e_p (m)	0,8	Z_{G_1} (m)	1,000	Z_{G_2} (m)	2,400	Z_{G_3} (m)	3,800	h (m)	1,90
					0,04		0,120		0,120		0,120		0,48

Tabela 3.7 – Características e configurações dos casos de estudo da tese (Parte 4)

Estudo	Modelo	Nº de placas	Domínio	Dimensões da(s) placa(s)		Coordenadas centrais do(s) eixo(s) de giro da(s) placa(s)						Características de onda	
				h_p (m)		X_{G_1} (m)	X_{G_2} (m)	X_{G_3} (m)	Y_{G_1} (m)	Y_{G_2} (m)	Y_{G_3} (m)	Z_{G_1} (m)	Z_{G_2} (m)
Estudo de diferentes Layouts entre placas (Layout 1)	3D	3	D9	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	4,560	X_{G_2} (m)	3,880	X_{G_3} (m)	4,560	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	1,000	Y_{G_2} (m)	2,400	Y_{G_3} (m)	3,800	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Estudo de diferentes Layouts entre placas (Layout 2)	3D	3	D9	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	4,880	X_{G_2} (m)	4,200	X_{G_3} (m)	3,520	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	1,000	Y_{G_2} (m)	2,400	Y_{G_3} (m)	3,800	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Estudo de diferentes Layouts entre placas (Layout 3)	3D	3	D10	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	4,200	X_{G_2} (m)	3,520	X_{G_3} (m)	4,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	1,000	Y_{G_2} (m)	2,400	Y_{G_3} (m)	2,400	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Estudo de diferentes Layouts entre placas (Layout 4)	3D	3	D9	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	3,880	X_{G_2} (m)	4,560	X_{G_3} (m)	3,880	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	1,000	Y_{G_2} (m)	2,400	Y_{G_3} (m)	3,800	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	0,120	Z_{G_3} (m)	0,120	h (m)	0,48
Avaliação da influência da declividade do fundo sobre uma placa simples (Caso 1)	2D	1	D11	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	4,200	X_{G_2} (m)	-	X_{G_3} (m)	-	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	-	Y_{G_3} (m)	-	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,120	Z_{G_2} (m)	-	Z_{G_3} (m)	-	h (m)	0,48
Avaliação da influência da declividade do fundo sobre uma placa simples (Caso 2)	2D	1	D11	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	4,200	X_{G_2} (m)	-	X_{G_3} (m)	-	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	-	Y_{G_3} (m)	-	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,480	Z_{G_2} (m)	-	Z_{G_3} (m)	-	h (m)	0,84
Avaliação da influência da declividade do fundo sobre uma placa simples (Caso 3)	2D	1	D11	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	4,200	X_{G_2} (m)	-	X_{G_3} (m)	-	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	-	Y_{G_3} (m)	-	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	0,830	Z_{G_2} (m)	-	Z_{G_3} (m)	-	h (m)	1,19
Avaliação da influência da declividade do fundo sobre uma placa simples (Caso 4)	2D	1	D11	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	4,200	X_{G_2} (m)	-	X_{G_3} (m)	-	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	-	Y_{G_3} (m)	-	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	1,190	Z_{G_2} (m)	-	Z_{G_3} (m)	-	h (m)	1,55
Avaliação da influência da declividade do fundo sobre uma placa simples (Caso 5)	2D	1	D11	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	4,200	X_{G_2} (m)	-	X_{G_3} (m)	-	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	-	Y_{G_3} (m)	-	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	1,570	Z_{G_2} (m)	-	Z_{G_3} (m)	-	h (m)	1,93
Avaliação da influência da declividade do fundo sobre uma placa simples (Caso 6)	2D	1	D11	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	4,200	X_{G_2} (m)	-	X_{G_3} (m)	-	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	-	Y_{G_3} (m)	-	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	1,970	Z_{G_2} (m)	-	Z_{G_3} (m)	-	h (m)	2,33
Avaliação da influência da declividade do fundo sobre uma placa simples (Caso 7)	2D	1	D11	h_p (m)	0,4	X_{G_1} (m)	4,200	X_{G_2} (m)	-	X_{G_3} (m)	-	H (m)	0,10
				L_p (m)	0,8	Y_{G_1} (m)	0,400	Y_{G_2} (m)	-	Y_{G_3} (m)	-	T (s)	1,90
				e_p (m)	0,04	Z_{G_1} (m)	2,400	Z_{G_2} (m)	-	Z_{G_3} (m)	-	h (m)	2,76

Tabela 3.8 – Características e configurações dos casos de estudo da tese (Parte 5)

4 RESULTADOS

O presente capítulo se inicia com a exposição de algumas observações e considerações importantes acerca dos casos de estudo da tese. Na sequência, são apresentados todos os resultados e suas respectivas análises, referentes às etapas de validação numérica do modelo adotado, da comparação entre casos 2D e 3D, do estudo dos fenômenos hidrodinâmicos associados ao movimento de três placas em série, da avaliação do espaçamento entre placas e da análise da influência da declividade de fundo. Todas estas etapas são realizadas com base no estudo das propriedades mais relevantes para o movimento oscilatório dos OWSC's, que, conseqüentemente, são bastante importantes para a geração de energia do sistema.

4.1 CONSIDERAÇÕES E OBSERVAÇÕES IMPORTANTES ACERCA DOS CASOS DE ESTUDO DO PRESENTE TRABALHO

Todas as simulações realizadas no presente trabalho baseiam-se na aplicação de ondas regulares, de altura e períodos definidos, as quais são modeladas pela teoria de Stokes de 5ª ordem e contemplam casos hidrodinâmicos de ondas em águas intermediárias e profundas.

Tendo em vista a significativa aderência dos modelos numéricos propostos aos resultados experimentais, apresentados por Henry et al. (2014b) e Wei et al. (2016), todas as análises realizadas baseiam-se na aplicação de placas que se encontram na mesma escala geométrica dos trabalhos referenciados (1:40). Esta consideração foi idealizada a fim de manter a mesma ordem de grandeza nas análises que aquela disposta na literatura de base, respeitando os aspectos levantados na etapa de validação numérica e de convergência da malha de cálculo, bem como os padrões de escoamento verificados nos respectivos campos de velocidade. Ademais, conforme apresentado na seção 2.3.7, caso fosse adotada uma modelagem em escala real, seriam necessários alguns cuidados adicionais a respeito da malha numérica, das propriedades do fluido e da representação da superfície livre. Isto exigiria uma análise muito mais longa e aprofundada, o que seria ainda mais difícil considerando o fato de que os resultados experimentais disponíveis na literatura se referem sempre a modelos em escala reduzida.

A geometria de todas as placas utilizadas nas simulações é mantida fixa, e representa um dos padrões bastante usual nos projetos dos OWSC's, que consideram a dimensão da largura de

placa cerca de duas vezes a dimensão da altura da mesma. Estes e outros aspectos geométricos já foram levantados e abordados no trabalho de Fuhmeister (2018), onde identificou-se que as dimensões $h_p = 0,40 \text{ m}$, $L_p = 0,80 \text{ m}$ e $e_p = 0,08 \text{ m}$ são favoráveis à geração de energia dos conversores. Desta forma, estas são as dimensões de placa padronizadas e adotadas em todos os casos de estudo desta tese.

A massa específica da placa, utilizada em todas as simulações, é a mesma daquela apresentada nos trabalhos experimentais da literatura referenciada, cujo valor é igual a 219 kg/m^3 . Além disto, assim como nos trabalhos de Henry et. Al (2014b) e Wei et al. (2016), os efeitos de amortecimento mecânico não foram levados em consideração neste trabalho.

O regime de escoamento em todos os casos de estudo é do tipo transiente, com padrões oscilatórios, em que ambos os fluídos do problema (ar e água) são modelados como incompressíveis. O efeito do escoamento próximo à parede, quando não capturado pela malha numérica (em função do grau de refinamento da mesma), é contabilizado em razão da formulação matemática do modelo de LES empregado nas análises.

A potência captada, conforme sugerido no trabalho de Nair e Kesavan (2019), pode ser estimada pela seguinte expressão:

$$P_{abs} = \omega \cdot M_t . \quad (99)$$

Algumas verificações realizadas durante as etapas deste trabalho permitiram concluir que o valor RMS da potência captada pode ser aproximado, com uma diferença máxima de até 20%, da seguinte maneira:

$$P_{absRMS} = \omega_{RMS} \cdot M_{tRMS} , \quad (100)$$

o que se mostra bastante interessante para estimativa da ordem de grandeza da potência teórica absorvida nos casos estudados, uma vez que dispensa a realização de numerosos processos de interpolação para o cálculo instantâneo da potência em cada passo de tempo (o que deveria ser realizado na etapa de pós-processamento).

Todos os casos de estudo desta tese foram analisados por meio da verificação das amplitudes angulares atingidas pelas placas, das velocidades angulares experimentadas, das forças

horizontais atuantes, das forças verticais observadas, dos momentos de excitação e da potência captada pelos dispositivos. Em muitas das análises, foram determinados e avaliados os valores RMS destas variáveis influentes, uma vez que os mesmos reúnem, de forma concisa e compacta, os principais padrões e tendências observadas nas séries temporais de cada variável estudada. Estes valores se mostram muito úteis, principalmente, em estudos comparativos em que se mantém fixas as características da onda incidente.

Durante as análises, observou-se que todos os casos modelados atingiam os padrões oscilatórios, típicos dos OWSC's, logo após 5 s do início simulação. Desta forma, um tempo máximo de simulação igual a 20 s se mostrou suficiente para identificar e analisar todos os padrões hidrodinâmicos associados aos casos de estudo do presente trabalho.

Por fim, é importante ressaltar que todas as simulações foram realizadas em um computador de médio porte, dotado de um processador Intel Core i7, com 32 GB de memória RAM e 12 núcleos. Tais configurações permitiram rodar diversas simulações simultaneamente (para os casos 2D) e paralelizar (por meio de um esquema de divisão do domínio, próprio do código OpenFOAM) as simulações tridimensionais. De uma forma geral, o tempo de simulação real (físico) dos casos de estudo oscilaram entre 48 h e uma semana (para as simulações com malhas mais refinadas).

4.2 VALIDAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO BIDIMENSIONAL

A validação do modelo numérico foi realizada com base no experimento descrito na seção 2.3.6 e apresentado na Figura 2.40 (que reproduz o fenômeno de *Slamming*), o qual é abordado nos trabalhos de Henry et al. (2014b) e Wei et al. (2016). Entretanto, conforme será explicado a seguir, algumas pequenas modificações foram realizadas no domínio do presente trabalho.

Levando em consideração os aspectos de discretização da malha numérica, discutidos na seção 3.4, observa-se que a altura, a largura e a espessura da placa utilizada no experimento original eram iguais a, respectivamente, 0,31 m, 0,646 m e 0,0875 m (HENRY et al., 2014b). Uma breve análise permite concluir que $\Delta x = \Delta z = 0,0005$ m corresponde a um múltiplo comum destas três dimensões, o que seria adequado para um modelo 2D. Porém, esta discretização resultaria em 620 elementos somente para a representação da altura da placa, o que, obviamente, demandaria um elevado custo computacional. Como alternativa, arredondou-se a menor

dimensão da placa para 0,09 m, o que leva, em uma primeira análise, à discretização $\Delta x = \Delta z = 0,03$ m. Seguindo o mesmo raciocínio, as outras dimensões de placa foram aproximadas para o múltiplo de 0,03 m imediatamente maior a cada dimensão original, resultando em $h_p = 0,33$ m, $L_p = 0,66$ m e $e_p = 0,09$ m.

Em função destas alterações, é necessário que a altura da onda também seja modificada, respeitando os conceitos de similaridade. Assim, por meio da teoria de Análise Dimensional e Semelhança, é possível obter o número adimensional κ_{nv} :

$$\kappa_{nv} = \frac{h_p L_p e_p}{H^3}. \quad (101)$$

De maneira similar, a porcentagem da altura de placa externa à superfície da água também precisa ser respeitada, em função da influência do grau de submersão sobre a hidrodinâmica de um OWSC (mostrada na Figura 2.33). A altura de onda e a profundidade deverão, portanto, ser modificadas com base nestes valores adimensionais.

Uma análise nas sondas de níveis d'água em uma região próxima à geração da onda permite concluir que a altura de onda máxima, observada durante 40 s de experimento (WEI et al., 2016), era igual a 0,22 m. Utilizando este valor e as dimensões originais da placa na expressão 101, obtém-se $\kappa_{nv} \approx 1,645$, o que resulta em um valor de $H = 0,23$ m para as novas dimensões da placa. Por outro lado, uma análise semelhante revela que, aproximadamente, 33% da altura da placa encontra-se externa à superfície livre, o que, levando em consideração as novas dimensões de h_p , L_p e e_p , resulta em 0,11 m. Finalmente, os valores de 0,23 m e 0,11 m são arredondados para 0,24 m e 0,12 m, em razão de ambos serem múltiplos de 0,03 m.

Estudos numéricos preliminares demonstraram que a onda, sob condições similares às experimentais, quebrava antes de atingir a placa, ocasionando um comportamento hidrodinâmico bastante diferente daquele encontrado na literatura. Como alternativa, optou-se por aumentar a profundidade na zona de geração da onda, evitando este problema. Além disso, a metodologia de deformação da malha costuma falhar em casos de objetos muito próximos ao fundo, sendo necessário existir uma pequena abertura na parte inferior da placa (FUHRMEISTER, 2019). Dentre as diversas aberturas testadas, aquela igual a 0,33 m demonstrou melhor estabilidade e convergência numérica, sendo, portanto, adotada para a

validação. O domínio final, as características de placa e as sondas de nível d'água, utilizados na validação do modelo bidimensional, são mostrados na Figura 4.1.

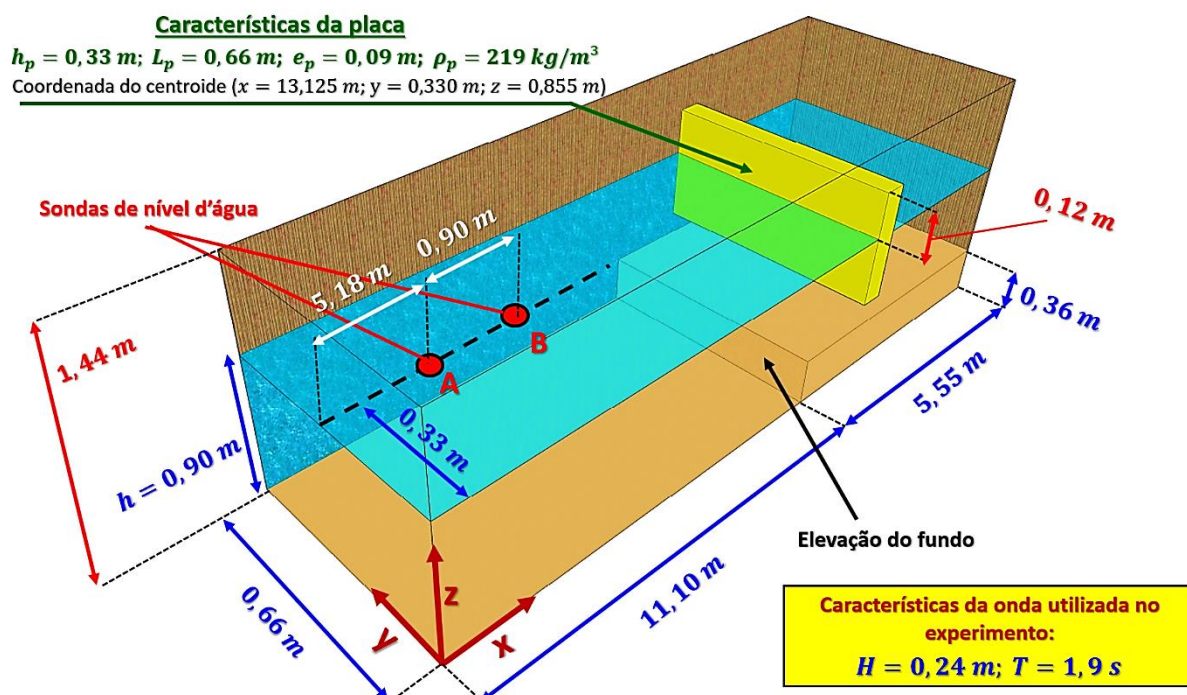


Figura 4.1 – Domínio, características de placa e sondas de nível d'água utilizados na validação do modelo 2D

Para as simulações desta etapa do trabalho, foram utilizadas características constantes de onda, de profundidade e de placa, modificando apenas os parâmetros de discretização da malha numérica, assim como os controles do número de Courant e do máximo passo de tempo permitido.

Os casos de estudo, associados à validação numérica, podem ser divididos em três partes: teste de convergência da malha numérica, comparação entre diferentes modelos de LES e verificação numérica completa. Os valores que foram mantidos fixos nestas simulações encontram-se dispostos na Tabela 4.1.

$H \text{ (m)}$	0,24
$T \text{ (s)}$	1,90
$h \text{ (m)}$	0,90
$h_p \text{ (m)}$	0,33
$L_p \text{ (m)}$	0,66
$e_p \text{ (m)}$	0,09
$\rho_p \text{ (kg/m}^3\text{)}$	219,00
Teoria de onda	Stokes de 5ª ordem
Tempo total de simulação (s)	20,00

Tabela 4.1 – Características de onda e de placa utilizadas nas simulações referentes à validação do modelo 2D

Segundo Simonetti et al. (2017), o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz normalizada do erro quadrático médio (*Normalized Root Mean Square Error* – ***NRMSE***) se mostram bastante adequados para verificar a aderência do modelo numérico aos resultados experimentais. O primeiro parâmetro indica o grau de explicação do fenômeno pelo modelo (quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2 , melhor será a explicação do experimento pelo modelo utilizado), enquanto o segundo relaciona os valores extremos do experimento com os erros médios quadráticos associados (quanto menor o valor do *NRMSE*, mais adequado será o modelo, ao passo que um valor de *NRMSE* = 0% indica um modelo perfeito). Assim, os melhores modelos são aqueles que apresentam os maiores valores de R^2 e as menores porcentagens de *NRMSE*.

Os valores de R^2 e *NRMSE* podem ser calculados, nesta ordem, pelas seguintes expressões:

$$R^2 = \frac{\left(\sum x_{exp}x_{mod} - \sum x_{exp} \sum \frac{x_{mod}}{N}\right)^2}{\left(\sum x_{exp}^2 - \frac{(\sum x_{exp})^2}{N}\right) \left(\sum x_{mod}^2 - \frac{(\sum x_{mod})^2}{N}\right)}, \quad (102)$$

$$NRMSE = \frac{100}{\left(Máx_{x_{exp}} - Mín_{x_{exp}}\right)} \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_{exp} - x_{mod})^2}, \quad (103)$$

onde N , x_{exp} , x_{mod} , $Máx_{x_{exp}}$ e $Mín_{x_{exp}}$ correspondem, respectivamente, ao número total de dados analisados, aos valores experimentais, aos valores associados do modelo numérico (no mesmo instante de tempo) e aos valores máximo e mínimo do estudo experimental.

4.2.1 Teste de convergência da malha numérica

Para a realização deste teste, foi utilizada a velocidade angular da placa ω_p como variável de análise, tendo em vista sua importância na estimativa da energia captada pelo OWSC. Tomando como ponto de partida $\Delta_{x_2} = 0,03 \text{ m}$, foram propostos mais quatro níveis de refinamento (Tabela 4.2), os quais foram definidos em função de um parâmetro adimensional Δ_{gr} :

$$\Delta_{gr} = \frac{\sqrt[3]{h_p L_p e_p}}{\Delta_{x_2}}. \quad (104)$$

Nível de refinamento	Descrição	Δ_{x_2} (m)	Δ_{gr}
1	Malha bastante grosseira	0,03	9,00
2	Malha grosseira	0,015	17,98
3	Malha intermediária	0,01	26,96
4	Malha refinada	0,0075	35,95
5	Malha bastante refinada	0,00375	71,90

Tabela 4.2 – Níveis de refinamento utilizados na etapa do estudo de convergência da malha numérica

Nesta etapa, optou-se pela utilização do modelo de Smagorinsky e pela avaliação da convergência segundo os valores de R^2 , $NRMSE$ e valores eficazes (RMS) de ω_p , obtidos em cada nível de refinamento. Tais resultados podem ser visualizados, em função do tamanho característico de malha adimensionalizado Δ_{gr} , nos gráficos da Figura 4.2.

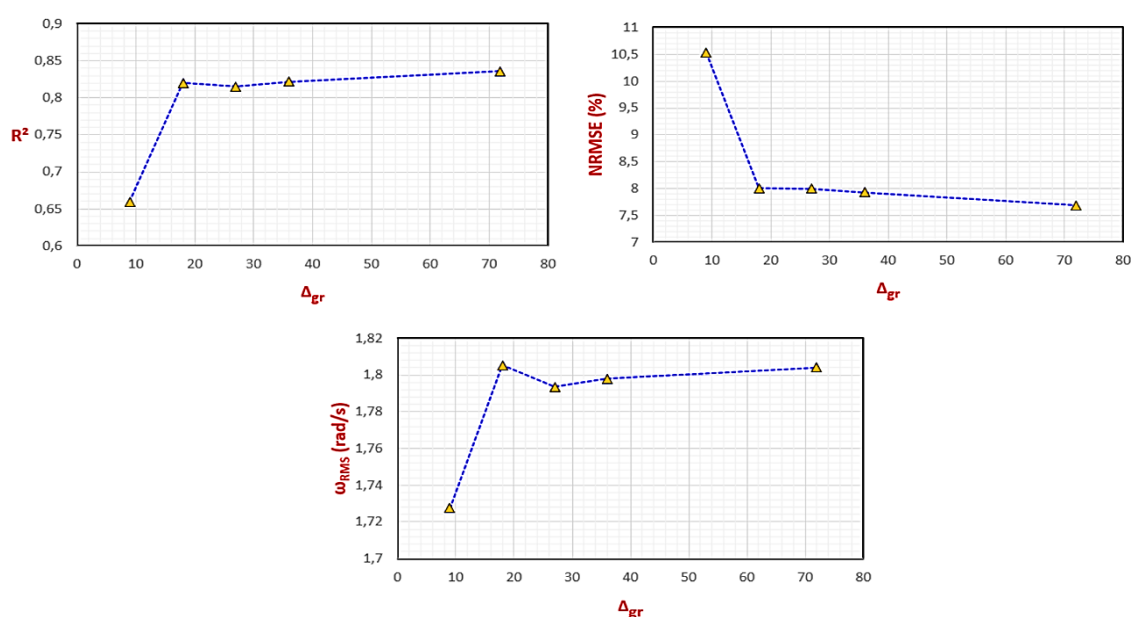


Figura 4.2 – Convergência da malha numérica com base nos valores RMS, R^2 e $NRMSE$ da velocidade angular da placa, segundo os resultados experimentais apresentados por Wei et al. (2016)

Por meio da análise destes gráficos, é possível observar que, a partir de $\Delta_{gr} \approx 30$, a variação dos parâmetros utilizados torna-se pouco expressiva, sugerindo que este valor corresponda a um grau suficiente de refinamento. Entretanto, é importante salientar que, apesar deste grau de refinamento se mostrar adequado ao estudo da velocidade angular da placa, o mesmo pode não ser suficiente para o campo de velocidades, o qual, em malhas mais refinadas, apresentará maior

riqueza de detalhes. Porém, tendo em vista o objetivo principal deste trabalho, boas aproximações da velocidade angular, da amplitude angular da placa, da força atuante e da potência captada, em conjunto de uma representação razoável do campo de velocidades, se mostram suficientes e adequadas para os casos de estudo da tese.

Os gráficos apresentados na Figura 4.3 mostram o tempo total de simulação (t_{sim}) e o respectivo espaço ocupado em disco rígido, associados a cada estágio de refinamento da malha numérica. Todas as simulações foram realizadas em um computador de médio porte, dotado de 12 núcleos, o que possibilitou rodar cada uma das simulações de forma paralelizada (divisão em 12 partes), diminuindo o tempo total de simulação. Sendo assim, espera-se que t_{sim} seja consideravelmente maior para o caso das simulações rodadas sem paralelização.

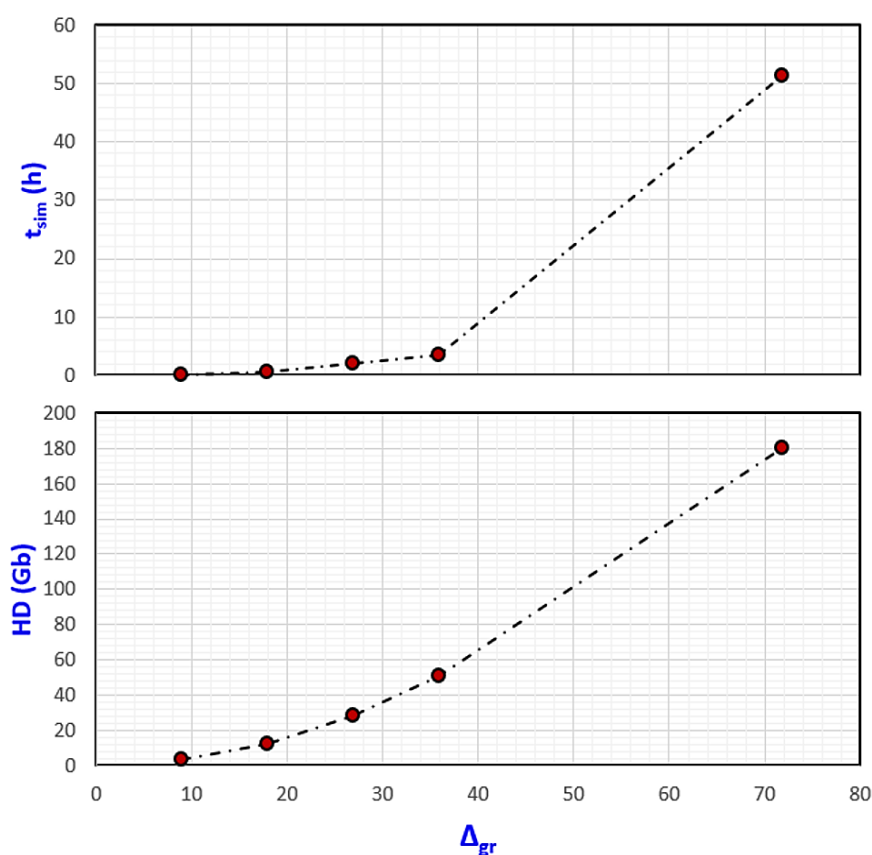


Figura 4.3 – Tempo total de simulação e respectivo espaço ocupado em disco rígido, em gigabytes, para cada grau de refinamento da malha numérica

O valor de $\Delta_{gr} \approx 30$, observado anteriormente, resulta em menos de 4 horas de simulação e menos de 40 Gb para um caso simulado de 20 s, o que representa um bom custo benefício em termos de resultado e de custo computacional. Desta maneira, é possível concluir que este valor

de Δ_{gr} representa um nível ideal de refinamento da malha de cálculo, o que corresponde a um valor de $\Delta_{x_2} = 0,009 \text{ m}$. Entretanto, optou-se por utilizar o valor de $\Delta_{x_2} = 0,01 \text{ m}$ como o grau de refinamento ideal, uma vez que a divisão da altura, largura e espessura de placa (0,33 m, 0,66 m e 0,09 m) por este valor, resulta em números exatos, o que não ocorre para $\Delta_{x_2} = 0,009 \text{ m}$.

4.2.2 Avaliação do comportamento de diferentes modelos em LES

Após a escolha do nível de refinamento, e tendo em vista a proposta deste trabalho (utilizar a modelagem em grandes escalas para o estudo dos OWSC's), foram testados três modelos diferentes de LES: Smagorinsky, Modelo Dinâmico de Uma Equação (cujo nome no *OpenFOAM* é *dynamicKEqn*) e o modelo WALE. O primeiro deles representa um modelo mais clássico (modelo pioneiro), o segundo a aplicação de um sistema de dupla filtragem e, finalmente, o último uma formulação robusta que está fundamentada na influência da proximidade com os contornos sólidos.

Como se optou pela utilização de uma malha uniformemente refinada na região 2 do domínio, um valor de Δ_{x_2} referente a $y^+ \approx 1$ (geralmente recomendado para uma modelagem em LES com bastante riqueza de detalhes) resultaria em custo computacional muito elevado, o que, em termos dos recursos existentes no laboratório, seria inviável. Como solução, foram propostos mais dois casos de análise, levando em consideração a aplicação das leis de parede (*wall functions*): modelo Smagorinsky com lei de parede (Smagorinsky II) e modelo dinâmico de uma equação com lei de parede.

Os valores de R^2 , $NRMSE$ e t_{sim} , foram novamente aplicados para a avaliação da velocidade angular atingida pela placa. Os resultados deste estudo podem ser observados na Tabela 4.3, onde as cores laranja, amarela e verde indicam, respectivamente, o primeiro, o segundo e o terceiro melhor modelo, considerando os parâmetros adotados.

Modelo de LES	R^2	$NRMSE$ (%)	$t_{simul.}$ (h)
Smagorinsky	0,815	8,000	1,620
Smagorinsky c/ Wall Function	0,846	7,501	1,660
<i>dynamicKEqn</i>	0,854	7,382	1,960
<i>dynamicKEqn</i> c/ Wall Function	0,826	7,950	1,810
WALE	0,837	7,660	1,750

Tabela 4.3 – Investigação dos modelos de LES mais adequados à proposta do presente trabalho

Foram considerados como modelos adequados aqueles que apresentassem pelo menos duas classificações, dentre as três adotadas e representadas em cores na tabela. Desta maneira, segundo este critério, os três modelos mais adequados foram o Smagorinsky com *wall function* (Smagorinsky II), o *dynamicKEqn* e o WALE.

Em uma segunda etapa de verificação, optou-se pela análise e comparação dos campos de velocidade, obtidos em cada um dos três modelos selecionados, durante o evento de *Slamming*. Para tal, foram considerados dois instantes importantes deste fenômeno: o instante final da passagem de uma crista de onda sobre a placa e o lançamento do jato, resultante da colisão da estrutura com a superfície líquida.

As fotos presentes no trabalho de Henry et al. (2014b), mostradas na Figura 2.40, encontram-se em preto e branco e não apresentam muita riqueza de detalhes sobre o escoamento antes e depois da placa, o que dificulta uma análise visual do fenômeno. Como alternativa, foram utilizados, para o estudo dos campos de velocidade, dois *frames* de um vídeo sobre um evento de *Slamming*, o qual foi realizado sobre um modelo reduzido de *Oyster* e, posteriormente, disponibilizado pelo *SuperGen UK Centre for Marine Energy Research* (2018) na plataforma online do *YouTube*. Os dois *frames* selecionados, referentes aos instantes 1min:34s (jato) e 2min:06s (passagem da crista de onda) do vídeo, são apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5. Nestas imagens também são mostrados os campos de velocidade para os diferentes modelos de LES, assim como os mesmos instantes para o caso de maior grau de refinamento da malha numérica.

Na Figura 4.4, uma região, de formato aproximadamente elíptico, é destacada em vermelho. Esta representa uma zona de baixa magnitude de velocidade, o que sugere a ocorrência de vórtices adjacentes (sinalizados com uma seta verde), os quais somente são capturados no caso de maior grau de refinamento da grade, como era esperado. Entretanto, o formato semi-elíptico é observado no modelo WALE, ao passo que, nos modelos de Smagorinsky com a utilização de lei de parede e *dynamicKEqn*, este formato é bem mais alongado. Por outro lado, observa-se uma zona de considerável turbulência (destacada por uma seta vermelha) na região superior, adjacente à placa, a qual é representada, em maior magnitude, no modelo WALE. Ao final, pode-se concluir também que a maior distância atingida pelo jato é observada no modelo WALE, o que se mostra de acordo com o *frame* do experimento e com a simulação em uma malha bastante refinada.

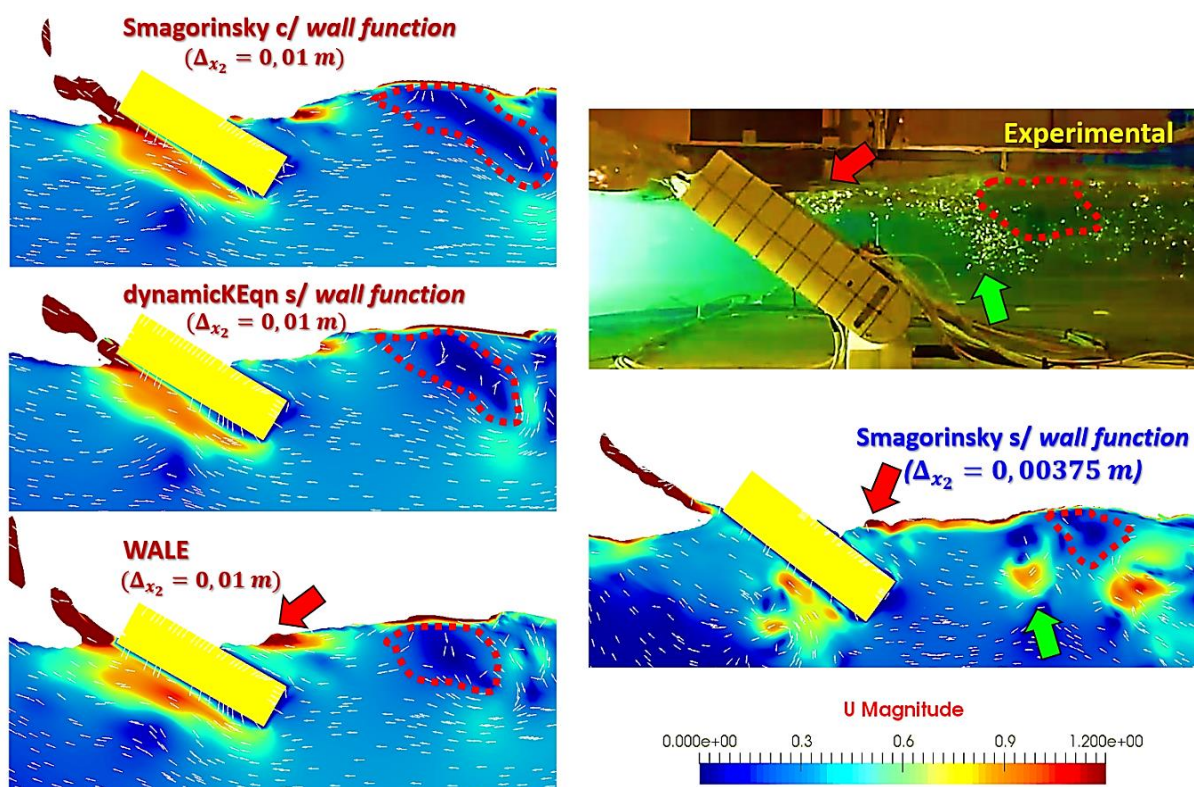


Figura 4.4 – Comparação visual dos campos de velocidade, durante o instante de lançamento do jato observado em um caso de *Slamming*, considerando diferentes modelos de LES

Uma análise similar é realizada na Figura 4.5, onde o enfoque agora é dado ao instante que demarca a passagem de uma crista de onda sobre o OWSC. De uma maneira geral, todos os campos de velocidade demonstram certa similaridade, apesar da maior riqueza de detalhes ser observada no caso do maior grau de refinamento. Entretanto, deve ser salientado que o modelo utilizado considera uma abertura inferior à placa, sendo assim, o vórtice demarcado pela seta vermelha só está presente nos casos numéricos. Observa-se que, apesar deste último ser capturado em todos os modelos, sua maior intensidade ocorre nos casos de Smagorinsky com *wall function* e do modelo WALE.

