



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

ADRIANO HENRIQUE TOGNATO

**MODELAGEM CFD DA INTERAÇÃO ENTRE
HIDRODINÂMICA COSTEIRA E
QUEBRA - MAR SUBMERSO: ESTUDO DE CASO DA
PONTA DA PRAIA EM SANTOS, SP.**

CAMPINAS

2020

ADRIANO HENRIQUE TOGNATO

**MODELAGEM CFD DA INTERAÇÃO ENTRE
HIDRODINÂMICA COSTEIRA E
QUEBRA - MAR SUBMERSO: ESTUDO DE CASO DA
PONTA DA PRAIA EM SANTOS, SP.**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli

Co-orientadora: Profa. Dra. Patrícia Dalsoglio Garcia

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO ADRIANO HENRIQUE TOGNATO E ORIENTADO PELO PROF. DR. TIAGO ZENKER GIRELI.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

T572m Tognato, Adriano Henrique, 1991-
Modelagem CFD da interação entre hidrodinâmica costeira e quebra-mar submerso : estudo de caso da Ponta da Praia em Santos, SP / Adriano Henrique Tognato. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Tiago Zenker Gireli.

Coorientador: Patrícia Dalsoglio Garcia.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Fluidodinâmica computacional CFD. 2. Quebra-mares. 3. Modelos numéricos. I. Gireli, Tiago Zenker, 1980-. II. Garcia, Patrícia Dalsoglio, 1980-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: CFD modeling of interaction between sea waves and submerged breakwater at Ponta da Praia - Santos, SP : a study case

Palavras-chave em inglês:

Computational fluid dynamics

Breakwater

Numerical models

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Tiago Zenker Gireli [Orientador]

Paulo Vatavuk

Geraldo de Freitas Maciel

Data de defesa: 07-02-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-8916-999>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7543788465106237>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**MODELAGEM CFD DA INTERAÇÃO ENTRE
HIDRODINÂMICA COSTEIRA E
QUEBRA - MAR SUBMERSO: ESTUDO DE CASO DA PONTA
DA PRAIA EM SANTOS, SP.**

ADRIANO HENRIQUE TOGNATO

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli

Presidente e Orientador - FEC/UNICAMP

Prof. Dr. Paulo Vatavuk

FEC/UNICAMP

Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel

UNESP/ILHA SOLTEIRA

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 07 de fevereiro de 2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Lurdes por todos os pequenos cuidados a mim dedicados e para minha irmã Andressa, pelos recorrentes exemplos de coragem e por sempre manter o nível elevado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos meus orientadores Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli e Prof^a. Dr^a. Patrícia Dalsoglio Garcia, pela orientação, confiança, motivação e oportunidades a mim conferidas. Agradeço acima de tudo pelo incrível e cativante exemplo na prática da docência e pesquisa.

Ao Prof. Dr. Paulo Vatauvuk pela incrível disciplina ministrada sobre Fluidodinâmica Computacional e pelo vital auxílio prestado durante a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel pela cordialidade e disponibilidade oferecidas desde o primeiro contato, além das valiosas contribuições elencadas durante o exame de qualificação e defesa.

Aos meus pais Lurdes de Souza e Mauro Tognato pelo apoio em todos os momentos, sempre dando segurança e conforto para que eu possa crescer pessoalmente e profissionalmente.

À minha namorada Tatiane Nobre de Paiva pelo companheirismo, carinho, dedicação e compreensão.

Aos meus queridos amigos do Departamento de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais, que estiveram comigo ao longo desta caminhada e tornaram ela muito mais divertida. Um abraço especial aos integrantes do LHM, LENER e Amigos da Toca do Tatu, pelas confraternizações, cafés, almoços e levantamentos de campo.

Um obrigado especial ao meu amigo Elcio Yonemoto pela parceria desde o início de nossa empreitada acadêmica. Sou grato pelos conselhos e acima de tudo pela amizade.

Obrigado ao Prof. Dr. Jorge Trabanco pelo auxílio durante o levantamento e processamento de dados topográficos, de grande importância para a realização deste trabalho, além das conversas durante o trajeto Campinas – Santos.

Aos representantes da empresa Mettalfoma, Luciano Santana e Aurélio Fushiki pelo treinamento e auxílio durante as modelagens no software Flow3D®.

À empresa Flow Science, INC., desenvolvedora do software Flow3D®, por viabilizar a aquisição da ferramenta durante o período de pesquisa a custo substancialmente reduzido.

Aos meus professores da Graduação Monica Zuffo, Jonatha R. Perreira e Marcelo Balbino por toda inspiração e incentivo, essenciais para minha escolha pela docência.

As minhas irmãs Paula, Franciele e Andressa, ao meu irmão mais novo Eduardo e ao meu cunhado Rogerio, por serem pessoas incríveis presentes na minha vida.

Aos integrantes da secretaria de pós-graduação por todo o auxílio com as infinitas documentações, informações e regras do programa.

E por fim, um salve a incomparável equipe de engenheiros que tive o prazer de coordenar, vocês me ajudaram a descobrir o prazer de ensinar.

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota”

Theodore Roosevelt

RESUMO

As transformações de onda que ocorrem sobre e ao redor dos quebra-mares submersos, como a dissipação de energia e os efeitos de águas rasas, dificilmente podem ser previstas sem o auxílio de ferramentas de modelagem. Todavia, os métodos numéricos comumente empregados em simulações de ambientes costeiros não conseguem reproduzir estes efeitos, devido à natureza das equações solucionadas e o tamanho de célula utilizado, resultante da proporção das áreas estudadas. Diante deste cenário, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um tanque de ondas capaz de integrar modernas técnicas CAD e CFD para atingir a excelente reprodução dos efeitos de águas rasas e dissipação de energia provocados pela interação entre hidrodinâmica costeira e quebra-mar submerso. Para isto, foi empregada a técnica de modelagem conhecida como RANS – VOF, altamente recomendada em simulações que envolvem geometrias complexas, devido à excelente relação entre precisão e gasto computacional em problemas de superfície livre. O modelo foi alimentado e validado a partir de dados coletados na região de influência de um quebra-mar submerso construído na Ponta da Praia em Santos, SP. Os resultados obtidos indicam que o método proposto pode ser utilizado na análise do desempenho de quebra-mares submersos, levando-se em conta suas interações hidrodinâmicas com o movimento das ondas. Por fim, ressalta-se que este tipo de modelo é indicado somente em situações onde é possível validá-lo a partir de dados mensurados em campo ou de modelo reduzido.

Palavras-chave: CFD, hidrodinâmica, quebra-mar submerso, ondas, modelo numérico, RANS-VOF.

ABSTRACT

Wave transformations that occur over and around breakwaters, such as energy dissipation and shallow water effects, can hardly be predicted without aid of modeling tools. However, numerical models commonly used in coastal environment simulations cannot reproduce these effects, due to the nature of the solving equations and the cell size used, resulting from the size studied areas. Thus, this work presents the development of a numerical wave tank capable of integrating modern CAD and CFD techniques to achieve an excellent reproduction of the shallow water effects and energy dissipation caused by the interaction between coastal hydrodynamics and submerged breakwater. A modeling technique popularly known as RANS - VOF was used. This technique is highly recommended in simulations involving complex geometries, due to the excellent relationship between accuracy and computational expense in free-surface problems. The model was fed and validated with data from surveys took in the region of influence of a submerged breakwater built at Ponta da Praia in Santos, SP. The results indicate that the proposed method can be used to investigate the performance of submerged breakwaters, considering their hydrodynamic interactions with wave movements. It is important to mention that this type of model is only indicated in situations where it is possible to validate it from data measured in the field or from a reduced model.

Palavras-chave: CFD, hydrodynamics, submerged breakwater, sea waves, numerical model, RANS-VOF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da região de estudo – Ponta da Praia, Santos – SP.	18
Figura 2: Protótipo construído na Ponta da Praia, Santos – SP.....	18
Figura 3: Ferramentas disponíveis.	22
Figura 4: Etapas da simulação CFD.....	26
Figura 5: Graus de modelagem e custo computacional.	36
Figura 6: Camada Absorvedora de Ondas ou Camada Esponja.....	39
Figura 7: Discretização do domínio.	40
Figura 8: Superfície livre a partir da variação da fração de volume.....	45
Figura 9: Efeitos da aplicação do método FAVOR™ nas células da malha.....	47
Figura 10: Localização da região de estudo – Porção central do litoral do paulista.	48
Figura 11: Arco praial de Santos subdividido pelos canais de drenagem urbana. ...	49
Figura 12: Retração praial entre o Canal 6 e a extremidade da Ponta da Praia.	50
Figura 13: Evolução da isóbata de 0,0 m, entre o Canal 6 e a Região da Ponta da Praia (2009–2017).....	50
Figura 14: Invasão do mar junto à infraestrutura urbana na região da Ponta da Praia, Santos - SP.	51
Figura 15: Foto aérea da obra após a implantação.....	53
Figura 16: Perfil seção 0 - Entre o Canal 6 e a Ponta da Praia.	54
Figura 17: Etapas do processo de simulação.....	55
Figura 18: Área modelada.....	56
Figura 19: Detalhe do posicionamento da obra piloto junto Ponta da Praia.....	57
Figura 20: Corte do trecho transversal do projeto piloto executado.	58
Figura 21: Seção trecho transversal protegido pelo enrocamento.	58
Figura 22: Seção trecho transversal completamente submerso.....	59
Figura 23: Corte do trecho longitudinal do projeto piloto executado.....	60
Figura 24: Seção transversal da camada inferior do trecho longitudinal.	60
Figura 25: Seção transversal do trecho longitudinal.....	60
Figura 26: Poligonal do levantamento topográfico.	62
Figura 27: Seções do levantamento topográfico.	63

Figura 28: Levantamento topográfico.....	64
Figura 29: Estação total (à esquerda) e equipamento GNSS (à direita).	64
Figura 30: Esquema dos níveis para correção dos pontos para a cota local.	65
Figura 31: Régua da estação maregráfica da Praticagem em Santos - SP, Brasil. .	65
Figura 32: Pontos de medição dos dados de campo.	68
Figura 33: Aparato de medição (Flutuador + Smartphone).	69
Figura 34: Espectro de acelerações filtrado.	69
Figura 35: Trem de ondas (540 s) - Ponto de medição 03 (Baixa-mar).	70
Figura 36: Trem de ondas (540 s) - Ponto de medição 03 (Preia-mar).	70
Figura 37: Modelo digital de elevação.....	72
Figura 38: Geotubos em 3D.	73
Figura 39: Geometria do tanque de ondas.....	74
Figura 40: Blocos múltiplos no Flow3D®.....	76
Figura 41: Relação entre células.....	76
Figura 42: Disposição dos blocos de malha no tanque de ondas.	77
Figura 43: Conexão entre os blocos múltiplos do tanque de ondas.	77
Figura 44: Malha conformada.....	78
Figura 45: Inserção do espectro de ondas no Flow3D®.	81
Figura 46: Condições de contorno.	81
Figura 47: Posição das ferramentas de extração de dados no modelo.....	83
Figura 48: Análise da malha computacional por meio do método FAVOR™.	85
Figura 49: Teste de refinamento da malha (Baixa-mar).	87
Figura 50: Teste de refinamento da malha (Preia-mar).....	88
Figura 51: Barras de incerteza numérica (Baixa-mar).....	88
Figura 52: Barras de incerteza numérica (Preia-mar).	89
Figura 53: Máxima pressão residual - Cenários 01 e 02.	90
Figura 54: Máxima pressão residual - Cenários 03 e 04.	90
Figura 55: Tamanho do intervalo de tempo - Cenários 01 e 02.	91
Figura 56: Tamanho do intervalo de tempo - Cenários 01 e 02.	91
Figura 57: Geração de ondas no modelo (Baixa-mar) - Campo x Flow3D.....	92

Figura 58: Geração de ondas no modelo (Preia-mar) - Campo x Flow3D.	92
Figura 59: Zonas de análise - Cenário 01 (Baixa-mar) e Cenário 02 (Preia-mar) ...	94
Figura 60: Empolamento puro observado no Cenário 04 (Preia-mar).....	95
Figura 61: Perfis XZ - Variação da superfície livre. Cenário 04 (Preia-mar).....	96
Figura 62: Refração gerada pela estrutura: Cenário 01 x Cenário 03 (Baixa-mar) ..	96
Figura 63: Empolamento devido à refração: Cenário 02 x Cenário 04 (Preia-mar)..	97
Figura 64: Efeitos da reflexão de ondas observados nos Cenários 01 (Baixa-mar) e 02 (Preia-mar)	98
Figura 65: Galgamento da estrutura - Cenário 01 (Baixa-mar).	99
Figura 66: Dissipação de energia turbulenta sobre o quebra-mar.....	101
Figura 67: Onda incidente x Onda transmitida - Campo (Baixa-mar).....	101
Figura 68: Onda incidente x Onda transmitida – Campo (Preia-mar).....	102
Figura 69: Onda incidente x Onda transmitida – Flow3D® (Cenário 01).....	103
Figura 70: Onda incidente x Onda transmitida – Flow3D® (Cenário 02).....	103
Figura 71: Curva de eficiência de quebra-mares submersos construídos com tubos de geotêxtil (LEIJA et al., 2014) x Dados de campo x Dados modelo numérico.	104
Figura 72: Onda incidente x Onda transmitida – Flow3D® (Cenário 03).	105
Figura 73: Onda incidente x Onda transmitida – Flow3D® (Cenário 04).	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens de cada método de modelagem.	23
Tabela 2: Valores de φ , $\Gamma\varphi$ e $S\varphi$	42
Tabela 3: Esquemas de discretização	42
Tabela 4: Coordenadas de referência UTM do quebra mar – submerso.....	61
Tabela 5: Detalhes dos elementos indicados nas seções transversais.	61
Tabela 6: Coordenadas das seções do levantamento.....	64
Tabela 7: Maré astronômica.	66
Tabela 8: Maré registrada.....	66
Tabela 9: Cenários de simulação	71
Tabela 10: Coordenadas poligonal superfície modelada.....	72
Tabela 11: Dimensões do tanque de ondas.	75
Tabela 12: Propriedades dos fluidos	82
Tabela 13: Níveis de refinamento da malha.	86
Tabela 14: Tempos de simulação.....	89
Tabela 15: Estatística de ondas – Borda de entrada do modelo.	93
Tabela 16: Estatística de ondas – Dados de campo.....	102
Tabela 17: Estatística de ondas – Simulações Flow3D® (Parte 01).....	103
Tabela 18: Estatística de ondas – Simulações Flow3D® (Parte 02).....	106
Tabela 19: Dissipação de energia provocada pelo quebra-mar submerso.....	106

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVO.....	20
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1. MODELAGEM HIDRODINÂMICA COSTEIRA.....	21
3.2. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	25
3.3. ESTADO DA ARTE – TANQUE DE ONDAS CFD	28
3.4. ESTRUTURA NUMÉRICA	33
3.4.1 Reynolds Avaraged Navier – Stokes (RANS)	34
3.4.1.1 Modelos de Turbulência.....	37
3.4.1.2 Camada Absorvedora de Ondas (Camada Esponja)	38
3.4.2 Método de Volumes Finitos.....	40
3.4.3 Método <i>Volume of Fluid</i> (VOF).....	44
3.4.4 Método FAVOR™	46
4. HISTÓRICO DO LOCAL DE ESTUDO.....	48
5. MATERIAIS E MÉTODO	55
5.1. DADOS DE CAMPO.....	56
5.1.1 Quebra-mar submerso	57
5.1.2 Levantamento topográfico.....	62
5.1.3 Dados de maré.....	66
5.1.4 Dados de onda.....	67
5.2. MODELO COMPUTACIONAL.....	71
5.2.1 Modelo digital de elevação (MDE)	71
5.2.2 Geometria do tanque de ondas.....	73
5.2.3 Malha Computacional.....	75
5.2.4 Modelos Físicos	78
5.2.5 Condições de Contorno.....	79
5.2.6 Condições Iniciais	82
5.2.7 Propriedades dos fluidos.....	82
5.2.8 Extração de dados	83
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85

6.1.	REFINAMENTO DA MALHA	85
6.2.	PROCESSAMENTO E CONTROLE DO SOLUCIONADOR	89
6.3.	GERAÇÃO DE ONDAS NO MODELO COMPUTACIONAL	92
6.4.	REPRODUÇÃO DOS EFEITOS DE ÁGUAS RASAS	93
6.4.1	Empolamento e Refração.....	95
6.4.2	Reflexão	98
6.4.3	Galgamento e Arrebentação	99
6.5.	DISSIPACÃO DA ENERGIA DAS ONDAS.....	101
7.	CONCLUSÕES.....	108
7.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

1. INTRODUÇÃO

Entre as estruturas destinadas a dissipar energia das ondas, destacam-se os quebra-mares submersos, estruturas de baixo impacto ambiental amplamente utilizadas ao redor do mundo devido sua simplicidade de execução, podendo ser construídas por uma ampla gama de materiais e que quando bem projetadas não causam problemas de balneabilidade e poluição visual. Atuam principalmente na proteção de embocaduras, combate a erosão costeira e criação de zonas de abrigo portuárias (GARCIA et al., 2004).

Apesar de sua popularidade, as transformações de onda que ocorrem sobre e ao redor dos quebra-mares como a supracitada dissipação de energia, os efeitos de águas rasas, além da influência da estrutura nos padrões de circulação, dificilmente podem ser previstos sem o auxílio de ferramentas de modelagem (DENTALE et al., 2018).

Na área de engenharia costeira, os modelos numéricos são amplamente utilizados na investigação da hidrodinâmica devido a proporção espacial dos estudos, o que acaba limitando a utilização de modelos físicos em problemas de grande escala (DIDIER et al., 2017). Entretanto, Sharifahmadian (2015) elucida que os modelos comumente utilizados em simulações de ambientes costeiros não conseguem reproduzir os referidos efeitos, principalmente após a interação com estruturas costeiras. Isto ocorre devido à natureza das equações solucionadas, que contém suposições simplificadoras e concentram-se nos efeitos bidimensionais, enquanto os efeitos tridimensionais não são estudados de forma detalhada. Além do mais, existe o problema decorrente do uso de grandes espaçamentos de grade, resultante da proporção das áreas simuladas. Logo, estudos para avaliar obras e / ou intervenções com base apenas neste tipo de modelagem não são adequados, podendo até mesmo indicar obras que acentuarão o problema ao invés de resolvê-lo.

Há, portanto, a necessidade de produzir métodos de modelagem capazes de reproduzir os efeitos de águas rasas e dissipação de energia em três dimensões e, assim, melhorar a compreensão sobre a interação entre quebra-mar submerso e hidrodinâmica. Por este motivo, nos últimos anos tem-se aumentado o interesse na Fluidodinâmica Computacional (em inglês, *Computational Fluid Dynamics*) para a modelagem de tanques de ondas numéricos totalmente não-lineares, visando

reproduzir as principais características, efeitos não-lineares e interações não-lineares com as estruturas costeiras (LARA et al., 2006).

A fluidodinâmica computacional é definida como o conjunto de metodologias que permitem a simulação de problemas que envolvem o escoamento de fluidos, recorrendo a equações diferenciais parciais para descrever fenômenos físicos. O advento de computadores com maior capacidade de processamento e armazenamento, oriundos dos constantes avanços tecnológicos, tem permitido o desenvolvimento de algoritmos para a solução de uma ampla gama de problemas e atraído à atenção de numerosos pesquisadores (MALISKA, 2004).

Losada et al. (2008), forneceram uma extensa validação de modelos CFD aplicados a casos de importância na área de engenharia costeira. Os softwares Ansys FLUENT® e OpenFOAM® têm sido usados com êxito, assim como o FLOW-3D® da Flow Science, que foi amplamente testado, apresentando excelente aderência a valores medidos em campo e modelo reduzido (DENTALE et al., 2018).