Assim, por meio das características analisadas e discutidas, conclui-se que os modelos de Smagorinsky II e WALE se mostram os mais adequados à proposta de estudo do presente trabalho, focada na hidrodinâmica do OWSC e sua consequente geração de energia. Ao final, é importante ressaltar que uma representação um pouco menos detalhada, em relação aos casos de maior refinamento da malha, se mostra suficiente para uma análise mais geral dos fenômenos de escoamento envolvidos no processo, ao mesmo tempo em que se otimiza o custo computacional.

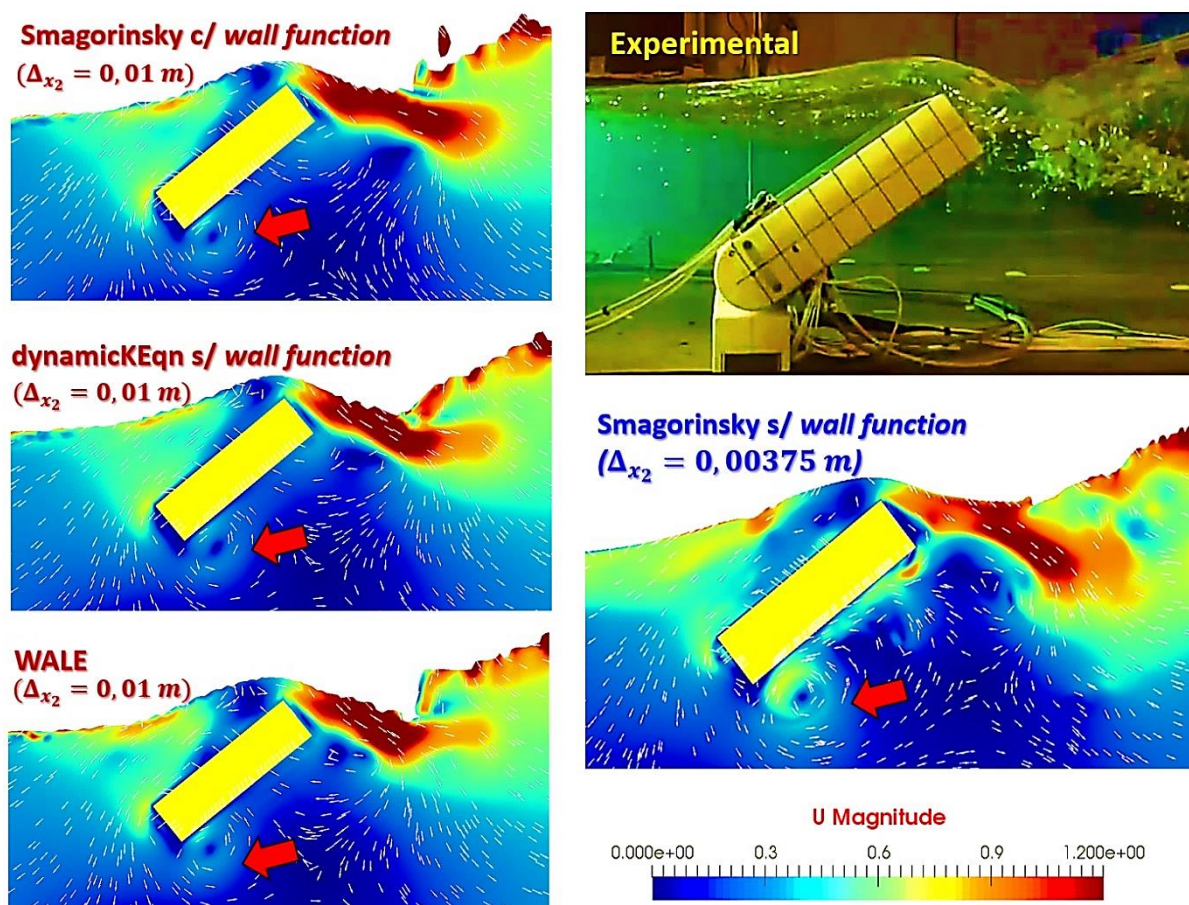


Figura 4.5 – Comparação visual dos campos de velocidade, durante o instante da passagem de uma crista de onda sobre o OWSC em um caso de *Slamming*, para diferentes modelos de LES

4.2.3 Validação final do modelo bidimensional

Nesta etapa, os modelos de Smagorinsky, com utilização de uma *Wall Function* (Smagorinsky II), e WALE foram verificados com base nos dados experimentais e numéricos fornecidos no trabalho de Wei et al. (2016). Assim, realizaram-se comparações gráficas para as séries temporais da amplitude angular, da velocidade angular, do momento de excitação (em relação ao eixo de giro) e para as sondas de nível d'água A (η_A) e B (η_B), mostradas na Figura 4.1.

Os resultados obtidos pelos modelos numéricos e os respectivos valores experimentais, para o caso da amplitude angular e da velocidade angular da placa, são apresentados na Figura 4.6. Nela pode ser observado que ambos os modelos se ajustam muito bem após o instante $t = 10$ s, tendo em vista que suas respectivas curvas praticamente encontram-se sobrepostas nos dois casos.

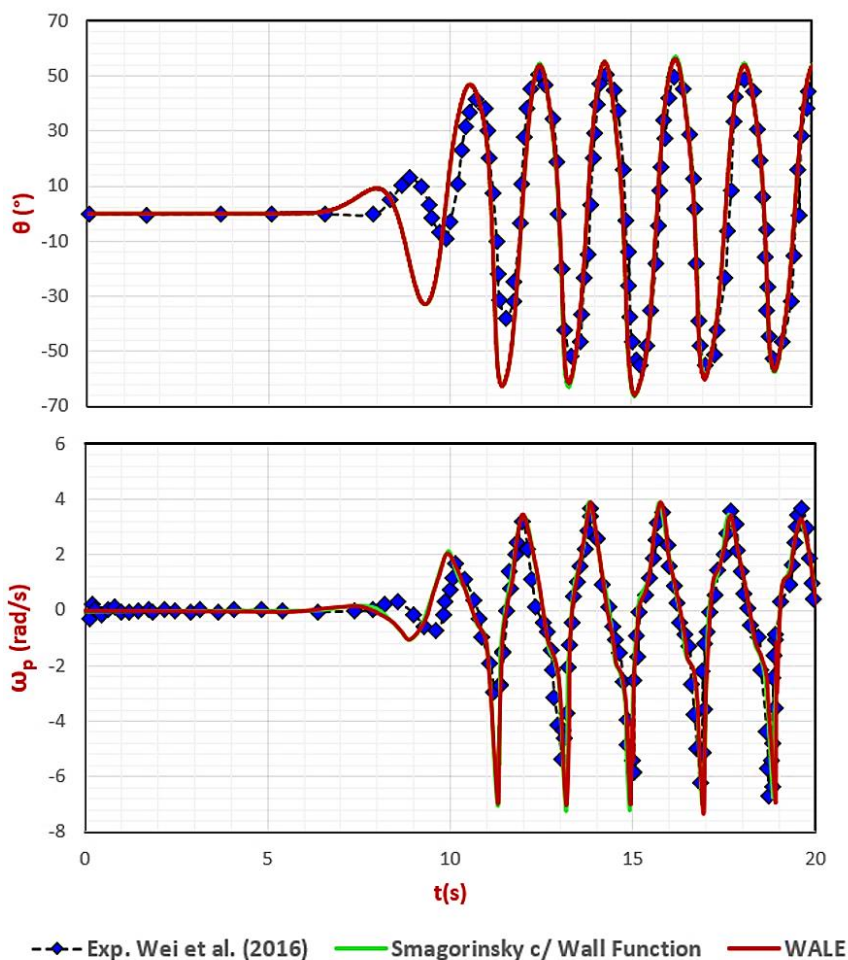


Figura 4.6 – Comparação entre as séries temporais da amplitude angular e velocidade angular da placa, levando em consideração os modelos de Smagorinsky II, WALE e os resultados experimentais de Wei et al. (2016)

Como não existem na literatura dados experimentais do momento de excitação para o caso abordado, foi utilizado como referência o resultado numérico obtido pelos autores Wei et al. (2016). Entretanto, é importante ressaltar que o modelo adotado por estes autores está baseado na metodologia RANS, que, diferente dos modelos em LES, não resolve diretamente parte das escalas de turbulência. Assim, as séries temporais de M_t , obtidas para os modelos deste trabalho, provavelmente apresentarão flutuações locais não visíveis nos modelos em RANS, porém estas deverão demonstrar certa similaridade em termos médios. A comparação pode ser visualizada na Figura 4.7, em que se verifica, novamente, boa concordância dos resultados em ambos os modelos. Porém, o modelo de Smagorinsky, com aplicação de uma *wall function*, apresenta uma maior quantidade de flutuações, além de ocasionar maiores magnitudes que o modelo WALE.

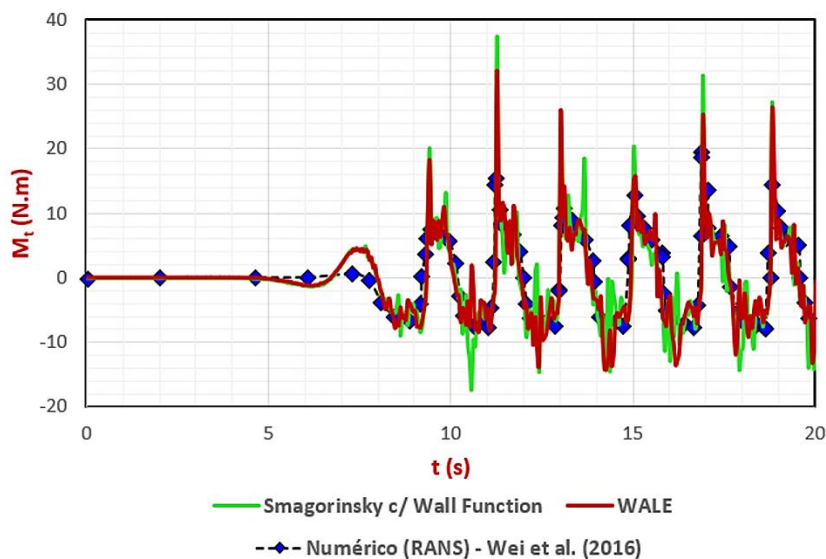


Figura 4.7 – Comparação entre as séries temporais do momento de excitação do conversor, levando em consideração os modelos de Smagorinsky II, WALE e os resultados numéricos de Wei et al. (2016)

No caso da verificação das sondas de nível A e B, é necessário, primeiramente, ajustar as séries temporais do experimento dos autores Wei et al. (2016). Esta modificação é fundamental, uma vez que os valores da série levam em consideração as dimensões originais da placa, as quais foram levemente modificadas no modelo numérico. Segundo as justificativas levantadas na parte inicial da seção 4.2, houve uma modificação na altura de onda máxima a ser utilizada pelo modelo, passando de um valor igual a 0,22 m para o valor de 0,24 m, o que representa um aumento de, aproximadamente, 10%. Logo, o mesmo aumento deve ser aplicado na série original, possibilitando a comparação destes resultados com aqueles obtidos numericamente.

Desta forma, a Figura 4.8 apresenta as comparações referentes às séries temporais, já ajustadas, dos níveis d'água A e B. Na imagem, é possível observar que o modelo de Smagorinsky II tende a superestimar os níveis atingidos pela superfície livre na sonda A, enquanto o modelo WALE apresenta uma melhor concordância. Ambos os modelos resultam em curvas bastante similares para os níveis lidos na sonda B, em que é observado a superposição de suas séries temporais. Entretanto, de uma forma geral, os níveis ainda são maiores que aqueles obtidos experimentalmente. Tal diferença pode ser atribuída, principalmente, a uma influência ocasionada pela modificação realizada no domínio numérico, o que, por outro lado, não resultou em mudanças significativas no comportamento hidrodinâmico do OWSC.

A fim de quantificar a aderência dos modelos Smagorinsky II e WALE, foram novamente utilizados os parâmetros R^2 e $NRMSE$ em cada uma das verificações realizadas. Ao final,

calculou-se a média aritmética destes parâmetros para os dois modelos empregados (Tabela 4.4), assumindo como modelo ideal aquele que apresentasse o maior valor de R^2 e o menor de $NRMSE$.

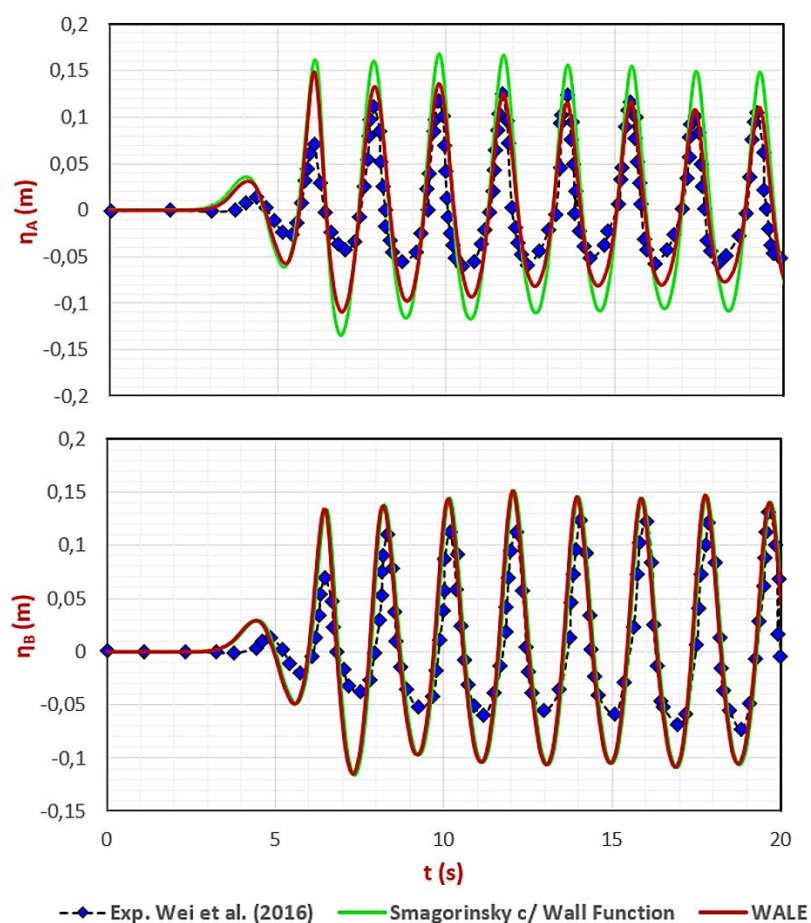


Figura 4.8 – Comparação entre as séries temporais das sondas de nível A e B, levando em consideração os modelos Smagorinsky II, WALE e os resultados experimentais ajustados de Wei et al. (2016)

	Smagorinsky c / Wall Function		WALE	
	R^2	$NRMSE$ (%)	R^2	$NRMSE$ (%)
θ	0,856	10,909	0,866	10,282
ω_p	0,846	7,501	0,837	7,660
M_t	0,689	12,315	0,734	11,234
η_A	0,836	23,782	0,851	15,212
η_B	0,904	15,428	0,863	16,504
Média	0,826	13,987	0,830	12,178

Tabela 4.4 – Valores de R^2 e $NRMSE$, obtidos para os modelos Smagorinsky II e WALE nas comparações realizadas com o experimento apresentado por Wei et al. (2016)

Segundo a tabela anterior, ambos os modelos de LES apresentaram valores médios bastante similares. Entretanto, o modelo WALE, demonstrou, em média, o maior valor para R^2 e o menor para $NRMSE$, sendo, portanto, o mais adequado a ser utilizado nas simulações subsequentes do trabalho.

Uma última verificação visual (Figura 4.9) é realizada para o caso do modelo WALE, onde são comparados os instantes A, C, E e H do fenômeno de *Slamming* (Figura 2.40) reproduzido neste trabalho, durante a validação numérica do modelo bidimensional. Após a análise da referida figura, é possível concluir que o modelo adotado reproduz adequadamente o experimento de Henry et al. (2014b), o que ressalta seu grande potencial para conformar o objetivo da tese.

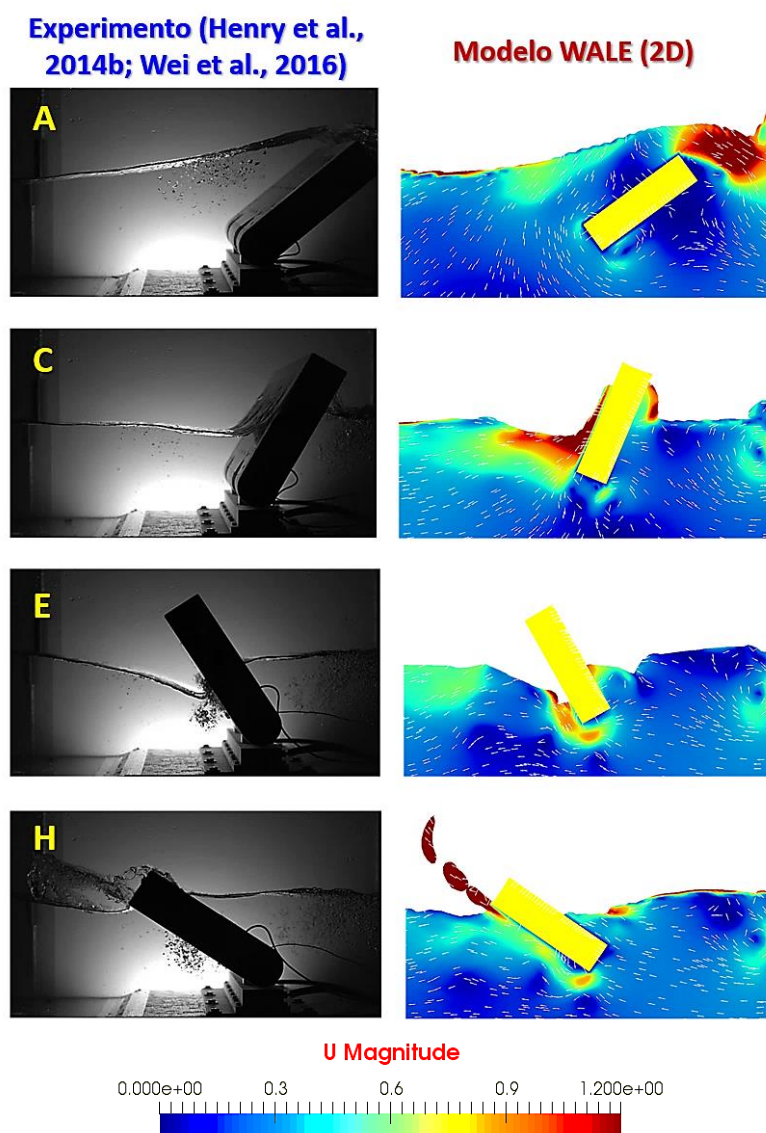


Figura 4.9 – Comparação entre os instantes do evento *slamming*, abordado pelos autores Henry et al. (2014b) e Wei et al. (2016), com o modelo WALE 2D adotado no presente trabalho

4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL

Visando expandir a aplicação do modelo de LES (anteriormente validado e selecionado para os casos bidimensionais) aos casos tridimensionais, efetua-se, primeiramente, uma adaptação do domínio da Figura 4.1 para o caso tridimensional. Nestas condições, são aplicadas as mesmas dimensões de placa utilizadas na validação 2D, bem como as mesmas configurações do domínio e iguais características de onda. A largura do domínio é dimensionada de tal maneira que a discretização da grade numérica na direção y resulte em elementos de malha quadrados, desta forma, adota-se uma largura igual a 1,44 m. A placa é então posicionada de forma que a linha vertical que divide a seção de saída na metade passe pelo centroide da estrutura, o que resulta numa distância lateral de 0,39 m entre as extremidades da placa e as faces laterais do domínio. Uma vista frontal da seção de saída é apresentada na Figura 4.10 onde podem ser observadas as adaptações realizadas na direção y sobre o domínio da Figura 4.1.

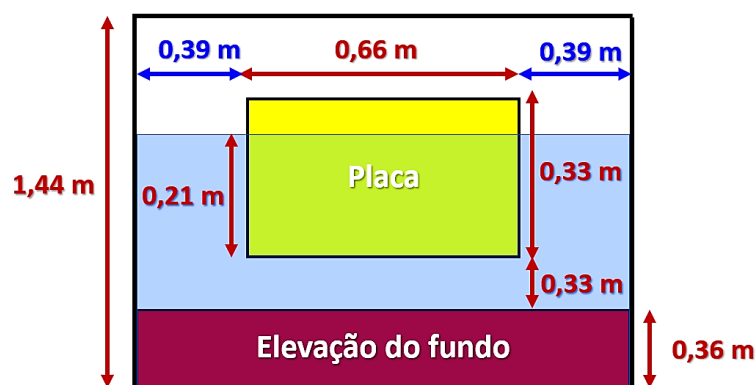


Figura 4.10 – Adaptações realizadas na largura do domínio da Figura 4.1, no intuito de possibilitar uma validação numérica tridimensional do modelo de LES

Inicialmente, é proposto um estudo, similar àquele realizado no caso 2D, a fim de verificar a convergência da malha numérica para diferentes graus de refinamento. Entretanto, observa-se a ocorrência de divergências numéricas para os casos onde os elementos de malha são muito refinados (casos onde $\Delta_{gr} > 9,00$). Realizaram-se diversas tentativas para corrigir tal problema, porém todas as soluções encontradas resultaram na redução da ordem dos esquemas numéricos apresentados na Tabela 3.1, distanciando-se da proposta desta tese, onde é visada a aplicação da modelagem em LES, que exige esquemas numéricos de maior ordem. Tal comportamento reflete a grande complexidade envolvida na modelagem dinâmica dos dispositivos nos casos tridimensionais, a qual tende a ser ainda maior para casos tridimensionais de múltiplas placas em movimento. Desta maneira, as simulações desta etapa foram realizadas com base em uma

malha com Δ_{gr} igual a 9,00 (relativamente mais grosseira que a malha utilizada na validação do modelo 2D).

Uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo tridimensional de LES e aqueles presentes no trabalho de Wei et al. (2016) é realizada, em termos das séries temporais da amplitude angular atingida, da velocidade angular experimentada pela estrutura e do momento de excitação associado. Estas comparações estão apresentadas nos gráficos da Figura 4.11, de onde se observa uma aderência bastante satisfatória entre os resultados, para as três variáveis analisadas, em instantes posteriores a $t = 12$ s. De maneira similar às tendências observadas no caso 2D, em relação ao momento de excitação (Figura 4.7), o modelo WALE 3D apresenta amplitudes maiores que o modelo numérico em RANS aplicado pelos autores. Tal diferença é atribuída ao fato da abordagem em RANS tratar o escoamento em termos médios, ao passo que a modelagem em LES consegue capturar as flutuações decorrentes das grandes escalas turbulentas.

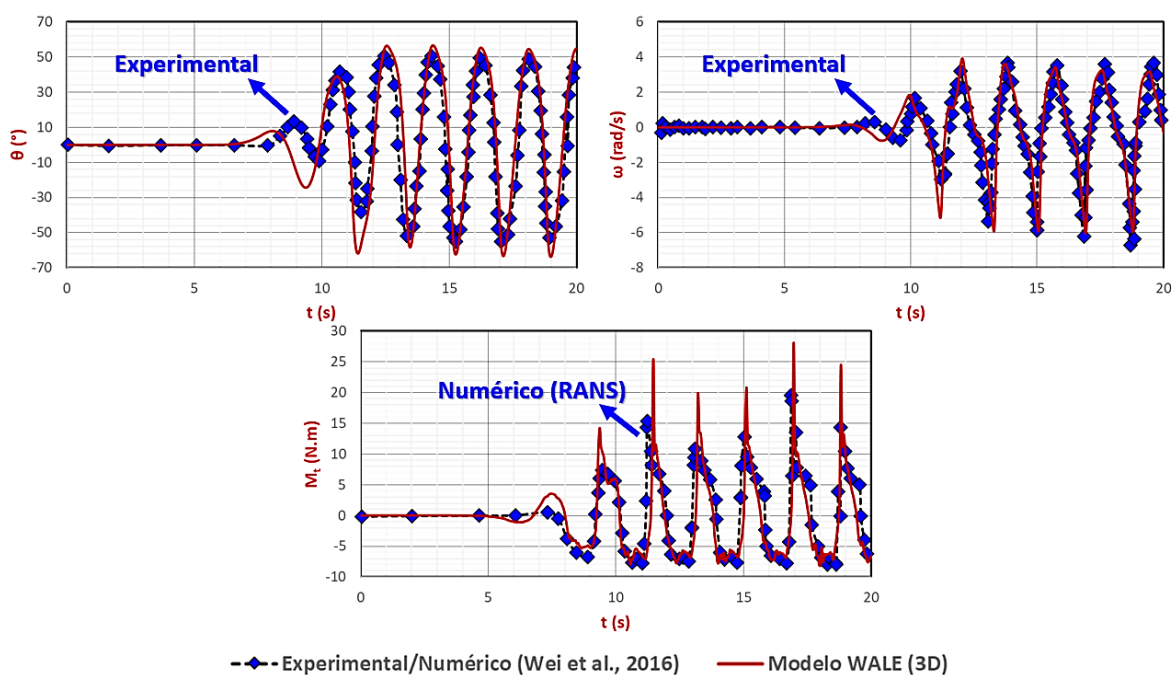


Figura 4.11 – Comparação entre as séries temporais da amplitude angular e velocidade angular da placa, levando em consideração o modelo WALE 3D e os resultados experimentais de Wei et al. (2016)

Logo em seguida, uma análise baseada nos parâmetros estatísticos R^2 e $NRMSE$ é realizada, buscando quantificar a aderência entre o modelo tridimensional e os resultados experimentais apresentados na Figura 4.11. Estes resultados encontram-se dispostos na Tabela 4.5, na qual se observa um coeficiente de determinação médio próximo de 0,74 e um valor médio de $NRMSE$

de 11,5%, valores estes não tão distantes daqueles demonstrados na Tabela 4.4 (calculados para o caso bidimensional).

	R^2	NRMSE
θ	0,793	12,899
ω	0,748	9,211
M_t	0,669	12,479
Média	0,737	11,530

Tabela 4.5 – Valores de R^2 e NRMSE, obtidos para o modelo WALE 3D nas comparações realizadas com o experimento apresentado por Wei et al. (2016)

Uma análise acerca dos valores máximos, mínimos e RMS atingidos nas séries temporais das variáveis consideradas também é realizada (Tabela 4.6). Ao final, verifica-se que a diferença relativa média destes valores se encontra entre 8,50% e 11,00%, onde o maior valor observado ocorre para o valor RMS do momento de excitação (em torno de 22,00%). Esta diferença está associada, novamente, ao fato de o modelo numérico presente no trabalho de referência estar baseado na metodologia das médias de Reynolds.

θ			
	Wei et al. (2016)	WALE	Dif _{REL} (%)
RMS (°)	34,171	39,224	14,787
Máx (°)	51,545	56,734	10,067
Mín (°)	-59,091	-63,961	8,242
		Média	11,032
ω			
	Wei et al. (2016)	WALE	Dif _{REL} (%)
RMS (°)	2,468	2,250	8,837
Máx (°)	3,671	3,903	6,321
Mín (°)	-6,715	-6,022	10,315
		Média	8,491
M_t			
	Wei et al. (2016)	WALE	Dif _{REL} (%)
RMS (°)	9,802	7,651	21,936
Máx (°)	35,442	33,056	6,731
Mín (°)	-8,455	-8,172	3,349
		Média	10,672

Tabela 4.6 – Comparação entre os valores máximos, mínimos e RMS da amplitude angular, velocidade angular e momento de excitação, obtidos pelo modelo WALE 3D e aqueles presentes no trabalho de Wei et al. (2016)

A Figura 4.12 apresenta uma comparação visual entre os campos de escoamento obtidos pelo modelo WALE tridimensional e os *frames* disponibilizados pelo *SuperGen UK Centre for Marine Energy Research* (2018), a respeito de um evento de *Slamming*.

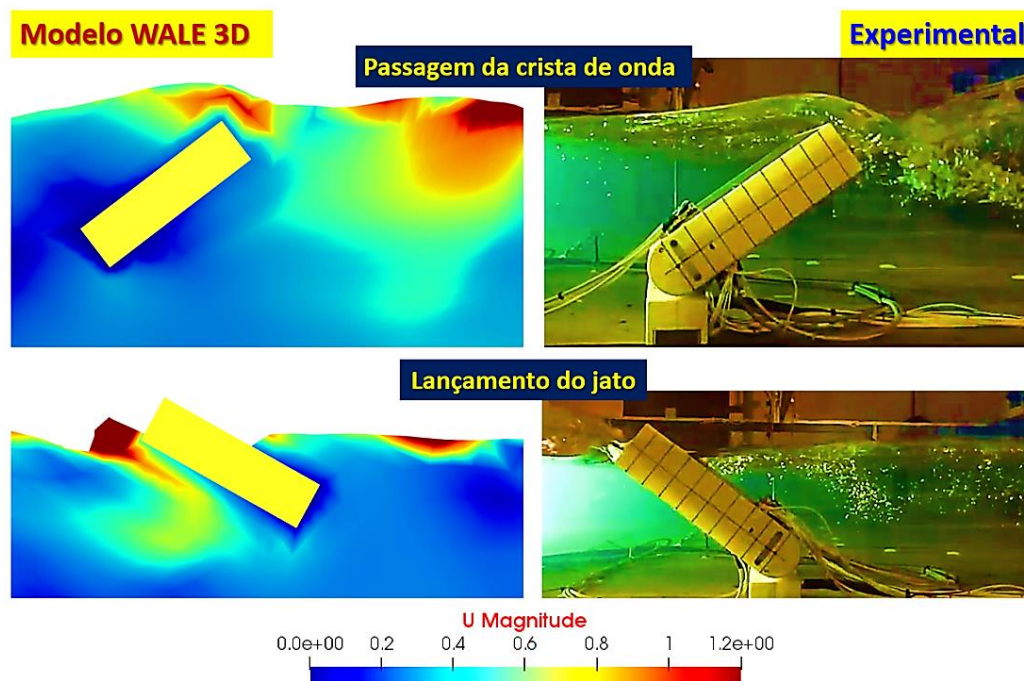


Figura 4.12 – Comparação visual dos campos de velocidade, durante os instantes que demarcam a passagem de uma crista de onda sobre o OWSC e o lançamento de um jato para longe da estrutura, durante um evento de *Slamming* (Modelo 3D)

Conforme pode ser observado na figura anterior, o modelo tridimensional representa de forma satisfatória as amplitudes angulares atingidas, ao mesmo tempo em que consegue capturar as principais regiões turbulentas presentes ao fenômeno. O grau de detalhamento é um pouco inferior aos campos mostrados nas Figuras 4.4 e 4.5 (obtidos para o caso bidimensional, com uma malha mais refinada), entretanto, ainda assim é capaz de reproduzir de forma adequada a hidrodinâmica associada.

De forma semelhante à comparação apresentada na Figura 4.9 (para o modelo 2D), uma segunda comparação entre os instantes de um evento do fenômeno de *Slamming* é realizada, sendo estes agora baseados nas imagens disponíveis no trabalho de Henry et al. (2014b). Esta análise é apresentada na Figura 4.13, na qual se observa bastante similaridade entre todos os instantes que descrevem o fenômeno (em termos da superfície livre e da amplitude angular atingida), validando o potencial do modelo tridimensional para reproduzir a dinâmica de corpo rígido associada.

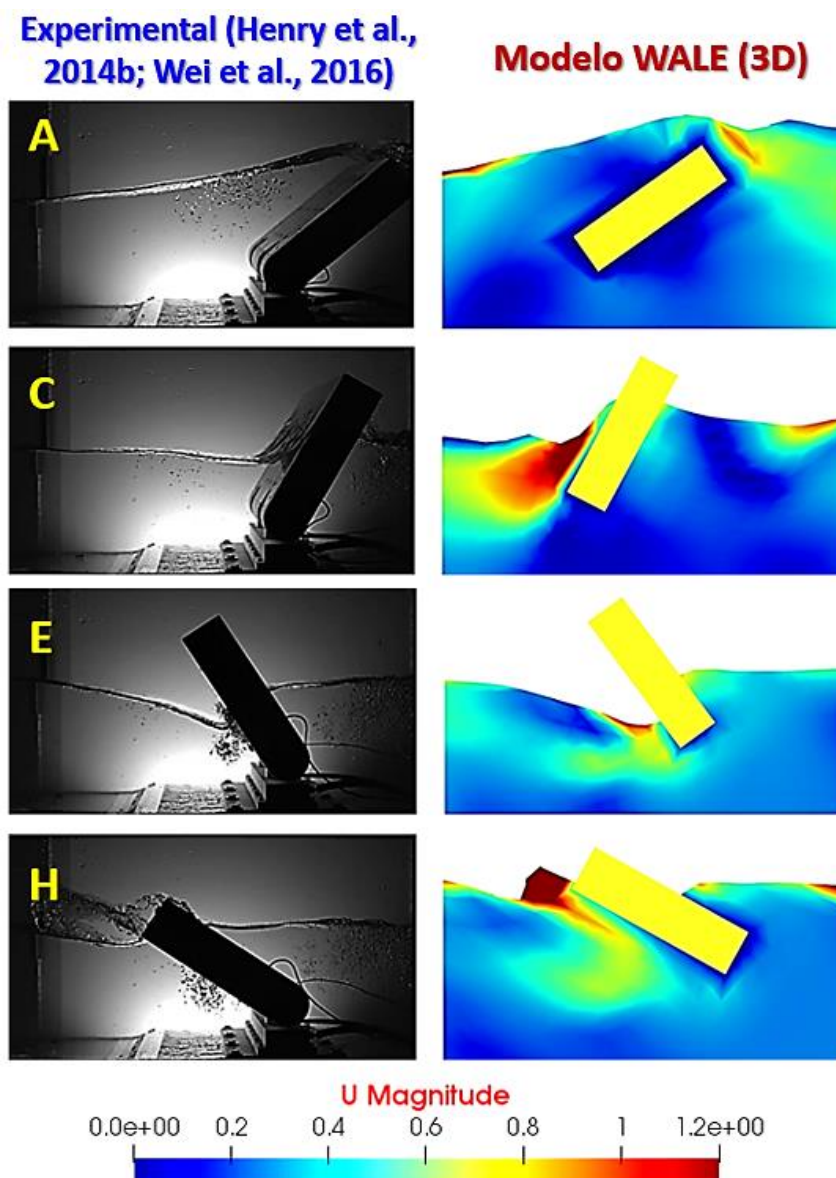


Figura 4.13 – Comparação entre os instantes do evento *slamming*, abordado pelos autores Henry et al. (2014b) e Wei et al. (2016), com o modelo WALE 3D adotado no presente trabalho

Os resultados obtidos nas análises desta etapa, levando em consideração uma malha um pouco mais grosseira (onde $\Delta_{gr} = 9,00$), são bastante satisfatórios, quando comparados aos valores experimentais e numéricos apresentados por Henry et al. (2014b) e Wei et al. (2016). Da mesma forma, o modelo tridimensional reproduziu de forma eficiente o movimento oscilatório da estrutura envolvido no caso extremo de operação do conversor. Sendo assim, o modelo WALE 3D se mostra adequado e apto para as modelagens tridimensionais do presente trabalho.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS 2D E 3D

Tendo em vista a necessidade de aplicação da modelagem numérica tridimensional em diversos casos do presente trabalho, aliado ao fato da dificuldade de serem utilizadas malhas com graus de refinamento (Δ_{gr}) superiores a 9,00 nos casos tridimensionais (conforme discutido na seção 4.3), faz-se necessário realizar uma comparação entre os modelos numéricos 2D (em que se atingem graus de refinamento superiores, resultando em uma maior riqueza de detalhes nos campos de escoamento) e 3D (onde são aplicadas malhas um pouco mais grosseiras). Tal comparação tem como objetivo principal verificar a aderência entre os modelos numéricos na representação do movimento oscilatório existente no caso de três placas, dispostas em série, em situações hidrodinâmicas e de geometria similares.

Para tal comparação, aplicam-se as mesmas configurações de domínio e de geometria de placa utilizadas no trabalho de Fuhrmeister (2018), em que $h_p = 0,40 m$, $L_p = 0,80 m$ e $e_p = 0,08 m$, enquanto $H = 0,10 m$, $T = 1,90 s$ e $h = 0,48 m$. Conforme discutido na seção 4.1, estas dimensões de placa se encontram na mesma ordem de grandeza das dimensões do modelo experimental apresentado nos trabalhos de Henry et al. (2014b) e Wei et al. (2016), que representa um OWSC do tipo Oyster na escala de 1:40. Desta maneira, um valor de 0,10 m de altura de onda equivale a, aproximadamente, 4,00 m na escala real, valor este que representa uma altura de onda considerável em muitos casos reais de clima de ondas do oceano, sendo, portanto, adotado como padrão em diversos casos de estudo do presente trabalho.

Por outro lado, observa-se que um valor de $\Delta_{gr} = 9,00$ resultaria em $\Delta_{x_2} = 0,033 m$ para estas novas dimensões da placa. Sendo assim, o valor mais próximo, múltiplo de 0,4 m, 0,8 m e 0,08 m, seria $\Delta_{x_2} = 0,04 m$, o qual foi adotado em todos os casos de análise tridimensionais do presente trabalho.

A Figura 4.14 apresenta um detalhamento do domínio e das condições de onda aplicados nesta etapa do trabalho. Maiores informações sobre a malha, localização das placas e dimensões do domínio referentes a estes casos de estudo podem ser obtidas nas Tabelas 3.2 e 3.4.

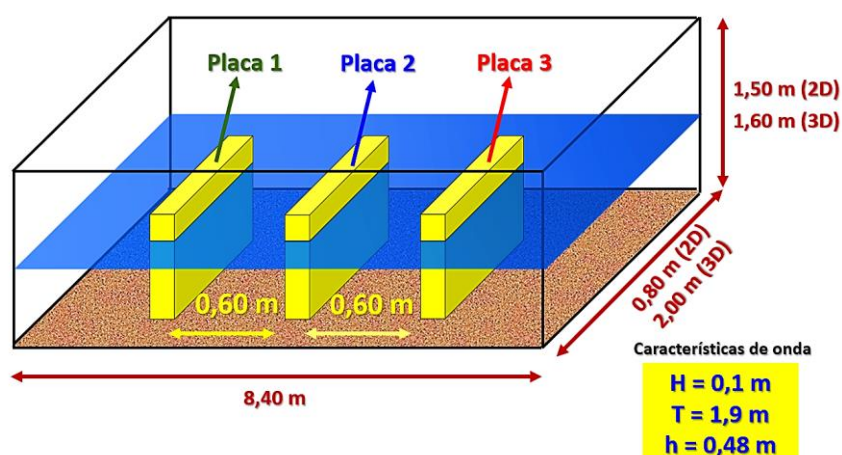


Figura 4.14 – Detalhamento do domínio utilizado na etapa de comparação entre os modelos 2D e 3D, considerando três placas dispostas em série

Inicialmente, é realizada uma comparação visual entre os campos de velocidade, obtidos em instantes iguais (que demarcam a passagem de uma crista de onda pela região das placas), dos modelos 2D e 3D. Como pode ser observado na Figura 4.15, as amplitudes angulares atingidas pelas três placas são praticamente iguais em todos os instantes de tempo em ambos os modelos. Da mesma forma, os campos de velocidade são bastante semelhantes, entretanto, o modelo 3D sempre apresenta uma maior magnitude de velocidade nas regiões entre as placas. Esta intensificação pode ser associada ao fato da existência de uma parcela de escoamento que ocorre na direção y (para dentro da página), não levada em consideração no modelo 2D, porém, presente no caso tridimensional. Ainda assim, a similaridade existente entre ambos os modelos é bastante expressiva.

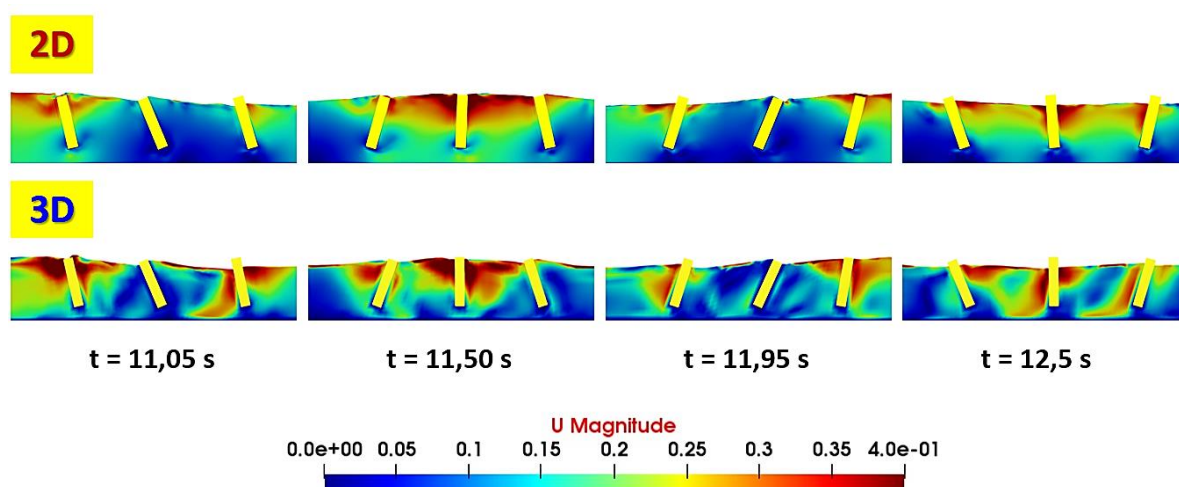


Figura 4.15 – Comparação entre os campos de velocidade dos modelos WALE 2D e 3D, durante a passagem de uma crista de onda sobre três placas iguais dispostas em série

As Figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam, respectivamente, comparações realizadas entre as séries temporais das amplitudes angulares, das velocidades angulares, das forças horizontais experimentadas, das forças verticais e dos momentos de excitação, dos modelos WALE bidimensional e tridimensional.

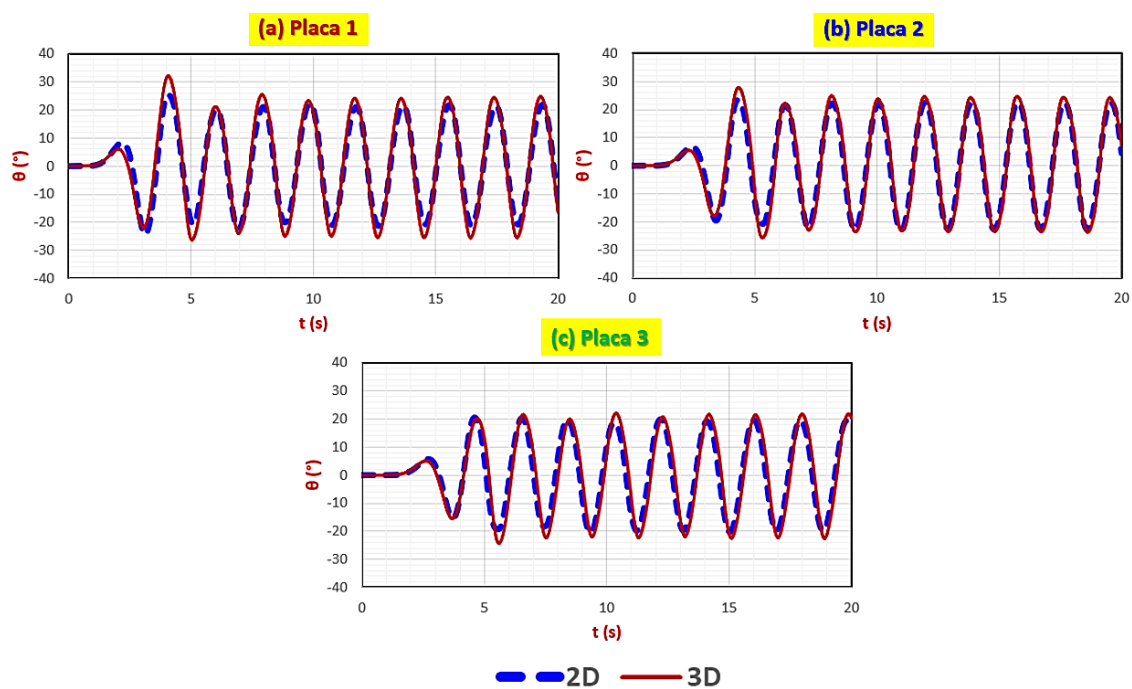


Figura 4.16 – Comparação entre as séries temporais da amplitude angular atingida por três placas iguais dispostas em série, obtidas por meio dos modelos 2D e 3D

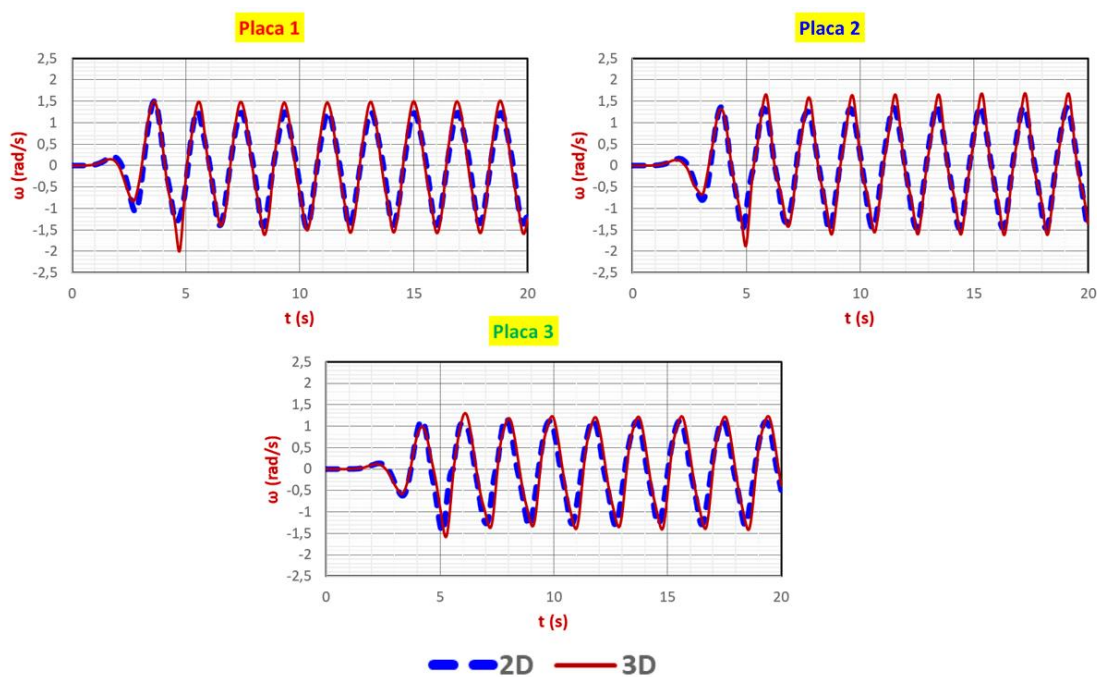


Figura 4.17 – Comparação entre as séries temporais da velocidade angular atingida por três placas iguais dispostas em série, obtidas por meio dos modelos 2D e 3D

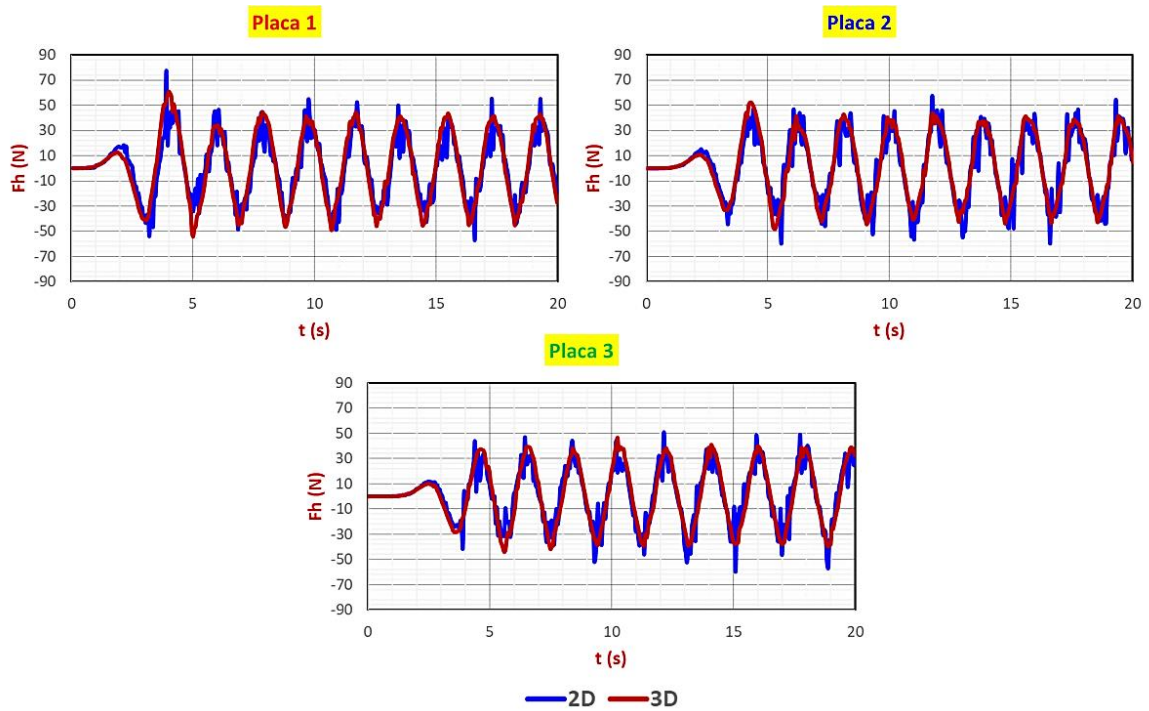


Figura 4.18 – Comparação entre as séries temporais da força horizontal atuante em três placas iguais dispostas em série, obtidas por meio dos modelos 2D e 3D

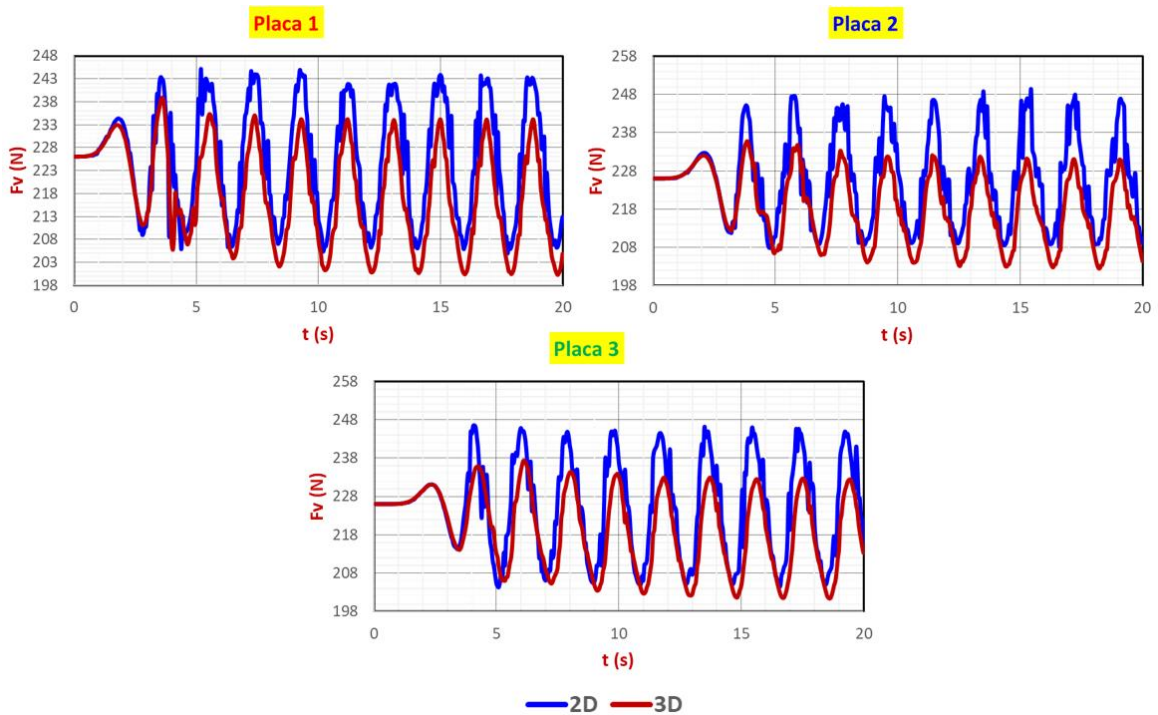


Figura 4.19 – Comparação entre as séries temporais da força vertical atuante em três placas iguais dispostas em série, obtidas por meio dos modelos 2D e 3D

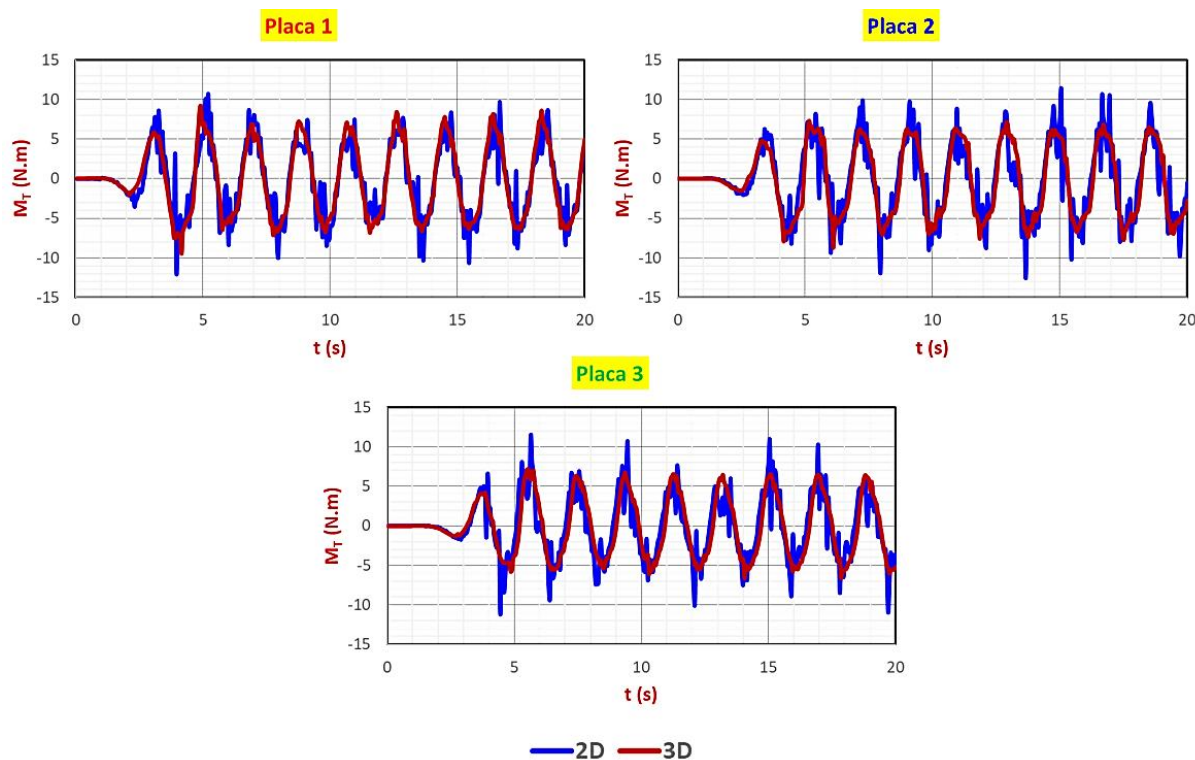


Figura 4.20 – Comparação entre as séries temporais do momento de excitação experimentado pelas três placas iguais dispostas em série, obtidas por meio dos modelos 2D e 3D

Por meio da análise dos gráficos das Figuras 4.16 e 4.17, é possível observar que o modelo 3D fornece maiores amplitudes de θ e ω em todas as placas. Entretanto, esta diferença não é muito acentuada, quando comparada aos valores obtidos pelo modelo bidimensional, que tende a apresentar um padrão de oscilação muito parecido.

Nas Figuras 4.18 e 4.20, são observadas as flutuações que ocorrem nos valores da força horizontal e no momento de excitação do modelo 2D, ao passo que o mesmo comportamento não é identificado no modelo 3D. Certamente as flutuações presentes no modelo bidimensional decorrem do maior grau de refinamento da malha associada, o que possibilita a captura e a representação de uma gama maior das grandes escalas turbulentas que o modelo 3D (dotado de uma malha mais grosseira). Ainda assim, o modelo 3D apresenta um padrão de oscilação bastante representativo e semelhante, em média, que o modelo 2D.

A Figura 4.19 demonstra que o modelo 2D apresenta maiores picos máximos de força vertical que o modelo 3D, que atinge menores picos mínimos. Tal diferença pode ser explicada em função da parcela hidrostática da pressão, que é muito influente na força vertical. Assim, como a malha tridimensional é um pouco mais grosseira, a variação da superfície livre e da quantidade de água que é ocupada em cada volume de controle da malha ocorrem de uma forma um pouco

menos suave que ocorreriam em uma malha mais refinada, como é o caso da simulação bidimensional. Esta variação um pouco mais abrupta resulta numa diminuição da estimativa da pressão hidrostática. Porém, esta diferença entre as forças verticais obtidas pelos modelos 2D e 3D sempre tende a ser inferior a 12%, que, em termos de engenharia, é bastante razoável.

Por fim, são calculados os valores de R^2 e $NRMSE$ (com base no modelo 2D, de malha mais refinada) de todas as propriedades supracitadas e analisadas. Estes valores demonstram que o modelo 3D, quando comparado ao modelo bidimensional, tende a apresentar, em média, coeficientes de determinação próximos a 0,85 e valores de $NRMSE$ próximos de 12,5%, onde os menores valores de R^2 e os maiores valores de $NRMSE$ são observados para o caso da força vertical, conforme esperado. Estas conclusões são obtidas por meio da análise dos dados dispostos na Tabela 4.7.

θ		
	R^2	$NRMSE$ (%)
Placa 1	0,946	9,412
Placa 2	0,93	9,414
Placa 3	0,91	10,349
Média	0,929	9,725
ω		
	R^2	$NRMSE$ (%)
Placa 1	0,943	10,283
Placa 2	0,924	8,695
Placa 3	0,795	13,964
Média	0,887	10,981
F_h		
	R^2	$NRMSE$ (%)
Placa 1	0,799	11,459
Placa 2	0,877	8,599
Placa 3	0,843	9,348
Média	0,84	9,802
F_v		
	R^2	$NRMSE$ (%)
Placa 1	0,83	24,295
Placa 2	0,762	19,549
Placa 3	0,704	21,964
Média	0,765	21,936
M_t		
	R^2	$NRMSE$ (%)
Placa 1	0,852	9,654
Placa 2	0,766	12,115
Placa 3	0,851	9,328
Média	0,823	10,366
R^2 Médio	0,849	$NRMSE$ Médio (%)
		12,562

Tabela 4.7 – Valores de R^2 e $NRMSE$ resultantes da comparação dos resultados obtidos pelos modelos 2D e 3D, para o caso de 3 placas iguais dispostas em série

De uma forma geral, o modelo WALE 3D, apesar de possuir uma malha mais grosseira que o modelo bidimensional, apresenta resultados muito semelhantes, em termos da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal, força vertical e momento de excitação. Desta forma, o mesmo pode, portanto, ser utilizado com segurança para o estudo das principais variáveis influentes na hidrodinâmica dos conversores em casos tridimensionais.

4.5 INVESTIGAÇÃO DOS FENÔMENOS DE ESCOAMENTO ASSOCIADOS À HIDRODINÂMICA DE TRÊS OWSC'S DISPOSTOS EM SÉRIE

Variações nos valores da altura e do período de onda, bem como da profundidade, ocasionam modificações bastante expressivas no movimento oscilatório de uma placa, conforme demonstrado no trabalho de Fuhrmeister (2018). Entretanto, é fundamental verificar como as mudanças destas variáveis afetam a hidrodinâmica envolvida no caso de três placas dispostas em série (que modelam a interação existente entre as estruturas nos parques de geração). Além das variáveis supracitadas, espera-se que alterações na declividade de fundo também sejam responsáveis por modificações no comportamento hidrodinâmico das placas. Por outro lado, conforme as informações apresentadas nas seções 2.1.3.2.2 e 2.3.2, é bastante razoável supor que a reflexão das ondas (ocorrência de ondas estacionárias) também influencie a dinâmica de corpo rígido dos conversores.

Para a realização das análises nesta etapa do trabalho, utiliza-se a modelagem 2D em LES, bem como as mesmas características geométricas das placas demonstradas na Figura 4.14 (incluindo a distância entre as placas). A extensão do domínio e sua altura são mantidas fixas em 8,40 m e 3,00 m, respectivamente. Os valores da profundidade, altura de onda, período de onda e a localização do eixo de giro das placas podem variar conforme os casos de estudo. Tais modificações encontram-se detalhadas nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6.

De uma maneira geral, o estudo dos fenômenos associados à hidrodinâmica de três conversores iguais e dispostos em série pode ser organizado da seguinte maneira:

- a) **Influência da altura de onda.**
- b) **Modificações ocasionadas por variações no período de onda.**
- c) **Influência do grau de submersão das placas.**

- d) **Modificações hidrodinâmicas decorrentes da variação da declividade de fundo.**
- e) **Influência de ondas estacionárias geradas por reflexão.**

Todos os casos de estudo realizados nesta etapa do trabalho envolvem análises baseadas nos valores eficazes (RMS) da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal, força vertical, momento de excitação e da potência captada, além de comparações visuais entre os campos de velocidade associados. Estes casos de análise são detalhados nas subseções seguintes.

4.5.1 Influência da altura de onda

No intuito de verificar a influência da altura de onda sobre a dinâmica dos conversores, os valores de 0,48 m e 1,90 s, para a profundidade e para o período de onda, respectivamente, foram mantidos fixos. Por outro lado, foram adotadas quatro alturas de onda distintas ($H_1 = 0,05\text{ m}$, $H_2 = 0,10\text{ m}$, $H_3 = 0,20\text{ m}$ e $H_4 = 0,30\text{ m}$), permitindo avaliar como um aumento desta variável altera as condições de escoamento entre as placas e a consequente geração de energia destes conversores.

Nesta análise, a distância do ponto de giro de todas as placas ao fundo do domínio é igual a 0,12 m e todos os casos de análise correspondem ao caso hidrodinâmico de ondas em águas intermediárias. O caso 4, onde a altura de onda é igual a 0,30 m, representa uma condição de onda bastante esbelta e muito próxima à condição de rebentação, estando associada a maiores tendências turbulentas.

Na Figura 4.21 são demonstrados os campos de velocidade obtidos para as alturas de onda de 0,10 m, 0,20 m e 0,30 m, nos instantes em que uma crista ($t = 11,75\text{ s}$) e uma cava ($t = 12,45\text{ s}$) de onda atingem a placa central, respectivamente. Nela é possível observar que os padrões de escoamento são bastante similares em todos os casos, entretanto, os campos associados às alturas de onda de 0,20 m e 0,30 m apresentam uma intensificação da magnitude da velocidade na região entre as placas. Esta característica pode ser associada a um aumento dos efeitos turbulentos nestes casos, uma vez que é observada uma grande vorticidade nos espaços entre as estruturas quando as alturas de onda atingem valores mais elevados. Além disto, esta figura também demonstra que as amplitudes angulares experimentadas pelas placas

crecem com o aumento da altura da onda, da mesma maneira que as tendências hidrodinâmicas pré-existentes, que apresentam uma intensificação de suas magnitudes.

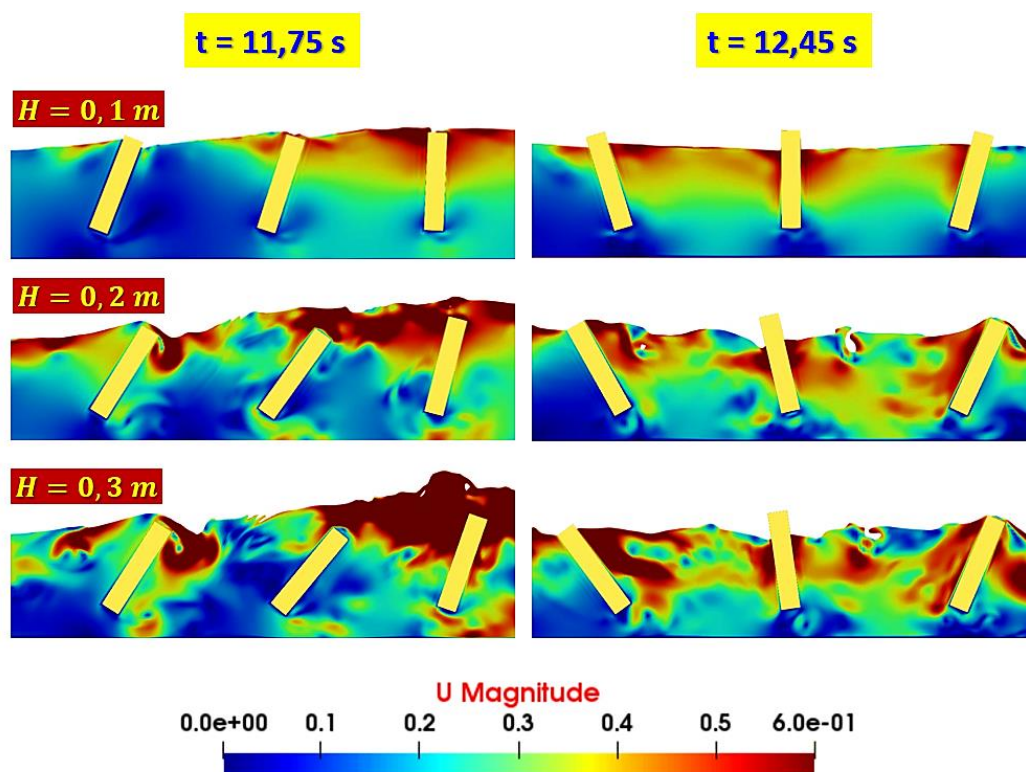


Figura 4.21 – Variação observada nos campos de velocidade em função do aumento da altura de onda, considerando a ação de três conversores iguais dispostos em série

Os valores RMS da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal, força vertical, momento de excitação e da potência captada são calculados com base nas suas respectivas séries temporais. Da mesma forma, também é estimada a potência total teórica captada pelo sistema ($P_{abs_{tot}}$), que corresponde à soma das potências captadas por cada uma das placas. Estes resultados são apresentados nos gráficos das Figuras 4.22 e 4.23.