Para este tipo de simulação a técnica de modelagem usualmente adotada envolve a solução das equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (em inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes* – RANS) por meio do Método de Volumes Finitos em uma malha fixa, utilizando um modelo de turbulência para o fechamento das equações RANS e um procedimento de rastreamento de superfície livre, normalmente baseado no *Volume of Fluid Method* (VOF). A técnica é popularmente denominada RANS / VOF (CAVALLARO et al., 2012).

Ainda assim, existe a questão sobre estes modelos reproduzirem corretamente a realidade, sendo de suma importância a sua validação por comparação com valores medidos em campo ou modelo reduzido, para prover o entendimento dos fenômenos físicos e calibração do modelo numérico, apesar da existência de erros inerentes à medição (LOSADA et al., 2008).

Desta forma, um tanque de ondas CFD será elaborado por meio do software FLOW-3D® na área de influência do protótipo apresentado em Garcia e Gireli (2019) e executado pela Prefeitura de Santos na região da Ponta da Praia, Santos – SP, que por estar próxima à embocadura do Estuário Santista (Figura 1), sofreu grandes alterações nos últimos 50 anos em consequência de mudanças climáticas e intervenções antrópicas, como à urbanização desordenada da linha de costa e a expansão do Porto de Santos.

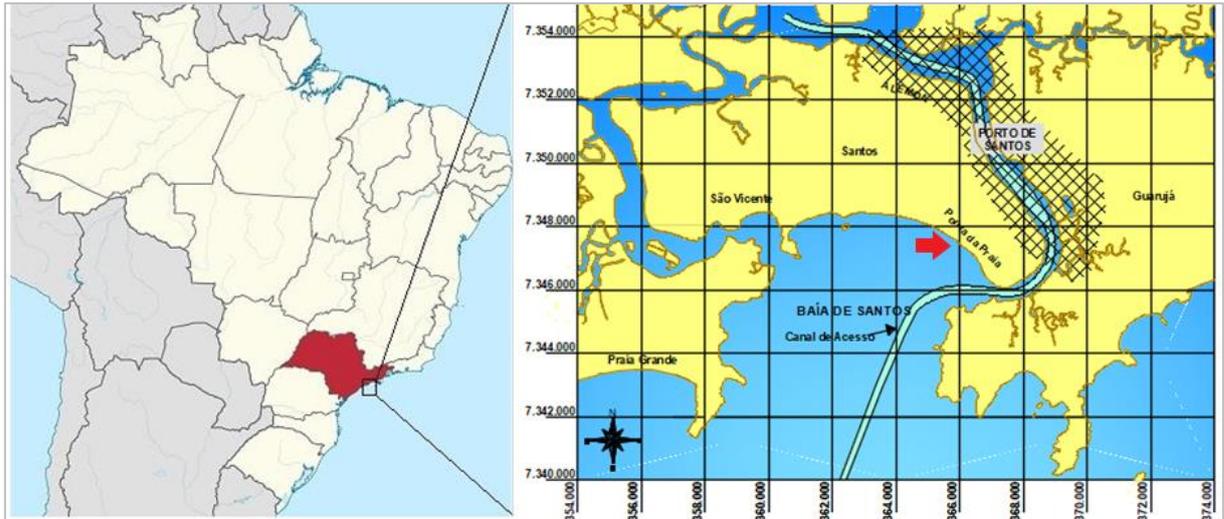


Figura 1: Localização da região de estudo – Ponta da Praia, Santos – SP.
Fonte: (GARCIA; GIRELI, 2019).

Visando atenuar o forte processo erosivo presente na região, classificada como a mais afetada pelo processo de retração costeira na zona urbana do litoral paulista, o protótipo consiste em um quebra-mar submerso construído com geotubos preenchidos com areia da praia (Figura 2). Seus principais objetivos são a redução do impacto proveniente da energia das ondas em eventos de ressaca e o engordamento da faixa praial, devido à refração das ondas sobre a estrutura, fazendo com que o rumo das ondas passe a atingir um ângulo próximo a ortogonal, diminuindo o transporte longitudinal costeiro resultante (GARCIA; GIRELI, 2019).

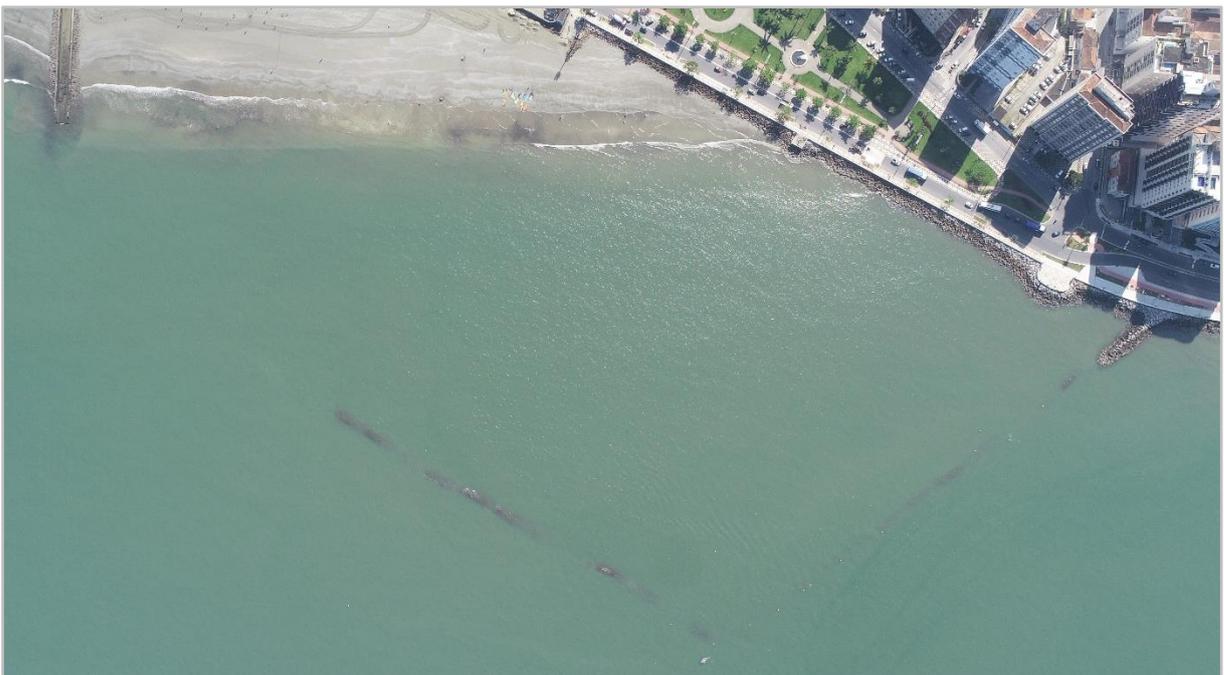


Figura 2: Protótipo construído na Ponta da Praia, Santos – SP.
Fonte: acervo pessoal, outubro, 2019.

Neste sentido, o desenvolvimento de um tanque de ondas CFD capaz de reproduzir a dissipação de energia e os efeitos de águas rasas, promove o melhor entendimento sobre a interação entre quebra-mar submerso e hidrodinâmica e, permite avaliar a real eficiência da inserção deste tipo de estrutura em regiões costeiras. Outro fator motivador é o ineditismo da aplicação da metodologia CFD para a investigação deste tipo de intervenção no Brasil.

2. OBJETIVO

Desenvolvimento de um tanque de ondas CFD por meio do software FLOW-3D®, capaz de reproduzir a dissipação de energia e os efeitos de águas rasas após a interação com um quebra-mar submerso.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar o estado da arte dos tanques de onda CFD, a fim de identificar as técnicas de modelagem indicadas para este tipo de simulação;
- Desenvolver um modelo 3D em escala real capaz de reproduzir a superfície praial da região de estudo, assim como do quebra-mar submerso;
- Avaliar a capacidade do software FLOW-3D® em gerar ondas irregulares a partir da inserção de espectros mensurados em campo;
- Comprovar numericamente a capacidade de reprodução do fenômeno de dissipação de energia provado pelo quebra-mar submerso por meio da comparação entre os dados mensurados em campo e os dados extraídos do modelo numérico;
- Obter a distribuição das propriedades do escoamento para avaliar de modo qualitativo a correta reprodução dos efeitos de águas após a interação com a estrutura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MODELAGEM HIDRODINÂMICA COSTEIRA

A modelagem é uma ferramenta poderosa para a análise de processos e de sistemas complexos, possibilitando o estudo e avaliação de situações, ou casos de difícil reprodução. Na engenharia a expressão “modelo” é usada para descrever a simulação de protótipos que visam antever os efeitos do projeto ou esquema proposto, transformando dados de entrada (geometria, condições de contorno, força, etc.) em dados de saída (vazões, níveis, pressões, etc.), notabilizando a técnica como uma ferramenta indispensável para tomadores de decisão em diversas áreas, capaz de produzir soluções técnicas e econômicas de forma otimizada em um mundo de crescente competitividade (LOMAX et al., 2013).

De acordo com Maliska (2004), a modelagem pode ser executada por meio dos três métodos a seguir: experimentais, analíticos ou numéricos. Os métodos experimentais são a abordagem tradicional e tem como principal vantagem o uso da configuração real do problema. No entanto, contam com diversas desvantagens, que devem ser contornadas para sua utilização. Os métodos analíticos e numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois ambos objetivam resolver as equações diferenciais que formam o modelo matemático. A diferença prática entre eles está apenas na complexidade das equações que cada método utiliza. Os métodos analíticos apresentam soluções fechadas, onde as equações analíticas podem ser solucionadas com baixíssimo tempo de processamento computacional. Geralmente são utilizados para resolver problemas com condições de contorno e geometria simples, onde a teoria matemática está suficientemente desenvolvida. Caso a solução através de métodos analíticos se enquadre dentro do nível de precisão desejado, seu uso é indicado, pois em engenharia deve-se escolher a ferramenta adequada ao tamanho do problema.

Os métodos numéricos são utilizados para resolver problemas com condições de contorno e geometrias complexas e na maioria dos casos não apresentam restrições. Tem como tarefa resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvam a função incógnita, uma vez que se está resolvendo um sistema algébrico de equações ao invés de um conjunto de equações diferenciais, a solução passa a ser obtida para um número

discreto de pontos ao longo do domínio e não mais em um nível infinitesimal (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A Figura 3 apresenta um fluxograma de trabalho que elucida as ferramentas disponíveis nos métodos experimentais e teóricos.

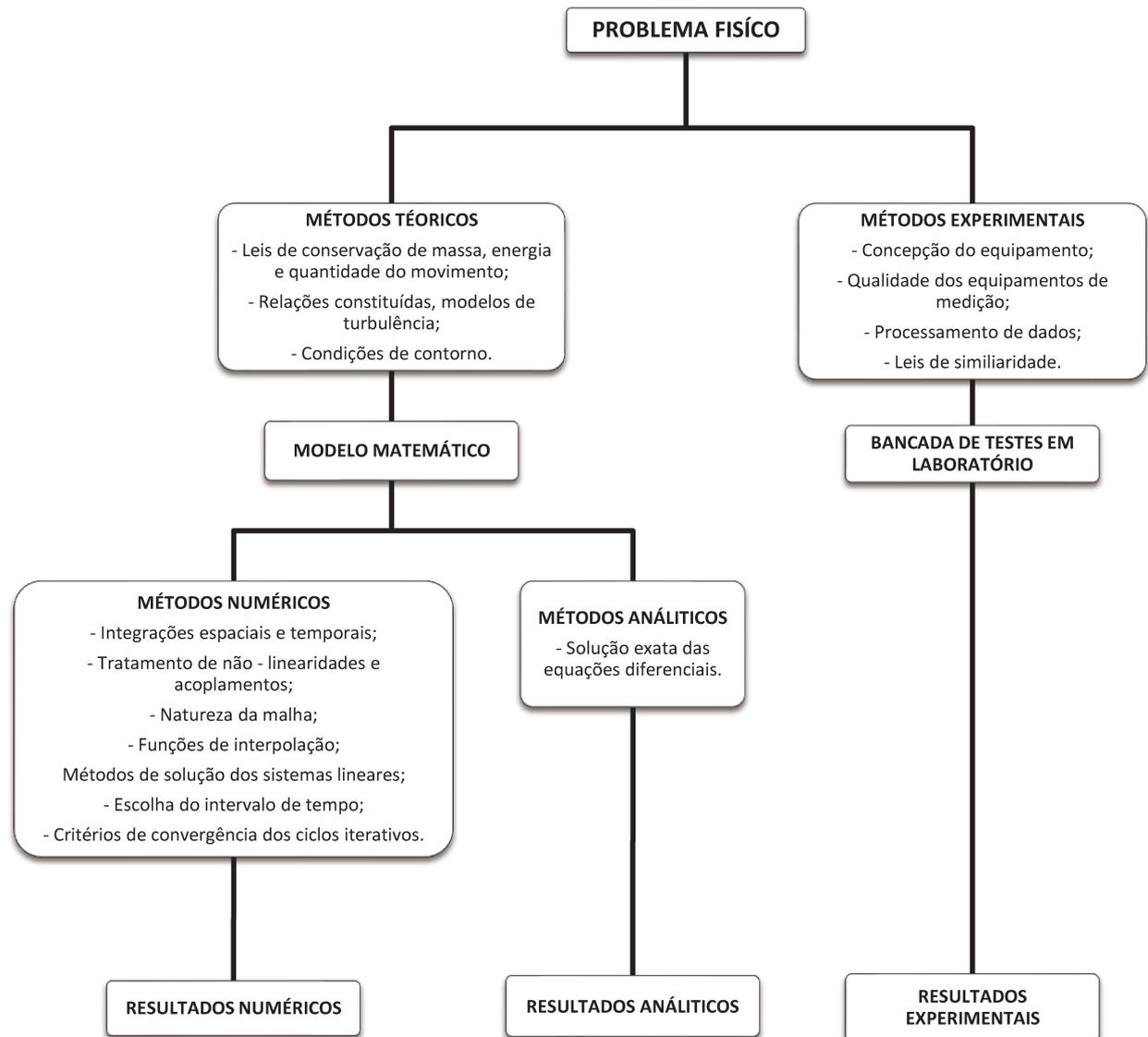


Figura 3: Ferramentas disponíveis.
Fonte: (Adaptado de MALISKA, 2004).

A prática mostra que para a obtenção de um bom modelo deve-se aliar ambos os métodos, casos onde métodos experimentais são utilizados para o entendimento e modelagem matemática do fenômeno ou calibração do modelo, assim como a importante função de modelos analíticos que validam casos limite de modelos numéricos são exemplos clássicos desta intercambialidade (FORTUNA, 2000). As vantagens e desvantagens dos três métodos elencados são expostas na Tabela 1.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens de cada método de modelagem.

Técnica	Vantagem	Desvantagem
Experimental	Mais realista	Equipamento exigido
		Problemas de escala
		Dificuldades de medição
		Custo operacional
Analítica	Mais geral	Restrita a geometrias e processos físicos simples
	Fórmula fechada	Geralmente restrita a problemas lineares
Numérica	Não há restrição a linearidade	Erros de truncamento
	Geometrias e processos físicos complicados	Prescrição das condições de contorno apropriadas
	Evolução temporal do processo	Custos computacionais

Fonte: (Adaptado de FORTUNA, 2000).

Ainda assim, é de vital importância realizar os processos de validação numérica e validação física, que atestam a qualidade do método numérico. Os processos têm como objetivo encontrar erros que podem estar presentes na solução numérica, levando-se em conta a comparação com o fenômeno físico. A validação numérica detecta erros numéricos resultantes da má solução de equações diferenciais, através de comparações com outras soluções numéricas ou analíticas para o mesmo problema, já a validação física preocupa-se com os erros resultantes do uso de equações diferenciais que não descrevem de maneira fiel os fenômenos físicos (MALISKA, 2004).

Segundo Lara et al. (2006), o principal método para modelar a hidrodinâmica costeira e conseqüentemente a sua interação com estruturas naturais ou artificiais são os tanques físicos de ondas em escala reduzida. A grande vantagem é que a hidrodinâmica real é modelada e importantes parâmetros como pressões e velocidades ao longo do fluxo, assim como as forças exercidas sobre a estrutura, podem ser medidos por sensores sem gerar perturbações. Além do mais, os ensaios são filmados e reproduzidos quantas vezes forem necessárias.

Todavia, para extrair bons resultados do modelo é imprescindível utilizar uma grande quantidade de medidores e contornar os problemas ocasionados por efeitos de escala, o que nem sempre é possível. Ademais, estes modelos são limitados em função da área de ocupação e custos de construção, operação e manutenção. Por conseqüência, não são utilizados em estudos de grande proporção espacial (WESTPHALEN et al., 2012).

Em relação aos métodos numéricos, atualmente existe uma infinidade de modelos disponíveis para simular a hidrodinâmica costeira. Contudo, devido à natureza de seus equacionamentos, devem ser aplicados somente em casos onde sua solução é indicada, ou seja, não existe um modelo capaz de investigar todos os fenômenos e situações que a modelagem hidrodinâmica costeira apresenta. (SHARIFAHMADIAN, 2015)

O movimento de ondas em larga escala é regularmente investigado por modelos espectrais, que assumem que o estado do mar é composto por um número infinito de ondas, cujas alturas de onda são uma função da frequência e direção. Estes modelos geralmente são conectados a modelos atmosféricos para prever o clima global de ondas. Como estes modelos estão no domínio da frequência, utilizam valores médios de fase e possuem espaçamento de malha maior que um comprimento de onda. Isto resulta em tempos computacionais relativamente rápidos, mas impossibilita o estudo da difração e refração de ondas sobre e ao redor de um corpo (MAGUIRE, 2011).

Os modelos baseados nas equações de Saint Venant (1871) e Boussinesq (1872) são comumente utilizados para modelar o comportamento das ondas próximo à costa, em uma escala espacial menor que os modelos espectrais. São indicados para a simulação em regiões de águas intermediárias (mares rasos e portos) e possuem rápida solução computacional no domínio do tempo. Contudo, não são indicados para simular a interação entre estrutura e hidrodinâmica, pois resolvem o problema integralmente apenas em duas dimensões e utilizam a profundidade média para representar parcialmente o fluido na vertical. Devido a esta e outras simplificações, importantes fenômenos presentes na interação, como a turbulência, não são representados de maneira fidedigna (SHARIFAHMADIAN, 2015).

Os modelos numéricos embasados no conceito de escoamento potencial incompressível obtêm as equações de conservação atendendo as equações de Laplace e, são resolvidos numericamente usando o Método de Elementos de Contorno. Geralmente, são empregados na análise hidrodinâmica de navios, plataformas de petróleo e conversores de energia, pois são capazes de modelar ondas não lineares em águas rasas e profundas, além de indicar as forças exercidas sobre as estruturas. Entretanto, possuem grandes limitações, pois não levam em consideração as perdas viscosas, além de contarem com a suposição de fluxo

irrotacional. Consequentemente, não são capazes de simular o complexo fluxo em torno de estruturas, nem a quebra de ondas (MAGUIRE, 2011).

Este contexto foi a gênese para o desenvolvimento de tanques de ondas numéricos (NWT's) capazes de simular com um bom grau de confiabilidade a interação entre estrutura e hidrodinâmica. Para isto, é necessário resolver as equações de Navier-Stokes que descrevem o fluxo viscoso e rotacional. A técnica de solução computacional destas equações é popularmente conhecida como Fluidodinâmica Computacional (LARA et al., 2006).