É possível observar, por meio da Figura 4.22, que os valores da amplitude angular, da velocidade angular e da força horizontal experimentados pelas placas tendem a aumentar com o quadrado a altura de onda, aproximadamente. Em alturas superiores a 0,20 m, identifica-se que a taxa de crescimento destas propriedades, em função da altura de onda, tende a diminuir um pouco. Este comportamento pode ser associado ao fato de que a onda, neste caso, encontra-se próxima da condição de rebentação, resultando na perda de energia cinética, a qual afeta diretamente o comportamento oscilatório das estruturas. Ainda na mesma figura, se observa uma tendência contrária para o caso da força vertical, que tende a diminuir à medida que a altura

de onda cresce, até o valor de 0,20 m, a partir do qual passa a aumentar novamente. Este comportamento permite concluir que a força vertical é desfavorável ao movimento oscilatório das estruturas, podendo ser relacionada à diminuição da produção de energia pelo sistema.

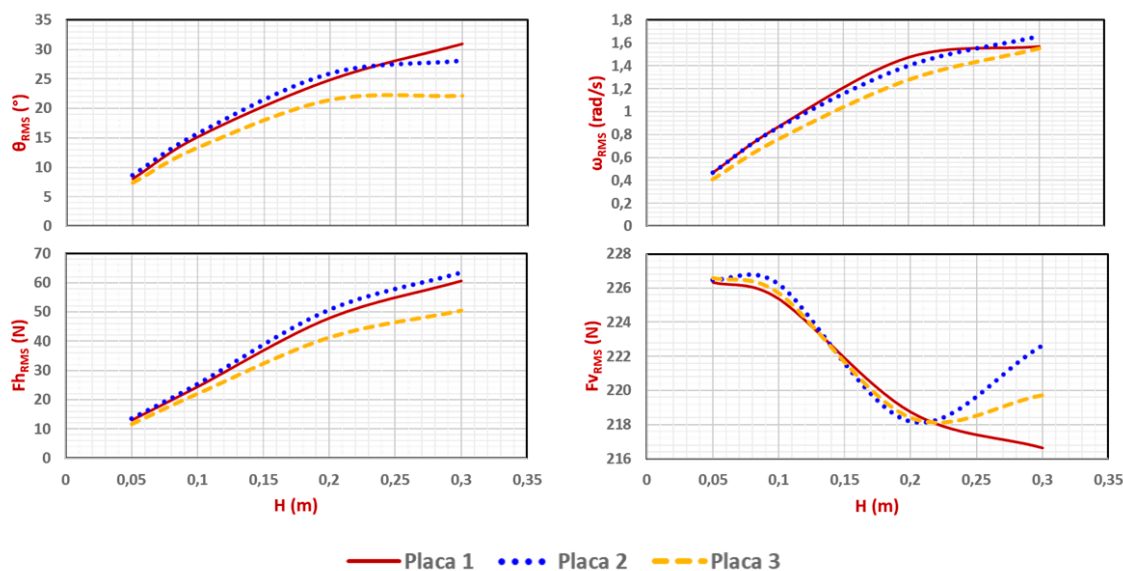


Figura 4.22 – Valores RMS obtidos para a amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e força vertical, considerando a ação de três placas iguais dispostas em série, sob o efeito da variação da altura de onda.

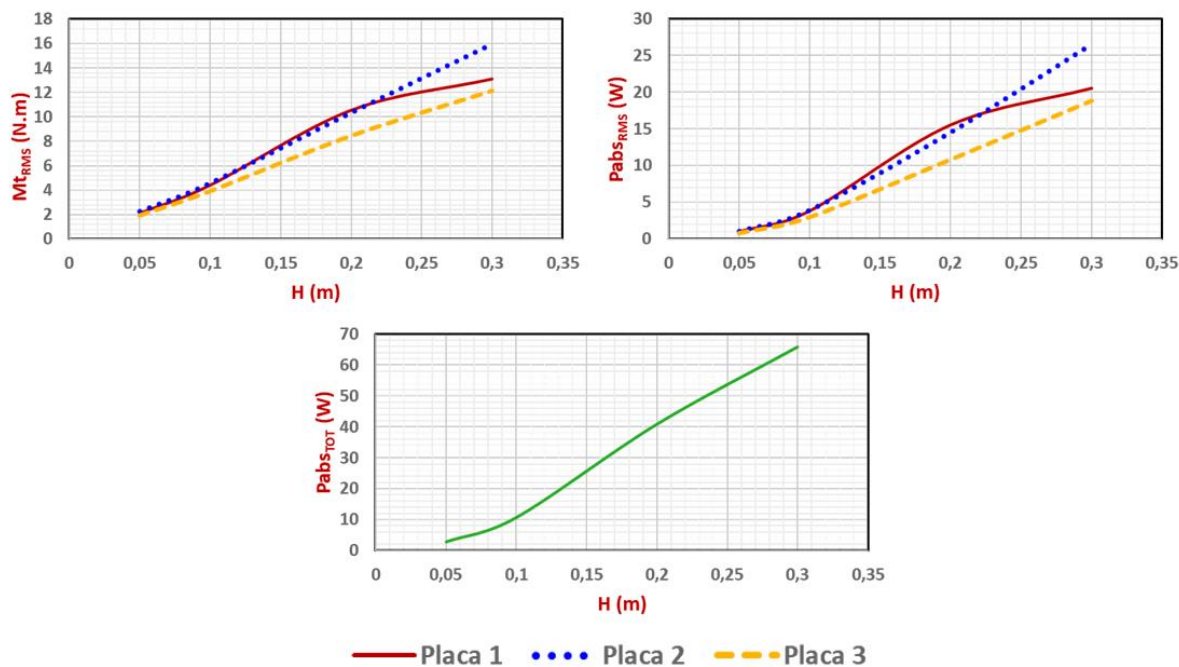


Figura 4.23 – Valores RMS do momento de excitação e da potência captada por três placas iguais associadas em série, bem como a estimativa da potência total absorvida pelo sistema, diante do efeito da variação da altura de onda.

A Figura 4.23 indica que tanto o momento de excitação quanto a potência captada pelas placas tendem a crescer de forma praticamente linear com o aumento da altura de onda. Este comportamento é ainda mais evidente para o caso da potência total absorvida pelo sistema.

Por outro lado, é possível identificar que, na grande maioria dos gráficos demonstrados nas Figuras 4.22 e 4.23, a placa 2 tende a apresentar os maiores valores RMS, ao passo que os menores valores sempre ocorrem para a placa 3. Isto permite concluir que a presença da placa 1 e da placa 3, na vizinhança da placa 2, favorecem o movimento oscilatório desta estrutura intermediária. Entretanto, a placa 3, localizada mais a jusante, acaba tendo seu comportamento oscilatório reduzido, o que pode ser explicado pelo fato de grande parte da energia disponível da onda incidente ser dissipada no processo turbulento ocasionado pela presença das placas 1 e 2.

4.5.2 Modificações ocasionadas por variações no período de onda

Para a verificação da influência do período de onda sobre a dinâmica dos conversores, foram mantidos fixos os valores de profundidade e da altura de onda em, respectivamente, 0,48 m e 0,10 m, enquanto adotaram-se quatro períodos de ondas distintos: $T_1 = 0,95$ s, $T_2 = 1,90$ s, $T_3 = 3,80$ s e $T_4 = 4,74$ s. Estes períodos representam casos hidrodinâmicos de ondas em águas rasas (T_4) e intermediárias (T_1 , T_2 e T_3). Todas as condições de geometria e localização das placas permanecem as mesmas daquelas utilizadas na análise apresentada na seção 4.5.1.

O aumento do período de onda é responsável pela intensificação da turbulência na região entre as placas, o que é ainda mais evidente nos casos dos períodos de 3,80 s e 4,74 s. Este aumento poderá ser favorável ou desfavorável ao comportamento oscilatório das estruturas, dependendo das características de oscilação natural das mesmas, conforme apresentado na seção 2.3.5. Em períodos muito grandes, a capacidade de oscilação das placas diminuirá, pois ocorrerá um efeito similar ao de uma corrente, responsável por movimentar as estruturas somente em um sentido. Este fenômeno pode ser visualizado por meio da análise dos campos de velocidade nos instantes mostrados na Figura 4.24, que demarcam, da esquerda para a direita, a passagem de uma crista de onda sobre a região das placas e o momento da chegada de uma nova crista de onda na primeira placa (localizada mais à esquerda na figura).

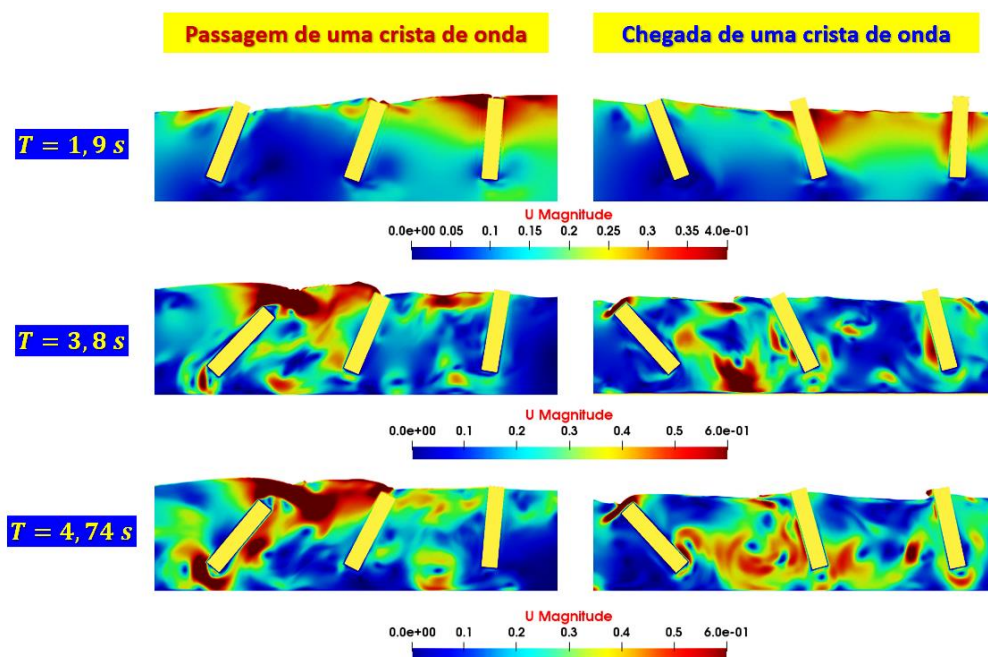


Figura 4.24 – Variação observada nos campos de velocidade em função do aumento do período de onda, considerando a ação de três conversores iguais dispostos em série

Os valores RMS das variáveis θ , ω , F_h , F_v , M_t , P_{abs} e P_{abstot} são demonstrados nos gráficos das Figuras 4.25 e 4.26. Neles é possível identificar, primeiramente, que a placa 1 é aquela que experimenta os maiores valores de amplitude angular, velocidade angular, força horizontal, momento de excitação e potência captada. Por outro lado, a placa 3, por ser a última a receber a influência dinâmica da onda incidente, resulta nos menores valores RMS destas variáveis, exceto no caso da força vertical, que apresenta um comportamento inverso.

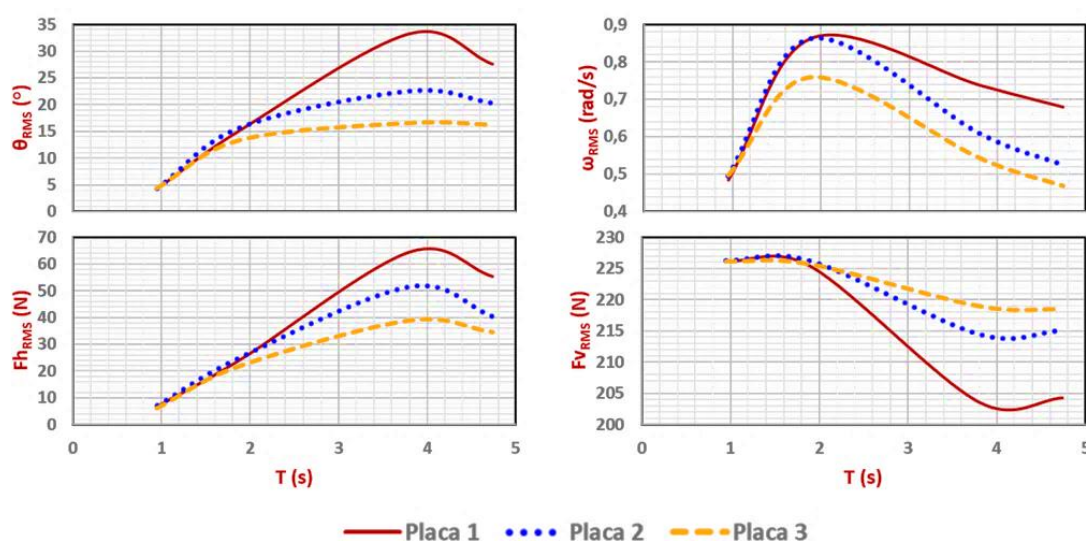


Figura 4.25 – Valores RMS obtidos para a amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e força vertical, considerando a ação de três placas iguais dispostas em série, sob o efeito da variação do período de onda.

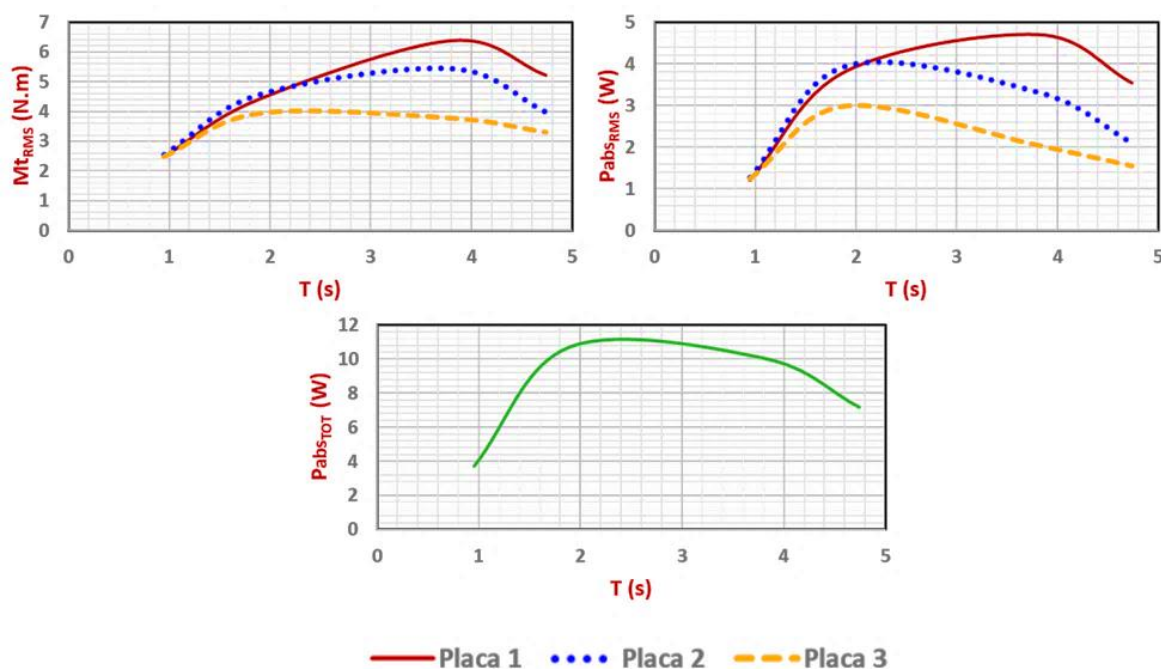


Figura 4.26 – Valores RMS do momento de excitação e da potência captada por três placas iguais associadas em série, bem como a estimativa da potência total absorvida pelo sistema, diante do efeito da variação do período de onda

Por meio da análise da Figura 4.25, observa-se que, tanto a amplitude angular quanto a velocidade angular e a força horizontal, tendem a aumentar à medida que o período de onda cresce, até o momento em que atingem um valor máximo, a partir do qual, passam a decrescer. O valor máximo da velocidade angular é atingido em um período próximo a 2 s, enquanto os valores máximos da amplitude angular e da força horizontal são ambos atingidos em um período em torno de 4 s. Esta semelhança indica a forte relação existente entre a amplitude angular atingida pelas placas e a força horizontal atuante sobre elas. Por outro lado, a força vertical atinge seu ponto mínimo em $T = 4$ s, indicando, mais uma vez, que esta variável é responsável por dificultar o movimento oscilatório das placas (comportamento contrário).

A Figura 4.26 revela que os momentos de excitação das placas 1 e 2 atingem seus picos em um período de onda próximo de 4 s, ao passo que a placa 3 atinge seu maior valor de momento entre os períodos de 2 s e 3 s. Isto sugere que a presença das placas 1 e 2 ocasiona características de escoamento capazes de diminuir a oscilação experimentada pela placa 3.

Um fato bastante interessante observado, tanto na Figura 4.25 quanto na Figura 4.26, é que, em períodos de onda inferiores a 1,60 s, todas as estruturas apresentam variações e comportamentos muito similares. Isto demonstra que pequenos períodos de onda não favorecem a intensificação

dos efeitos turbulentos na região entre as placas, permitindo que todas elas demonstrem características oscilatórias e dinâmicas muito próximas.

4.5.3 Influência do grau de submersão das placas

A submersão das placas é estudada por meio da variação da lâmina d'água, enquanto se mantém fixos o período ($T = 1,90\text{ s}$), a altura de onda ($H = 0,10\text{ m}$) e as distâncias dos eixos de giro das placas ao fundo do domínio (todas iguais a $0,12\text{ m}$). Por outro lado, adotam-se as profundidades de $0,40\text{ m}$, $0,48\text{ m}$, $0,52\text{ m}$, $0,56\text{ m}$ e $0,64\text{ m}$, que correspondem, respectivamente, aos graus de submersão (G_{sub}) de $0,70$, $0,90$, $1,00$, $1,10$ e $1,13$.

Inicialmente, investiga-se o comportamento dos campos de velocidade referentes aos graus de submersão de $0,70$ (menor grau, indicando a placa com 30% de sua estrutura externa à superfície livre), $1,00$ (grau intermediário, com o topo da placa coincidindo com a superfície livre) e $1,13$ (maior, indicando uma placa totalmente submersa, com uma lâmina d'água superior igual a 13% da altura da placa). A Figura 4.27 apresenta os campos de velocidade dos referidos graus de submersão, observados durante os instantes I, II, III e IV, que demarcam, respectivamente, a passagem de uma crista de onda pela placa central, a passagem da crista pela placa 3 (à direita), ocorrência de uma cava de onda na região central das placas e a chegada de uma nova crista de onda na placa 1 (à esquerda).

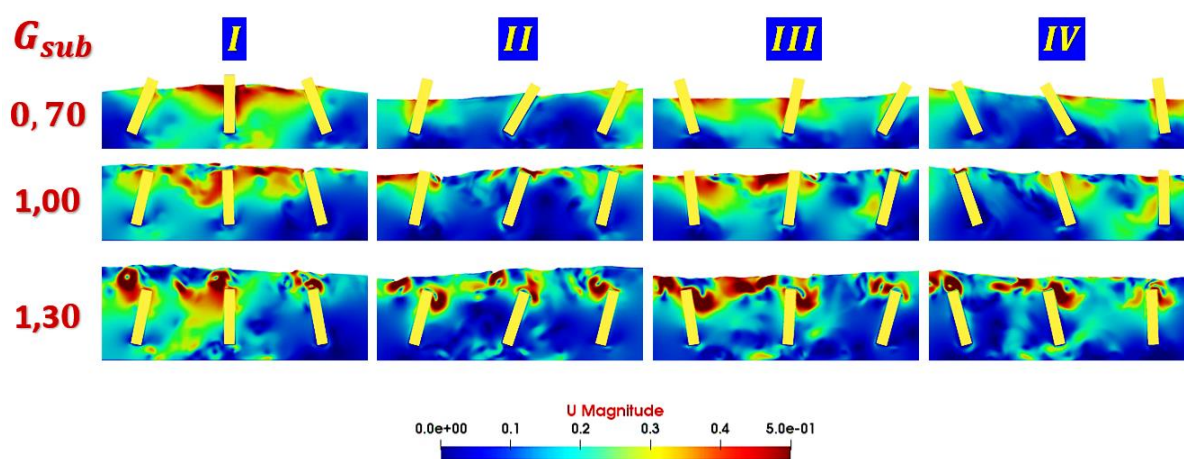


Figura 4.27 – Campos de velocidade observados durante a passagem de uma crista de onda sobre três OWSC's iguais e dispostos em série, considerando os graus de submersão de $0,70$, $1,00$ e $1,30$

Na figura acima, observa-se que a amplitude angular atingida pelas placas tende a diminuir com o aumento do grau de submersão. Por outro lado, a turbulência ocorrida na região entre as placas

tende a aumentar em profundidades maiores, onde o caso $G_{sub} = 1,30$ é aquele que apresenta maiores vorticidades na parte superior das placas.

O aumento da submersão é responsável por uma diminuição das amplitudes angulares e das velocidades angulares experimentadas pelos dispositivos. Por outro lado, o aumento da submersão está associado a uma intensificação das forças horizontais atuantes sobre as placas, a qual pode ser associada ao aumento da turbulência ocorrida nos arredores destas estruturas (conforme observado nos campos de velocidade da Figura 4.27). Observa-se também que as variações dos valores RMS das propriedades das placas 1 e 2 ocorrem de forma bastante similar, enquanto a placa 3 apresenta os menores valores destas variáveis. Estas conclusões podem ser obtidas por meio da análise dos gráficos dispostos nas Figuras 4.28 e 4.29.

Outro ponto bastante importante, que pode ser observado nestas figuras (4.28 e 4.29), é o fato das amplitudes angulares, velocidades angulares, momentos de excitação, potências captadas e da potência total absorvida sofrerem uma diminuição com o aumento da submersão, até um valor de G_{sub} um pouco superior a 1,00, a partir do qual, estas propriedades passam a adquirir valores aproximadamente constantes. Este fato sugere que os OWSC's tenham seu potencial de geração de energia diminuído consideravelmente quando encontram-se totalmente submersos.

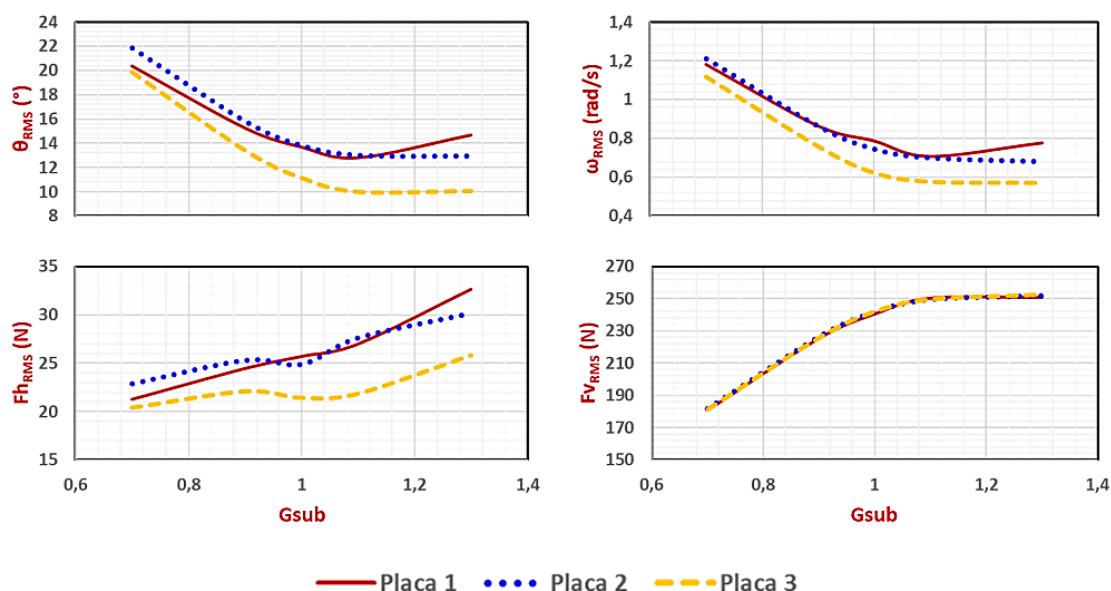


Figura 4.28 – Valores RMS obtidos para a amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e força vertical, considerando a ação de três placas iguais dispostas em série, sob o efeito da variação grau de submersão.

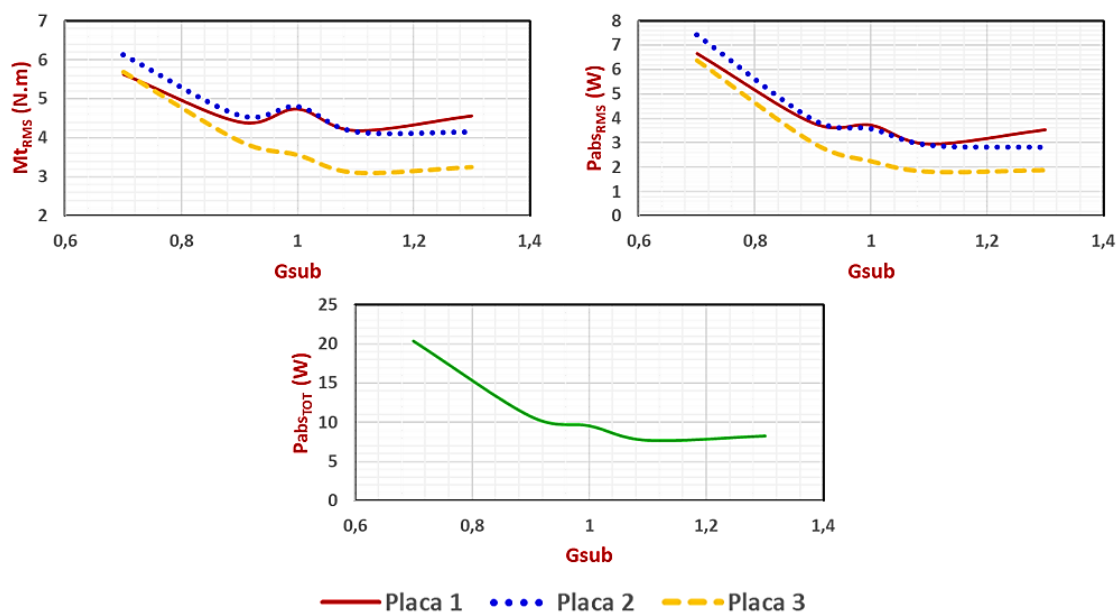


Figura 4.29 – Valores RMS do momento de excitação e da potência captada por três placas iguais associadas em série, bem como a estimativa da potência total absorvida pelo sistema, diante do efeito da variação da altura de onda.

4.5.4 Modificações hidrodinâmicas decorrentes da variação da declividade de fundo

Para o estudo da influência da declividade de fundo sobre a hidrodinâmica dos conversores, mantiveram-se fixos os valores da altura e do período de onda em, respectivamente, 0,20 m e 1,90 s. As características geométricas das placas e o distanciamento entre elas mantiveram-se os mesmos daqueles aplicados nos casos da seção 4.4, entretanto, a lâmina d'água, em relação à entrada do domínio, precisou ser modificada em cada caso, em função da inclinação da rampa utilizada para modelar a variação no fundo do domínio.

Buscando atenuar os efeitos ocasionados pela variação da profundidade de escoamento, fixou-se a distância entre o eixo de giro da última placa (placa 3) e o fundo em 0,12 m, a fim de manter a profundidade neste ponto sempre igual a 0,48 m (de forma similar aos casos abordados nas seções 4.5.1 e 4.5.2). Por outro lado, optou-se por interromper a rampa em uma seção localizada 1,00 m à direita da terceira placa, visando diminuir os efeitos decorrentes da reflexão da onda. Um detalhamento do domínio adaptado aos casos de análise da influência da declividade de fundo é apresentado na Figura 4.30.

Neste estudo, foram adotados quatro valores distintos para a inclinação do fundo do domínio (α_f): $0,00^\circ$, $7,50^\circ$, 15° e 20° . Valores estes que estão associados à ocorrência do fenômeno de empolamento da onda, em que ela, ao viajar de uma região mais profunda a uma região mais rasa, em razão do aclave do fundo, tem sua altura potencializada, tornando-se mais esbelta.

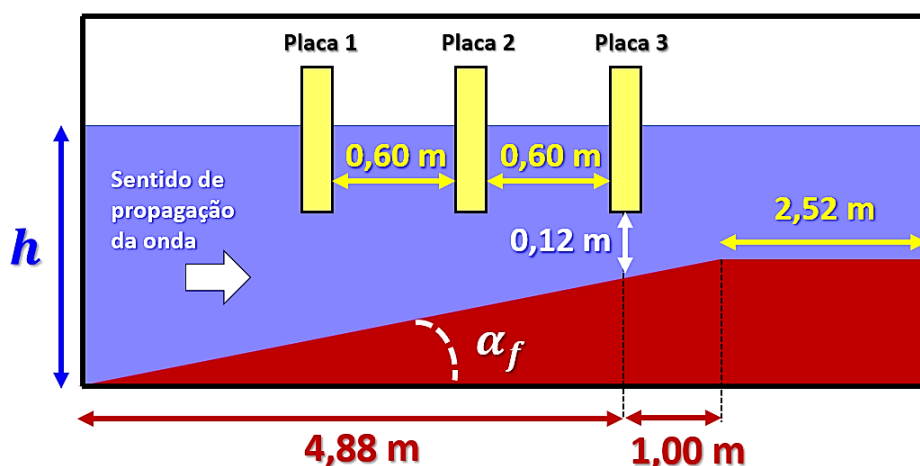


Figura 4.30 – Detalhamento das características do domínio utilizado na análise da influência da declividade de fundo sobre a hidrodinâmica de 3 conversores dispostos em série

Visando a identificação dos padrões de escoamento existentes nos casos estudados, realizou-se uma análise nos campos de velocidade associado às inclinações de $7,50^\circ$, $15,00^\circ$ e $20,00^\circ$, os quais podem ser observados na Figura 4.31. Esta, por sua vez, demarca dois instantes distintos, onde o primeiro representa o momento em que uma crista de onda passa pela região das placas, enquanto o segundo corresponde ao instante em que uma nova crista de onda se aproxima da placa 1, logo após a passagem de uma cava de onda.

Nesta figura, é possível identificar que os padrões de escoamento são bastante similares, considerando cada uma das declividades em ambos instantes demonstrados. Também observa-se que a região entre as placas 2 e 3 é aquela que está sujeita a uma maior turbulência e concentração de velocidades, de tal maneira que a terceira placa é aquela que experimenta maiores intensificações de velocidade. Os maiores valores de magnitude de velocidades atingidos são observados para o caso de $\alpha_f = 15,00^\circ$, ao passo que, em $\alpha_f = 20,00^\circ$, são observados os maiores vórtices formados na parte inferior das placas.

Uma análise realizada nos valores RMS das amplitudes angulares e das velocidades angulares das placas, bem como das forças horizontais e verticais experimentadas por estas estruturas

(Figura 4.32), demonstra que o comportamento hidrodinâmico associado é bastante complexo, uma vez que as curvas obtidas para cada uma delas não seguem um padrão bem definido.