Este tipo de modelo numérico é altamente versátil, sendo capaz de simular a quebra de ondas, arraste de ar, interação fluido-estrutura e fluxo multifásico, para citar apenas algumas vantagens. Por este motivo, nos últimos anos tem-se aumentado o interesse no desenvolvimento de tanques de ondas CFD, que simulam diversas condições sem restrições de escala (DIDIER et al., 2017).

A principal desvantagem da metodologia CFD em comparação com os demais métodos supracitados é o tempo de processamento computacional e o tamanho do arquivo de dados de saída. No entanto, o advento de computadores com processadores multi-núcleos e maior frequência, além do aumento da capacidade armazenamento vem contornando este problema (FORTUNA, 2000).

3.2. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A fluidodinâmica computacional surge como uma poderosa ferramenta utilizada no estudo da dinâmica local do fluido e fenômenos associados. Fundamentalmente o usuário da fluidodinâmica computacional tem interesse em obter a distribuição de velocidades, pressões e temperatura na região do escoamento através da solução das equações de Navier-Stokes, altamente não lineares, que descrevem matematicamente princípios físicos como a conservação de massa (equação da continuidade), quantidade de movimento (segunda lei de Newton) e conservação de energia (primeira lei da termodinâmica) (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Para prover análises satisfatórias com relativa facilidade de execução os softwares de CFD, em sua maioria, contam com interfaces gráficas e são divididos em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento, facilitando a definição do problema e a análise dos resultados (LOMAX et al., 2013).

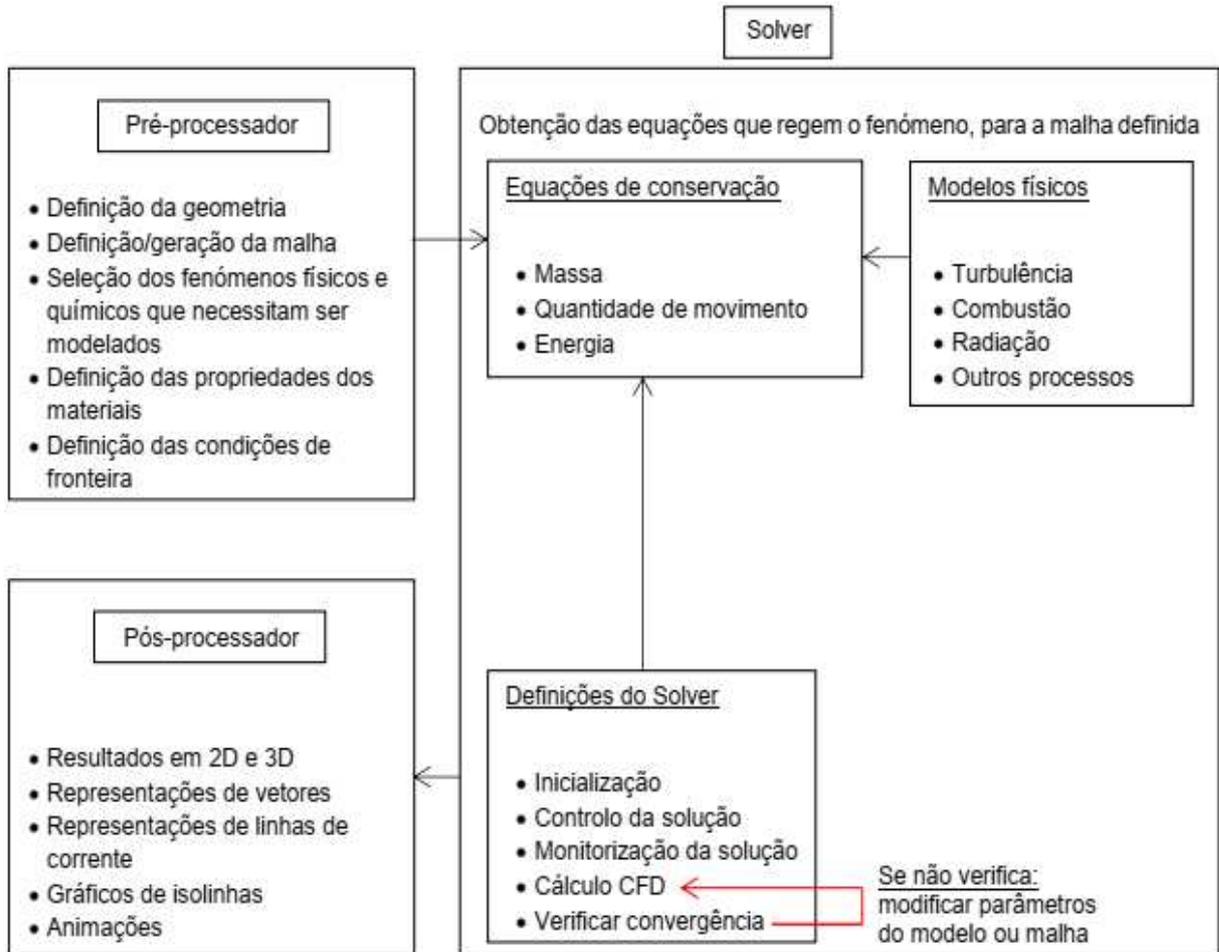


Figura 4: Etapas da simulação CFD.
Fonte: (Adaptado de FORTUNA, 2000).

Na etapa do pré-processamento é inserida a geometria e definida a região de interesse (domínio computacional), esse domínio é dividido em uma quantidade determinada de subdomínios (criação da malha) e são definidas as condições de contorno iniciais, posteriormente seleciona-se os fenômenos físicos que serão simulados (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A etapa do processamento consiste na solução numérica de sistemas de equações diferenciais parciais e necessita de métodos robustos de discretização tais como, Diferenças Finitas (MDF), Volumes Finitos (MVF) ou Elementos Finitos (MEF). Esses métodos permitem linearizar as equações que modelam o fenômeno num conjunto de equações algébricas que são resolvidas pelos diferentes métodos numéricos existentes, sendo que a principal diferença entre eles consiste na forma como as variáveis do escoamento são aproximadas com o processo de discretização empregado em cada método. No campo da mecânica dos fluidos, o método de volumes finitos (MVF) é o mais utilizado em função de suas características

conservativas, onde equações aproximadas são obtidas através dos balanços de conservação no volume elementar, por conseguinte, a conservação das propriedades é satisfeita no nível de todos os volumes elementares (MALISKA, 2004).

O pós-processamento trata-se da coleta dos resultados obtidos após os cálculos e a análise dos dados por meio da plotagem de gráficos e emissão de planilhas eletrônicas. Os softwares de CFD dispõem de diversas ferramentas qualitativas e quantitativas para a visualização de resultados. Exemplos clássicos são os perfis de velocidade, pressão, vazão e etc., que permitiram o manuseio dos dados com maior facilidade (FORTUNA, 2000).

Evidentemente os modelos CFD, assim como qualquer outro modelo numérico, está sujeito a erros e incertezas. Portanto, é necessário quantificar e limitar estes erros, de modo a garantir que os resultados encontrados possam ser confiáveis. Segundo Maguire (2011), erros e incertezas podem ser causados por sete fontes:

- i. Erro e incerteza do modelo: Definida como sendo a diferença entre o fluxo real e a solução exata das equações do modelo. Os erros de modelagem e a incerteza são causados pela solução errada das equações;
- ii. Discretização ou erro numérico: Este tipo de erro é definido como a diferença entre a solução exata das equações modeladas e a solução numérica em uma malha de pontos de grade, devido ao uso de diferenças finitas para representar derivadas exatas. À medida que o número de pontos de grade aumenta, a probabilidade de ocorrência deste erro diminui e tende a zero a uma taxa determinada pelo método numérico empregado;
- iii. Erro de iteração ou convergência: A diferença entre uma solução totalmente convergente em um número finito de pontos de grade e uma solução que não é totalmente convergida leva a esse tipo de erro. Esses erros só poderiam ser evitados se o processo iterativo pudesse continuar indefinidamente, o que não é possível, uma vez que os modeladores têm restrições de tempo e os limites de convergência são definidos para tolerâncias de exatidão;

- iv. Erro de arredondamento: Este tipo de erro é a diferença entre a aproximação calculada de um número e seu valor matemático exato. É causado pelo fato de que os computadores podem armazenar um determinado valor apenas através de um número limitado de dígitos, no caso 16, 32 e 64 bits;
- v. Incertezas da aplicação: Quando o problema é complexo e não pode ser definido com precisão, esses erros podem surgir. Essas incertezas incluem, mas não estão limitadas a definição de geometria, condições de contorno ou se o fluxo é estável ou instável;
- vi. Erros do usuário: em qualquer estágio da interação do usuário com o código (ou seja, geração de geometria, criação da malha, pré-processamento ou pós-processamento), erros podem ser cometidos. Quanto mais experiente o usuário, menos erros haverá;
- vii. Erros de código: Frequentemente conhecidos como erros de programação. São erros não intencionais na implementação ou erros de compilação no hardware do computador. Eles podem ser detectados principalmente por meio da verificação e validação do código, o que geralmente é difícil.

Conforme mencionado anteriormente, a técnica de modelagem popularmente denominada RANS / VOF é a base dos modelos CFD aplicados ao estudo da interação entre estruturas costeiras e hidrodinâmica (CAVALLARO et al., 2012). Logo, nos tópicos seguintes serão abordados aspectos relacionados a estrutura numérica destes modelos. Contudo, antes de abordar estes tópicos se faz necessária uma revisão sobre o estado da arte da simulação numérica de tanque de ondas CFD.

3.3. ESTADO DA ARTE – TANQUE DE ONDAS CFD

A simulação numérica tornou-se uma ferramenta indispensável no estudo da hidrodinâmica costeira, especialmente nos últimos anos devido ao avanço de tecnologias e metodologias de simulação. Atualmente, a maioria dos softwares de simulação numérica são capazes de modelar NWTs que permitem a utilização de

ondas irregulares, obtendo desta forma resultados em concordância com valores mensurados em campo. Contudo, simulações de superfície livre totalmente não-lineares ainda demandam grande esforço computacional (DIDIER et al., 2017).

Há, portanto, numerosos estudos sobre modelagem numérica de tanques de ondas CFD. Na sequência são apresentados de maneira sucinta os trabalhos de maior relevância desenvolvidos nos últimos 20 anos.

O trabalho realizado por Lin e Liu (1998), apresentou um modelo numérico capaz de investigar o fenômeno da quebra de onda através da solução das equações RANS e modelo de turbulência $k-\epsilon$. O rastreamento da superfície livre foi obtido por meio do método VOF (HIRT; NICHOLS, 1981). Os autores observaram uma boa concordância entre os resultados numéricos e os resultados experimentais em termos de perfil de onda e velocidades, entretanto, o modelo foi incapaz de fornecer informações sobre outros fenômenos. Este trabalho é considerado o pioneiro no uso da CFD para modelar NWT's.

Em Hsu et al. (2002), um modelo matemático baseado nas equações VARANS (*Volume Averaged Reynolds Averaged Navier–Stokes*) foi desenvolvido para descrever o movimento das ondas de superfície nas proximidades de uma estrutura costeira, sendo ela sólida, permeável ou uma combinação de ambas. Nas equações VARANS, as tensões de Reynolds são modeladas adotando a hipótese de viscosidade turbulenta, portanto, as equações do modelo de energia cinética turbulenta ($K-\epsilon$) foram obtidas através da taxa de dissipação média no volume elementar. O desempenho do modelo foi verificado comparando as soluções numéricas com dados experimentais.

Giarrusso et al. (2003), apresentaram resultados obtidos por meio do uso de um modelo computacional de águas rasas acoplado a um procedimento simples para avaliação do transporte de sedimentos no leito, aplicado a três diferentes geometrias de quebra-mar submerso, com objetivo de analisar a efetividade deste tipo de estrutura em dissipar a energia das ondas e causar o engordamento praial. Esta abordagem, embora incapaz de produzir uma simulação da real evolução do fundo, forneceu uma medida de estabilidade de uma determinada configuração do leito. Os autores alertam que a utilização de tal parâmetro sem a real investigação da interação estrutura – ação das ondas, pode levar a construção de obras que podem piorar a situação ao invés de melhorar e, classificam o entendimento do regime hidrodinâmico e do transporte de sedimentos, como extremamente importante e complexo. Por fim,

concluem que o desenvolvimento de métodos baseados nas equações de Navier-Stokes é necessário para melhorar o desempenho dos NWT's, especialmente para baixas alturas de onda e maiores profundidades.

Um tanque de ondas numérico 2D foi desenvolvido por Garcia et al. (2004), para simular a interação das ondas com estruturas porosas através da aplicação das equações RANS, também foram analisados os processos hidrodinâmicos mais relevantes na interação com quebra-mares de baixa crista. O modelo considera a reflexão, transmissão, galgamento, quebra de onda, turbulência em regiões permeáveis para qualquer tipo de geometria e número de camadas. Testes de laboratório em pequena escala foram realizados para validar o modelo com diferentes condições de onda e configurações de quebra-mar, comparando os resultados dos cálculos numéricos com dados experimentais. O modelo foi validado com alto grau de concordância no deslocamento de superfície livre, pressões dentro da estrutura porosa e campo de velocidades. Os resultados obtidos indicaram que este modelo representou uma melhoria substancial na modelagem numérica de estruturas de baixa crista, uma vez que incluiu muitos processos negligenciados anteriormente.

Em Park et al. (2004), ondas multidirecionais totalmente não lineares foram simuladas por meio do uso de um técnica de simulação numérica em tanque de ondas numérico 3D. As ondas incidentes direcionais foram criadas por um gerador de ondas multi-segmentado e as ondas de saída foram dissipadas numericamente dentro de uma zona de amortecimento artificial localizada no lado oposto do gerador. O estudo apresentou resultados para a geração de ondas regulares, incluindo testes de convergência numérica, ondas irregulares e ondas aleatórias multidirecionais. Além disso, o tanque de ondas foi examinado usando outro gerador de ondas numéricas, este com base nas velocidades da partícula de água da onda linear (segunda ordem de Stokes), validando as velocidades de entrada e as forças hidrodinâmicas.

Lara et. (2006), demonstraram a capacidade do modelo COBRAS (*Cornell Breaking Waves e Structures*) de reproduzir a interação de ondas irregulares com quebra-mares submersos permeáveis. Os resultados apresentados pelo modelo numérico foram comparados com dados experimentais de testes de laboratório, sendo que, a validação do modelo numérico foi realizada em duas etapas. Primeiramente, verificou-se que o procedimento de geração de ondas irregulares funciona adequadamente, comparando dados experimentais e numéricos de diferentes trens de ondas irregulares que se propagam sobre um fundo plano. Em seguida, a validação

do modelo numérico para interação de ondas com quebra-mares submersos foi realizada através de ensaios laboratoriais de pequena escala em diferentes espectros de ondas incidentes. Os resultados extraídos do modelo numérico reproduziram adequadamente os principais aspectos da interação de ondas aleatórias com quebra-mares porosos submersos.

O trabalho apresentado por Losada et al. (2008), descreve os resultados de uma modelagem numérica 2D com enfoque na funcionalidade de quebra-mares de enrocamento, com atenção especial focada em processos de galgamento de onda. Foi utilizado o modelo COBRAS-UC, uma versão do COBRAS, baseada nas equações VARANS, que faz uso do método de captura da superfície livre VOF. A natureza das equações do modelo e a técnica de resolução aplicada forneceram um método capaz de simular a reflexão de ondas, *run-up*, quebra de onda, transmissão através de blocos de enrocamento, galgamento e agitação no lado protegido. Além disso, estudos experimentais bidimensionais foram realizados para investigar o desempenho do modelo. Os cálculos das séries temporais de superfície livre, pressão e espectros sob ondas regulares e irregulares, foram comparados com os dados experimentais, atingindo uma excelente concordância, assim como as comparações com fórmulas semi-empíricas existentes

Em Chopakatla et al. (2008), o modelo comercial de CFD FLOW-3D® foi utilizado para calcular pressões e velocidades em malhas finas para um período de 35,5 minutos sobre um perfil de praia bidimensional. Espectros de onda observados a 8 metros de profundidade foram utilizados como dados de entrada e os resultados extraídos foram comparados com um conjunto de medições realizadas em campo através de sensores de pressão e medidores de corrente costeiros. Nos cálculos, a quebra de onda é uma consequência natural da dinâmica dos fluidos e não requer o uso de formulações empíricas ou critérios de quebra. Constatou-se uma boa concordância entre a altura da onda modelada e a observada. Os autores concluíram que o modelo pode ser usado como um laboratório numérico para estudar o processo de quebra e dissipação de onda.

No trabalho desenvolvido por Cavallaro et al. (2012), a metodologia CFD foi usada para fornecer uma abordagem nova e mais confiável para a análise de projeto de quebra-mares, especialmente em conexão com acúmulo de sedimentos e galgamento. A estrutura sólida foi simulada dentro do domínio numérico pela sobreposição de elementos virtuais individuais para formar os espaços vazios

delimitados pelos blocos. Assim, definindo uma grade computacional com um número adequado de nós dentro dos interstícios dos quebra-mares, proporcionando uma solução completa das equações hidrodinâmicas. As simulações numéricas foram realizadas integrando as equações RANS tridimensionais, acopladas ao modelo de turbulência RNG, a captura de superfície livre foi realizada pelo método VOF.

A modelagem por meio do software FLOW-3D® desenvolvida por Chen (2012), foi utilizada para o estudo da interação entre ondas e estruturas porosas. A validação ocorreu através de experimentos em modelo físico. Constatou-se que os resultados alcançados através do método proposto pelo manual do usuário do FLOW-3D, para definir os coeficientes de arrasto de meios porosos e os resultados dos experimentos divergem. Portanto, um estudo para calibração do modelo numérico se fez necessário. No estudo, quatro diferentes tipos de estruturas porosas foram modelados para explorar a interação com a onda, simples, dupla e de três camadas. Os resultados indicaram que as diferenças entre a simulação e o experimento são menores quando a fórmula de ajuste do parâmetro de mídia porosa 'b' ajusta-se a $0,03 / D$. O estudo constatou que quanto maior o período de onda, maior será a altura de onda e mais difícil será absorve-la, e que a refletividade é proporcional ao período de onda.

O trabalho desenvolvido por Dentale et al. (2014), forneceu resultados de um novo procedimento para analisar aspectos hidrodinâmicos das interações entre quebra-mares e ondas, integrando projetos CAD e a técnica CFD. A estrutura é modelada através da sobreposição de elementos tridimensionais individuais, semelhantes a situação real. O fluxo dentro dos vazios entre os blocos de concreto foi avaliado pela solução das equações RANS, em vez de usar a abordagem de "meios porosos". Para a validação dos resultados, os efeitos numéricos de galgamento e reflexão sobre o quebra-mar virtual foram comparados com algumas fórmulas empíricas e alguns testes laboratoriais similares. Obviamente, o modelo apresentado pode ser vantajoso quando comparado à modelagem física, analisando várias soluções preliminares de projeto e fornecendo orientação sobre a escolha ideal a ser submetida a testes laboratoriais posteriores.

O trabalho desenvolvido por Didier et al. (2017), apresenta um modelo numérico no qual foram implementadas rotinas específicas que permitem modelar um tanque de ondas 3D para analisar as interações complexas entre ondas e estruturas, que interessam os projetos de engenharia costeira e marítima. O trabalho também apresenta a aplicação deste modelo para o estudo da interação de ondas com três

tipos diferentes de estruturas marítimas: um emissário submarino, um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas e uma parte de um píer.