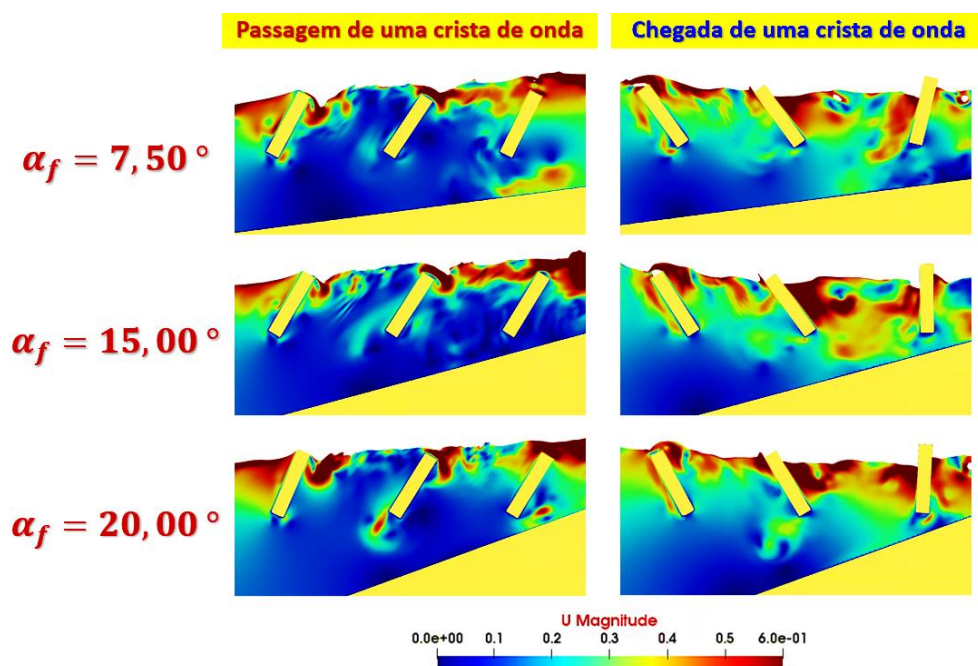


Figura 4.31 – Campos de escoamento observados em dois instantes distintos da dinâmica de 3 OWSC's iguais dispostos em série, considerando as declividades de fundo de 7,50°, 15,00° e 20,00°

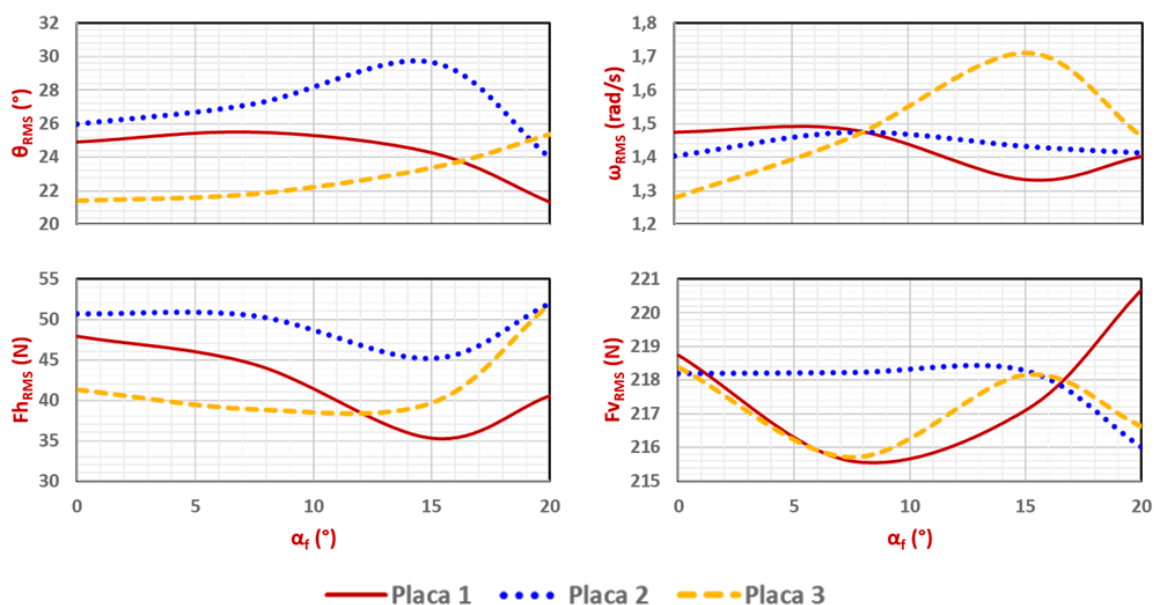


Figura 4.32 – Valores RMS obtidos para a amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e força vertical, considerando a ação de três placas iguais dispostas em série, sob o efeito da variação da declividade de fundo

As curvas dispostas na Figura 4.32 demonstram que a placa 2 é aquela que experimenta os maiores valores de amplitude angular e de força horizontal, demonstrando que as influências

laterais das placas 1 e 3 são favoráveis ao seu comportamento oscilatório. A placa 1, por outro lado, é a estrutura que recebe a ação direta da onda incidente. Sua amplitude angular, velocidade angular e força horizontal tendem a diminuir com o aumento da declividade, atingindo valores mínimos em declividades próximas a 15° . A placa 3 apresenta um comportamento crescente da amplitude angular, da velocidade angular e da força horizontal para declividades superiores a 8° , atingindo sua máxima velocidade angular em $\alpha_f = 15^\circ$. Este comportamento sugere que as grandes magnitudes de velocidade experimentadas pela placa 3 (conforme observado na Figura 4.31) são favoráveis à dinâmica desta estrutura. As forças verticais sobre as placas 1 e 3 tendem a diminuir nos casos de declividades de até 10° , ao mesmo tempo em que o valor experimentado pela placa 2 permanece praticamente constante até uma declividade próxima de 15° .

Por meio de uma análise realizada nos valores RMS dos momentos de excitação, dispostos na Figura 4.33, é possível concluir que esta propriedade tende a diminuir com o aumento da declividade de fundo, atingindo seu valor mínimo próximo a $\alpha_f = 15,00^\circ$, este mesmo comportamento pode ser observado na curva da potência total captada (demonstrada na mesma figura). Por outro lado, a curva de potência captada, presente na mesma imagem, demonstra que, em declividades inferiores a 5° , tanto a placa 1 quanto a placa 2 tendem a produzir quantidades de energia similares.

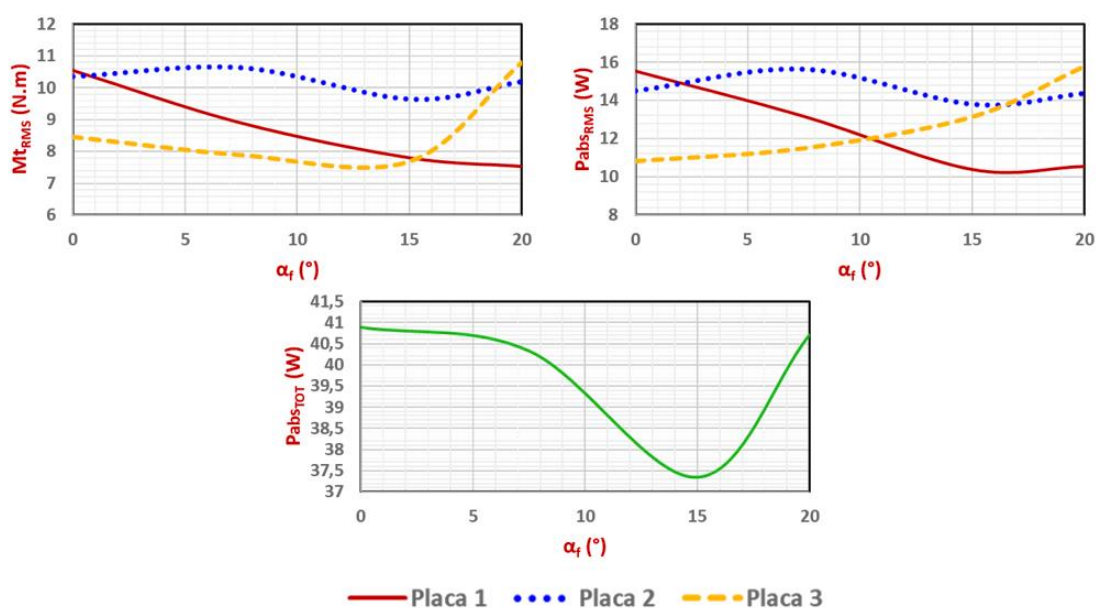


Figura 4.33 – Valores RMS do momento de excitação e da potência captada por três placas iguais associadas em série, bem como a estimativa da potência total absorvida pelo sistema, diante do efeito da variação da declividade de fundo

É bastante importante ressaltar que, tendo em vista os resultados apresentados nas Figuras 4.32 e 4.33, a influência hidrodinâmica decorrente da variação da declividade de fundo sobre as três placas é bastante complexa, envolvendo efeitos associados à turbulência ocasionada e de intensificação das magnitudes de velocidade nos entornos das placas. Além disto, a existência de uma declividade no relevo também altera a distância, em relação ao fundo, de cada estrutura, que, somada ao comportamento de empolamento de onda, resultará em uma superposição de efeitos de escoamento, influenciando significativamente a geração de energia dos conversores. O estudo aqui presente sugere que o aumento da declividade de fundo esteja associado a uma diminuição da energia captada pelo sistema. Porém, para serem obtidas conclusões mais claras e assertivas sobre a variação da declividade, seria necessário excluir a ação de uma placa sobre a outra, ou seja, estudar a influência desta variável sobre uma única placa somente.

4.5.5 Influência de ondas estacionárias geradas por reflexão

Na análise dos efeitos hidrodinâmicos decorrentes da ação de uma onda estacionária, são adotadas posições fixas de placa (as mesmas consideradas na seção 4.4) e valores constantes de profundidade ($h = 0,48 \text{ m}$), altura ($H = 0,10 \text{ m}$) e período de onda ($T = 1,90 \text{ m}$).

A ocorrência da onda estacionária se dá em função da instalação de uma parede (anteparo) no final do domínio em uma região “R” (à direita), a qual é responsável por refletir a onda incidente. Tendo em vista esta condição, são adotados quatro casos principais para avaliar a influência das ondas estacionárias: saída livre (Caso 1), parede vertical (Caso 2), parede com inclinação de 45° (Caso 3) e parede em forma de 1/4 de círculo (Caso 4). Um resumo dos casos estudados e da configuração do domínio é apresentado na Figura 4.34.

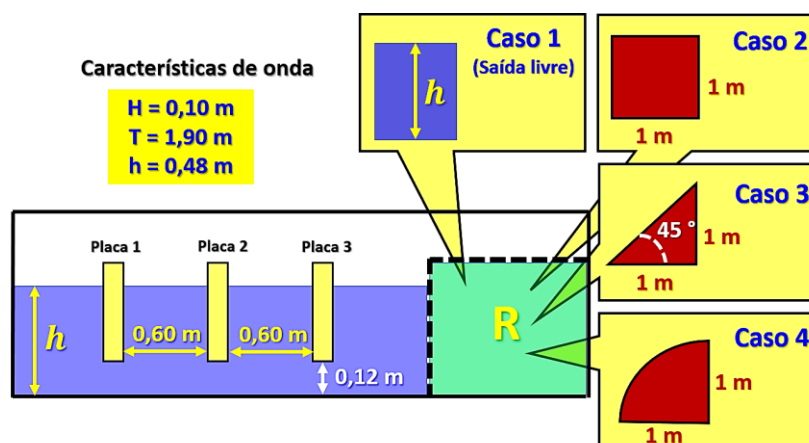


Figura 4.34 – Detalhamento do domínio e dos casos de estudo considerados na análise do efeito de ondas estacionárias sobre a hidrodinâmica de três conversores dispostos em série

A geração de uma onda estacionária ideal ocorre no caso de uma reflexão de onda completa, condição esta que é totalmente satisfeita quando o obstáculo localizado a jusante é uma parede vertical (Caso 2). Desta forma, a Figura 4.35 demonstra como é o padrão de escoamento observado em casos de ondas estacionárias atuando sobre um sistema composto por três placas iguais e dispostas em série. Visualmente, uma onda estacionária apresenta um movimento de “sobe e desce”, que é caracterizado ora por uma grande crista de onda e ora por uma grande cava. As flechas azuis da figura representam o movimento das massas de água se afastando (para formar a cava da onda), ao passo que as flechas vermelhas indicam a elevação do nível (correspondendo a formação da crista).

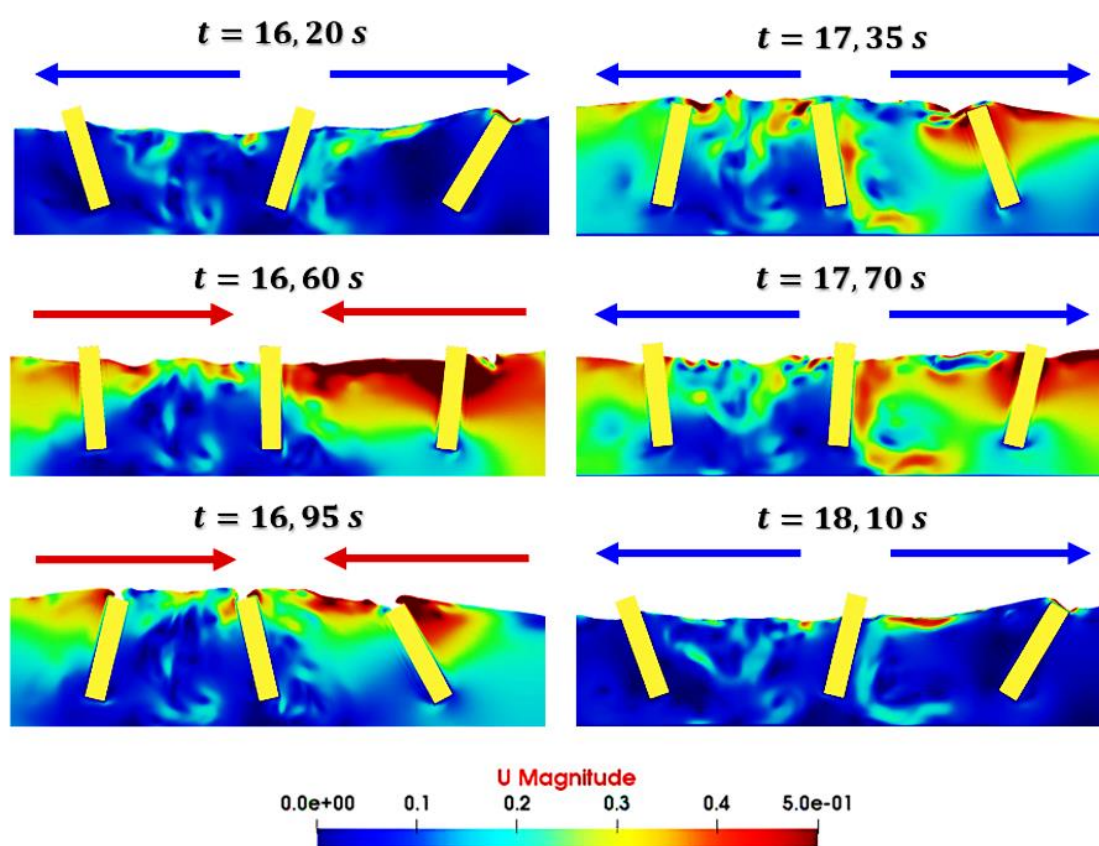


Figura 4.35 – Detalhamento dos campos de velocidade, durante a ação de uma onda estacionária (formada pela reflexão sobre uma parede vertical), no caso de um sistema composto por três placas dispostas em série

A análise da figura anterior permite concluir que, tanto na formação da crista quanto na formação da cava da onda estacionária, é observado uma considerável intensificação dos efeitos turbulentos na região entre as placas, onde se identifica grande vorticidade e recirculação. Também pode ser observado, nesta mesma imagem, que a região entre a placa 2 e a placa 3 é

aquela que está sujeita às maiores magnitudes de velocidade, que podem exercer influências importantes sobre a dinâmica destas estruturas.

Uma nova análise nos campos de velocidade é realizada na Figura 4.36, porém agora comparando as ondas estacionárias ocasionadas nos casos 2 (parede vertical), 3 (parede inclinada a 45°) e 4 (parede no formato de 1/4 de círculo), nos instantes de formação da crista e da cava. Nesta figura, é possível identificar bastante similaridade entre os casos 2 e 3, sendo que as magnitudes de velocidade observadas no caso 2 são levemente mais expressivas. Por outro lado, é possível identificar que as tendências hidrodinâmicas, observadas na formação da crista e da cava, são muito parecidas no caso 4, indicando uma baixa oscilação da placa 1 neste caso.

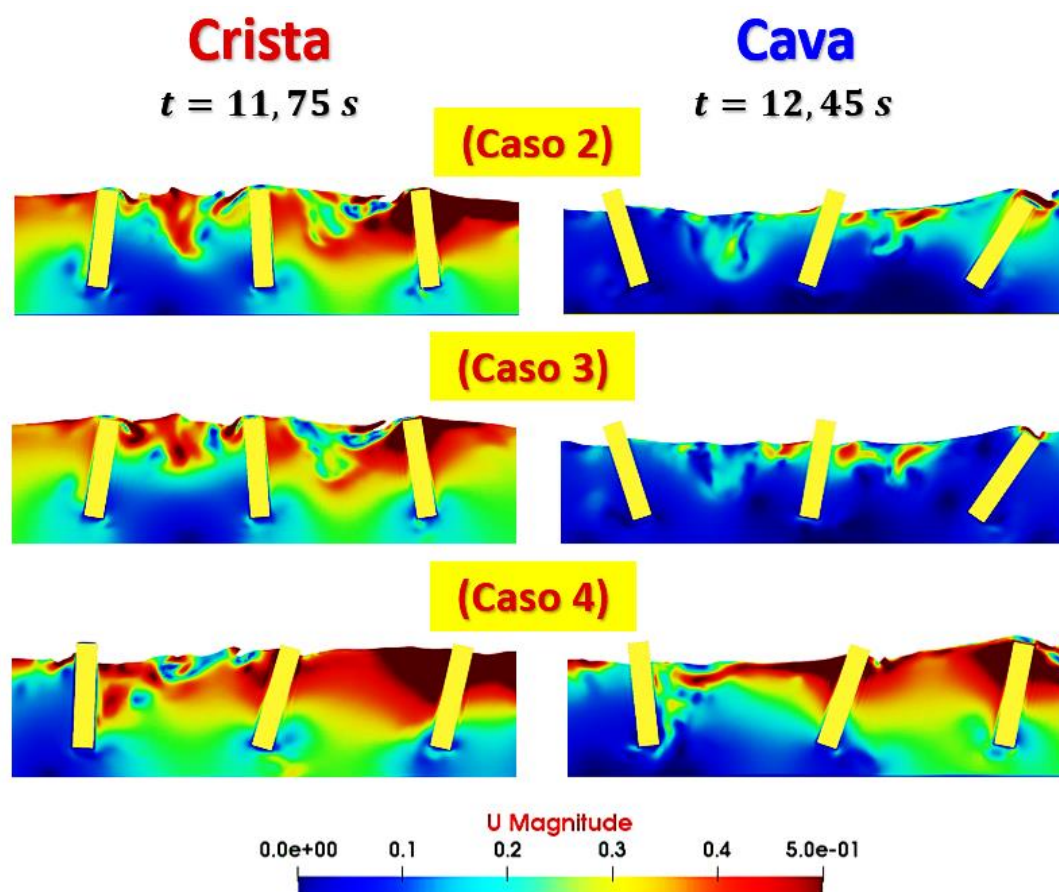


Figura 4.36 Campos de velocidade para três casos diferentes de onda estacionária, nos instantes de formação da crista e da cava de onda, levando em consideração um sistema composto por três placas iguais e dispostas em série

A Figura 4.37 apresenta os valores RMS das amplitudes angulares, velocidades angulares, forças horizontais, forças verticais, momentos de excitação e das potências captadas para os quatro casos analisados neste estudo.



Figura 4.37 Valores RMS da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal, força vertical, momento de excitação e potência captada, considerando a ação de ondas estacionárias sobre um sistema composto por três placas em série.

Uma breve análise nos gráficos e valores dispostos na Figura 4.37 permite concluir que, em todos os casos onde ocorrem ondas estacionárias (casos 2, 3 e 4), são observadas intensificações em todas as variáveis influentes no movimento oscilatório, sendo estas maiores que no caso 1, que corresponde a um fluxo livre sem a ocorrência de uma onda estacionária. Nesta figura, também é possível observar que o caso 4, onde é aplicada uma parede curva, corresponde ao caso que, teoricamente, resultará em uma maior captação de energia (representando um aumento de potência de, aproximadamente, 46%, quando comparado ao caso 1). Neste mesmo caso (4), também é observado que todos os valores RMS obtidos para as placas 2 e 3 são muito similares, sugerindo que as mesmas apresentem padrões hidrodinâmicos muito próximos. Isto também é observado nos campos de velocidade do caso 4, dispostos na Figura 4.36, que demonstram que as placas 2 e 3, nos dois instantes mostrados, apresentam praticamente as mesmas amplitudes angulares, indicando que esta configuração coloca o movimento oscilatório destas duas placas em fase.

4.6 ESTUDO DO ESPAÇAMENTO ENTRE PLACAS NO PLANO

Esta etapa do trabalho, é estudada por meio da aplicação do modelo de LES bidimensional. Nela são mantidas as mesmas dimensões do domínio, bem como as mesmas condições de geometria placa, de profundidade, de altura e de período de onda do estudo apresentado na seção 4.4.

Buscando avaliar a influência da distância entre as placas (em vista lateral) sobre a hidrodinâmica dos conversores, foram idealizadas 14 combinações distintas de espaçamento entre as estruturas. Tais distâncias foram propostas em termos da altura de placa (h_p) e levaram em consideração que todas as estruturas se encontram alinhadas em planta. A Figura 4.38 apresenta de forma concisa todos os casos de estudo realizados nesta etapa.

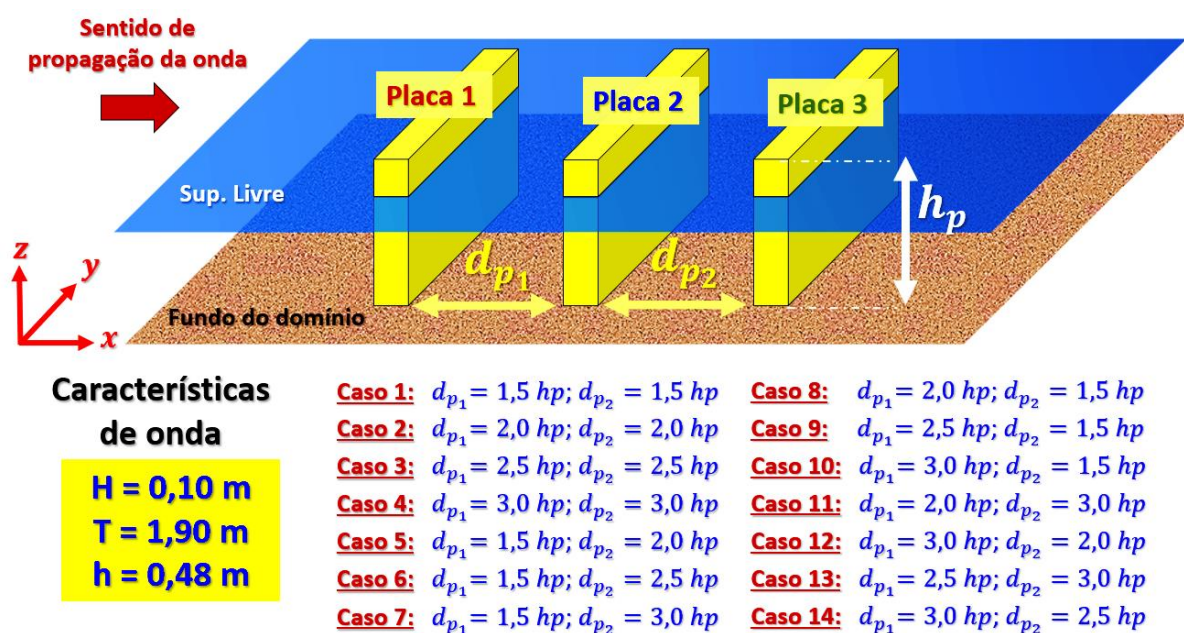


Figura 4.38 – Casos de análise realizados na etapa do estudo do espaçamento entre placas no plano

Nesta etapa, o interesse principal está voltado para o espaçamento entre placas que irá fornecer a maior potência captada, devendo este ser adotados nos projetos dos parques de OWSC's. Desta forma, no intuito de comparar todos estes casos de estudo entre si, adotou-se como parâmetro de análise o valor eficaz (RMS), o qual foi aplicado sobre as variáveis mais influentes na hidrodinâmica dos conversores (amplitude angular, velocidade angular, força horizontal, força vertical, momento de excitação e potência captada). Após serem identificados os casos

mais favorável e menos favorável à geração de energia, realizou-se uma comparação entre os campos de velocidade dos mesmos, para identificação dos padrões de escoamento.

Uma análise baseada nos valores RMS das amplitudes angulares atingidas demonstra que as maiores amplitudes angulares são experimentadas pela placa 2 (central), na grande maioria dos casos de estudo. Por outro lado, as menores amplitudes tendem a ocorrer para a placa 3, conformando uma das conclusões levantadas em seções anteriores, de que a maior parte da energia disponível da onda incidente é absorvida pela placa frontal, ao passo que, grande parte da energia restante, é absorvida pela placa 2 e outra dissipada nos processos turbulentos observados na região entre placas, resultando em uma menor quantidade de energia disponível para ser aproveitada pela placa 3. Esta análise também fornece que a condição de espaçamento inicial (caso 1) é aquela que apresenta a maior soma de amplitudes angulares, indicando que esta é a configuração mais favorável para que o sistema atinja as maiores amplitudes angulares. Todas estas conclusões podem ser verificadas por meio da análise dos dados dispostos na Figura 4.39.

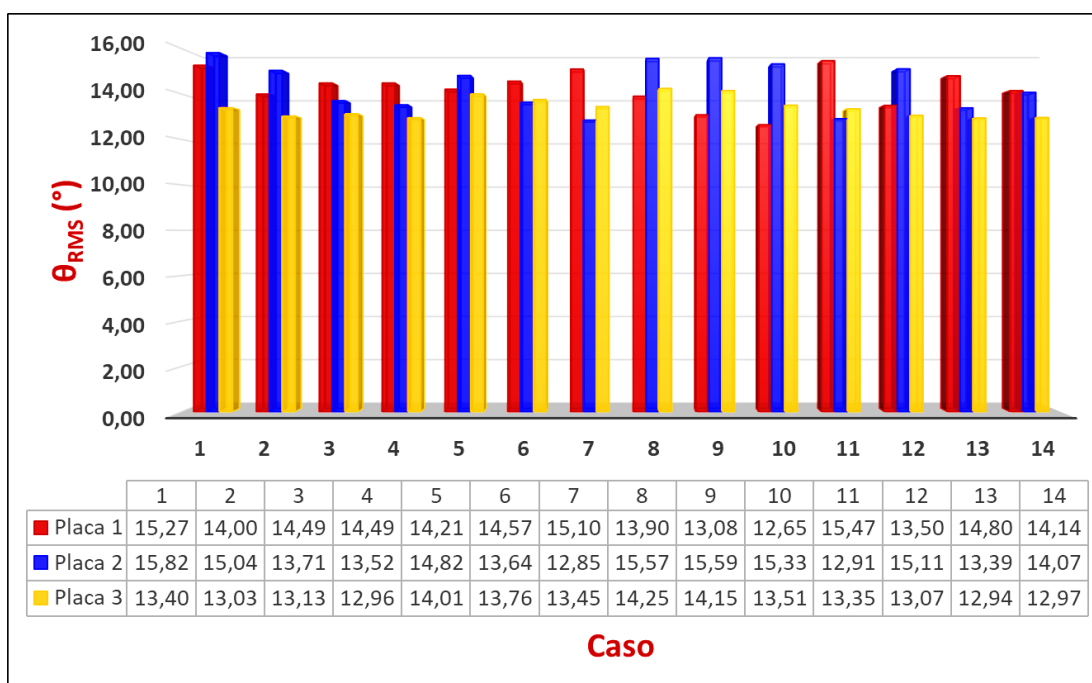


Figura 4.39 – Valor RMS da amplitude angular atingida por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas

Uma análise bastante similar pode ser realizada com base nos valores RMS das velocidades angulares atingidas (Figura 4.40). Nela, também pode ser verificada que as maiores velocidades angulares ocorrem para a placa 2 e as menores para a placa 3, na grande maioria dos casos. As

maiores velocidades angulares novamente são obtidas para o caso 1, entretanto, os casos 5 e 8 também apresentam valores RMS bastante próximos aos do caso 1.

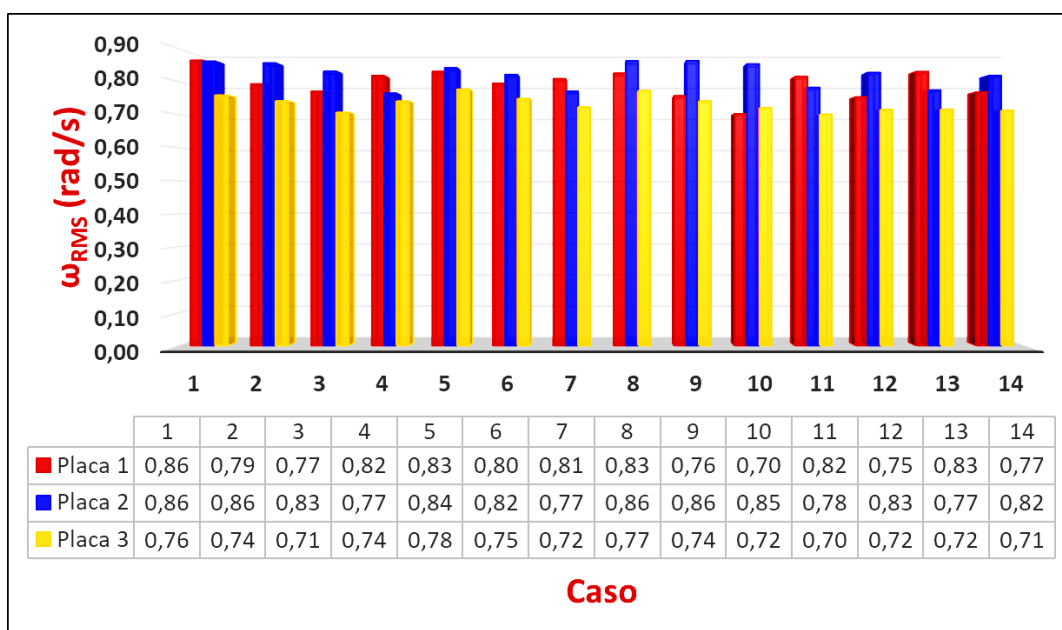


Figura 4.40– Valor RMS da velocidade angular atingida por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas

As Figuras 4.41 e 4.42 apresentam, respectivamente, os valores RMS obtidos para as forças horizontais e para as forças verticais das placas. Na primeira figura, é possível identificar que a maior força horizontal também é experimentada pela placa 2, ao passo que o caso 8 é aquele que resulta na melhor configuração para potencializar as forças horizontais. Por outro lado, por meio da análise dos dados dispostos na Figura 4.42, observa-se que as forças verticais medidas estão situadas entre 223 N e 226 N, o que representa uma diferença relativa menor que 2,00%. Desta forma, as variações ocorridas nas forças verticais entre os casos são desprezíveis.

Os maiores momentos de excitação são experimentados pela configuração apresentada no caso 5, na qual as três placas apresentam valores bastante próximos. De forma similar, a configuração inicial (caso 1), também apresenta uma condição parecida, porém com menor momento de excitação experimentado pela placa 3. Estas conclusões podem ser confirmadas por meio dos dados dispostos na Figura 4.43.

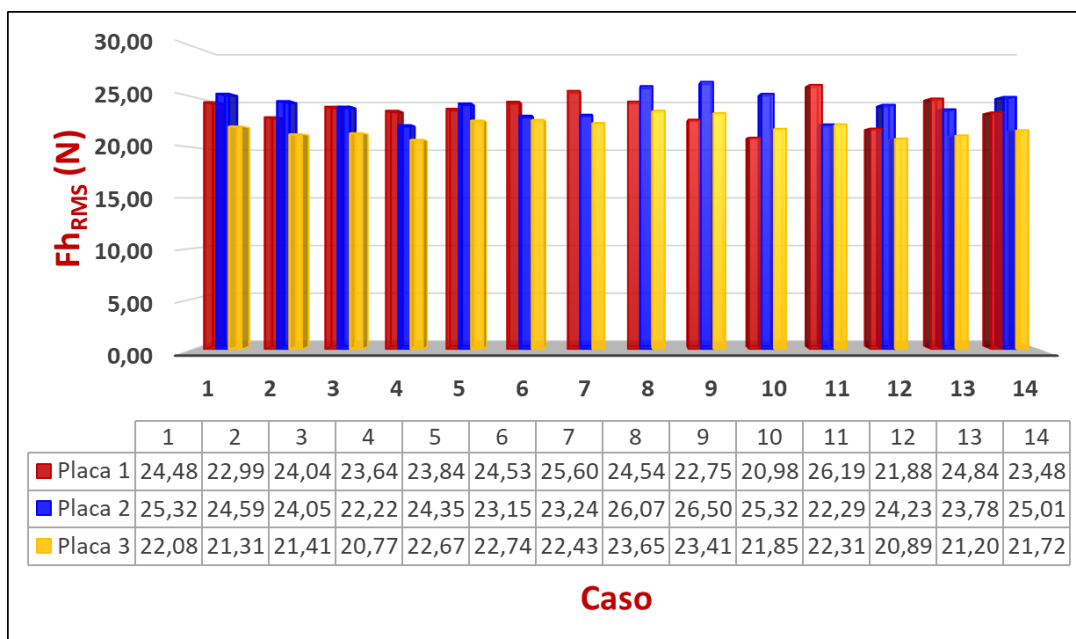


Figura 4.41– Valor RMS da força horizontal atingida por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas

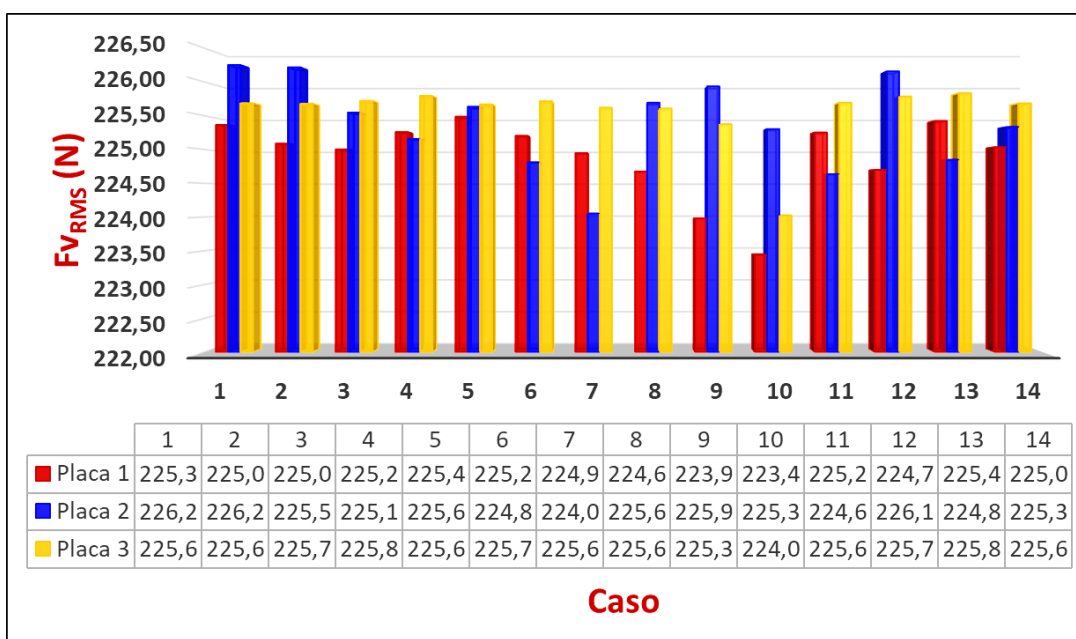


Figura 4.42– Valor RMS da força vertical atingida por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas

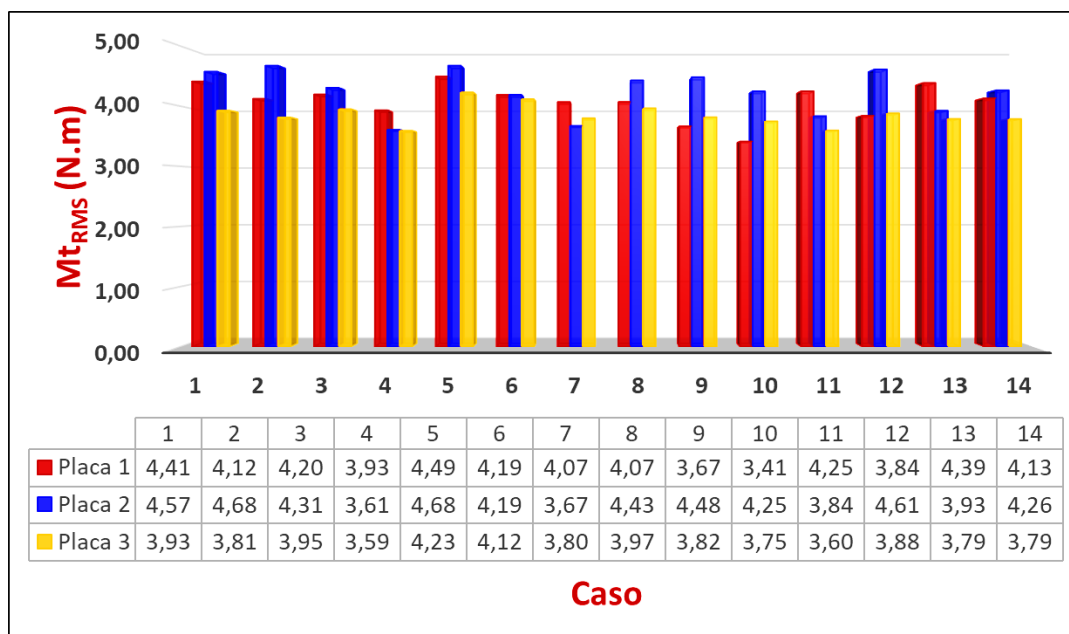


Figura 4.43– Valor RMS do momento de excitação atingido por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas

Conforme pode ser observado na Figura 4.44, a maior potência captada, em qualquer configuração, ocorre para a placa central, indicando, mais uma vez, que os efeitos de escoamento que ocorrem entre as placas são responsáveis por favorecer a hidrodinâmica da placa 2. Ainda na mesma figura, é possível identificar que os casos 5 e 1 são, nessa ordem, aqueles que fornecem os maiores valores de potência captada, ao passo que os menores valores desta variável ocorrem para o caso 4, em razão das baixas amplitudes demonstradas no gráfico de barras.

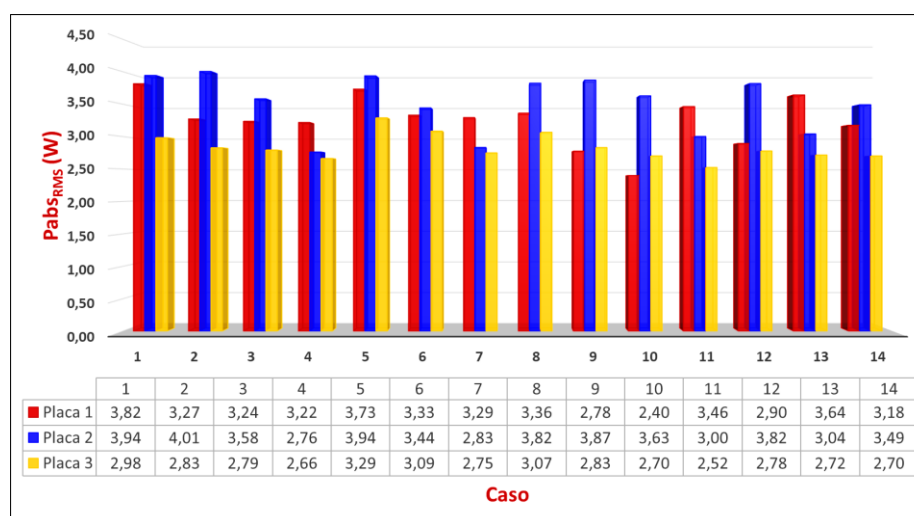


Figura 4.44– Valor RMS da potência captada por um sistema composto por 3 placas iguais em série, considerando 14 condições diferentes de espaçamento entre placas

Por fim a potência total captada por cada um dos casos é calculada e apresentada na Figura 4.45. Nela é possível identificar que a maior potência ocorre para o caso 5, cuja configuração de espaçamento resulta em 10,96 W, enquanto a menor potência total captada é observada para o caso 4, cujo valor é de 8,64 W (21,2% inferior ao do caso 5). Entretanto, é importante salientar que o caso inicial (caso 1) apresenta uma potência total captada próxima de 10,74 W (apenas 2% menor que aquela obtida para o caso 5).

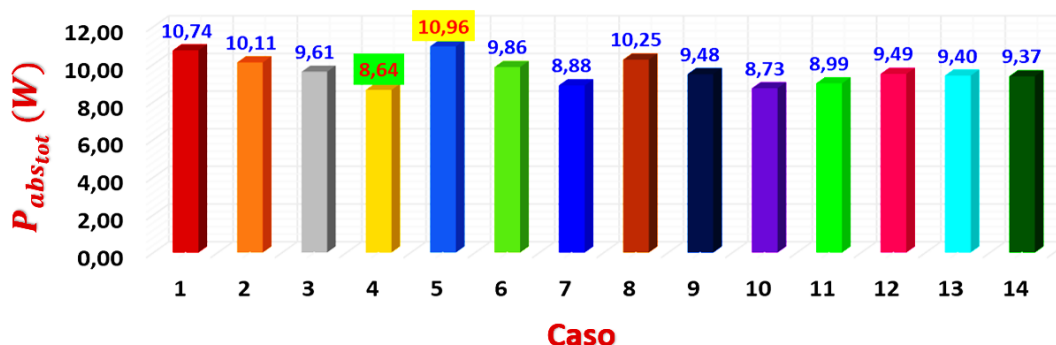


Figura 4.45 – Potência total captada teórica obtida em cada caso de espaçamento entre placas no plano

Assim, levando em consideração todas as análises realizadas com base nos valores RMS, constata-se que o espaçamento ideal recomendado é aquele que resulta em uma distância de $1,5h_p$ para a distância entre as placas 1 e 2, e de $2h_p$ para o espaçamento entre as placas 2 e 3 (Caso 5). Por outro lado, um espaçamento fixo de $1,5h_p$ entre todas placas (Caso 1), também resulta em valores bastante satisfatórios e próximos aos obtidos para o caso 5.

Uma última análise desta etapa é realizada por meio da comparação entre os campos de escoamento, considerando os casos 1 (caso padrão, com valor de potência total bastante próxima do caso 5), 4 (menor valor de potência obtida) e 5 (maior potência captada) durante a passagem de uma crista de onda sobre os conversores. Estes campos de escoamento são apresentados na Figura 4.46, onde é possível identificar muita semelhança entre os campos dos casos 1 e 5. Porém, observa-se que, em relação ao caso 5, no momento em que a onda chega na placa 1, a região entre as placas 2 e 3 fica sujeita a uma intensificação na magnitude de velocidades, ao passo que o mesmo não ocorre no caso 1. Por outro lado, a magnitude de velocidades atingida nos entornos das placas parece ser mais expressiva no caso 1.

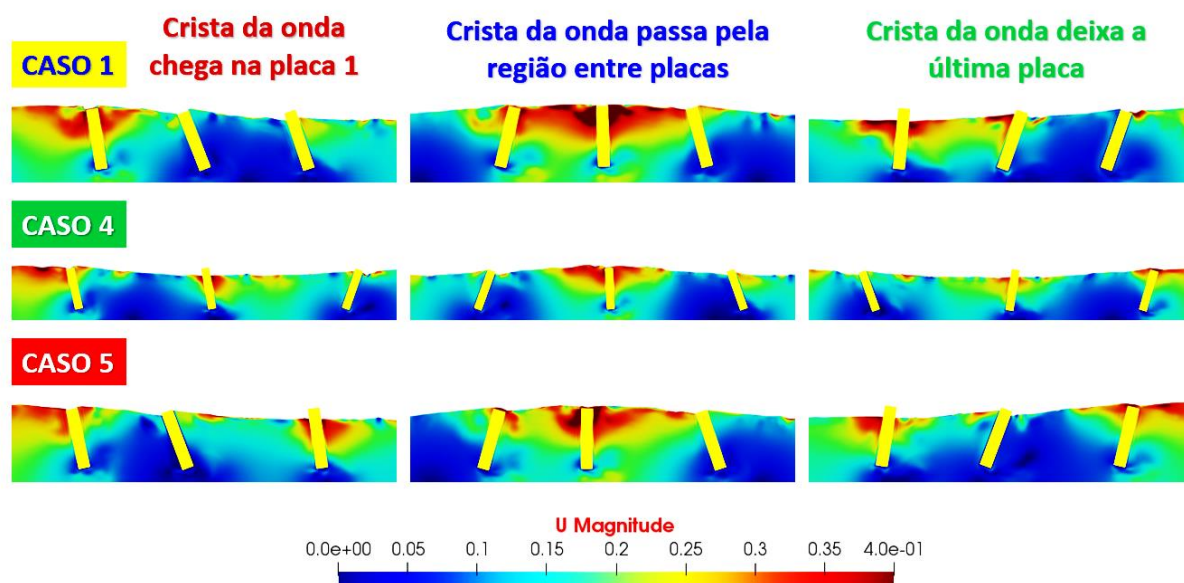


Figura 4.46 – Campos de velocidade observados nos caso de espaçamento entre placas 1, 4 e 5, durante a passagem de uma crista de onda sobre um sistema composto por 3 OWSC's dispostos em série

4.7 ESTUDO DO ESPAÇAMENTO ENTRE PLACAS NO ESPAÇO

Buscando complementar o estudo do espaçamento entre placas realizados no plano (em termos da vista lateral, no plano xz do domínio), descrito na seção 4.6, a presente etapa de trabalho é focada na análise do espaçamento entre placas no espaço (em termos da vista superior do domínio, no plano xy). Sendo assim, o principal objetivo desta etapa consiste em investigar e identificar se o espaçamento lateral promoverá uma intensificação no movimento oscilatório dos conversores, favorecendo, assim, o potencial de geração de energia do sistema. Tal estudo é realizado por meio da aplicação do modelo WALE tridimensional, validado previamente.

Nestas análises, as características geométricas das placas, as condições de onda (altura, período e profundidade) e a extensão do domínio são as mesmas daquelas aplicadas no estudo da seção 4.4. Por outro lado, a altura do domínio é modificada para 1,60 m e sua largura varia conforme o espaçamento lateral adotado entre as placas, como pode ser observado na Figura 4.47, onde estão apresentados os dois casos avaliados nesta etapa. O espaçamento do segundo caso ($d_p = 1,5h_p$) foi inspirado pelos resultados obtidos nos estudos da seção 4.6, de onde identificou-se que este valor é um dos espaçamentos responsáveis por promover um considerável aumento na potência captada pelo sistema.

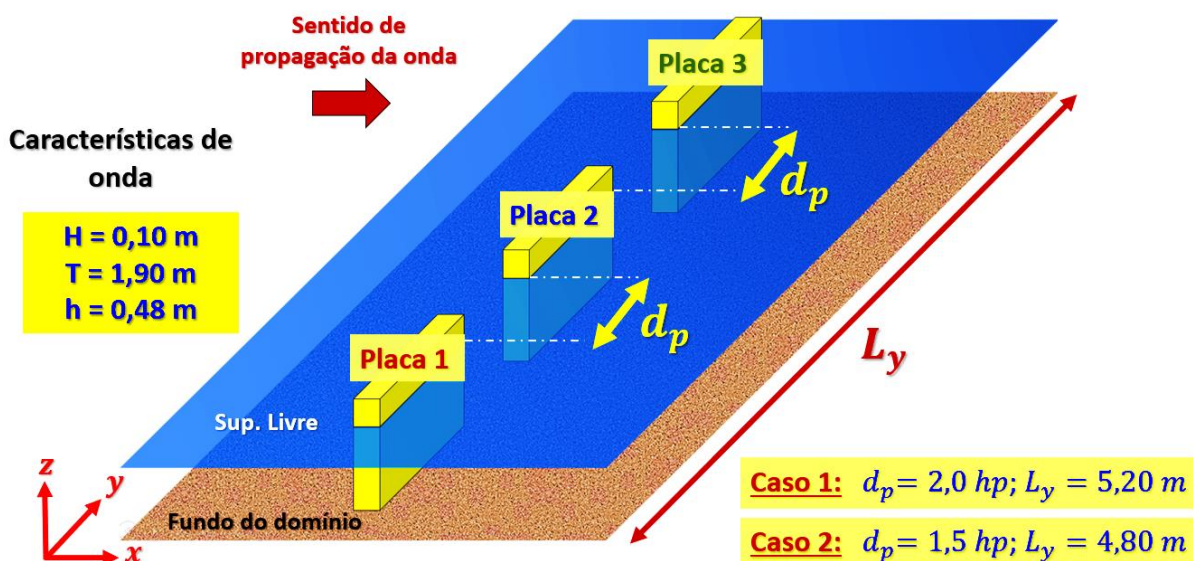


Figura 4.47 – Casos de estudo realizados na etapa da análise do espaçamento entre placas no espaço

É importante destacar que o presente estudo busca mapear e estabelecer qual o espaçamento lateral favorece a geração de energia dos conversores, no caso de diversas placas alinhadas lado a lado, ao longo da direção do eixo y (segundo a orientação disposta na Figura 4.47). Este espaçamento consiste no ponto de partida para uma posterior avaliação de diferentes *layouts* entre as placas.

Como demonstrado pelos gráficos e valores dispostos na Figura 4.48, o caso 2 é aquele em que as três placas apresentam valores RMS de amplitude angular e velocidade angular bastante próximos. Por outro lado, o caso 1 apresenta uma potencialização dos valores RMS associados a placa 2. Este mesmo padrão é observado para os valores RMS das forças horizontais e dos momentos de excitação (Figura 4.49). Desta forma, o caso 2 apresenta condições mais favoráveis à geração de energia.

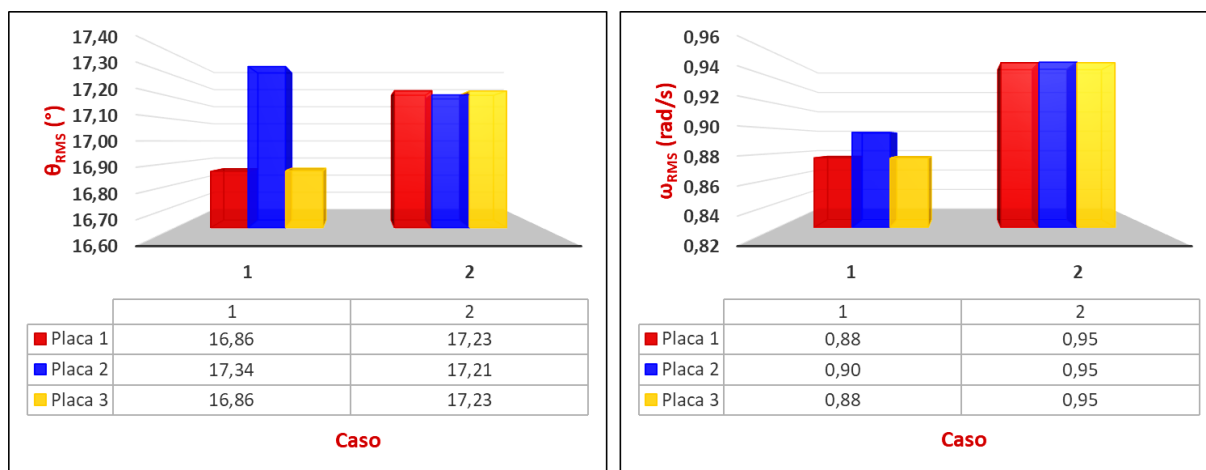


Figura 4.48 – Valores RMS das amplitudes angulares e velocidades angulares atingidas pelas placas, nos dois casos de distanciamento tridimensional estudados

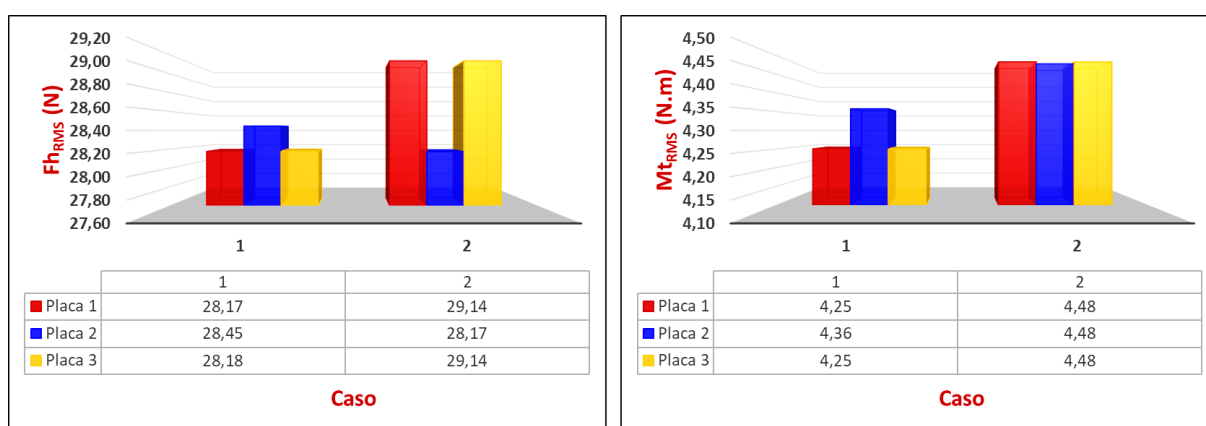


Figura 4.49 – Valores RMS das forças horizontais e momento de excitação atingidos pelas placas, nos dois casos de distanciamento tridimensional estudados

A potência captada por cada placa, considerando as duas configurações estudadas, é apresentada na Figura 4.50. Nela é possível observar que o segundo caso resulta numa potência captada aproximadamente igual para as três placas, o que, além de indicar padrões similares de comportamento, também resulta em uma potência total captada pelo sistema 13% superior que a potência total observada para o caso 1. Desta maneira, conclui-se que a distância lateral considerada ideal, em termos da vista superior (plano xy), é aquela com dimensão igual a 1,5 vezes a altura das placas (caso 2).

Na Figura 4.51, são apresentados os campos de velocidade, referentes ao caso 2, associados aos instantes que demarcam a passagem de uma crista de onda pela fileira onde estão instaladas as três estruturas dos OWSC's. Uma breve análise realizada nestes campos, permite concluir que as magnitudes de velocidade experimentadas nos entornos das placas são bastante similares em todas elas, resultando em comportamentos hidrodinâmicos parecidos e em fase.

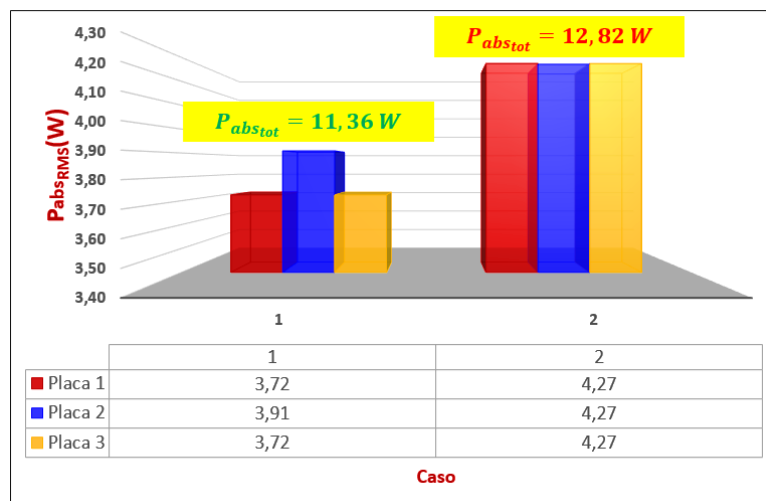


Figura 4.50 – Valor RMS das potências captadas, bem como estimativa da potência total captada, nos dois casos de distanciamento tridimensional estudados

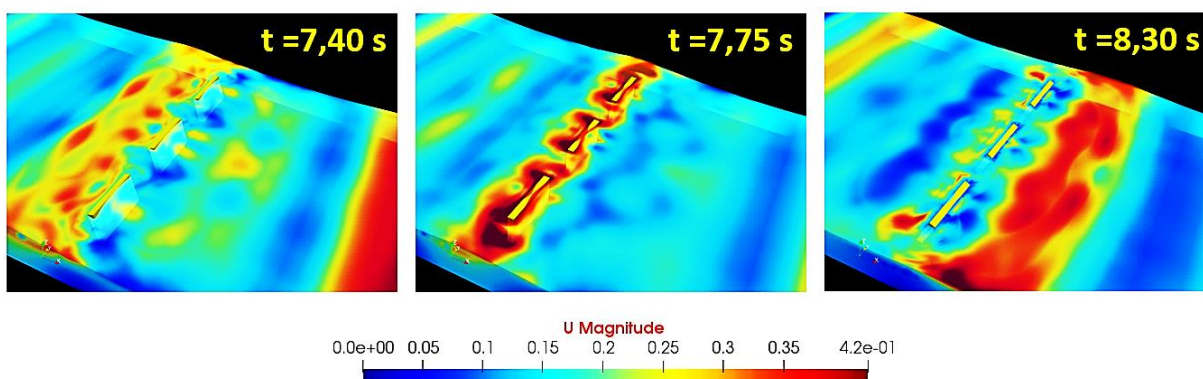


Figura 4.51 – Campo de velocidades observado durante a passagem de uma crista de onda sobre uma fileira composta por 3 OWSC's iguais

4.8 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES LAYOUTS DE PLACAS NO ESPAÇO

Uma vez determinada e adotada a distância lateral ideal entre as placas (em termos da vista superior do domínio), faz-se necessário estudar qual configuração de *layout* no espaço é aquela responsável por intensificar os comportamentos oscilatórios das estruturas, estando, portanto, associada a uma maior potência captada pelo sistema.

Nesta análise, foram consideradas as mesmas condições de geometria de placa e características de onda que aquelas adotadas na seção 4.7, da mesma forma que o modelo WALE 3D é novamente aplicado. Entretanto, a extensão e a largura do domínio podem variar em função do

caso analisado, como pode ser observado nas Figuras 4.52, 4.53, 4.54 e 4.55, que apresentam todos os casos de estudo desta etapa do trabalho.

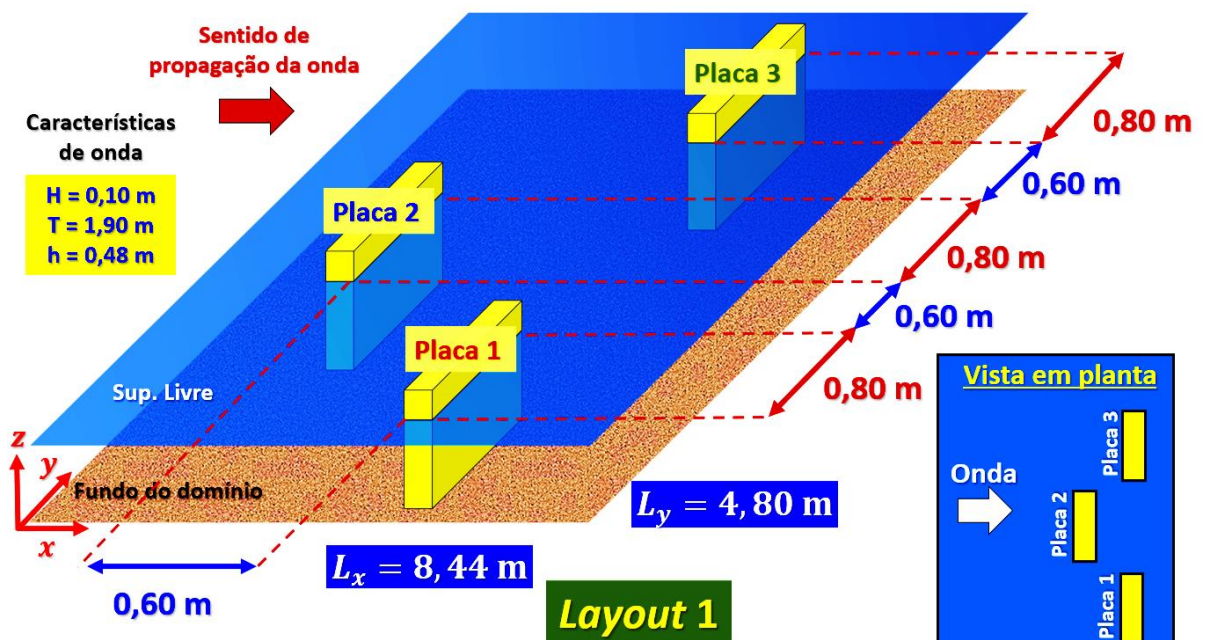


Figura 4.52 – Configuração do domínio e características aplicadas no *Layout 1* de três OWSC's

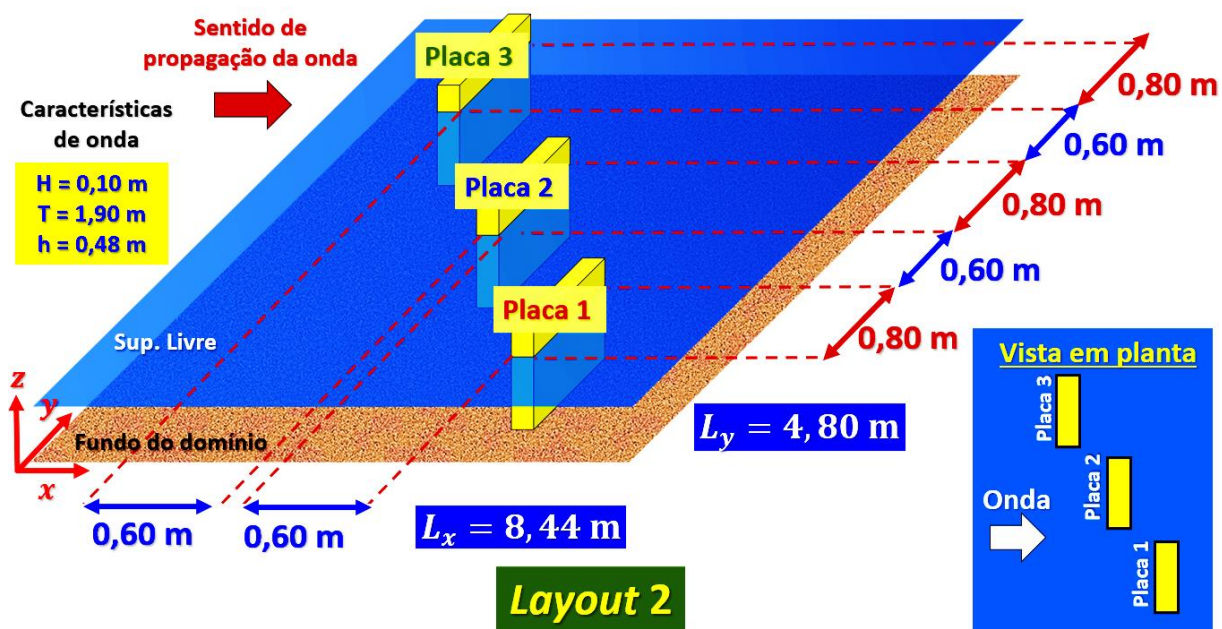


Figura 4.53 – Configuração do domínio e características aplicadas no *Layout 2* de três OWSC's

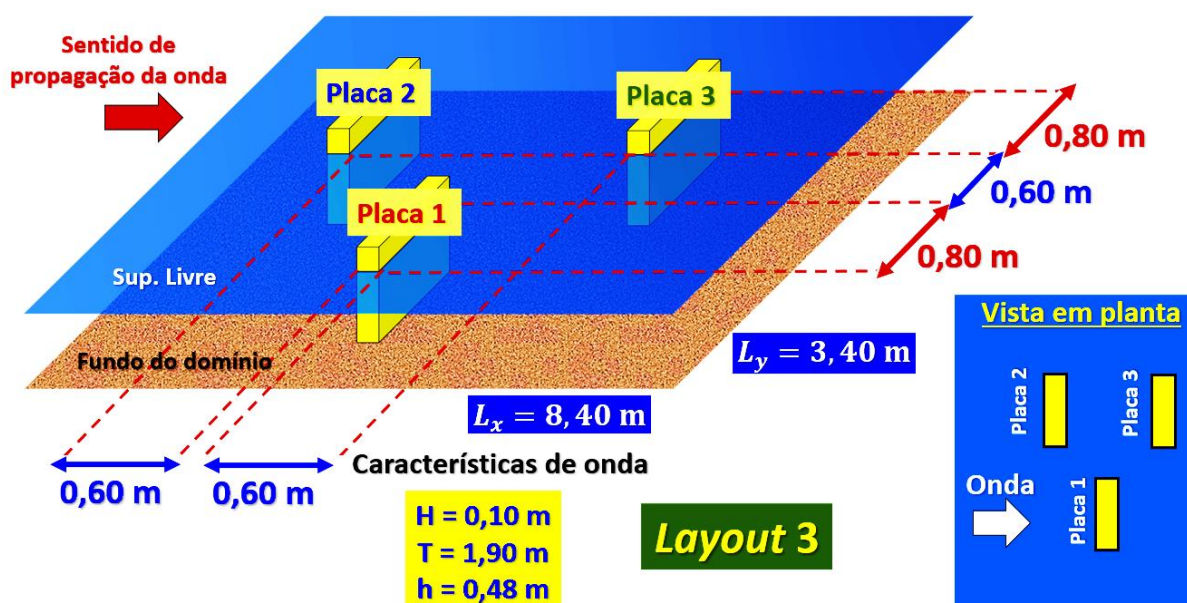


Figura 4.54 – Configuração do domínio e características aplicadas no *Layout 3* de três OWSC's

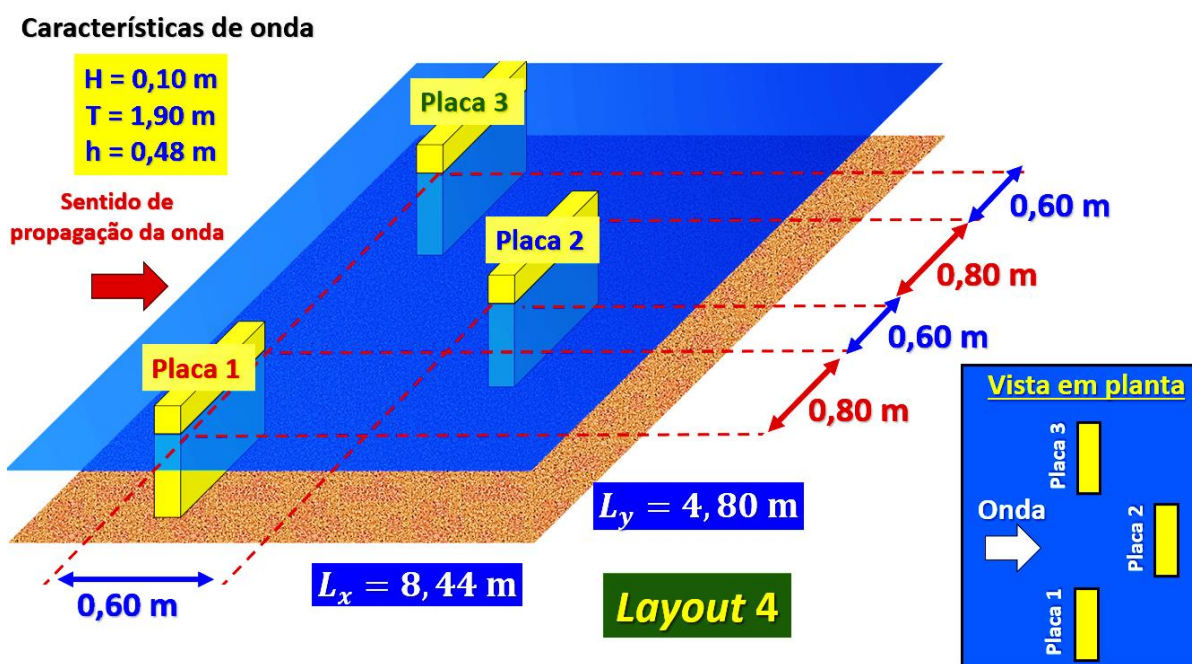


Figura 4.55 – Configuração do domínio e características aplicadas no *Layout 4* de três OWSC's

Uma análise baseada nos valores RMS das amplitudes angulares, velocidades angulares, forças horizontais e momentos de excitação é apresentada na Figura 4.56 (os valores RMS das forças verticais foram omitidas deste estudo, pois apresentaram variações inferiores a 1,20% entre o maior e o menor valor observado, indicando que esta variável é praticamente constante em todos estes casos, não sendo um parâmetro chave para a hidrodinâmica dos conversores).