O trabalho apresentado por Dentale et al. (2018), forneceu avanços para o cálculo numérico de fluxo dentro de unidades de blindagem (no inglês *Numerical Calculation of Flow Within Armour Units* – FWAU) aplicado ao projeto de quebra-mares de enrocamento. A hidrodinâmica do fluxo induzido pelas ondas dentro dos interstícios dos blocos de concreto foi simulada com auxílio do método FAVOR™ para solucionar as equações RANS. Embora computacionalmente muito pesado, o FWAU está ganhando terreno, devido às suas óbvias vantagens sobre os “meios porosos”, como a possibilidade de contabilizar os efeitos altamente não estacionários, a menor necessidade de calibração e a avaliação de forças hidrodinâmicas em blocos únicos são fatores motivadores.

3.4. ESTRUTURA NUMÉRICA

As equações fundamentais para a dinâmica dos fluidos que descrevem a conservação de massa (1) e quantidade de movimento (3) são apresentadas a seguir utilizando a notação de Einstein:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do fluido e u_i ($i = x; y; z$) são as componentes cartesianas da velocidade. Para fluidos incompressíveis, a equação (1) é reduzida para:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

A segunda Lei de Newton descreve a quantidade de movimento e indica que a força em um elemento fluido pode ser entendida como a resultante das forças que atuam no volume elementar. A força da gravidade (aceleração g) é assumida como a única força de corpo atuante (MALISKA, 2004). Na forma diferencial, a equação para um fluido incompressível é descrita como:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + g \delta_{ij} \quad (3)$$

onde os termos no lado esquerdo da equação (3) expressam a aceleração local e convectiva, equalizados pela força da gravidade ($g\delta_{ij}$), pressões (p) e tensões viscosas (τ). Esta equação é geralmente empregada supondo que a tensão de cisalhamento (τ_{ij}) é proporcional ao gradiente de velocidade, sendo que um fluido com essas propriedades é chamado de newtoniano (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Quando o fluido é incompressível, as tensões de cisalhamento podem ser descritas como:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica. O processo dedução, assim como a apresentação das equações supracitadas para o fluxo tridimensional podem ser encontradas em Maliska (2004).

Em seguida, é apresentada a extensão das equações de conservação com modelos para fluxo turbulento.

3.4.1 Reynolds Avaraged Navier – Stokes (RANS)

A turbulência ocorre quando as forças de inércias do fluido tornam-se significativas em relação às forças viscosas, é caracterizada por um alto número de Reynolds e pode ser traduzida como flutuações instantâneas, irregulares e aparentemente aleatórias de velocidade, temperatura e outros escalares do fluido no espaço e no tempo. Por isso, tem uma influência determinante nas distribuições destas propriedades no campo de escoamento. Como consequência destas flutuações, o estado turbulento em um fluido contribui significativamente no transporte de quantidade de movimento, calor e massa (SOUZA et al., 2011).

A abordagem mais precisa para modelar a turbulência é denominada *Direct Numerical Simulation* (DNS), e tem como tarefa resolver as equações de Navier-Stokes sem o auxílio de modelos de turbulência em uma malha computacional altamente refinada, desde as menores escalas dissipativas, até a escala integral

associada a movimentos que contêm a maior parte de energia cinética. Atualmente, as aplicações DNS estão limitadas a escoamentos turbulentos em regime de baixo número de Reynolds e geometrias simples. O custo e o tempo computacional do DNS são extremamente altos, mesmo em números de Reynolds baixos, portanto, qualquer simplificação na análise dos efeitos da turbulência é extremamente vantajosa do ponto de vista físico, matemático e numérico (RODI, 1993).

A busca constante por tais simplificações é um dos principais objetivos no desenvolvimento de novos modelos de turbulência. Muitas teorias e conceitos têm sido formulados na tentativa de obter uma descrição universal para o fenômeno da turbulência que seja adequada a qualquer problema de interesse prático. Enquanto tal descrição não é alcançada, modelos de turbulência simplificados têm sido desenvolvidos como forma de analisar problemas específicos em cada área de interesse (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Desta forma, técnicas que fazem à decomposição das equações governantes em um campo médio ou filtrado e um campo de flutuações vem sendo amplamente utilizadas. No entanto, esta decomposição ocasiona o aparecimento de momentos de segunda ordem ou mais, gerando mais incógnitas que equações, esta situação é conhecida como problema de fechamento da turbulência. Os métodos conhecidos como *Large Eddy Simulation* (LES) e *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), são duas maneiras de descrever o comportamento do fluxo turbulento que contém o problema de fechamento (MICHAEL, 2015).

O método LES calcula diretamente todas as estruturas de fluxo turbulento que podem ser resolvidas pela malha computacional, aproximando apenas as escalas que são pequenas demais para serem resolvidas, esta aproximação ocorre por meio de um modelo de sub-malha. Para permitir que as grandes estruturas de fluxo se dividam em menores, o fluxo tem que ser simulado em três dimensões e a precisão do tempo deve ser mantida. A partir de uma quantidade considerável de energia cinética no fluxo, deve-se utilizar uma alta resolução de grade (SOUZA et al., 2011).

O último método para modelar a turbulência trata o fluxo de um ponto de vista estatístico, onde a variação instantânea das variáveis é decomposta num termo médio (no tempo) e numa flutuação. Na solução através da metodologia RANS, as Equações (5) e (6) são resolvidas utilizando velocidade média, pressão média e o tensor de Reynolds ($-\rho \overline{u_i' u_j'}$), que aparece como incógnita nas equações, representa a

influência das flutuações turbulentas no fluxo médio (MICHAEL, 2015). As equações RANS para fluidos incompressíveis podem ser descritas na forma diferencial como:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) + g \delta_{ij} \quad (6)$$

Com o aparecimento do tensor de Reynolds e como não há nenhuma equação adicional ao sistema, ocorre o problema de fechamento matemático, sendo necessário a solução de um modelo adicional de turbulência (RODI, 1993). Em geral, os requisitos para a discretização são menos rigorosos, devido à importância relativamente grande dos termos do modelo de turbulência, tornando o método menos exigente computacionalmente que os métodos DNS e LES, vide Figura 5.

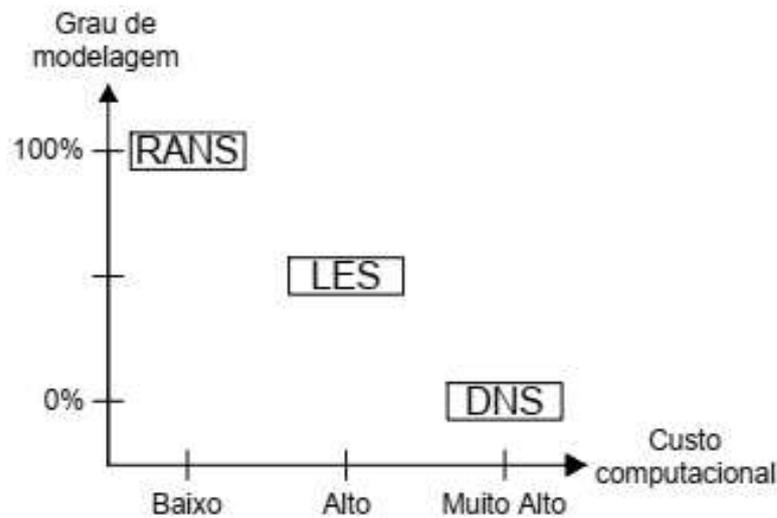


Figura 5: Graus de modelagem e custo computacional.
Fonte: (Adaptado de RODI, 1993).

Em suma, o tensor de Reynolds possui nove componentes, entretanto, devido a simetria, a presença do tensor nas equações médias somente introduz seis novas incógnitas, vide Equação (7):

$$\overline{u_i' u_j'} = \begin{pmatrix} \overline{u_1'^2} & \overline{u_1' u_2'} & \overline{u_1' u_3'} \\ \overline{u_2' u_1'} & \overline{u_2'^2} & \overline{u_2' u_3'} \\ \overline{u_3' u_1'} & \overline{u_3' u_2'} & \overline{u_3'^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{u_1'^2} & \overline{u_1' u_2'} \\ \overline{u_2'^2} & \overline{u_2' u_3'} \\ \overline{u_3' u_1'} & \overline{u_3'^2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Estas incógnitas podem ser determinadas pela hipótese da viscosidade turbulenta ou mais diretamente, por equações modeladas de transporte das tensões de Reynolds. Contudo, as parcelas que se encontram próximas às superfícies, como as faces da estrutura, não são adequadamente representadas, pois estas apresentam a formação de turbilhões (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

No presente trabalho são abordados apenas os modelos de turbulência K-ε e RNG, visto que os resultados numéricos obtidos por Bakhtyar et al. (2010), revelaram que o modelo de turbulência RNG produziu melhores previsões de hidrodinâmica da zona costeira, embora o modelo k-ε tenha dado previsões satisfatórias.

3.4.1.1 Modelos de Turbulência

Os modelos de turbulência K-ε e RNG são modelos semi-empíricos e, assim como muitos outros, são embasados na hipótese de viscosidade turbulenta de Boussinesq. Essa hipótese, análoga à relação tensão / deformação de um fluido newtoniano, afirma que as tensões de cisalhamento de Reynolds são diretamente proporcionais à taxa média de deformação do fluido (MICHAEL, 2015).

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (8)$$

sendo (μ_t) a viscosidade turbulenta, que varia no espaço, mas é considerada isotrópica. A energia cinética turbulenta (k) é definida como:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (9)$$

Segundo Rodi (1993), o modelo K-ε é o modelo mais comum utilizado nas análises CFD para simular a parcela turbulenta de um fluxo. Consiste na inclusão de duas equações para determinar os tensores de Reynolds, sendo um dos modelos mais robustos, principalmente pela sua estabilidade numérica. Este modelo é aplicável para uma ampla faixa de escoamentos turbulentos, sendo usado há muito tempo na modelagem da turbulência. O modelo introduz duas novas variáveis no sistema de equações, a energia cinética turbulenta (k), definida com a variância da flutuação da velocidade, e a taxa de dissipação de turbulência (ϵ), para calcular a viscosidade turbulenta (μ_t).

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

onde (C_μ) é uma constante obtida por meio de dados experimentais. Basicamente, a resolução numérica consiste em determinar os valores (k) e (ε), a partir das equações de transporte.

O modelo conhecido popularmente como RNG, possui desenvolvimento similar ao modelo K- ε tradicional, entretanto, explica os efeitos de escalas menores de movimento aplicando uma técnica de renormalização as equações de Navier-Stokes, por meio de mudanças no termo fonte. Esta modificação torna o modelo RNG mais sensível a fluxos com regiões de cisalhamento forte. As resoluções completas dos métodos abordados podem ser encontradas de maneira detalhada em Rodi (1993).

3.4.1.2 Camada Absorvedora de Ondas (Camada Esponja)

Em aplicações de engenharia costeira e oceânica, um domínio computacional com um tamanho limitado e limites abertos é frequentemente usado para simular a propagação de ondas. Quando um trem de ondas se move através do domínio e atinge um limite aberto, uma condição de contorno deve ser usada para minimizar a reflexão das ondas. Caso contrário, podem ocorrer formas de onda incorretas e alteração severa do volume de água. Em geral, existem dois tipos de métodos para reduzir a reflexão de ondas em limites abertos: condição limite de radiação e camada absorvedora de onda (camada esponja) (HIGUERA et al., 2012).

Entretanto, a condição de contorno radiação pode não funcionar efetivamente para ondas não-lineares, pois é baseada na hipótese de onda linear. O método da camada absorvedora usa uma região com amortecimento adicional para dissipar a onda antes que ela alcance o limite aberto e seja refletida. A região chamada de camada de absorção de ondas ou como é popularmente conhecido, camada de esponja, começa em algum lugar na área a jusante do domínio computacional e termina no limite aberto, se estendendo na direção vertical, vide Figura 6 (FLOW SCIENCE, INC., 2015).

De modo resumido, dentro da camada de esponja a onda é dissipada por uma força de amortecimento artificial, reduzindo o potencial de sua reflexão no limite, sendo a força de amortecimento tipicamente linear em relação à velocidade do fluido.

Numericamente é tratado no solver da mesma maneira que as perdas de fluxo em meio poroso.

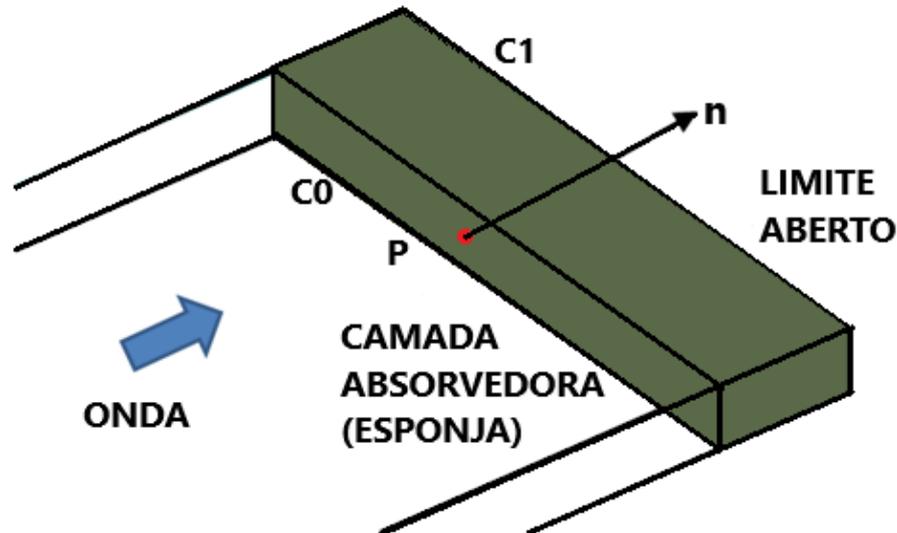


Figura 6: Camada Absorvedora de Ondas ou Camada Esponja.
Fonte: (Adaptado de FLOW SCIENCE, INC., 2015).

O método é teoricamente simples e funciona efetivamente na prática. Na camada de esponja, a equação de Navier-Stokes é modificada como:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i' u_j'}) + g \delta_{ij} - k(u_i - u_{i \text{ montante}}) \quad (13)$$

onde $k(u_i - u_{i \text{ montante}})$ representa a força de amortecimento artificial. Sendo (k) , o coeficiente de amortecimento em unidade de tempo (s^{-1}) e $(u_{i \text{ montante}})$ a velocidade do fluxo a montante, isenta do amortecimento. O coeficiente (k) pode ser constante dentro da camada de esponja ou aumentar linearmente na direção de propagação da onda (vide Figura 6) e pode ser determinado pela equação abaixo:

$$k = k_0 + l \left(\frac{k_1 - k_0}{d} \right) \quad (14)$$

onde k_0 e k_1 são os valores no início e no final da camada respectivamente, (d) indica a largura da camada e (l) o comprimento.

3.4.2 Método de Volumes Finitos

Transformar uma equação diferencial, definida em determinado domínio, em um sistema de equações algébricas, substituindo as derivadas existentes por expressões que envolvem a função incógnita é a tarefa dos métodos numéricos. O Método de Volumes Finitos (MVF) é uma forma de se obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP) do domínio fluido em volumes de controle. Seu desenvolvimento está ligado ao conceito de fluxo entre regiões, ou volumes adjacentes, ou seja, a quantidade de fluido que atravessa um volume de controle por unidade de tempo é obtida pelo balanço das propriedades do fluido sobre estas fronteiras, o que é obtido de forma geral pela integração das EDPs. Todo método que para obter equações aproximadas, satisfaz a conservação de propriedade em nível de volumes elementares é um método de volumes finitos (MALISKA, 2004).

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), de início determina-se uma distribuição de pontos, denominados pontos nodais, dentro da geometria de estudo de maneira que cada nó é envolto por um volume de controle, ou célula. É comum determinar volumes de controle próximos às extremidades do domínio, de forma que os limites físicos coincidam com os limites dos volumes de controle. A solução do problema de escoamento (velocidade, pressão, fração volumétrica do fluido etc.) é definida no centroide de cada célula e a distribuição destas células no domínio é nomeada de malha ou grade, vide Figura 7. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

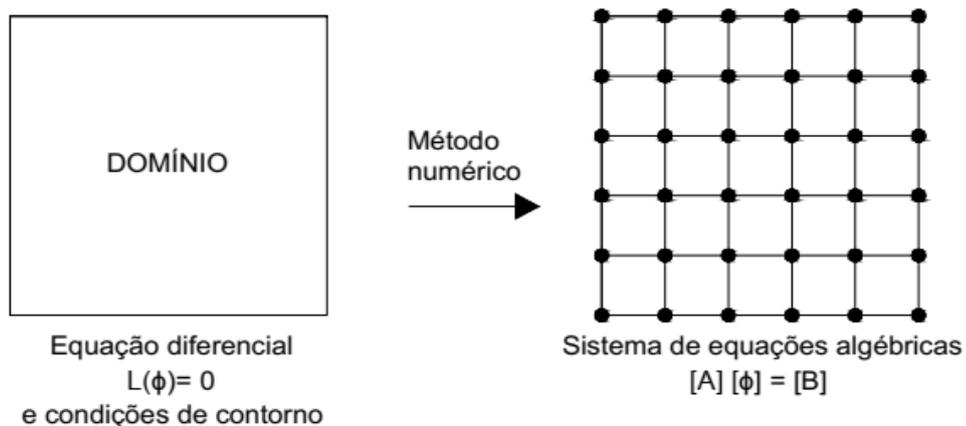


Figura 7: Discretização do domínio.
Fonte: (MALISKA, 2004).

Referente à organização desses elementos, classifica-se a malha como estruturada e não-estruturada. Uma malha otimizada geralmente não é estruturada, caracterizada por maiores refinamentos, onde há grandes variações das propriedades

entre os pontos nodais. Para problemas de escoamentos mais complexos, uma malha não estruturada traz flexibilidade ao modelo computacional, dado que subdivide o domínio para que se obtenha um grau de precisão adequado a cada parte desse domínio, por outro lado, apresentará menor estabilidade que uma malha uniforme. Quanto à forma dos volumes de controle, é usual a divisão em elementos tetraédricos e hexaédricos (MALISKA, 2004).

A precisão da solução é determinada pelo número de células do domínio e em casos de problemas com transientes, também pela marcha temporal. Com o aumento do número de nós, aumenta-se também a demanda por recursos computacionais para a solução do problema, portanto, para obter uma boa precisão é necessário um grande tempo de processamento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Segundo Maliska (2004), é possível definir de maneira sucinta a utilização do método de volumes finitos como a solução das seguintes etapas:

- i. Integração das equações de conservação em todas as células do domínio de interesse;
- ii. Substituição de diferentes esquemas de aproximação por diferenças finitas em termos da equação integrada, representando os processos do escoamento, como convecção, difusão e fontes. Este processo converte as equações integrais em um sistema de equações algébricas;
- iii. Solução das equações algébricas por um método iterativo.

O primeiro passo é a grande vantagem do método de volumes finitos em relação aos demais métodos numéricos, devido a conservação das principais propriedades para cada elemento. A conservação de uma propriedade genérica de um escoamento (ϕ), por exemplo, um componente do campo de velocidades, dentro do volume de controle pode ser expresso como o balanço entre os vários fatores que tendem a contribuir ou reduzir a propriedade. Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas para esta metodologia. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes finitos. A segunda é integrar sobre o volume finito, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa (FORTUNA, 2000).

Para facilitar o processo de dedução, Maliska (2004) apresentou uma descrição do método de volumes finitos aplicado as equações conservação de massa,

quantidade de movimento e transporte da fração volumétrica, visando simplificar a apresentação do modelo numérico:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\bar{v}\varphi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\varphi \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right) + S^\varphi \quad (15)$$

onde φ é o escalar que está sendo transportado, Γ^φ é o coeficiente de difusão e S^φ é o termo fonte ou sumidouro por unidade de volume. Os termos relacionados com o escalar φ são apresentados na Tabela 2 para cada equação de conservação.