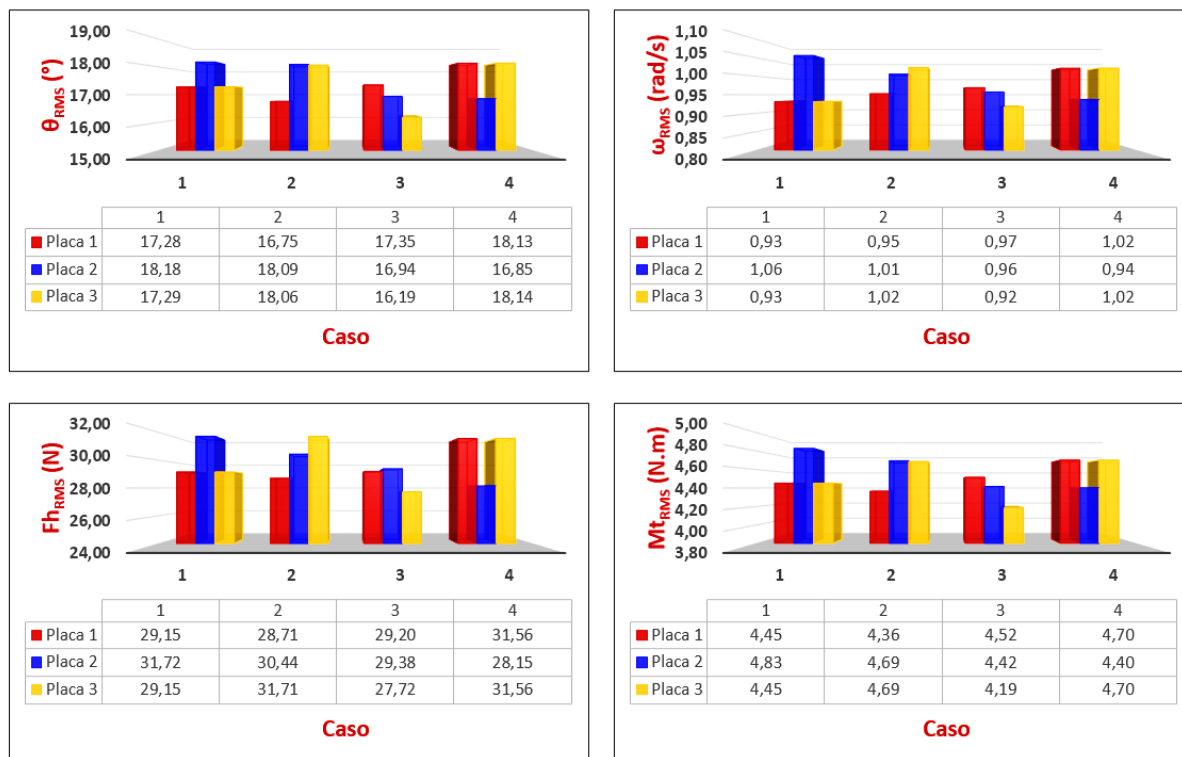


Figura 4.56 – Valores RMS das amplitudes angulares, velocidades angulares, forças horizontais e momentos de excitação experimentados pelas 3 placas em 4 *layouts* distintos

Da figura anterior, observa-se, primeiramente, que o *layout* 4 é aquele onde estão os maiores valores atingidos pelas variáveis em questão. Logo em seguida, o *layout* 2 também demonstra que os valores RMS atingidos neste arranjo se equiparam àqueles do *layout* 4. Por outro lado, os menores valores atingidos são observados para o *layout* 3, sugerindo que esta configuração seja a menos favorável para potencialização da energia captada pelo sistema. Ainda na Figura 4.56, pode ser identificada uma característica comum a todos os casos: os menores valores atingidos sempre se referem às placas localizadas mais a jusante. Tal fato conforma uma das conclusões levantadas nas seções anteriores, que relaciona esta perda de oscilação aos efeitos turbulentos ocasionados pelas placas à montante e à dissipação de energia associada.

A Figura 4.57 apresenta o valor RMS da potência captada pelas placas em todos os casos de *layout* propostos. Tais resultados apenas conformam as conclusões levantadas acerca dos valores RMS da Figura 4.56, de que o *layout* 4 é aquele que mais favorece a intensificação da potência captada pelo sistema, seguido do *layout* 2, que apresenta uma potência total captada bastante próxima do *layout* ideal. Efetuando uma comparação da potência total captada pelo *layout* 4 com aquela observada para o caso 2 do espaçamento tridimensional (disposta na

Figura 4.50), constata-se que esta disposição arranjada para as placas, resultou em um aumento em torno de 8,00%, em relação ao caso das três placas alinhadas ao longo da direção y. Isto demonstra que estes aspectos devem ser cuidadosamente considerados no projeto de um parque composto por diversos OWSC's, a fim de garantir o melhor desempenho do mesmo na geração de energia elétrica.

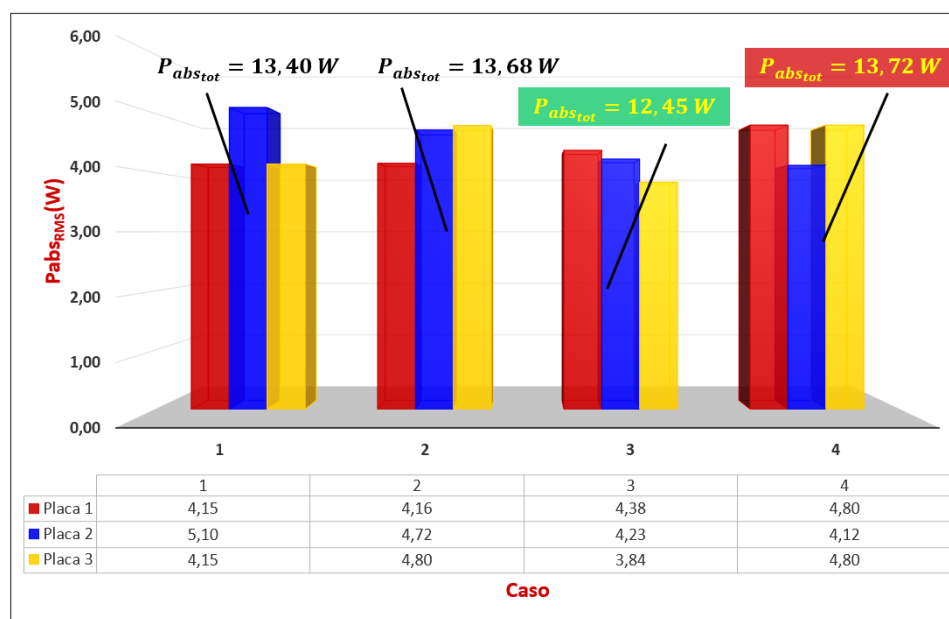


Figura 4.57 – Valor RMS das potências captadas pelas 3 placas em 4 layouts distintos

Uma análise comparativa entre os campos de velocidade (Figura 4.58) referentes aos layouts 3 (configuração mais desfavorável) e 4 (arranjo mais favorável), durante a passagem de uma crista de onda pela região dos conversores, permite concluir que as placas mais a montante, em ambos layouts, são aquelas que experimentam as maiores magnitudes de velocidade. Tal fato pode ser associado aos maiores valores de RMS verificados nas Figuras 4.56 e 4.57. Além disto, também se observa que a turbulência ocasionada nos arredores das placas é mais intensa para layout 3, sugerindo que este efeito dissipativo seja o principal fator que resultou na menor potência total captada para esta configuração.

Ao final, constata-se que o melhor arranjo, a ser adotado em futuros projetos de parques destes dispositivos, deverá seguir o padrão de instalação disposto e apresentado no layout 4. Quando este não for possível, pode-se optar pelo layout 2, que resulta em valores de parâmetros hidrodinâmicos bastante próximos àqueles do layout ideal.

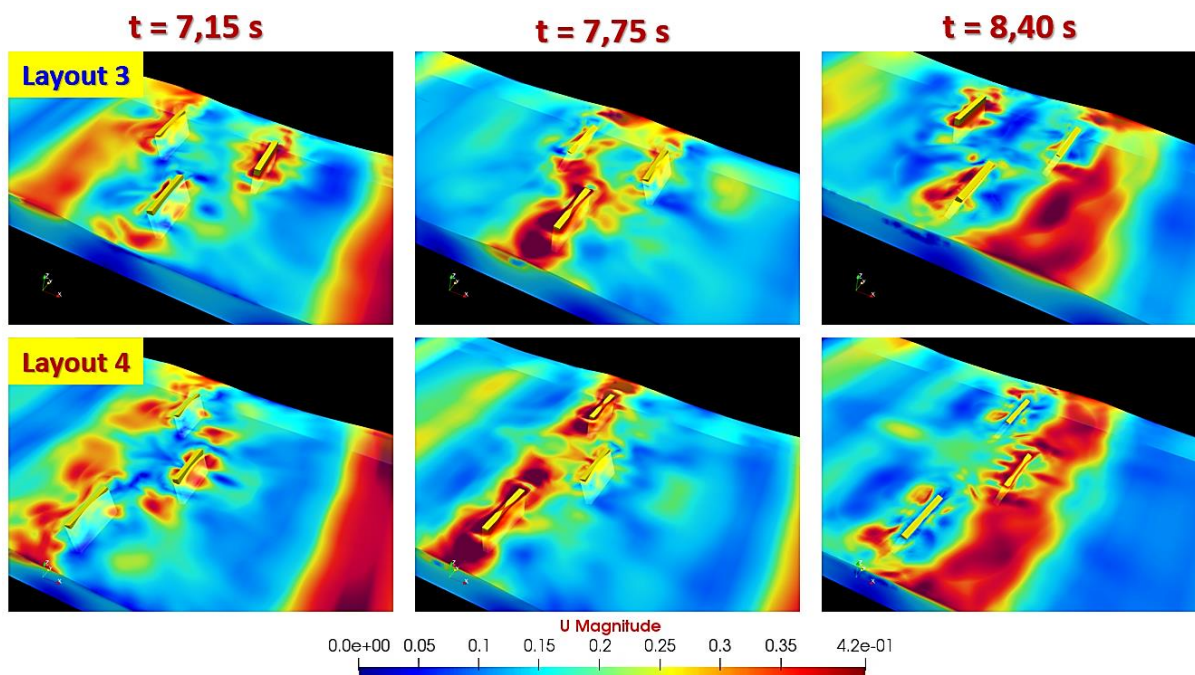


Figura 4.58 – Campos de velocidade observados nos *layouts* 3 e 4, durante a passagem de uma crista de onda

4.9 INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE DE FUNDO SOBRE A HIDRODINÂMICA DE UM ÚNICO OWSC

Levando em consideração os resultados obtidos nas análises realizadas na seção 4.5.4, o presente estudo tem como objetivo fornecer melhores noções acerca do efeito da declividade de fundo, excluindo-se o efeito de outras placas adjacentes. Desta forma, os casos aqui analisados referem-se ao estudo de uma única placa sob a influência da variação da declividade de fundo.

Em todas as análises realizadas nesta etapa foram consideradas as mesmas características de onda e de geometria de placa daquelas aplicadas na seção 4.4. De maneira similar, o modelo WALE bidimensional foi aplicado em todos os casos do estudo. O detalhamento das dimensões da placa e das configurações do domínio utilizado é apresentado na Figura 4.59.

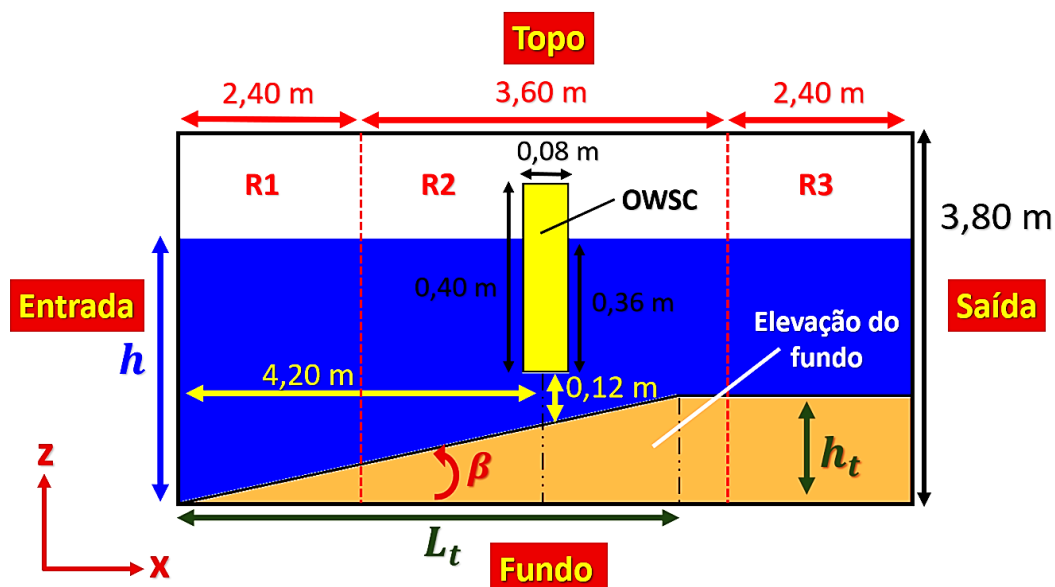


Figura 4.59 – Domínio numérico e características geométricas do OWSC utilizado nas simulações referentes à variação da declividade de fundo (caso de uma placa unitária)

Neste estudo foram considerados sete valores diferentes para a declividade de fundo (β), os quais ocasionam diferentes valores de profundidade h e de elevação do fundo (h_t). Todos os casos encontram-se descritos e organizados na Tabela 4.8.

Caso de estudo	β (°)	h_t (m)	h (m)
1	0,00	0,00	0,48
2	4,75	0,39	0,83
3	9,50	0,79	1,18
4	14,24	1,19	1,55
5	19,00	1,62	1,93
6	23,74	2,07	2,33
7	28,49	2,55	2,76

Tabela 4.8 – Casos de análise no estudo da influência da declividade de fundo sobre a dinâmica de um único OWSC

Os campos de velocidade referentes aos casos 1, 2, 4 e 7, nos instantes de máxima amplitude angular nos sentidos *landward* e *seaward*, são mostrados na Figura 4.60. Nela, se observam que as máximas amplitudes angulares atingidas, nos dois sentidos, são muito semelhantes em todos os casos. Porém, verifica-se uma intensificação das magnitudes de velocidade à medida que a elevação de fundo aumenta. Nos casos das maiores inclinações do fundo, identifica-se uma intensificação da vorticidade nas proximidades inferiores da placa, da mesma forma que a ocorrência de zonas de recirculação logo abaixo da estrutura no caso de $\beta = 28,49^\circ$.

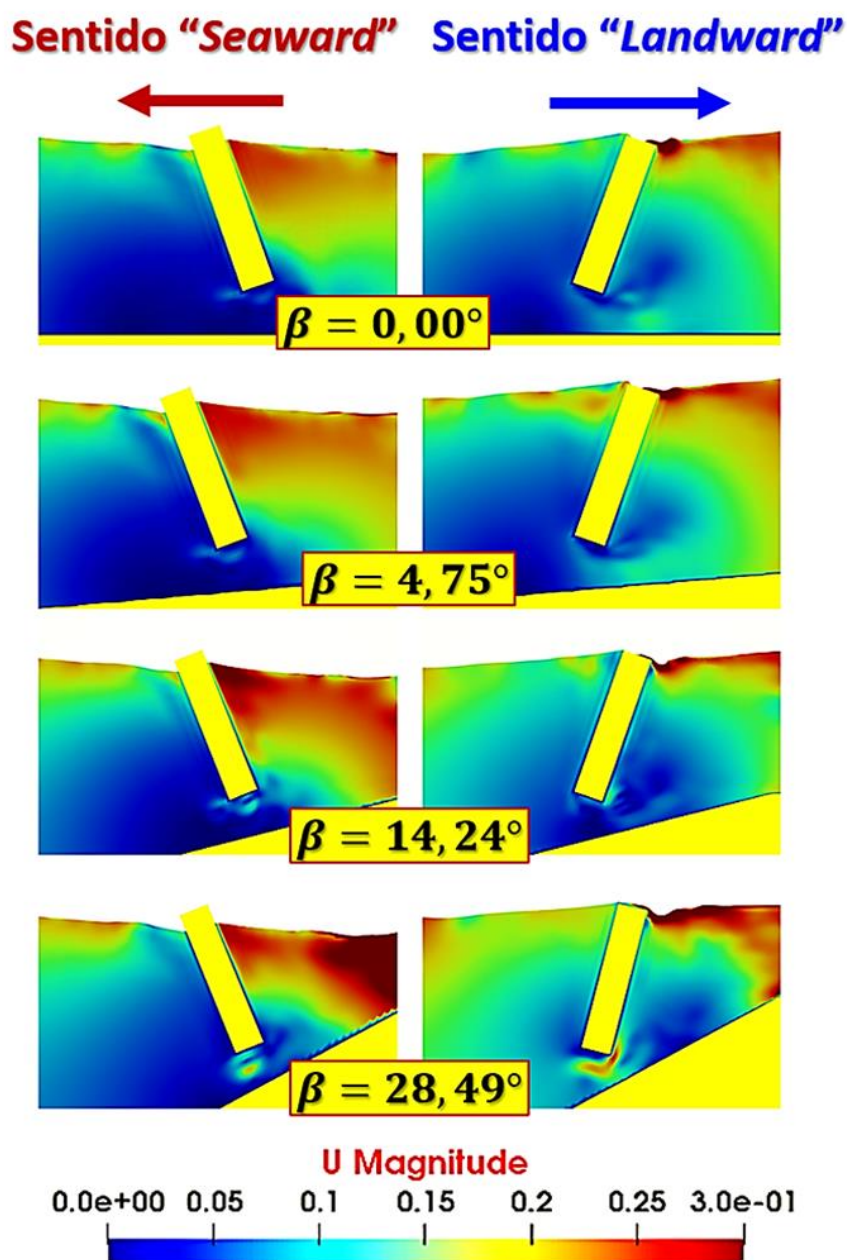


Figura 4.60 – Campos de velocidade para as máximas amplitudes angulares atingidas nos sentidos *landward* e *seaward* (casos 1, 2, 4 e 7)

Uma comparação entre os valores máximos e mínimos atingidos pela amplitude angular, velocidade angular, força horizontal, força vertical e momento de excitação encontram-se dispostos nos gráficos da Figura 4.61, em termos das máximas (Max_{Amp}^+ , associada ao sentido *landward*) e mínimas (Max_{Amp}^- , associada ao sentido *seaward*) amplitudes atingidas.

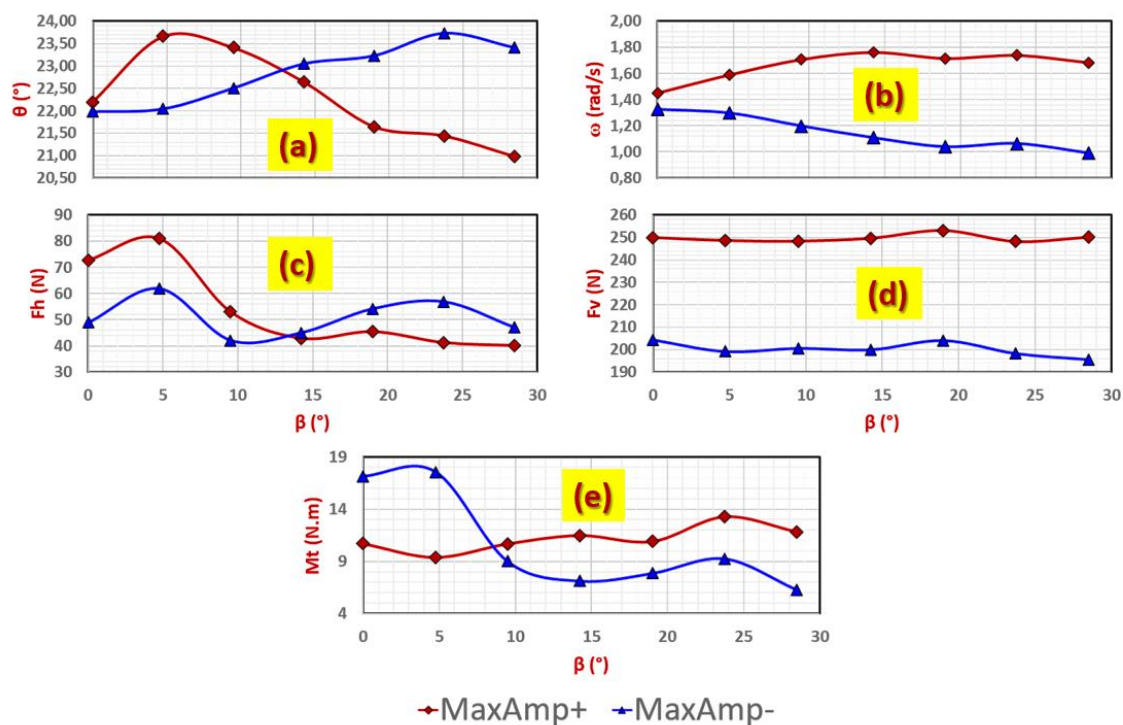


Figura 4.61 – Magnitudes das máximas amplitudes positivas (sentido positivo ou *landward*) e das máximas amplitudes negativas (sentido negativo ou *seaward*), em função da declividade do fundo, considerando a amplitude angular (a), a velocidade angular (b), a força horizontal (c), a força vertical (d) e o momento de excitação (e)

Por meio da análise da figura anterior, é possível identificar que as maiores amplitudes angulares são experimentadas no sentido *landward* até uma declividade próxima de 15°, sendo que, a partir deste valor, a maior amplitude angular passa a ocorrer no sentido *seaward*. Tal fato pode ser associado à zona de recirculação abaixo da placa, conforme observado nos campos da Figura 4.60. Por outro lado, em declividades muito baixas, observa-se que as amplitudes máximas atingidas para a velocidade angular no sentido *landward* e *seaward* são bastante semelhantes.

A magnitude da máxima amplitude positiva da velocidade angular tende a aumentar até atingir uma inclinação próxima de 15°, tendendo a valores praticamente constantes em inclinações superiores, que se encontram próximos de 1,80 rad/s (Figura 4.61b). Entretanto, sob as mesmas condições, a magnitude da máxima amplitude negativa tende a diminuir até um valor em torno de 1,00 rad/s, se estabilizando em valores próximos a este em declividades superiores a 15°.

A Figura 4.61c permite concluir que o módulo das máximas amplitudes atingidas pela força horizontal tende a aumentar em inclinações entre 0° e 5°. Em declividades superiores, as

magnitudes de ambas as amplitudes máximas são bastante similares, em torno de 50 N, sugerindo que a oscilação da placa tende a diminuir com o aumento da inclinação do fundo.

Por outro lado, é possível observar na Figura 4.61d que a diferença entre as máximas amplitudes atingidas é praticamente constante, indicando que a força vertical não sofre variações significativas em função da variação da declividade do fundo.

Em declividades inferiores a 10° , a amplitude máxima atingida pelo momento de excitação no sentido *seaward* é superior à amplitude atingida no sentido *landward* (Figura 4.61e). Para declividades superiores a 10° , observa-se uma inversão entre as máximas amplitudes atingidas. Entretanto, a diferença entre ambas torna-se praticamente constante, indicando que, em fundos muito íngremes, a placa tende a rotacionar com maior intensidade no sentido *landward*.

No intuito de estudar as tendências hidrodinâmicas do OWSC, em função da declividade do fundo, foram avaliados os valores eficazes (RMS) das mesmas variáveis analisadas anteriormente, cujos resultados são mostrados nos gráficos das Figuras 4.62 e 4.63. Como pode ser observado na Figura 4.62a, a amplitude angular tende, primeiramente, a aumentar até uma declividade próxima de 5° (aumento de aproximadamente 3,20%), passando a diminuir em inclinações superiores a esta (representando uma diminuição de até 16%, quando comparada ao máximo valor obtido para a amplitude angular).

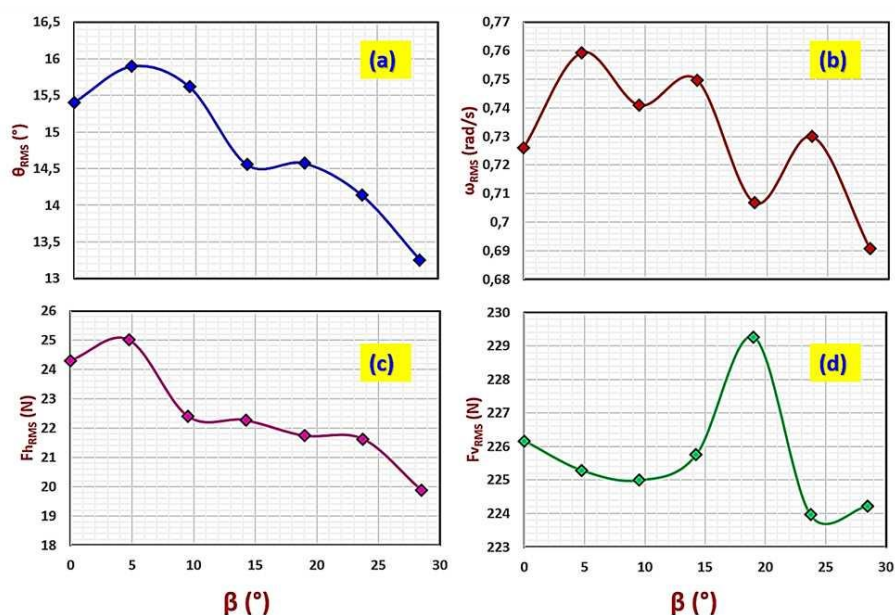


Figura 4.62 – Variação do valor RMS da amplitude angular, velocidade angular, força horizontal e força vertical experimentadas pelo OWSC, em função da declividade do fundo

A variação do valor RMS da amplitude angular oscila bastante em função da declividade do fundo, como pode ser observado na Figura 4.62b, indicando que um aumento nesta variável está associado a uma forte influência no comportamento oscilatório do conversor. Comparando-se o máximo valor RMS da velocidade angular (atingido na inclinação de 5°) com o mínimo valor atingido desta variável (em $28,49^\circ$), é possível concluir que um aumento na declividade do fundo pode corresponder a uma variação de até 9,00% na velocidade angular do OWSC.

O valor RMS da força horizontal (Figura 4.62c) se comporta de forma bastante similar aos valores máximos e mínimos atingidos por esta mesma variável (conforme visto na Figura 4.61c) em função da declividade do fundo. Sendo assim, a força horizontal tende a aumentar primeiramente em inclinações de até 5° , para diminuir em inclinações superiores. Já o valor RMS da força vertical (Figura 4.62d) mostra um pequeno aumento (em torno de 1,40%) em profundidades entre 15° e 20° , intervalo este que corresponde ao mínimo valor RMS atingido pela velocidade angular, sendo, portanto, uma faixa de declividades desfavorável para a hidrodinâmica do conversor.

Por meio dos gráficos dispostos nas Figuras 4.63a e 4.63b, é possível observar uma estreita semelhança entre as curvas dos valores RMS do momento de excitação e da potência média captada, indicando que o momento de excitação é uma variável muito importante na hidrodinâmica do OWSC. Por outro lado, pode-se concluir que o aumento de 1,50% experimentado na Potência média captada para uma inclinação de 5° se deve, principalmente, à influência da velocidade angular (que apresenta este mesmo comportamento, observado na Figura 4.62b). De uma maneira geral, comparando-se o primeiro e o último caso, é possível observar diminuições da ordem de 28% no momento de excitação e da potência média captada pelo dispositivo, levando à conclusão de que o aumento da declividade de fundo ocasiona características de escoamento desfavoráveis à hidrodinâmica do conversor, resultando em baixa eficiência na geração de energia pelo sistema nestes casos.

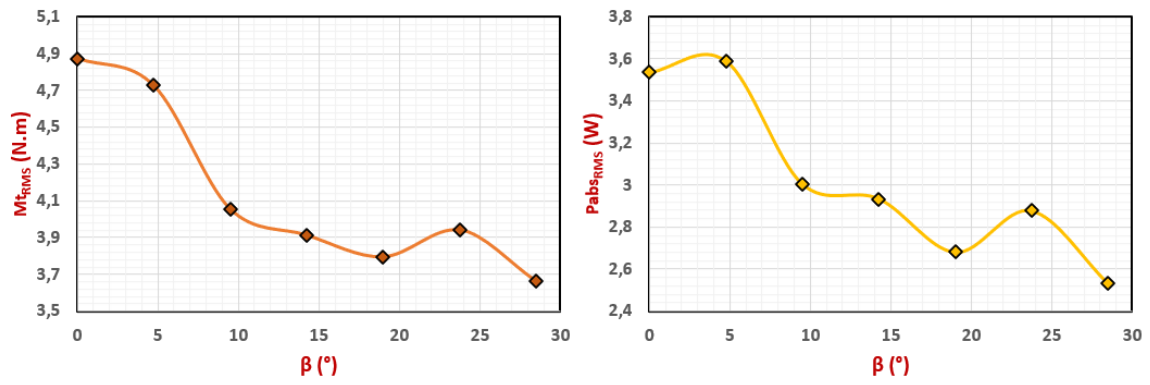


Figura 4.63 – Variação do valor RMS do momento de excitação e da potência média captada, em função da declividade do fundo

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração o cenário global atual e o importante desenvolvimento experimentado na última década pelos sistemas de conversão de energia das ondas, o presente trabalho teve como objetivo principal preencher algumas lacunas existentes acerca do sistema *Oscillating Wave Surge Converter* (OWSC), sob o contexto dos parques de geração (nos quais existem diversos dispositivos do mesmo tipo atuando em conjunto para a produção de energia). Para isto, foram abordados estudos a respeito de algumas variáveis bastante relevantes na hidrodinâmica destes conversores, como mudanças nas características da onda incidente, variações na declividade de fundo, alteração da distância entre placas e proposta de diferentes *layouts* do parque. Todos estes casos de análise possibilitaram investigar parâmetros chave para a produção de energia do sistema, bem como compreender a hidrodinâmica associada à interação fluido-estrutura de três placas iguais atuando em conjunto, fornecendo importantes noções, que poderão ser fundamentais para novos projetos e para o desenvolvimento futuro da tecnologia. Estes pontos, aliados à modelagem numérica em *Large Eddy Simulation* (LES), representam aspectos bastante inovadores na área, trazendo ainda mais relevância para o presente trabalho.

As simulações numéricas foram realizadas por meio do código computacional livre e aberto *OpenFOAM* v. 4.1, em conjunto da sua extensão *OlaFlow*, com a utilização de esquemas com precisão de até quarta ordem. A superfície livre foi modelada por meio do método *Volume of Fluid*, enquanto a dinâmica de corpo rígido foi tratada em termos da metodologia de deformação da malha de cálculo (*Mesh Morphing Method*), sendo esta última discretizada de forma estruturada. A modelagem da turbulência foi realizada através da aplicação do modelo *Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity* (WALE), fundamentado na metodologia de simulação em grandes escalas.

O modelo numérico proposto apresentou bastante aderência aos resultados experimentais dispostos na literatura, tanto em simulações bidimensionais quanto em análises tridimensionais. Análises realizadas nos campos de escoamento, também mostraram a grande eficiência do modelo na reprodução e representação de um caso crítico de operação destes conversores.

Uma comparação entre os modelos 2D e 3D também se fez necessária, uma vez que o grau de refinamento da malha no caso tridimensional, por estar sujeito a algumas condições de convergência e estabilidade numérica, ficou um pouco mais grosseiro que aqueles aplicados às malhas bidimensionais. Entretanto, ainda assim, o modelo WALE 3D reproduziu de forma bastante satisfatória o comportamento hidrodinâmico de 3 placas iguais atuando em conjunto, permitindo analisar importantes parâmetros como as amplitudes angulares e velocidades angulares atingidas pelas estruturas, assim como calcular e estimar os momentos de excitação atuantes e as respectivas potências captadas por cada uma das placas.

A análise dos fenômenos de escoamento envolvidos na hidrodinâmica de três OWSC's dispostos em série permitiu identificar diversos pontos importantes. Dentre estes, verificou-se que o aumento da altura de onda é responsável pela intensificação da turbulência na região entre as placas, bem como dos efeitos de escoamento já existentes, podendo otimizar ou reduzir a eficiência dos conversores na produção de energia, dependendo do caso. Um aumento do período de onda ocasiona maiores magnitudes de velocidade nos entornos das placas, e, o mesmo pode ser responsável tanto por uma otimização da energia produzida pelo sistema (nos casos onde os períodos são da mesma ordem de grandeza que o período de oscilação natural das estruturas) quanto por uma diminuição da mesma (nos casos de períodos muito grandes). Profundidades associadas a graus de submergência superiores a 1,00 resultam em uma diminuição da eficiência do sistema. Por outro lado, a ocorrência de ondas estacionárias mostrou ser benéfica para otimização do comportamento oscilatório do sistema, potencializando a energia captada pelas placas.

Simulações bidimensionais e tridimensionais sobre a avaliação da distância entre as placas permitiram determinar o valor de espaçamento ideal. Sendo assim, observou-se que o valor prático, tanto em termos de vista lateral (no plano zy) quanto em termos da vista superior (no plano xy), responsável por otimizar a hidrodinâmica dos conversores e a respectiva potência captada, é aquele igual a uma vez e meia a altura de placa. Este valor está associado a um aumento de até 22% na potência captada pelo sistema (quando comparado ao efeito de três placas operando em conjunto, porém, de forma isolada uma das outras).

A análise de quatro *layouts* diferentes para um parque composto por três OWSC's iguais, demonstrou que a configuração ideal é aquela onde, partindo de um alinhamento ao longo da

direção y, duas das três placas são deslocadas para montante (no sentido *seaward*), respeitando a distância entre as estruturas de 1,5 vezes a altura de placa, admitida como espaçamento ideal. Esta configuração, quando comparada ao triplo da potência captada por uma placa isolada, resulta num aumento de até 30% sobre a potência captada pelo sistema.

Um estudo bastante detalhado, a respeito da influência da declividade de fundo, permitiu concluir que os terrenos planos (com declividades inferiores a $5,00^\circ$) são aqueles ideais ao funcionamento dos parques. Entretanto, em regiões com declividades superiores a 10° , irão ocorrer efeitos turbulentos e zonas de recirculação, desfavoráveis à geração de energia pelo sistema. Sendo assim, nestes casos, recomenda-se que as placas sejam instaladas sobre plataformas flutuantes, o mais distante do fundo, a fim de otimizar a produção de energia pelos OWSC's.