Tabela 2: Valores de φ , Γ^φ e S^φ

Equação de Conservação	φ	Γ^φ	S^φ
Massa	1	0	0
Quantidade de momento	v_i	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x_i} \delta_{ij} + \rho g_i + F_i$
Transporte de fração volumétrica	f	0	0

Fonte: (MALISKA, 2004).

O segundo passo refere-se à seleção de modelos adequados de discretização das derivadas presentes nas equações diferenciais, aplicáveis aos volumes de controle por termos lineares. A seleção destes modelos de discretização linear deve ser feita levando-se em consideração as características do fenômeno de transporte envolvido. O objetivo sempre é propor uma função de interpolação com o menor erro possível e que, ao mesmo tempo, não envolva muitos pontos nodais para não criar uma matriz com estrutura muito complexa. Assim, a função de interpolação ideal é aquela que conecta os pontos nodais com a própria solução do problema que deve ser resolvido. Por meio da Tabela 3, são listados os esquemas de discretização espacial mais usuais, assim como uma breve descrição (MALISKA, 2004).

Tabela 3: Esquemas de discretização

DIFERENÇAS CENTRAIS	Recomendado para problemas de caráter difusivo, em que o valor de uma propriedade genérica do escoamento pode ser obtido levando-se em consideração a contribuição das células adjacentes, sem considerar o fluxo do escoamento.
UPWIND	Aplicado principalmente em problemas advectivos, em que o valor de uma propriedade genérica é calculado considerando a contribuição do nó vizinho de maior influência, analisando a direção do fluxo.
UPSTREAM	Pode-se adequar ao caráter difusivo ou advectivo, trata-se de uma formulação intermediária entre os esquemas de diferenças centrais e UPWIND.

Fonte: (MALISKA, 2004).

Após realizar a discretização espacial da equação é importante definir qual o tipo de formulação será utilizado para resolver o problema no tempo. Para analisar problemas transientes, torna-se necessário a utilização de algum esquema de interpolação no tempo, que pode, por sua vez, ser classificado como: explícito, totalmente implícito e implícito. Uma descrição mais detalhada sobre os métodos supracitados, assim como os métodos de discretização espacial, pode ser encontrada em Maliska (2004).

Para a resolução da terceira etapa, os principais softwares comerciais disponíveis no mercado permitem a escolha entre o método de solução segregado (*Segregated Solver*) e o método de solução acoplado (*Coupled Solver*) para integrar as equações de conservação geradas pela discretização (LOMAX et al., 2013). A diferença entre esses métodos consiste na forma de resolução das incógnitas. Enquanto o solver acoplado resolve todas as incógnitas simultaneamente, ou seja, resolve todas as equações governantes para todas as variáveis (velocidade, pressão, temperatura etc.) em todos os volumes de controle de maneira simultânea ou acoplada. O método segregado resolve as equações governantes para uma variável (por exemplo, a velocidade) em todos os volumes de controle sequencialmente, em cada uma das iterações as propriedades dos fluidos são atualizadas e as equações da quantidade de movimento são solucionadas utilizando valores atualizados de pressão e fluxo de massa na face. Caso as velocidades obtidas em um passo de tempo não satisfaçam a equação da continuidade localmente, é gerada uma equação para a correção da pressão, a partir da equação da continuidade e das equações do movimento linearizadas. Esta equação de correção de pressão é então resolvida para obter as correções necessárias de pressão, campo de velocidades e fluxo de massa na face, até o ponto que atenda a conservação de massa. Devido a isto, a solução segregada apresenta vantagens sobre a solução acoplada, além do fato que a solução acoplada apresenta uma matriz resultante com um altíssimo índice de esparsidade, enquanto a solução segregada gera matrizes menos esparsas, o que acelera a resolução dos sistemas lineares e diminui a alocação de memória (MALISKA, 2004).

Contudo, a solução das equações nas direções x , y e z apresenta alguns obstáculos, devido a todas equações serem intrinsecamente acopladas, já que cada componente da velocidade aparece nas equações de quantidade de movimento e conservação de massa, e aos termos advectivos da equação de quantidade de movimento, que contêm termos não lineares. Neste contexto, é preciso utilizar um

procedimento sequenciado e iterativo (algoritmo) que melhore a estimativa do campo de pressão, de modo que o campo de velocidade se aproxime progressivamente da solução que satisfaça a equação de conservação de massa na forma discretizada (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Conforme Maliska (2004), o acoplamento entre o campo de velocidades e a pressão em conjunto com as não-linearidades presentes na equação de quantidade de movimento, podem ser resolvidos de maneira iterativa através dos algoritmos listados abaixo:

- SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation*);
- SIMPLER (*SIMPLE Revised*);
- SIMPLEC (*SIMPLE Consistent*);
- PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*).

Existem vários critérios de convergência para as variáveis. Um deles consiste no valor da Raiz do Erro Quadrático Médio (em inglês, *Root Mean Square* - RMSE), que pode ser entendido como a raiz do erro médio quadrático da diferença entre a predição e o valor real, ou seja, o resíduo inicial. O erro residual da solução numa matriz pode ser esquematizado da seguinte maneira:

$$[A] [\varphi] - [B] = [R] \quad (16)$$

Onde $[A]$ é a matriz de coeficientes, $[\varphi]$ o escalar transportado, $[B]$ os termos do lado direito da equação linear, e $[R]$ o erro residual. O nível da convergência depende do propósito da solução e do nível de detalhamento do modelo. Valores de RMSE abaixo de 10^{-4} , embora indiquem uma convergência fraca, podem ser suficientes para muitas aplicações na engenharia. De maneira geral, valores abaixo de 10^{-5} fornecem uma boa convergência, na maioria dos casos suficiente para a maioria das aplicações em engenharia. São indicados RMSE menores que 10^{-5} para problemas geometricamente sensíveis (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

3.4.3 Método *Volume of Fluid* (VOF)

O método *Volume of Fluid* (HIRT; NICHOLS, 1981) é um modelo multifásico usado para as soluções de escoamentos compostos de no mínimo dois fluidos (ou

fases) imiscíveis. O método é composto de três ingredientes: um esquema para localizar a superfície, um algoritmo para rastrear a superfície e um meio de aplicar condições de contorno na superfície.

Isto ocorre em função da fração volumétrica, uma variável contínua no espaço e no tempo, representada pela letra (f), que descreve a presença de dois fluidos no interior do volume de controle, sendo que, o volume ocupado por um fluido não pode ser ocupado por outro. Para cada fluido adicionado no modelo, uma nova variável é introduzida, resultando numa fração volumétrica destes fluidos na célula computacional. A soma das frações deve ser unitária ($0 \leq f \leq 1$). Conseqüentemente, se ($f_{\text{água}} = 0$), o volume de controle está vazio de água e cheio de ar ($f_{\text{ar}} = 1$), caso o fluido tenha uma mistura de ar e água, uma fase é o complemento da outra, conforme pode ser observado na Figura 8 (DIDIER et al., 2017).

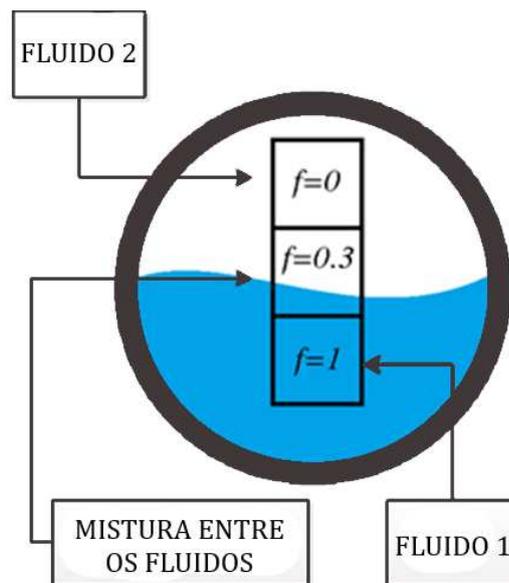


Figura 8: Superfície livre a partir da variação da fração de volume.
Fonte: (Adaptado de FLOW SCIENCE, INC., 2015).

Ao empregar o método VOF, está se resolvendo um conjunto de equações de conservação que são aplicadas a cada fluido ao longo do volume. Então, a fração volumétrica de cada fluido em cada célula é considerada em todo o domínio computacional através da equação de transporte para a fração volumétrica, que pode ser escrita na forma conservativa como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f) + \nabla \cdot (f\vec{v}) = 0 \quad (18)$$

Uma vez que as equações de conservação são resolvidas para a mistura de ar e água, é necessário calcular valores médios para a massa específica e a viscosidade, respectivamente:

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (19)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (20)$$

Este método é considerado o mais realista se comparado com outros métodos de rastreamento de superfície, pois se mostra capaz de representar além da interação entre o ar e a água, a interação destes fluidos com estruturas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Uma das desvantagens do método ocorre em casos onde grandes diferenças de velocidade existem entre as fases, logo a precisão das velocidades computadas perto das interfaces pode ser afetada (FLOW SCIENCE, INC., 2015).

3.4.4 Método FAVOR™

A técnica de representação de obstáculos de área fracionária FAVOR™ (*Fractional Area Volume Obstacle*), desenvolvida por Hirt e Sicilian (1985), é uma técnica única usada para modelar objetos geométricos em um domínio computacional dentro de uma grade retangular. A técnica é baseada no conceito de porosidade, para o qual células inseridas dentro de um obstáculo apresentam porosidade de valor nulo e células pertencentes completamente ao escoamento apresentam porosidade de valor unitário.

Qualquer célula parcialmente obstruída apresentará um valor intermediário. O método trabalha por meio da determinação de quais faces das células da malha estão dentro dos elementos de geometria e quais faces estão fora. O plano de corte não apenas define a fração de volume de cada célula, mas também a fração de área (A_x , A_y e A_z) em cada face de célula em que o escoamento pode ocorrer. Em suma, a representação da geometria é definida por uma série de “mini-planos”, conforme Figura 9. A partir deste conceito, são definidos os coeficientes que representam a porcentagem da face ou volume do elemento, a qual está bloqueada a passagem de escoamento (FLOW SCIENCE, INC., 2015).

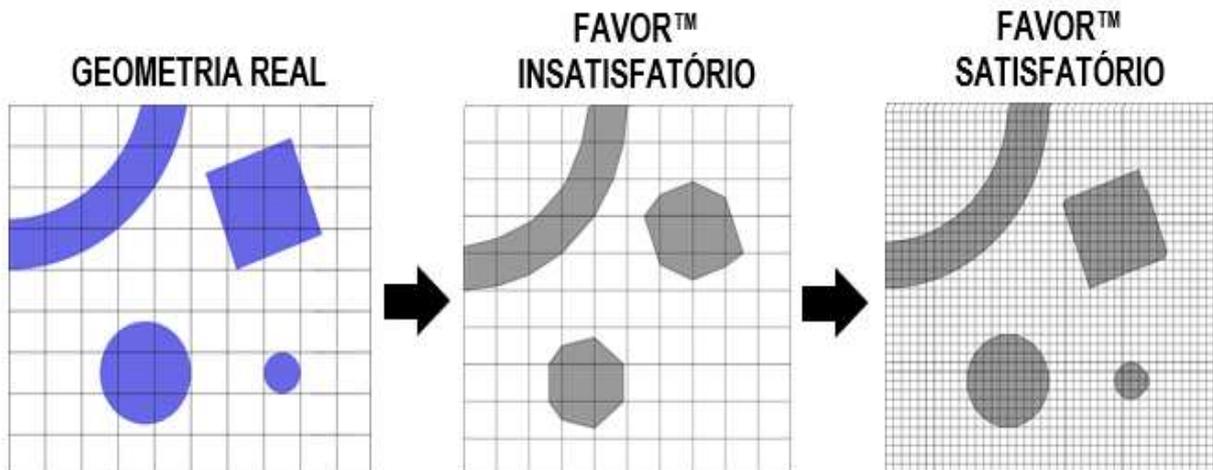


Figura 9: Efeitos da aplicação do método FAVOR™ nas células da malha.
 Fonte: (Adaptado de FLOW SCIENCE, INC., 2015).

Estes coeficientes são aplicados diretamente às equações que regem o comportamento físico dos fluidos, como as equações de conservação de massa e quantidade de movimento. Exemplos das equações supracitadas com a inserção destes coeficientes podem ser encontrados no Manual do Usuário do FLOW 3D® (FLOW SCIENCE, INC., 2015).

Constata-se que quanto menor o tamanho da célula, mais suavizado será a representação do contorno do obstáculo. Por meio da Figura 9, torna-se óbvio que uma malha com elementos infinitesimais resultaria em uma geometria muito próxima a uma superfície curva, portanto, cabe ao responsável pelo estudo avaliar até que ponto esse refinamento traz benefícios aos resultados, visto que o tempo de processamento é diretamente proporcional ao número de células da malha computacional. Em resumo, este método aplica algoritmos complexos para o cálculo das frações de volumes e áreas, durante a etapa do pré-processamento da simulação e a cada iteração.

4. HISTÓRICO DO LOCAL DE ESTUDO

O município de Santos está localizado na Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS), porção central do litoral do Estado de São Paulo, entre os municípios de São Vicente e Guarujá, cerca de 72 km da capital São Paulo. Possui aproximadamente 420.000 habitantes e destaca-se no cenário nacional devido ao alto índice de desenvolvimento humano municipal (IDHM) de 0,840, segundo dados do Censo 2010 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Ademais, lidera o ranking das melhores cidades brasileiras, de acordo com o BCI 100 da consultoria econômica Delta, de outubro de 2014 (VENANCIO, 2018).



Figura 10: Localização da região de estudo – Porção central do litoral do paulista.
Fonte: (GOOGLE EARTH, 2019).

Santos possui uma localização privilegiada do ponto de vista estratégico no Estado de São Paulo, sendo que, cerca de 90% da base industrial do estado está a menos de 200 km do Porto de Santos. Em consequência, a atividade portuária faz com que o município seja economicamente, o mais importante da RMBS, sendo o Porto de Santos, o maior da América Latina com uma área de 7,7 milhões de m² de área e 13 km de extensão. A importância comercial do Porto de Santos é tamanha que, somente o mesmo, gera uma arrecadação maior que a soma das arrecadações dos outros seis maiores portos brasileiros (CODESP, 2017).

A linha de costa do município é caracterizada por um arco praial com direção aproximada E-W, largo na porção central e estreito na direção do Canal do Porto, são 7 km de praias subdivididas regionalmente entre as praias de José Menino, Gonzaga,

Boqueirão, Embaré, Aparecida e Ponta da Praia, sendo cada uma delas, separadas por canais de drenagem pluvial, construídos perpendicularmente a linha de costa, vide Figura 11. Contudo, trata-se da área mais populosa do litoral paulista e, por essa razão, aquela mais sensível em termos de efeitos da dinâmica costeira sobre a malha urbana (ITALIANI, 2014).



Figura 11: Arco praial de Santos subdividido pelos canais de drenagem urbana.
Fonte: (ITALIANI, 2014).

No extremo leste do arco praial, entre o Canal 6 e a entrada do Canal do Porto, está localizada a região da Ponta da Praia, um segmento praial afunilado de granulometria fina. A urbanização desordenada, além de obras para melhoria e expansão do Porto de Santos, somadas a processos naturais, como a alteração do nível do mar e aumento da incidência de ressacas, vem alterando de forma significativa a dinâmica costeira da região, que atualmente sofre forte processo erosivo. Sendo que, após o processo de alargamento e aprofundamento do Canal do Porto, iniciado em 2009 e concluído em 2013, o processo se intensificou e praticamente eliminou a faixa praial (VENANCIO, 2018).

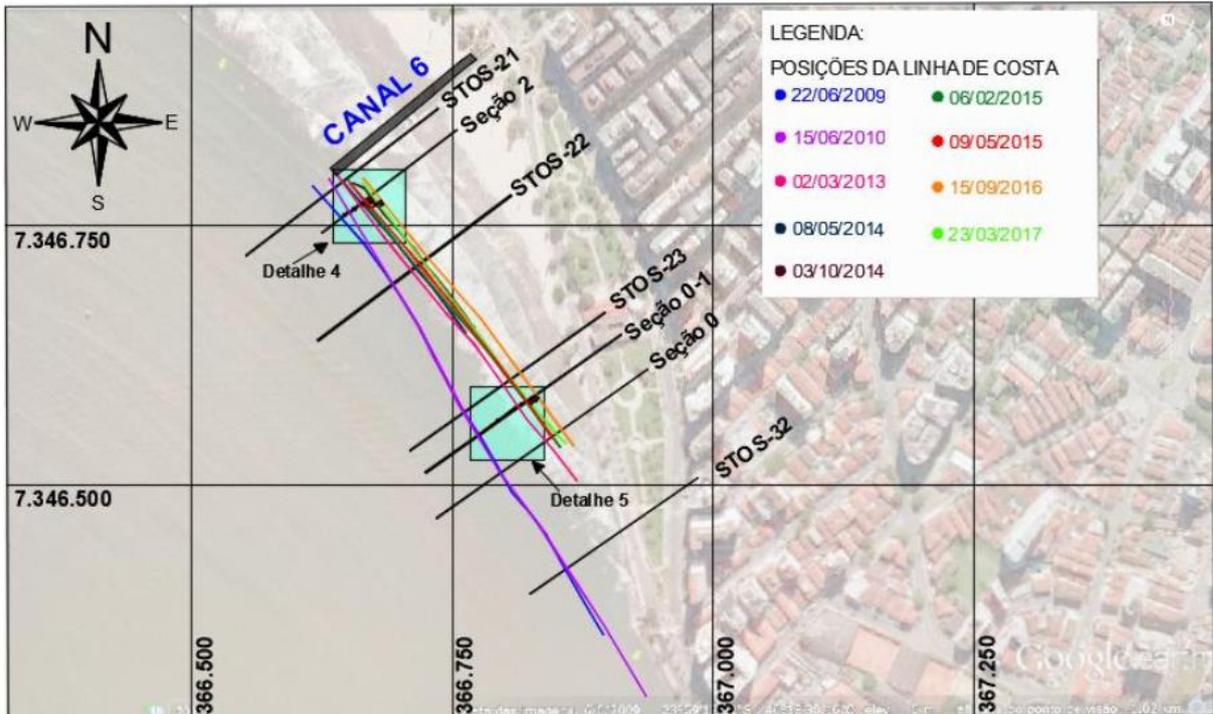


Figura 12: Retração praial entre o Canal 6 e a extremidade da Ponta da Praia.
Fonte: (GIRELI; GARCIA, 2019).

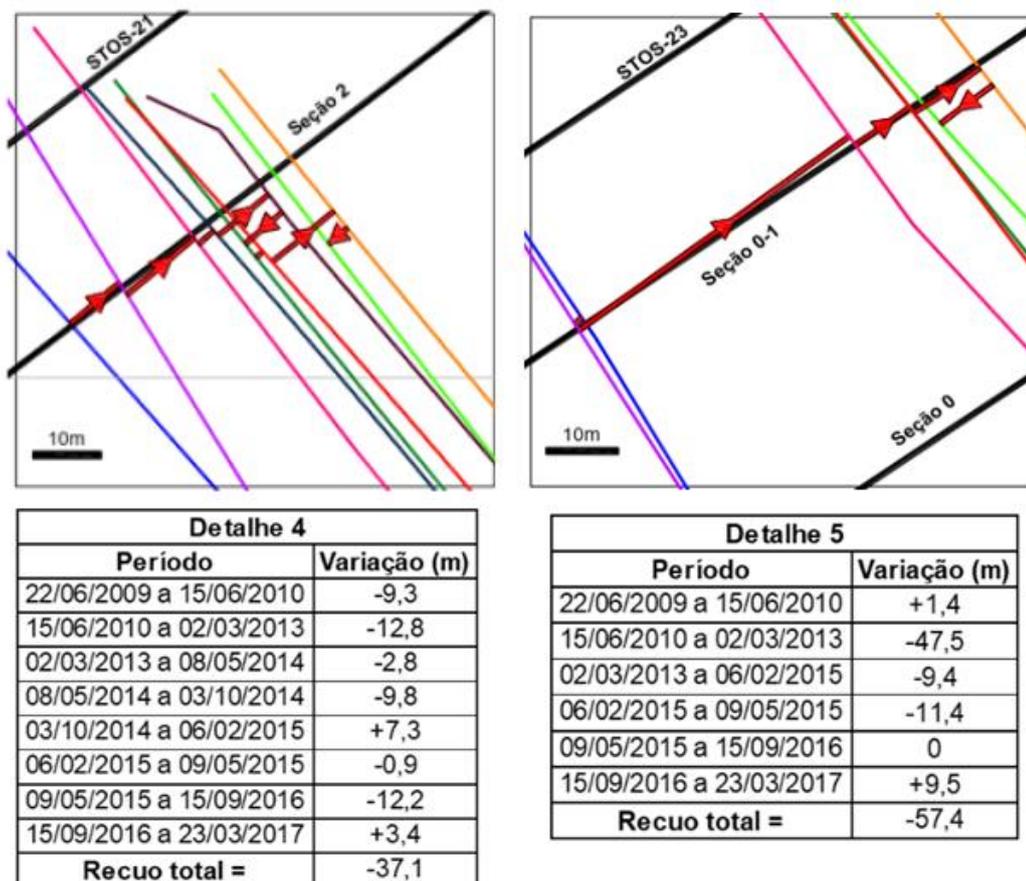


Figura 13: Evolução da isóbata de 0,0 m, entre o Canal 6 e a Região da Ponta da Praia (2009–2017).
Fonte: (Adaptado de VENANCIO, 2018).

Notoriamente a região está sujeita a diversos fatores e fenômenos que podem ser resumidos em: incidência direta de ondas, correntes de maré, influência hidrodinâmica da embocadura do Estuário Santista e presença de estruturas rígidas construídas pelo homem. Para proteger a estrutura urbana da ação direta das ondas em eventos de ressaca e evitar possíveis quedas de pedestres, foram construídos muros paralelos à linha de costa, combinados com a colocação de enrocamentos em sua base, o que aumenta o índice de reflexão das ondas e acentua o processo erosivo (GARCIA; GIRELI, 2019).

Após eventos de fortes ressacas na região da Ponta da Praia, registrados no inverno de 2016, que causaram grandes prejuízos a infraestrutura urbana, a Justiça autorizou a Prefeitura de Santos utilizar recursos no valor de R\$ 3,2 milhões, provenientes de multas ambientais para a “Contratação de serviços técnicos especializados para elaboração de estudos para soluções emergenciais e definitivas para mitigação da erosão na região (SANTOS, 2018).



Figura 14: Invasão do mar junto à infraestrutura urbana na região da Ponta da Praia, Santos - SP.
Fonte: (G1, 2016).

Estudos de monitoramento praias e análises geológicas (SOUZA, 2009; FUNDESPA, 2013; ITALIANI, 2014; PORTO DE SANTOS, 2017; VENANCIO, 2018), avaliaram os impactos das obras de dragagem de aprofundamento do canal de acesso nas praias adjacentes. No entanto, Pezzoli et al. (2013) frisaram que eram necessárias obras fixas para a manutenção da profundidade de 17 m DHN do Porto de Santos.

Deste modo, com base no valor disponível, pesquisadores do Departamento de Recursos Hídricos (DRH) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – FEC / UNICAMP apresentaram

por meio de nota técnica uma análise dos estudos realizados para diagnóstico e prognóstico da erosão da Ponta da Praia em Santos (SP), bem como a proposição de uma obra piloto de baixo impacto ambiental e custo, que constitui uma alternativa viável a curto prazo, sendo capaz de auxiliar tanto no monitoramento do local, quanto na diminuição dos prejuízos causados pela invasão da água do mar junto à infraestrutura urbana existente, tendo em vista estudos para intervenções definitivas (GARCIA; GIRELI, 2019).

Em primeiro momento, Gireli et al. (2017) avaliaram a eficiência de molhes guia-corrente, por meio de modelagem numérica, na manutenção do fundo e sua influência na dispersão dos efluentes do emissário submarino existente na Baía de Santos. Ademais, foi constatado que os modelos espectrais não conseguem reproduzir fielmente a hidrodinâmica local, especialmente no que diz respeito aos efeitos de águas rasas como a reflexão, difração e arrebentação.

Em Gireli et al. (2018) as mesmas proposições foram estudadas, mas agora utilizando modelagem física. Em ambos trabalhos se verificou que a presença dos molhes induz uma acreção marinha que tende a proteger a região do processo erosivo, também foi realizada uma avaliação qualitativa em modelo físico sobre a influência dessas obras na Ponta da Praia.

Contudo, a solução implementada no local e descrita em Garcia e Gireli (2019) consiste em um quebra-mar submerso, dividido em dois trechos construídos com geotubos preenchidos com areia da praia, sendo o primeiro, denominado trecho transversal à praia, com 275 metros de extensão e instalado a partir da mureta na altura da Rua Afonso Celso de Paula Lima, com a finalidade de armazenar a areia. Já a estrutura paralela à praia, denominada trecho longitudinal, possui 240 metros de extensão e tem como objetivo de diminuir a energia das ondas. A obra piloto visa:

- i. Reduzir o custo de implantação de uma solução definitiva, bem como o risco desta solução ter baixa eficácia e / ou produzir impactos indesejados em regiões adjacentes. Esta consideração se torna especialmente relevante nesta região, em função dos modelos matemáticos aplicados não terem se mostrado capazes de reproduzir as condições locais;
- ii. Causar o mínimo impacto visual, visto que a área tem atrativo turístico;

- iii. Permitir a execução em um curto período, visto que as dimensões são reduzidas e os métodos construtivos são ágeis;
- iv. Permitir uma fácil desmobilização da obra e a inexistência de impactos ambientais decorrentes de sua retirada, caso está se mostre ineficiente. A estrutura pode ser removida apenas abrindo os geotubos e os deslocando, de forma a permitir que a areia, que é proveniente da própria praia, seja recapturada pelo transporte costeiro, tal como já acontece com a alimentação artificial da praia realizada pela prefeitura.

Para a implantação da obra foram analisados em conjunto os eventos de ondas e marés meteorológicas para estimar com devida precisão os meses associados à erosão. Concluiu-se que este período ocorre na região entre os meses de abril a setembro (outono e inverno), sendo neste período, a maior incidência de ressacas, em contrapartida, de outubro a março, ocorre o período de bom tempo, quando ocorre re-deposição de sedimentos. Em vista disto, a obra foi iniciada em janeiro de 2018 e concluída do fim de abril do mesmo ano (GARCIA; GIRELI, 2019).

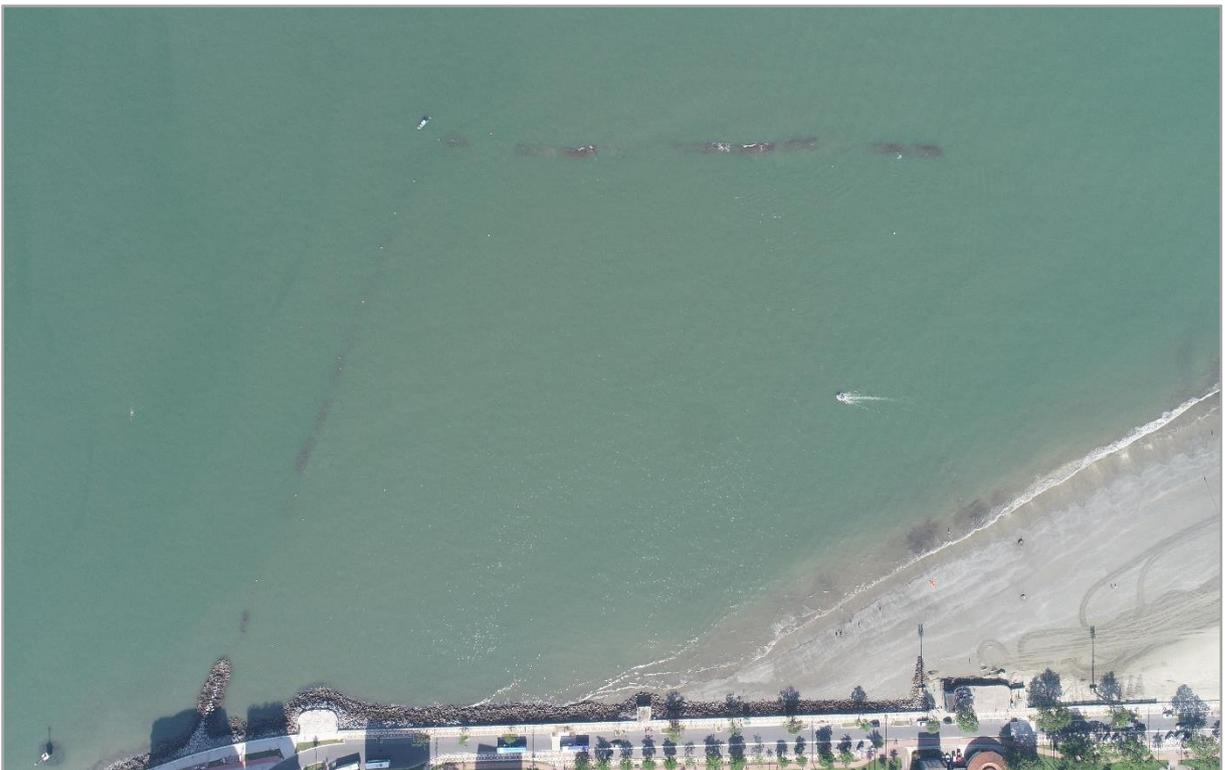


Figura 15: Foto aérea da obra após a implantação.
Fonte: acervo pessoal, outubro, 2019.

Em um curto espaço de tempo, a obra foi capaz de acumular sedimentos na sua região de influência, conforme dados de monitoramento, vide Figura 16.

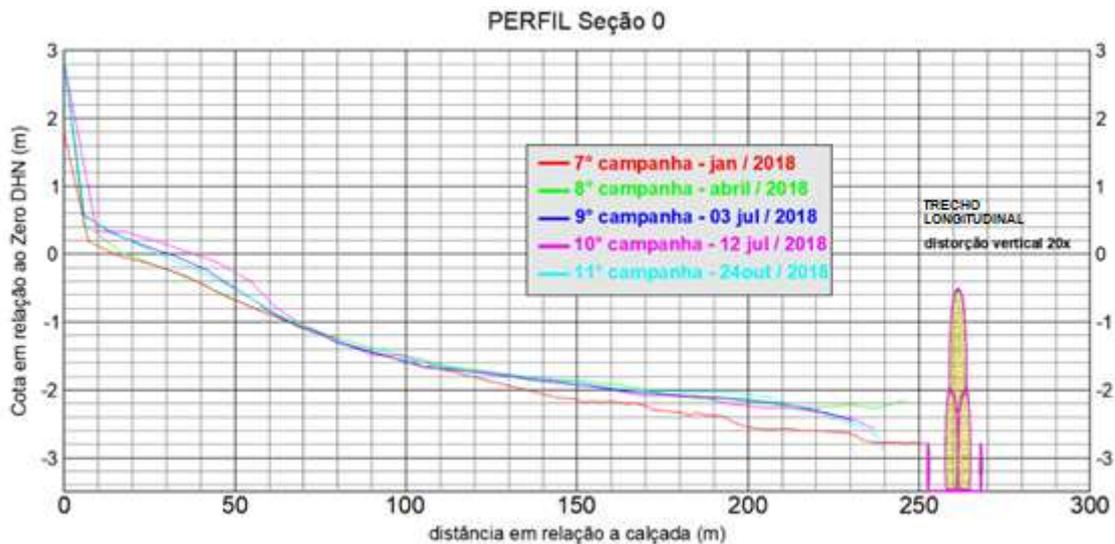


Figura 16: Perfil seção 0 - Entre o Canal 6 e a Ponta da Praia.
Fonte: (GIRELI; GARCIA, 2019).

O projeto piloto vem se notabilizando como uma solução econômica e ambientalmente interessante em comparação a soluções convencionais e, caso responda conforme o esperado a médio prazo, a solução deve ser replicada para o trecho entre a Ponta da Praia e o canal 4, cessando de maneira definitiva o recuo da linha de costa na região e, conseqüentemente, protegendo a orla e todos os equipamentos urbanos nela instalados da ação das ressacas, sem que para isso, os moradores tenham que se conformar com uma mudança significativa na vista da baía, na característica da arrebentação das ondas, ou nas condições de balneabilidade das praias de Santos (GARCIA; GIRELI, 2019).

Como se trata de uma solução inovadora no âmbito nacional, aplicada a uma região de vital importância econômica e que, pode ser replicada em outras regiões que sofrem processo erosivo, quando somada a estudos locais, vem atraindo constantemente a atenção da opinião pública. Ademais, a partir de seu monitoramento permite preencher as lacunas de conhecimento em relação ao comportamento dos agentes hidrodinâmicos.

Informações referentes ao projeto do quebra-mar submerso são apresentadas no item 5.1.1.

5. MATERIAIS E MÉTODO

A estratégia metodológica utilizada para responder à questão de pesquisa do presente trabalho é definida como simulação. De acordo Freitas Filho (2001), a simulação computacional é o processo de modelagem de sistemas pela aplicação de técnicas matemáticas, suportadas pelo emprego de computadores. Em resumo, a simulação é a tradução da realidade para um ambiente sob controle, no qual seu comportamento pode ser estudado sob as mais variadas condições, ou pode tratar de eventos contínuos, que alteram seus estados continuamente no tempo, sem riscos físicos ou o envolvimento de custos elevados. As etapas do processo de simulação são apresentadas na Figura 17.

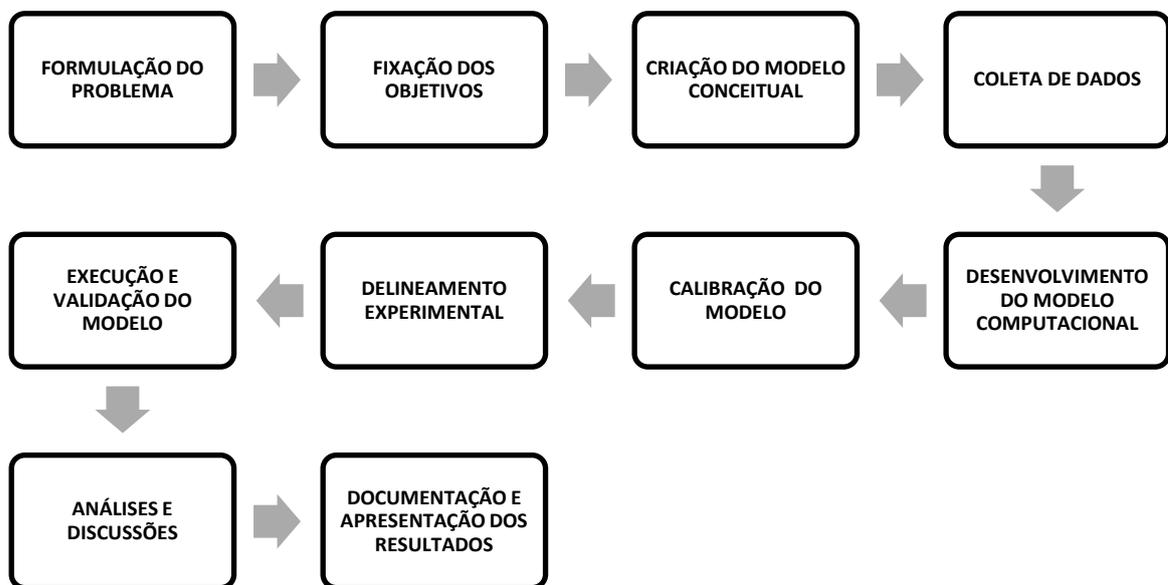


Figura 17: Etapas do processo de simulação.
Fonte: (FREITAS FILHO, 2001).

A utilização do processo de simulação computacional tem sido amplamente adotada como uma técnica que possibilita a análise abrangente sob diversas óticas e permite fazer inferências sobre os sistemas estudados, facilitando a verificação e o encaminhamento de soluções. Porém, as habilidades e conhecimentos do engenheiro ou cientista não podem ser substituídos. Os modelos são apenas um auxílio ao profissional, análogos a uma calculadora, isto é, são ferramentas complexas que devem ser utilizadas de forma cuidadosa, levando em conta os conhecimentos sobre a área estudada (DA SILVA NETO et al., 2016).

Deste modo, um tanque de ondas CFD foi desenvolvido tendo em vista a correta reprodução dos efeitos de águas rasas e dissipação de energia após a interação do movimento das ondas com um quebra-mar submerso, construído na região da Ponta da Praia em Santos – SP. A área de modelagem delimitada, apresentada na Figura 18, permite a investigação dos efeitos supracitados sem inviabilizar a simulação devido ao alto gasto computacional ou comprometer a estabilidade numérica do modelo, além de possibilitar a coleta de dados em campo para a validação e calibração do modelo.

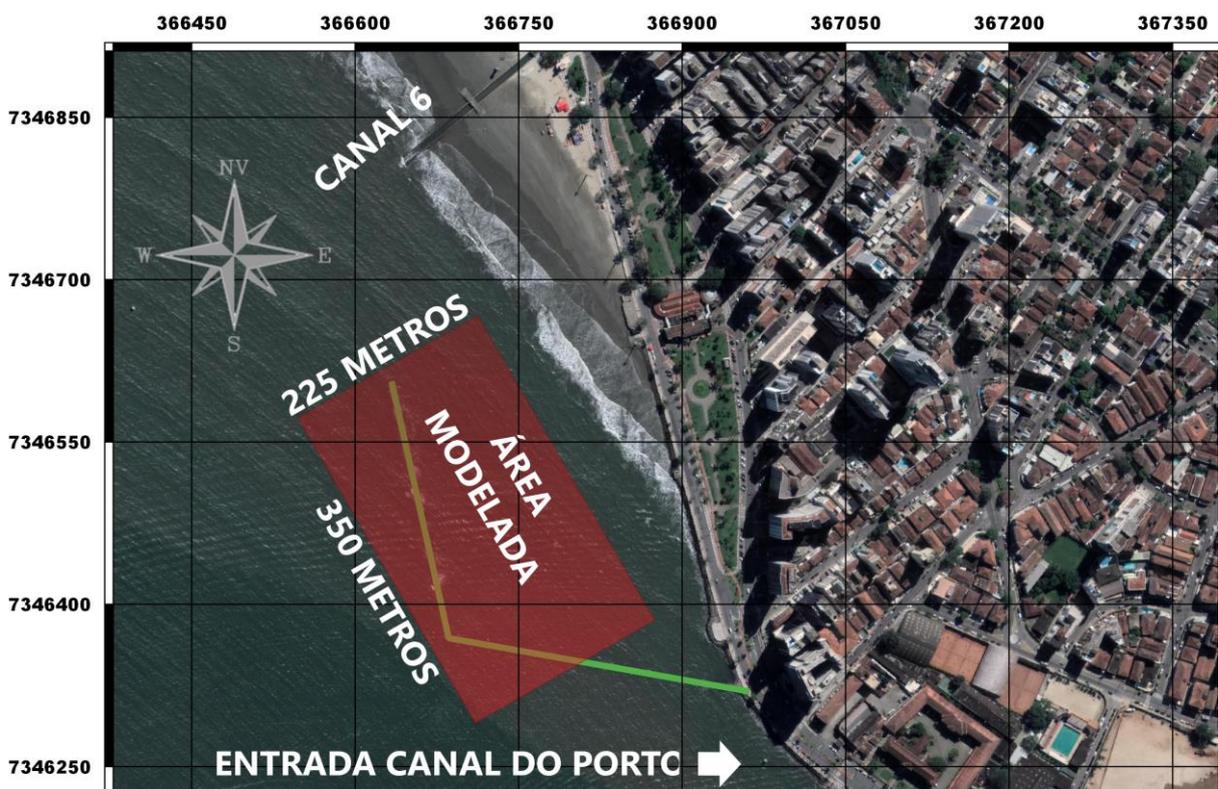


Figura 18: Área modelada.
Fonte: elaborado pelo autor.