Por fim, é importante ressaltar que o presente trabalho trouxe diversas informações importantes e relevantes sobre a hidrodinâmica associada aos parques de geração formados por mais de um OWSC. Além disto, também demonstrou que a modelagem em grandes escalas representa uma poderosa ferramenta de análise, podendo ser utilizada e implementada no estudo deste e de diversos outros sistemas de conversão de energia de ondas. Da mesma maneira, os resultados aqui obtidos poderão servir como importantes pontos de partida para futuros projetos e para o desenvolvimento desta tecnologia, uma vez que fornecem ao leitor informações essenciais sobre a hidrodinâmica existente nos parques de OWSC's, bem como sugestões de espaçamento entre placas e de configurações de *layout*, que visam a otimização da produção de energia do sistema.

6 SUGESTÕES DE PESQUISA

Esta tese de doutorado complementou os estudos realizados por Fuhrmeister (2015) e Fuhrmeister (2018), trazendo um fechamento com importantes informações sobre os OWSC's e os parques de geração formados por mais de um conversor deste tipo. Da mesma maneira, os resultados obtidos demonstraram que a modelagem em LES, aliada ao método de deformação dos elementos da malha numérica, é bastante adequada ao estudo deste e, possivelmente, de outros conversores de ondas. Além disto, o método mostrou ser bastante eficiente na modelagem de mais de um conversor atuando em conjunto, o que representa uma importante alternativa a outros métodos menos adequados a estes casos. Sendo assim, o presente trabalho deixa em aberto diversos temas que visam complementar o estudo, ou que podem servir como orientação para futuros trabalhos na área. A seguir, são listadas algumas sugestões de continuidade deste trabalho:

- a) **propor a utilização de malhas não-estruturadas ou híbridas para a representação de outros conversores de geometria complexa** – a utilização de malhas não-estruturadas possibilita o estudo de geometrias mais detalhadas e complexas, porém, representa um desafio muito grande na parte da representação da superfície livre, onde geralmente ocorrem problemas sérios de convergência e de estabilidade numérica;
- b) **aplicar a modelagem em LES 3D para casos extremos de operação de diversos dispositivos atuando em conjunto** – consiste em adaptar a metodologia proposta neste trabalho para casos mais refinados de malha dinâmica, a fim de capturar e reproduzir uma gama maior das escalas turbulentas, trazendo mais riquezas de detalhes aos campos de velocidade e possibilitando analisar as flutuações observadas nas séries temporais, o que permitiria estudar de forma mais detalhada o fenômeno de *Slamming*;
- c) **estudo da influência decorrente da direção de propagação da onda** – espera-se que a direção de propagação da onda incidente seja um parâmetro bastante influente na hidrodinâmica dos OWSC's e de diversos outros sistemas de conversão de ondas, sendo necessário relacionar as direções de propagação com as variações ocorridas nas propriedades de movimento das estruturas, bem como a variação ocasionada na potência captada pelo conversor;
- d) **análise da ação de ondas irregulares sobre os conversores** – a utilização de ondas não regulares corresponde a uma situação mais próxima da realidade, não só em relação aos OWSC's, mas também em relação a outros sistemas de conversão, sendo assim de extrema importância para uma análise mais detalhada e específica de uma determinada região;
- e) **aplicação do modelo em LES em regiões específicas do globo terrestre, com características batimétricas reais** – esta análise seria muito importante no caso do estudo e do projeto de um parque de conversores a ser instalado em uma

região específica do globo terrestre, onde seria necessário adaptar o modelo às características de relevo e de clima de ondas típicas da localidade;

- f) **estudo da turbulência associada à hidrodinâmica dos OWSC's** – este estudo teria como finalidade avaliar as características da turbulência observada durante o movimento oscilatório da estrutura do OWSC, permitindo caracterizar perfis de velocidade, identificar a intensidade de turbulência envolvida e caracterizar as escalas turbulentas associadas.

REFERÊNCIAS

- ACQUA. **Ambiente Marinho**. MDMAT (Mídias Digitais para Matemática), Instituto de Matemática da UFRGS. [2000?]. Disponível em: <http://mdmat.mat.ufrgs.br/acqua/Textos/ambiente_marinho.htm>. Acesso em: 07 fev. 2020.
- ADERINTO, T.; LI, H. Review on Power Performance and Efficiency of Wave Energy Converters. *Energies*, v. 12, n. 22, p. 4329, 2019.
- ANSYS. **Lecture 7: Turbulence Modeling**. Introduction to ANSYS Fluent. 2014. Disponível em: <https://www.academia.edu/36090206/Lecture_7_Turbulence_Modeling_Introduction_to_ANSYS_Fluent>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- ANTES, H. **A short course on boundary element methods**. Institut für Angewandte Mechanik. 2010. Disponível em: <<https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-01352830/>>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- ASTARIZ, S.; IGLESIAS, G. The economics of wave energy: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 397-408, 2015.
- AW-ENERGY. **Waveroller**. Vantaa, Finland, 2019. Disponível em: <<https://aw-energy.com/waveroller/>>. Acesso em: 15 mar. 2020.
- BACA, E.; PHILIP, R. T.; GREENE, D.; BATTEY, H. Expert Elicitation for Wave Energy LCOE Future (No. NREL/TP-5700-82375). **National Renewable Energy Laboratory**, Golden, CO (United States), 2022.
- BLACKLEDGE, J.; COYLE, E.; KEARNEY, D.; McGuirk, R.; NORTON, B. Estimation of wave energy from wind velocity. **IAENG Engineering Letters**, n. 4, p. 158-170, 2013.
- BLAZEK, J. **Computational fluid dynamics: principles and applications**. Butterworth-Heinemann, 2015.
- BRANCO, P. de M. **Relevo Oceânico**. Serviço Geológico do Brasil, CPRM. [2013?]. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Relevo-Oceanico-2624.html>>. Acesso em: 07 fev. 2020.
- BRITO, M.; CANELAS, R. B.; GARCÍA-FEAL, O.; DOMÍNGUEZ, J. M.; CRESPO, A. J. C.; FERREIRA, R. M. L.; NEVES, M. G.; TEIXEIRA, L. A numerical tool for modelling oscillating wave surge converter with nonlinear mechanical constraints. **Renewable Energy**, v. 146, p. 2024-2043, 2020.
- CHATZIMICHAILIDIS, A. E.; ARGYROPOULOS, C. D.; ASSAEL, M. J.; KAKOSIMOS, K. E. Qualitative and quantitative investigation of multiple large eddy simulation aspects for pollutant dispersion in street canyons using OpenFOAM. **Atmosphere**, v. 10, n. 1, p. 17, 2019.

CHENG, Y.; JI, C.; ZHAI, G.; MA, Z. Fully nonlinear simulation of wave–current interaction with an oscillating wave surge converter. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 25, n. 1, p. 93-110, 2020.

CK-12 FOUNDATION. **Wind Waves**. FlexBook Platform, 2020. Disponível em: <<https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-middle-school-earth-science-flexbook-2.0/section/9.4/primary/lesson/wind-waves-ms-es>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

CONVERGE CFD SOFTWARE. **Numerical Viscosity**. Convergent Science, 2018. Disponível em: <<https://convergecf.com/resources/numerical-viscosity-convergent-science.pdf>>. Acesso em: 8 mar. 2020.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 4th ed. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2017.

DANIELS, S.; RAHAT, A.; TABOR, G.; FIELDSEND, J.; EVERSON, R. A Review of Shape Distortion Methods Available in the OpenFOAM® Framework for Automated Design. In: **OpenFOAM®: Selected Papers of the 11th Workshop**. Springer, 2019. p. 389.

DAVIDSON, J.; COSTELLO, R. Efficient Nonlinear Hydrodynamic Models for Wave Energy Converter Design — A Scoping Study. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 35, 2020.

DAVOUDABADI, P. **The Most Accurate and Advanced Turbulence Capabilities**. Design workshop, ANSYS. 2012. Disponível em: <<https://support.ansys.com/staticassets/ANSYS/Conference/Confidence/Chicago/Downloads/most-accurate-advanced-turbulence-capabilities.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

DEAN, R. G. Stream function representation of nonlinear ocean waves. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, n. 18, p. 4561-4572, 1965.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. 2nd ed. Singapore: World Scientific, 1991.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Coastal Process**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.

DHANAK, M. R.; XIROS, N. I.; DARWISH, M. **Springer handbook of Ocean Engineering**. USA: Springer, 2016.

DIAS, F.; RENZI, E.; GALLAGHER, S.; SARKAR, D.; WEI, Y.; ABADIE, T.; CUMMINS, C.; RAFIEE, A. Analytical and computational modelling for wave energy systems: the example of oscillating wave surge converters. **Acta Mechanica Sinica**, v. 33, n. 4, p. 647-662, 2017.

DIAS, F.; GHIDAGLIA, J. M. Slamming: Recent progress in the evaluation of impact pressures. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 50, p. 243-273, 2018.

EDENHOFER, O.; MADRUGA, R. P.; SOKONA, Y.; SEYBOTH, K.; MATSCHOSS, P.; KADNER, S.; ZWICKEL, T.; EICKEMEIER, P.; HANSEN, G.; SCHLOMER, S.; VON

STECHOW, C. **Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge University Press, 2011.

ENERGY-MAG. **Wellenkraftwerk auf Französisch**. 2013. Disponível em: <<http://www.energy-mag.com/wellenkraftwerk-auf-franzoesisch/>>. Acesso em: 02 fev. 2020

ENGINEERING, 37th, 2018, Madrid, Spain. **Proceedings...** American Society of Mechanical Engineers Digital Collection., 2018.

FADAEI-KERMANI, E.; SHOJAEI, S.; MEMARZADEH, R.; BARANI, G. A. Numerical simulation of seepage problem in porous media. **Applied Water Science**, v. 9, n. 4, p. 79, 2019.

FENTON, J. D. A fifth-order Stokes theory for steady waves. **Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering**, v. 111, n. 2, p. 216-234, 1985.

FENTON, J. D. The numerical solution of steady water wave problems. **Computers & Geosciences**, v. 14, n. 3, p. 357-368, 1988.

FENTON, J. D. **The cnoidal theory of water waves**. In: DEVELOPMENTS IN OFFSHORE ENGINEERING. Gulf Professional Publishing, 1999. p. 55-100.

FERNANDO, H. J. S. **Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume Two: Systems, Pollution, Modeling, and Measurements**. CRC press, 2012.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M.; STREET, R. L. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 4. ed. Cham, Switzerland: Springer, 2020.

FOLLEY, M.; WHITTAKER, T.; OSTERRIED, M. The oscillating wave surge converter. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 14th, 2004, Toulon, France. **Proceedings...** Toulon: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004.

FOLLEY, M.; WHITTAKER, T.W.T.; VAN'T HOFF, J. The design of small seabed—manted bottom—hinged wave energy converters. In: EUROPEAN WAVE AND TIDAL ENERGY CONFERENCE, 7th, 2007, Porto, Portugal. **Proceedings...** Belfast: Queen's University Belfast, 2007.

FUHRMEISTER, G. V. **Waveroller: Análise das características hidráulicas e de escoamento influentes na geração de energia elétrica por simulação numérica**. 2015. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FUHRMEISTER, G. V. **Modelagem numérica da hidrodinâmica e geração de energia dos dispositivos oscilantes por translação de ondas**. 2018. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

FUHRMEISTER, G. V.; SCHETTINI, E. B. C. Influência da posição de instalação sobre a hidrodinâmica de um conversor oscilante por translação de ondas. In: CONGRESO

LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 28th, 2018, Buenos Aires, Argentina.
Proceedings... Buenos Aires: IAHR, AIIH, 2018.

FUHRMEISTER, G. V.; SCHETTINI, E. B. C. Aplicação de uma metodologia alternativa de deformação de malhas na modelagem numérica de conversores oscilantes por translação de ondas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, v. 24, 2019.

GERHART, P. M.; GERHART, A. L.; HOCHSTEIN, J. I. **Munson, Young and Okiishi's Fundamentals of Fluid Mechanics**. 8. ed. Danvers, USA: John Wiley & Sons, 2016.

GERMANO, M.; PIOMELLI, U.; MOIN, P.; CABOT, W. H. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 3, n. 7, p. 1760-1765, 1991.

GHADIMI, P.; DASHTIMANESH, A.; DJEDDI, S. R. Study of water entry of circular cylinder by using analytical and numerical solutions. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 34, n. 3, p. 225-232, 2012.

GOMES, R. P. F.; LOPES, M. F. P.; HENRIQUES, J. C. C.; GATO, L. M. C.; FALCAO, A. F. O. The dynamics and power extraction of bottom-hinged plate wave energy converters in regular and irregular waves. **Ocean Engineering**, v. 96, p. 86-99, 2015.

GREENSHIELDS, C. J. **Programmer's Guide V 3.0.1**. The OpenFOAM Foundation Ltd. 2015.

GREENSHIELDS, C. J. **User Guide V 7.0**. The OpenFOAM Foundation Ltd. 2019.

GUERRERO, J. **Finite Volume Method: A Crash introduction**. Wolf Dynamics, [2015?]. 202 slides.

GUIBERTEAU, K. L.; LIU, Y.; LEE, J.; KOZMAN, T. A. **Potential of Development and Application of Wave Energy Conversion Technology in the Gulf of Mexico**. 2014.

GUNAWARDANE, S. D. G. S. P.; FOLLEY, M.; KANKANAMGE, C. J. Analysis of the hydrodynamics of four different oscillating wave surge converter concepts. **Renewable energy**, v. 130, p. 843-852, 2019.

HANSON, L. **Waves**. Department of Geological Sciences, Salem State College. 2003. Disponível em: < http://w3.salemstate.edu/~lhanson/gls214/gls214_waves.html>. Acesso em: 19 fev. 2020.

HEMPEL. **Hempel acorda parceria com a AW Energia**. 2012. Disponível em: <<https://www.hempel.com.br/pt-br/about-hempel/news/2012/hempel-acorda-parceria-com-a-aw-energia>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

HENRY, A.; RAFIEE, A.; SCHMITT, P.; DIAS, F.; WHITTAKER, T. The characteristics of wave impacts on an oscillating wave surge converter. In: INTERNACIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 23th, 2013, Anchorage, Alaska. **Proceedings...** Cupertino, California (USA): ISOPE, 2014a. p. 101–110.

HENRY, A.; KIMMOUN, O.; NICHOLSON, J.; DUPONT, G.; WEI, J.; DIAS, F. A two-dimensional experimental investigation of slamming of an oscillating wave surge converter.

In: INTERNATIONAL OCEAN AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 24th, 2014, Busan, Korea. **Proceedings...** Cupertino, California (USA): ISOPE, 2014b.

HENRY, A.; ABADIE, T.; NICHOLSON, J.; McKINLEY, A.; KIMMOUN, O.; DIAS, F. The vertical distribution and evolution of slam pressure on an oscillating wave surge converter. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 34th, 2015, St. John's, Newfoundland, Canada. **Proceedings...** New York (USA): ASME, 2015.

HENRY, A.; FOLLEY, M.; WHITTAKER, T. A conceptual model of the hydrodynamics of an oscillating wave surge converter. **Renewable Energy**, v. 118, p. 965-972, 2018.

HIGUERA, P.C. **Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional a la Acción del Oleaje Sobre Estructuras**. 2015. Tesis Doctoral – Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Cantabria, 2015.

HIGUERA, P. **OLAFOAM Reference Manual**. Cantabria: Universidad de Cantabria, 2016.

HOSSAIN, J; HOSSAIN, E.; SIKANDER, S. S. **A Wave-to-Wire Model of Ocean Wave Energy Conversion System Using MATLAB/Simulink Platform**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE DEVELOPMENT IN THE RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGY (ICDRET), 4th. Dhaka, Bangladesh. IEEE, 2016. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/Jakirhossain471/a-wavetowire-model-of-ocean-wave-energy-conversion-system-using-matlab-simulink-platform>>. Acesso em: 31 jan. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Annual report 2007**. Ocean Energy Systems: Lisbon, Portugal, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Annual report: An Overview of activities in 2017**. Ocean Energy Systems: Lisbon, Portugal, 2017.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050**. International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, UAE, 2018.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Power Generation Costs in 2021**. International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, UAE, 2022.

JAYAKUMAR, V. **Engineering Mechanics**. PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.

KAMPHUIS, J. W. **Introduction to coastal engineering and management**. World Scientific, 2010.

KARADENIZ, H. **Stochastic analysis of offshore steel structures: an analytical appraisal**. Springer Science & Business Media, 2012.

KARADIMOU, D. P.; MARKATOS, N.C. Study of the Numerical Diffusion in Computational Calculations. **Numerical Simulations in Engineering and Science**, p. 65, 2018.

KESSLER, M. **Escoamento turbulento**. ESSS, 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/escoamento-turbulento/>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

- KHAMLAJ, T. **Computation of y^+** . ICON Technology & Process Consulting, 2018. Disponível em: <<https://tariqkhamlaj.com/category/computation-of-y/>>. Acesso em: 01 mar. 2020.
- KIM, W. W.; MENON, S. Application of the localized dynamic subgrid-scale model to turbulent wall-bounded flows. In: AEROSPACE SCIENCES MEETING AND EXHIBIT, 35th, 1997. Reno, EUA. **Proceedings...** Reno, 1997. p. 210.
- KNOWLEDGE PROJECT. **Coastal Processes and Beaches**. The Nature Education. 2014. Disponível em: <<https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/coastal-processes-and-beaches-26276621/>>. Acesso em: 07 fev. 2020.
- KOLMOGOROV, A. N. **Dissipation of energy in locally isotropic turbulence**. In: AKADEMIIA NAUK SSSR DOKLADY. 1941. p. 16.
- KORTEWEG, D. J.; de VRIES, G. On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 39, n. 240, p. 422-443, 1895.
- KUMAWAT, A. K.; KARMAKAR, D.; SOARES, C. G. Wave Energy Conversion by Multiple Bottom-Hinged Surging WEC. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN OCEAN ENGINEERING, 4th, 2018, Chennai, India. **Proceedings...** Singapore: Springer, 2019. p. 913-929.
- LANGLEE WAVE POWER. **Langlee Technology**. 2013. Disponível em: <<http://www.langleewp.com/?q=langlee-technology>>. Acesso em: 15 mar. 2020.
- LAUNCHBURY, D. R. **Unsteady Turbulent Flow Modelling and Applications**. Horw, Switzerland: Springer, 2016.
- LE MÉHAUTÉ, B. **An introduction to hydrodynamics and water waves**. Springer Science & Business Media, 1976.
- LEHMANN, M.; KARIMPOUR, F.; CLIFFORD, A. G.; JACOBSON, P. T.; ALAM, M. R. Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 1300-1313, 2017.
- LILLY, D. K. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 4, n. 3, p. 633-635, 1992.
- LIN, C. C.; CHOW, Y. C.; TZANG, S. Y.; CHIOU, C. Y.; HUANG, Y. Y. Numerical Study on the Geometric and Inertial Parameters for Oscillating Wave Surge Converters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING. Vol. 51319. American Society of Mechanical Engineers, 2018.
- LIU, C.; LI, J.; BU, W.; MA, W.; SHEN, G.; YUAN, Z. Large eddy simulation for improvement of performance estimation and turbulent flow analysis in a hydrodynamic torque converter. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 12, n. 1, p. 635-651, 2018.

LIU, M. B.; LIU, G. R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments. **Archives of computational methods in engineering**, v. 17, n. 1, p. 25-76, 2010.

MAR DE VIDA MUSEU. **Oceano em camadas**. ALLBS Ltda. 2017. Disponível em: <<http://www.mardevida.pt/pt/conhecer-o-oceano/oceano-em-camadas>>. Acesso em: 07 fev. 2020.

MASIVA ECOLÓGICA. **WaveRoller, un dispositivo que convierte las olas en energía y electricidad**. 2015. Disponível em: <<http://www.masivaecologica.com/articulo-waveroller-un-dispositivo-que-convierte-las-olas-en-energia-y-electricidad>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

MEI, C. C.; STIASSNIE, M.; YUE, D. K. P. **Theory and applications of ocean surface waves**. Vol 23. Singapore: World Scientific, 2005.

MELDAHL, K. **Lesson: Waves – Part I**. Brooks/Cole, Thomson Learning Inc., 2002. Disponível em: <https://www.kau.edu.sa/Files/0002674/Files/27968_wind%20waves.pdf/>. Acesso em: 12 fev. 2020.

MENEVEAU, C.; LUND, T. S.; CABOT, W. H. A Lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence. **Journal of fluid mechanics**, v. 319, p. 353-385, 1996.

MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. **Turbulência: Fundamentos**, IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência. PUC-RS-Universidade Pontifícia Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre–RG, v. 27, p. 09-1, 2004.

MONAGHAN, J. J. Smoothed particle hydrodynamics. **Reports on progress in physics**, v. 68, n. 8, p. 1703-1759, July. 2005.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab®**. Vol. 113. Berlin, Germany: Springer, 2016.

NAIR, S. P. M.; KESAVAN, A. K. Shape optimization of the flap of wave surge converters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED MECHANICS AND OPTIMISATION, 2019, Thiruvananthapuram, India. **Proceedings...** AIP Publishing LLC, 2019. p. 030010.

NARULA, K. **The Maritime Dimension of Sustainable Energy Security**. Springer, 2019.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Marine and Hydrokinetic Technology Glossary**. OpenEI. 2018. Disponível em: <https://openei.org/wiki/Marine_and_Hydrokinetic_Technology_Glossary>. Acesso em: 15 mar. 2020.

NEW WORLD ENCYCLOPEDIA. **Continental shelf**. MediaWiki. 2017. Disponível em: <https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Continental_shelf>. Acesso em: 07 fev. 2020.

NICOUD, F.; DUCROS, F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. **Flow, turbulence and Combustion**, v. 62, n. 3, p. 183-200, 1999.

NISHAD, K.; RIES, F.; LI, Y.; SADIKI, A. Numerical Investigation of Flow through a Valve during Charge Intake in a DISI-Engine Using Large Eddy Simulation. **Energies**, v. 12, n. 13, p. 2620, 2019.

O'BOYLE, L.; DOHERTY, K.; VAN'T HOFF, J.; SKELTON, J. The value of full scale prototype data-testing oyster 800 at emec, orkney. In: EUROPEAN WAVE AND TIDAL ENERGY CONFERENCE, 11th, 2015, Nantes, France. **Proceedings...** Nantes: EWTEC, 2015. p. 6-11.

O'HARA MURRAY, R.; GALLEGO, A. Data review and the development of realistic tidal and wave energy scenarios for numerical modelling of Orkney Islands waters, Scotland. **Ocean & Coastal Management**, v. 147, p. 6-20, 2017.

OPENCFD. **Numerical schemes**. ESI Group, 2018. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/fvSchemes.php>>. Acesso em: 05 abr. 2020.

OPENFOAM FOUNDATION. **OpenFOAM 2.3.0: Arbitrary Mesh Interface**. 2017. Disponível em: <<https://openfoam.org/release/2-3-0/non-conforming-ami/>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

OPENFOAM WIKI. **Contrib/olaFlow**. 2019. Disponível em: <<https://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/olaFlow>>. Acesso em: 05 abr. 2020.

OPTIMISED ENVIRONMENTS. **Brough Head Wave Farm**. [2010?]. Disponível em: <<http://www.optimisedenvironments.com/projects/environmental-planning/brough-head-wave-farm/>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

ORCAFLEX. **Waves: Breaking waves**. Orcina Ltd. 2019a. Disponível em: <<https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Default.htm>>. Acesso em: 19 fev. 2020.

ORCAFLEX. **Waves: Ranges of applicability**. Orcina Ltd. 2019b. Disponível em: <<https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Default.htm>>. Acesso em: 19 fev. 2020.

OSSES, J. **O método de volumes finitos**. ESSS. 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/o-metodo-de-volumes-finitos/>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

PECHER, A.; KOFOED, J. P. **Handbook of ocean wave energy**. London: Springer, 2017

PEIFFER, A.; RODDIER, D. **Design of an oscillating wave surge converter on the windfloat structure**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN ENERGY, 4th, 2012, Dublin, IRL. Ocean Energy Systems, 2012. p. 1-9.

PERITUS. **The Benefits and Limitations of Computational Fluid Dynamics in the Offshore Oil and Gas Industry**. Start Digital, 2019. Disponível em: <<https://www.peritusint.com/benefits-and-limitations-of-computational-fluid-dynamics/>>. Acesso em: 01 mar. 2020.

POPE, S. B. **Turbulent Flows**. New York, USA: Cambridge University Press, 2000.

POTTER, M.C.; WIGGERT, D. C.; RAMADAN, B. H. **Mechanics of fluids**. Nelson Education, 2016.

PRANDTL, L. Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. **ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik**, v. 5, n. 2, p. 136-139, 1925.

RAHUMA, F. K.; YAAKOB, O. Power Extraction by a Nearshore Oscillating Wave Surge Converter (OWSC). **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 15, n. 1, p. 28-34, 2015.

RENZI, E.; DIAS, F. Resonant behaviour of an oscillating wave energy converter in a channel. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 701, p. 482-510, 2012.

RENZI, E.; ABDOLALI, A.; BELLOTI, G.; DIAS, F. Mathematical modelling of the oscillating wave surge converter. In: CONFERENCE OF HYDRAULICS AND HYDRAULIC ENGINEERING, 33th, 2012, Brescia, Italy. **Proceedings...** Brescia, 2012.

RENZI, E.; DOHERTY, K.; HENRY, A.; DIAS, F. How does Oyster work? The simple interpretation of Oyster mathematics. **European Journal of Mechanics-B/Fluids**, v. 47, p. 124-131, 2014.

RICHARDSON, L. F. **Weather Prediction by Numerical Process**. Cambridge University Press, 1922.

RIENECKER, M. M.; FENTON, J. D. A Fourier approximation method for steady water waves. **Journal of fluid mechanics**, v. 104, p. 119-137, 1981.

RITCHIE, H.; ROSER, M. **Renewable energy**. 2020. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/renewable-energy>>. Acesso em: 30 jan. 2020.

RODRIGUEZ, S. **Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling: Practical Tools, Tips and Techniques**. Springer Nature, 2019.

RUDMAN, M. Volume-tracking methods for interfacial flow calculations. **International journal for numerical methods in fluids**, v. 24, n. 7, p. 671-691, 1997.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. **Water Power Technologies: Capabilities & Products**. U. S Department of Energy, 2015. Disponível em: <<https://energy.sandia.gov/programs/renewable-energy/water-power/>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SCHMITT, P.; ELSAESSER, B. On the use of OpenFOAM to model Oscillating Wave Surge Converters. **Ocean Engineering**, v. 108, p. 98-104, July. 2015.

SCHMITT, P.; ELSÄBER, B. The application of Froude scaling to model tests of Oscillating Wave Surge Converters. **Ocean Engineering**, v. 141, p. 108-115, 2017.

SHADMAN, M.; SILVA, C.; FALLER, D.; WU, Z.; ASSAD, L.P de F.; LANDAU, L.; LEVI, C.; ESTEFEN, S. F. Ocean Renewable Energy Potential, Technology, and Deployments: A Case Study of Brazil. **Energies**, v. 12, n. 19, p. 3658, 2019.

- SILVEIRA NETO, A. Fundamentos da turbulência nos fluidos. **Coleção Cadernos de Turbulência. Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – ABCM**. Rio de Janeiro. v. 1, p. 1-48, 2002.
- SIMONETTI, I.; CAPPIETTI, H.; ELSAFTI, H; OUMERACI, H. Optimization of the geometry and the turbine induced damping for fixed detached and asymmetric OWC devices: A numerical study. **Energy**, v. 139, p. 1197-1209, 2017.
- SINGH, N. K. **Ocean Wave Energy Harvesting**. Technical Report, 2019.
- SINGH, T. **Aquamarine Power Breaks Ground on Oyster Wave Energy Farm in Orkney**. Inhabitat, 2011. Disponível em: <<https://inhabitat.com/aquamarine-power-breaks-ground-on-oyster-wave-energy-farm-in-orkney/>>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. **Monthly weather review**, v. 91, n. 3, p. 99-164, 1963.
- SNIECKUS, D. **Winged wonder wave-power machine is set to get wet**. Recharge, 2011. Disponível em: <<https://www.rechargenews.com/wave-tidal-hydro/winged-wonder-wave-power-machine-is-set-to-get-wet/1-1-844502>>. Acesso em: 15 mar. 2020.
- SORENSEN, R. M. **Basic coastal engineering**. Vol 10. Springer Science & Business Media, 2005.
- SOUZA, J. F. A.; OLIVEIRA, L. R. de; AZEVEDO, J. L. L.de; SOARES, I. D.; MATA, M. M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21-41, 2011.
- STEFEN, S. F. **Ocean Energy Development in Brazil**. Rio de Janeiro: COPPE, UFRJ, 2015.
- SULTAN, I. **Power Take-off System Design for Wing-Wave WEC**. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Department of Marine and Environmental Systems, Florida Institute of Technology, Melbourne, Florida, 2013.
- SUPERGEN UK CENTRE FOR MARINE ENERGY RESEARCH. **Model Scale Replication of OWSC Slamming**. 2018. (2m21s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=aJaO8-_h8tU&t=11s> Acesso em: 10 abr. 2020.
- TAY, Z. Y.; VENUGOPAL, V. Optimization of spacing for oscillating wave surge converter arrays using genetic algorithm. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 143, n. 2, p. 04016019, 2016.
- TAY, Z. Y.; VENUGOPAL, V. Hydrodynamic interactions of oscillating wave surge converters in an array under random sea state. **Ocean Engineering**, v. 145, p. 382-394, 2017.
- TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence**. MIT press, 1972.
- TODALSHAUG, J. H.; BABARIT, A.; KURNIAWAN, A.; MOAN, T. **The NumWEC project. Numerical estimation of energy delivery from a selection of wave energy converters–final report**. 2011.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computational fluid dynamics: a practical approach**. Butterworth-Heinemann, 2018.

URQUHART, M. **A tutorial of the sixDofRigidBodyMotion library with multiple bodies**. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2016.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Shore Protection Manual**, Vol. 1. Superintendent of Documents, US Government Printing Office, Washington, DC, v. 20402, 1984.

VAN DRIEST, E. R. On turbulent flow near a wall. **Journal of the aeronautical sciences**, v. 23, n. 11, p. 1007-1011, 1956.

VENUGOPAL, V.; NEMALIDINNE, R.; VÖGLER, A. Numerical modelling of wave energy resources and assessment of wave energy extraction by large scale wave farms. **Ocean & Coastal Management**, v. 147, p. 37-48, 2017.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson education, 2007.

VON KÁRMÁN, T. **The impact of seaplane floats during landing**. Washington, DC, 1929. (NACA Tech. Note 321, Natl. Advis. Comm. Aeronaut.).

WAGNER, H. Über Stoß-und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten. **ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik**, v. 12, n. 4, p. 193-215, 1932.

WAHYUDIE, A.; JAMA, M. A.; SUSILO, T. B.; SAEED, O.; NANDAR, C. S. A.; HARIB, K. **Simple bottom-up hierarchical control strategy for heaving wave energy converters**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 87, p. 211-221, 2017.

WATABE, T.; KONDO, H.; YANO, K. **VII-1 Characteristics of a pendulum type wave energy converter**. Ocean Engineering, v. 12, n. 6, p. 593, 1985.

WATABE, T.; GUNAWARDANE, S. Study on Pendulum Wave Power Converter for Coastal Operation of Sri Lanka: Design of the Piston Pump for the HST (Hydro-Static Transmission) of the Pendulum. **OTEC: 佐賀大学海洋エネルギー研究センター報告**, n. 22, p. 47-54, 2017.

WEI, Y.; RAFIEE, A.; HENRY, A.; DIAS, F. Wave interaction with an oscillating wave surge converter, part I: Viscous effects. **Ocean Engineering**, v. 104, p. 185-203, June. 2015.

WEI, Y.; ABADIE, T.; HENRY, A.; DIAS, F. Wave interaction with an oscillating wave surge converter. Part II: Slamming. **Ocean Engineering**, v. 113, p. 319-334, 2016.

WENG, X.; HUANG, C.; LONG, T.; LI, S. M.; LIU, M. B. An integrated finite particle method with perfectly matched layer for modeling wave-structure interaction. **Coastal Engineering Journal**, v. 61, n. 1, p. 78-95, 2019.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. 8. ed. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2016.

WHITTAKER, T.; FOLLEY, M. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 370, n. 1959, p. 345-364, 2012.

WILHELM, M. **Numerical investigation of a hinged wave energy converter interacting with a close boundary**. 2017. 93 p. Master thesis (Naval architecture and ocean engineering) – Institut für Land und Seeverkehr, Technische Universität, 2017.

WINDT, C.; DAVIDSON, J.; RINGWOOD, J. V. High-fidelity numerical modelling of ocean wave energy systems: A review of computational fluid dynamics-based numerical wave tanks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, p. 610-630, 2018.

XIE, J.; ZUO, L. Dynamics and control of ocean wave energy converters. **International Journal of Dynamics and Control**, v. 1, n. 3, p. 262-276, 2013.

YAO, G. **Immersed Boundary Method for CFD: Focusing on Its Implementation**. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.

YONEDA, Y. **‘Oyster’ System is a New Way to Harness the Power of Waves**. Inhabitat, 2009. Disponível em: <<https://inhabitat.com/oyster-generates-electricity-from-waves/oysterpower1/>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

YONEDA, Y. **New Oyster 2 Wave Power Generator Unveiled This Morning**. Inhabitat, 2010. Disponível em: <<https://inhabitat.com/the-oyster-wave-generator-2-buoyant-wave-power-without-the-turbine/oyster-waves-5/>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

YOUNESIAN, D.; ALAM, M. R. Multi-stable mechanisms for high-efficiency and broadband ocean wave energy harvesting. **Applied Energy**, v. 197, p. 292-302, 2017.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; NITHIARASU, P. **The finite element method for fluid dynamics**. Elsevier, 2015.