5.1. DADOS DE CAMPO

Todavia, antes de efetuar a modelagem, se fez necessário o levantamento de dados mensurados no local especificado, para posteriormente, efetuar a modelagem computacional. Sendo assim, a coleta de dados foi dividida em quatro partes: dados de projeto e execução do quebra-mar submerso, dados topográficos, dados de onda e dados de maré.

As operações de campo ficaram a cargo da equipe do Laboratório de Hidráulica Marítima e Fluvial, com auxílio técnico do Departamento de Geotecnia e Transportes (DGT), pertencentes a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

5.1.1 Quebra-mar submerso

As informações alusivas ao projeto e execução do quebra-mar submerso podem ser encontradas em Garcia e Gireli (2019), portanto, os dados apresentados neste tópico foram extraídos do referido trabalho. Ademais, foram realizados pequenos ajustes de cota em função dos dados medidos em campo.

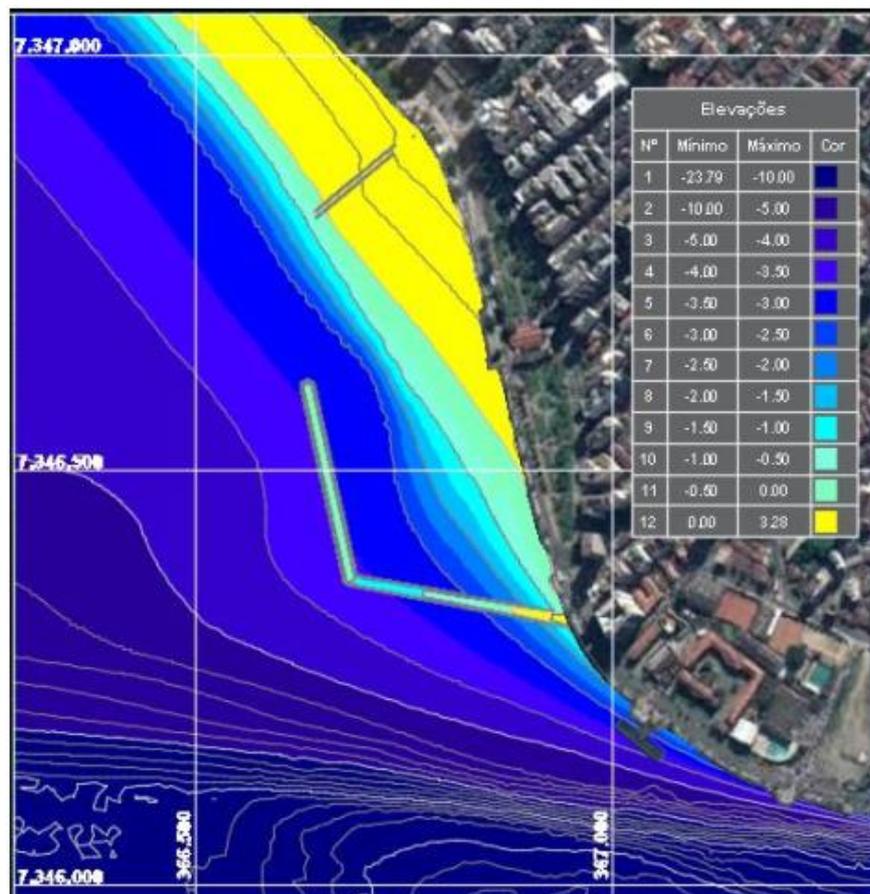


Figura 19: Detalhe do posicionamento da obra piloto junto Ponta da Praia.
Fonte: (GIRELI; GARCIA, 2019).

A obra é composta de dois seguimentos lineares, sendo o primeiro denominado trecho transversal, enraizado junto ao muro de praia e que segue mar adentro por 275 metros, com rumo de $280,15^\circ$ em relação ao norte verdadeiro, até atingir a isóbata de 3,5 metros em relação ao Nível de Redução da Marinha na região (NR). Devido ao

risco de vandalismo, foi executada uma camada de blocos de enrocamento para proteger os primeiros 75 metros da obra. Em suma, este trecho foi executado como uma linha única de geotubos que avançam mar adentro, tendo sua cota de coroamento variando desde a cota +2,50 metros até a cota -1,60 metros.

Neste trecho foram utilizadas duas dimensões diferentes de geotubos, os 3 primeiros possuem 25 metros de comprimento e 9 metros de perímetro cada, este trecho corresponde ao protegido por enrocamento. Na sequência, foram inseridos mais 10 geotubos, com 20 metros de comprimento e perímetro de 12 metros cada. A Figura 20 traz o corte do trecho transversal, já a Figura 21 detalha a seção transversal do trecho na parte protegida pelo enrocamento e a Figura 22 a seção transversal do trecho completamente submerso.

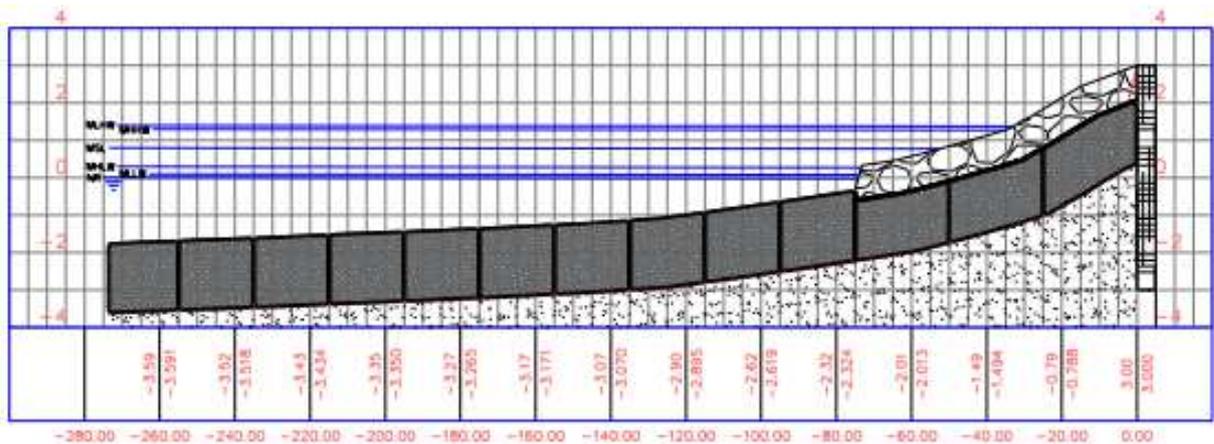


Figura 20: Corte do trecho transversal do projeto piloto executado.
Fonte: (GIRELI; GARCIA, 2019).

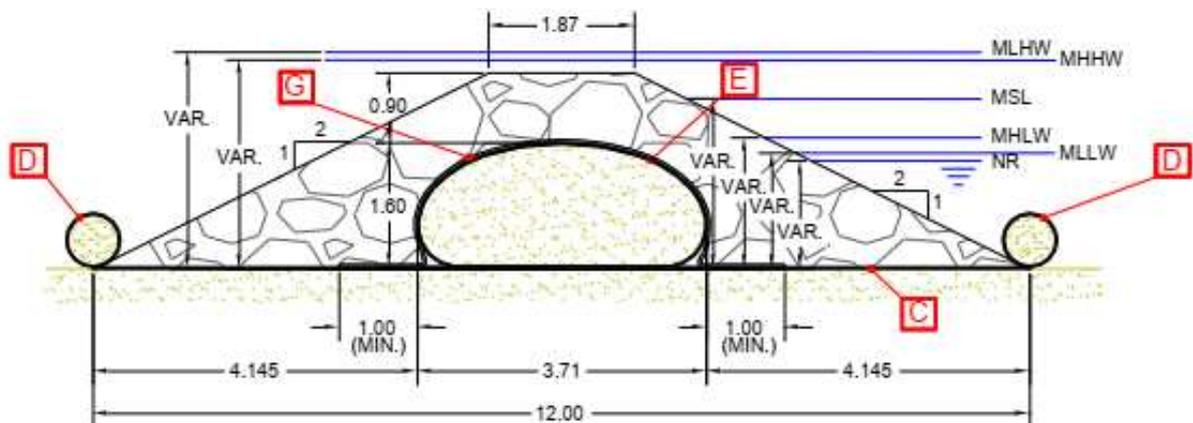


Figura 21: Seção trecho transversal protegido pelo enrocamento.
Fonte: (GIRELI; GARCIA, 2019).

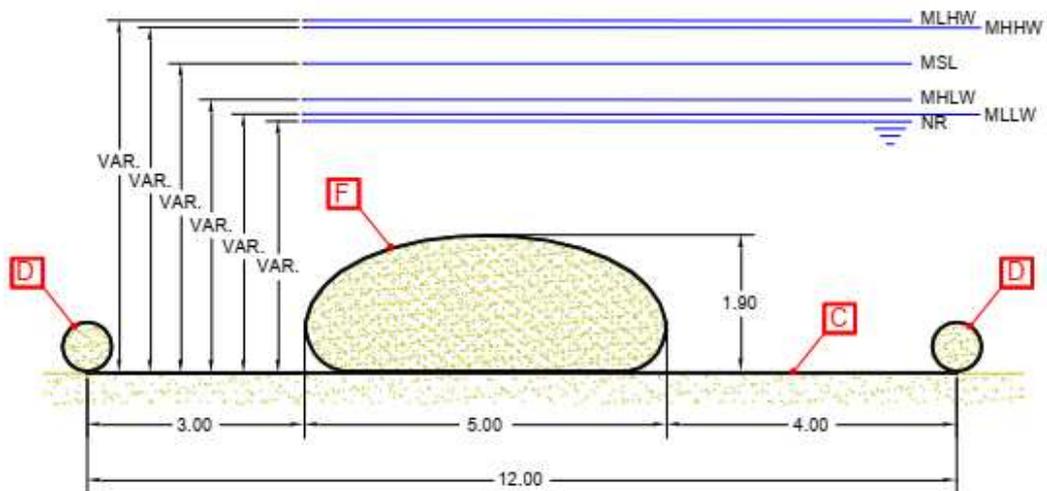


Figura 22: Seção trecho transversal completamente submerso.
Fonte: (GIRELI; GARCIA, 2019).

O segundo trecho linear denominado de longitudinal foi projetado para ficar paralelo à direção dos muros proteção existentes na Ponta da Praia. O trecho foi inserido em uma região ainda estável do perfil praiar, ou seja, em que as declividades continuam baixas, a uma distância da linha de costa capaz de minimizar os efeitos das ressacas e que permite observar a acresção praiar no local. Diante de tais premissas, o trecho longitudinal foi executado com 240 metros de extensão e rumo de $347,53^\circ$ em relação ao norte verdadeiro, praticamente acompanhando a isóbata de 3,5 metros em relação ao NR.

Foi definida a cota de coroamento do trecho longitudinal em - 0,5 metros em relação ao NR, visto que a proposta para este trecho consiste em mantê-lo submerso a maior parte do tempo, minimizando assim o impacto visual negativo, pois trata-se de uma região de atrativo turístico. Portanto, a obra tem em relação à maré astronômica, lâminas d'água acima da cota de coroamento neste trecho, variando entre 0,5 e 2,0 metros, sendo que, a obra apenas pode aflorar em casos de eventos meteorológicos negativos extremos. O trecho longitudinal é composto por duas camadas de geotubos sobrepostas, sendo a camada inferior constituída por duas linhas justapostas de geotubos de 20 metros de comprimento e 9 metros de perímetro cada, totalizando 24 geotubos (12 por linha). Já a camada superior foi projetada com uma única linha composta por 12 geotubos de 20 metros de comprimento e 12 metros de perímetro. A Figura 23 traz o corte do trecho longitudinal, já a Figura 24 detalha a seção transversal da camada inferior do trecho longitudinal e a Figura 25 a seção transversal composta por ambas camadas.

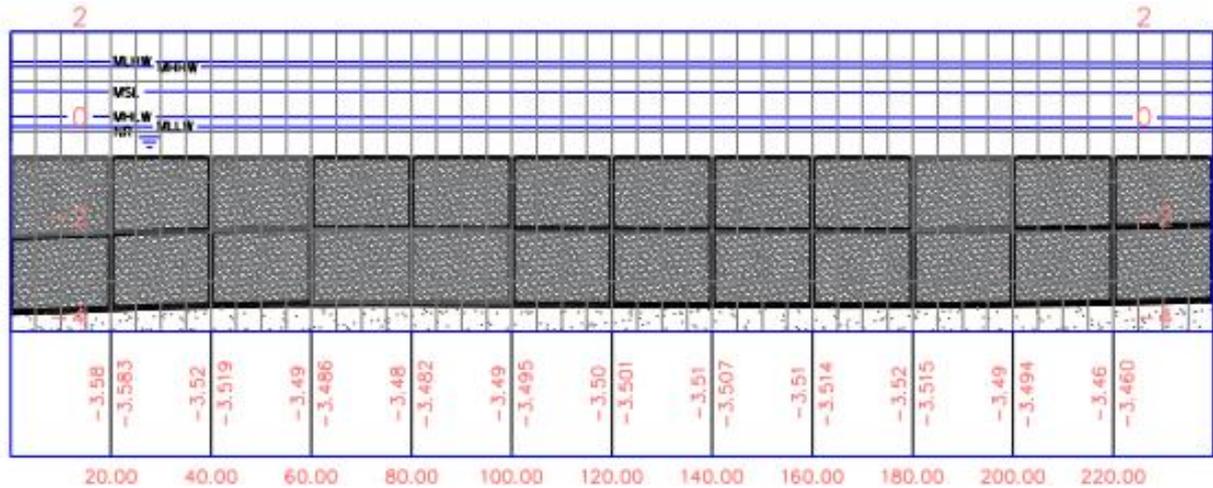


Figura 23: Corte do trecho longitudinal do projeto piloto executado.
Fonte: (GIRELI; GARCIA, 2019).

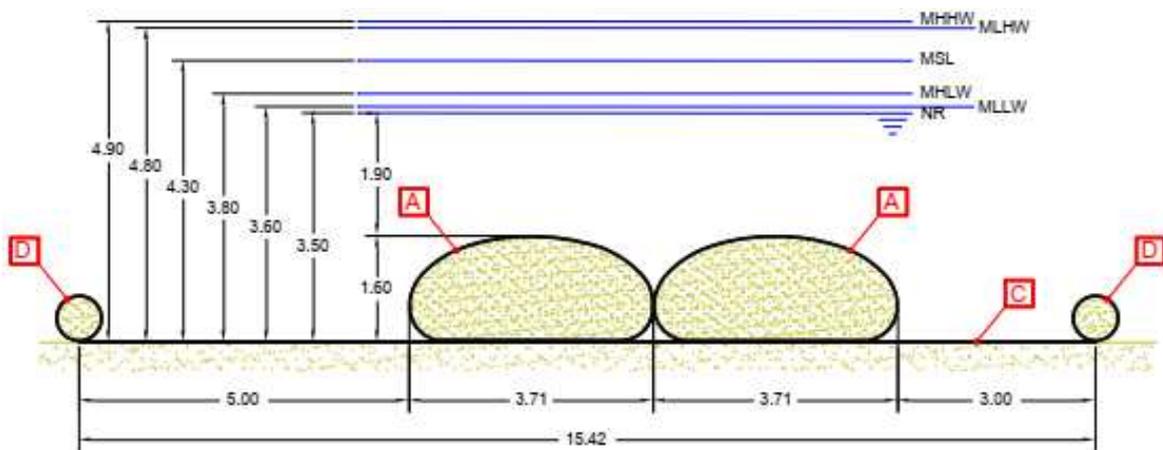


Figura 24: Seção transversal da camada inferior do trecho longitudinal.
Fonte: (GIRELI; GARCIA, 2019).

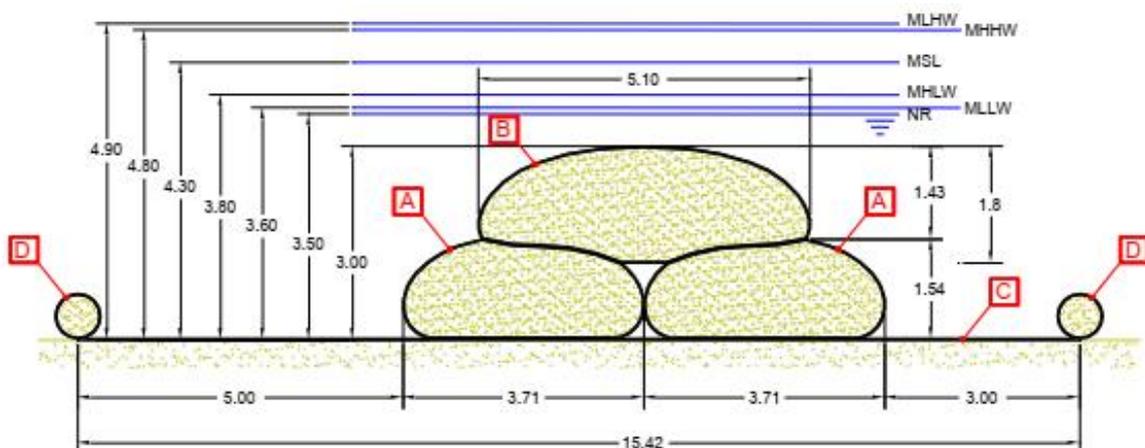


Figura 25: Seção transversal do trecho longitudinal.
Fonte: (GIRELI; GARCIA, 2019).

A Tabela 4 apresenta as coordenadas UTM de início e fim dos trechos da obra piloto, ambas referidas ao Datum Horizontal SIRGAS 2000.

Tabela 4: Coordenadas de referência UTM do quebra mar – submerso.

TRECHO TRANSVERSAL			TRECHO LONGITUDIONAL	
Ponto	Coord. Leste (m)	Coord. Norte (m)	Coord. Leste (m)	Coord. Norte (m)
Início	366.959,082	7.346.319,694	366.685,880	7.346.368,597
Fim	366.685,880	7.346.368,597	366.634,042	7.346.602,980

Fonte: elaborado pelo autor.

Os comprimentos adotados nos dois trechos da obra para os geotubos foram definidos para garantir que o peso próprio dos geotubos preenchidos seja suficiente para estabilidade dos mesmos frente à ação das ondas, sendo assim, a Tabela 5 apresenta informações de cada um dos elementos indicados por letras nas Figuras 21, 22, 24 e 25.

Tabela 5: Detalhes dos elementos indicados nas seções transversais.

Ident.	Elemento	Perímetro (m)	Comp. (m)	Área (m ²)	F. Forma	Qde.	Vol. (m ³)	Resistência à tração nominal mínima do tecido (kN/m)
A	Geotubo tecido	9	20	5	0,460	24	2400	100
B	Geotubo tecido	12	20	7,8	0,374	12	1872	100
C	Tapete anti socavação	15,42 12 12	20 25 20	-	-	12 3 10	-	Trecho Long. 300 Trecho Transv. 50
D	Mini-bag tecido ϕ 0,7m	2 2,2	20 25	0,39 0,39	~1 ~1	44 6	339 58	100
E	Geotubo tecido	9	25	5	0,460	3	325	100
F	Geotubo tecido	12	20	8,2	0,411	10	1640	100
G	Proteção não tecido	8	66	-	-	1	-	-
Volume Total							6684 m³	

Fonte: (Adaptado de GIRELI; GARCIA, 2019).

Segundo Oh e Shin (2006), na construção de quebra-mares, estruturas clássicas estão substituídas por materiais mais baratos. Geotubos têm sido aplicados na construção de diques e quebra-mares em diversos projetos ao redor do mundo. No Brasil, a obra da Ponta da Praia é a pioneira na utilização desta técnica construtiva, constituindo uma solução econômica e ambientalmente interessante em comparação a soluções convencionais.

5.1.2 Levantamento topográfico

O presente trabalho fez uso de pontos georreferenciados em trabalhos de campo realizados entre 2014 e 2019 que estabeleceram uma poligonal enquadrada, caracterizada por um conjunto de alinhamentos consecutivos constituídos de ângulos e distâncias, em que os pontos de partida (início) e de chegada (término), têm suas coordenadas estabelecidas por meio de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) apoiados na Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, por meio do DATUM Sirgas 2000. Assim, permitindo determinar os erros de fechamento, tanto lineares, quanto angulares, conforme a norma NBR 13.133/1994 - Execução de levantamento topográfico (ABNT, 1994).

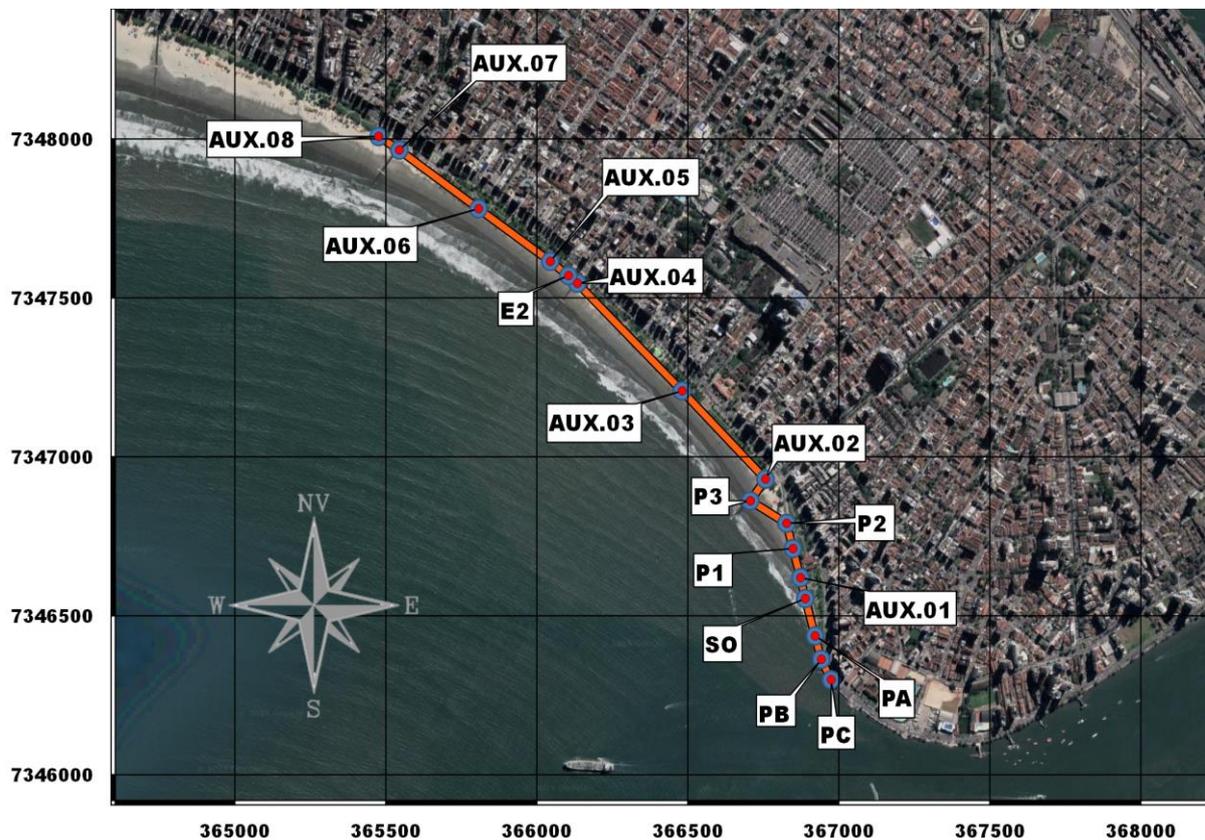


Figura 26: Poligonal do levantamento topográfico.
Fonte: elaborado pelo autor.

A poligonal compreende a região entre a extremidade da Ponta da Praia e o Canal 4 e seus pontos constituintes foram sinalizados por meio de marcações com tinta (no muro de proteção e/ou na calçada) e materializados através de pregos fixados à calçada. Além dos pontos constituintes, foram adicionados novos pontos de interesse para o levantamento de seções transversais irradiadas, isto é, seções

perpendiculares à linha de costa, com intuito de obter dados adicionais para melhor caracterização da área de estudo. As seções nomeadas “STOS-32 a STOS-15” foram estabelecidas no trabalho apresentado pela FUNDESPA (2010), enquanto as seções SA, SMI, SME e as seções numeradas de 0 a 8, foram estabelecidas pela equipe de campo em trabalhos anteriores.

Isto posto, para levantar os dados topográficos necessários para elaboração da superfície da região de estudo, foram utilizadas as seções entre STOS-22 e SME, conforme elucidado na Figura 27.

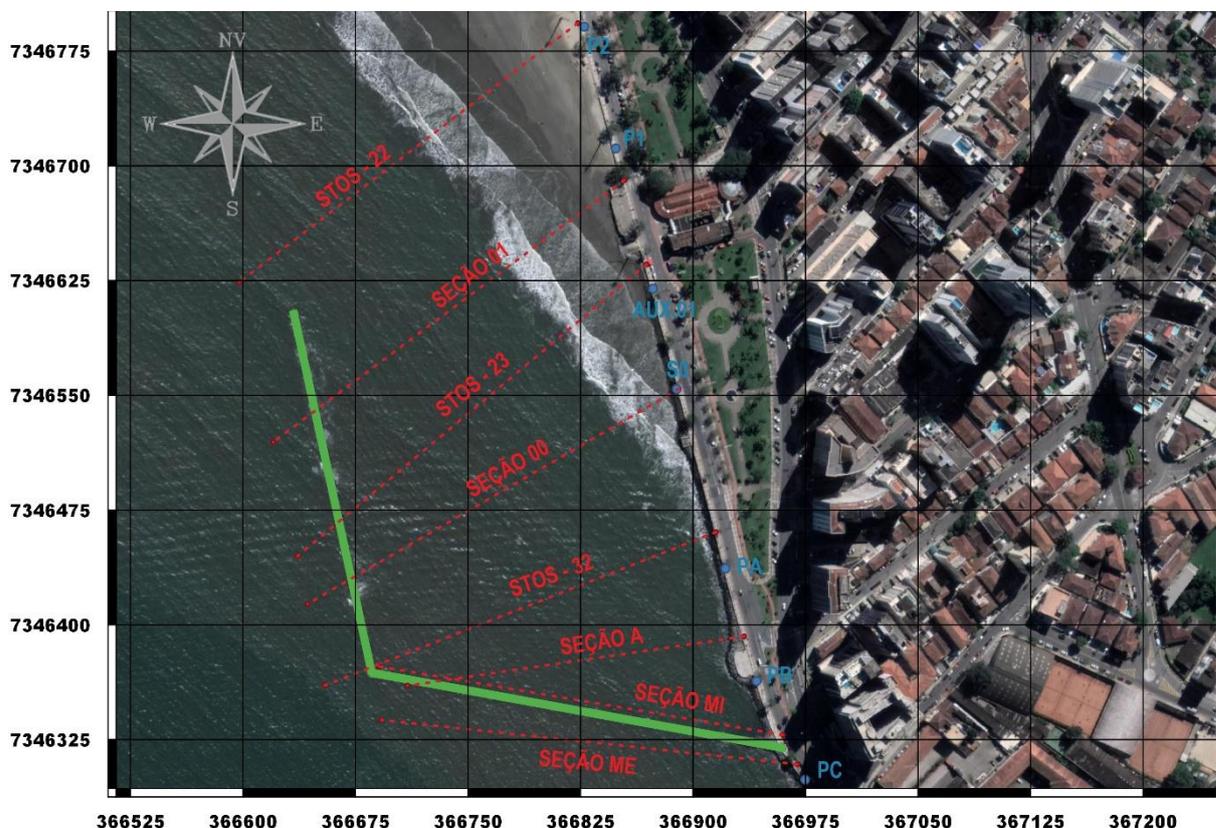


Figura 27: Seções do levantamento topográfico.
Fonte: elaborado pelo autor.

Foi realizado o levantamento topográfico partindo dos pontos iniciais de cada seção, previamente fixados na calçada (Tabela 6), visando manter um alinhamento perpendicular à linha de costa sempre que possível. Tal condição mostrou-se difícil de ser alcançada, devido as condições encontradas em campo durante o período do levantamento, como a presença de obstáculos (guarda-sóis, coqueiros, postes etc.) na parte emersa, enquanto na parte submersa, correntes e ondas reduziram a precisão do alinhamento, vide Figura 28.

Tabela 6: Coordenadas das seções do levantamento.

Ponto	Coord. Leste (m)	Coord. Norte (m)
STOS - 22	366.823,26	7.346.793,37
S1	366.854,34	7.346.690,78
STOS - 23	366.869,13	7.346.635,67
S0	366.890,65	7.346.554,32
STOS - 32	366.915,34	7.346.460,62
SA	366.934,11	7.346.392,44
SMI	366.959,92	7.346.328,07
SME	366.969,55	7.346.308,86

Fonte: elaborado pelo autor.



Figura 28: Levantamento topográfico.
Fonte: acervo pessoal, outubro, 2019.

O levantamento topográfico foi realizado no dia 11 de outubro de 2019 utilizando uma estação total TC305 da marca Leica®. O georreferenciamento, por sua vez, foi realizado com auxílio de equipamento GNSS Hiper Lite Plus da Topcon®, no modo pós processado; com precisão horizontal de $(3 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times \text{distância})$ e precisão vertical de $(5 \text{ mm} + 1,4 \text{ ppm} \times \text{distância})$.



Figura 29: Estação total (à esquerda) e equipamento GNSS (à direita).
Fonte: (Adaptado de VENANCIO, 2018).

As altitudes estabelecidas por meio do receptor GNSS são determinadas em relação a um elipsoide de referência pré-programado. Contudo, para a obtenção das altitudes ortométricas (em relação ao nível médio do mar em Imbituba – Santa Catarina) é necessário utilizar um modelo de ondulação geoidal. Neste trabalho, foi utilizado o MAPGEO 2010 do IBGE. Por fim, realizou-se uma segunda correção de altitude, em função da diferença entre a altitude ortométrica e o nível de redução local da Marinha (NR), que corresponde à média das baixa-mares de sizígia equinociais, conforme ilustrado na Figura 30.

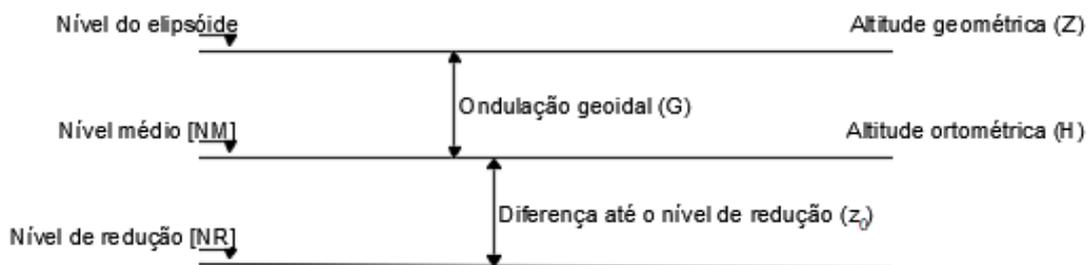


Figura 30: Esquema dos níveis para correção dos pontos para a cota local.
Fonte: elaborado pelo autor.

Essa diferença foi obtida após a realização de nivelamento geométrico entre a Estação Geodésica 2141M do IBGE, localizada na Orla de Santos, e o Nível de Referência Vertical da Marinha, localizado na Estação Maregráfica da Praticagem. Em Santos, o Nível de Redução está a -0,58 m em relação ao nível médio do mar local.

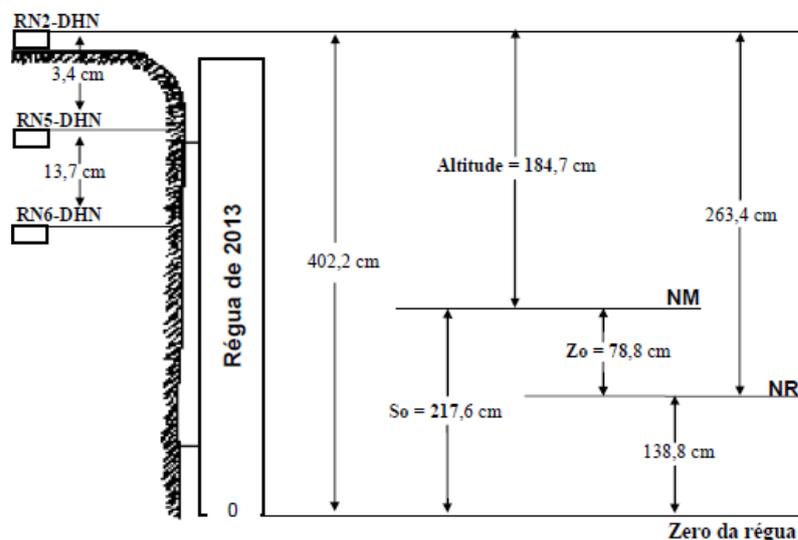


Figura 31: Régua da estação maregráfica da Praticagem em Santos - SP, Brasil.
Fonte: MARMIL, 2019.

5.1.3 Dados de maré

A maré astronômica é um efeito periódico, logo previsível, causada pela conjunção dos efeitos das forças gravitacionais da Lua e do Sol, sobre as massas líquidas juntamente às forças centrífugas entre a Terra e a Lua, e da Terra com o Sol. As marés causam oscilações do nível do mar, e geralmente levam 12,42 horas entre a enchente e vazante, portanto, são semi-diurnas e podem ser medidas através dos marégrafos (ALFREDINI; ARASAKI, 2009).

Neste trabalho, a previsão de maré astronômica (Baixa-mar e Preia-mar) foi utilizada para identificar o período de estofa, condição caracterizada pela baixa ou inexistente corrente de maré, o que facilitou a instalação do aparato de medição. Os dados resumidos na Tabela 7, são disponibilizados online pela Marinha do Brasil (2019), e indicam os valores previstos para a localização do Marégrafo da Torre Grande, equipamento com previsão mais próximo a região da Ponta da Praia.

Tabela 7: Maré astronômica.

Evento	Data	Horário	Maré astronômica (m)
Levantamento (Baixa-mar)	11/10/2019	07:19	0,10
Levantamento (Preia-mar)	11/10/2019	13:34	1,40

Fonte: (MARINHA DO BRASIL, 2019).

As marés também podem ser originadas por efeitos meteorológicos, como o vento e pressões atmosféricas, que podem produzir variações no nível do mar de difícil determinação (ALFREDINI; ARASAKI, 2009). Logo, os valores de maré inseridos nas simulações foram medidos por meio do Marégrafo da Praticagem, localizado na própria região da Ponta da Praia, durante o período de levantamento. Os dados resumidos na Tabela 8 são disponibilizados pela Praticagem de Santos (2019).

Tabela 8: Maré registrada.

Evento	Horário	Maré registrada (m)	Diferença (m)
Levantamento (Baixa-mar)	07:50	0,12	0,02
Levantamento (Preia-mar)	14:10	1,25	-0,15

Fonte: (PRATICAGEM DE SANTOS, 2019).

As diferenças entre maré prevista e maré registrada evidenciadas são causadas por três diferentes motivos: localização distinta dos marégrafos, diferença horária entre dado de previsto e dado levantado, além de efeitos meteorológicos.

5.1.4 Dados de onda

Para alimentar e calibrar o modelo numérico foi necessário coletar dados estáticos de onda como: altura significativa (H_s), altura média ($H_{\text{médio}}$), período significativo (T_s) e período médio ($T_{\text{médio}}$). Tal medida visou representar o regime de ondas durante o período do levantamento, que em conjunto aos demais dados levantados constituem a representação da morfo-hidrodinâmica da área de estudo.

Ademais, foi necessário inserir um espectro de ondas capaz de reproduzir o movimento da superfície livre mensurado em campo no modelo numérico. O espectro de ondas pode ser entendido como a junção de várias componentes de ondas com frequências, amplitudes e fases independentes. É descrito numericamente como:

$$\eta(t) = \sum_{i=0}^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (21)$$

onde A_i , ω e φ são amplitude de onda, frequência e fase respectivamente.

Normalmente, os dados estatísticos e o espectro de ondas são obtidos via sensores de pressão, sensores acústicos, radares de ondas ou boias equipadas com sensores de movimento. Cada um destes equipamentos coleta parâmetros de ondas utilizando técnicas distintas, por exemplo, as boias derivam estatísticas de ondas rastreando superfície da água por meio de acelerômetros, giroscópios etc. Tais instrumentos são, por necessidade altamente precisos, mas podem ser proibitivamente caros em termos de compra inicial, custos de implantação e manutenção, o que inviabilizaria a obtenção de dados para este trabalho que necessitava de medições em ao menos dois pontos da área de estudo, um antes e outro depois da estrutura.

Diante deste contexto, optou-se pela aplicação da técnica detalhada por Loehr et al. (2013), que faz uso de acelerômetros instalados sobre um flutuador para descrever a variação da superfície livre em cada instante de tempo. Vale ressaltar que o uso de acelerômetros para este fim não é novidade, trata-se do princípio fundamental de grande parte das boias de ondas disponíveis no mercado atualmente. Princípio este, descrito pela primeira vez por Browne (1937) e aperfeiçoado significativamente por Tucker (1958).

Logo, a grande contribuição de Loehr et al. (2013) foi a validação do uso de acelerômetros modernos, que basicamente são micro sensores eletromecânicos e estão presentes em uma ampla variedade de dispositivos móveis como smartphones e tablets. Isto torna o método mais atrativo financeiramente e possibilita a sua aplicação em uma gama maior de situações. A seguir são elucidados os procedimentos e considerações realizados para a obtenção da estatística e do espectro de ondas:

- i. Em primeiro momento, foram definidos pontos de medição dentro da área de estudo, assim como a sequência de instalação indicada na Figura 32. Dois pontos foram locados para caracterizar o comportamento de ondas na borda de entrada do modelo, enquanto os outros dois pontos estavam à aproximadamente 55 metros do eixo do quebra-mar e visavam mensurar as condições após a interação das ondas com a estrutura;

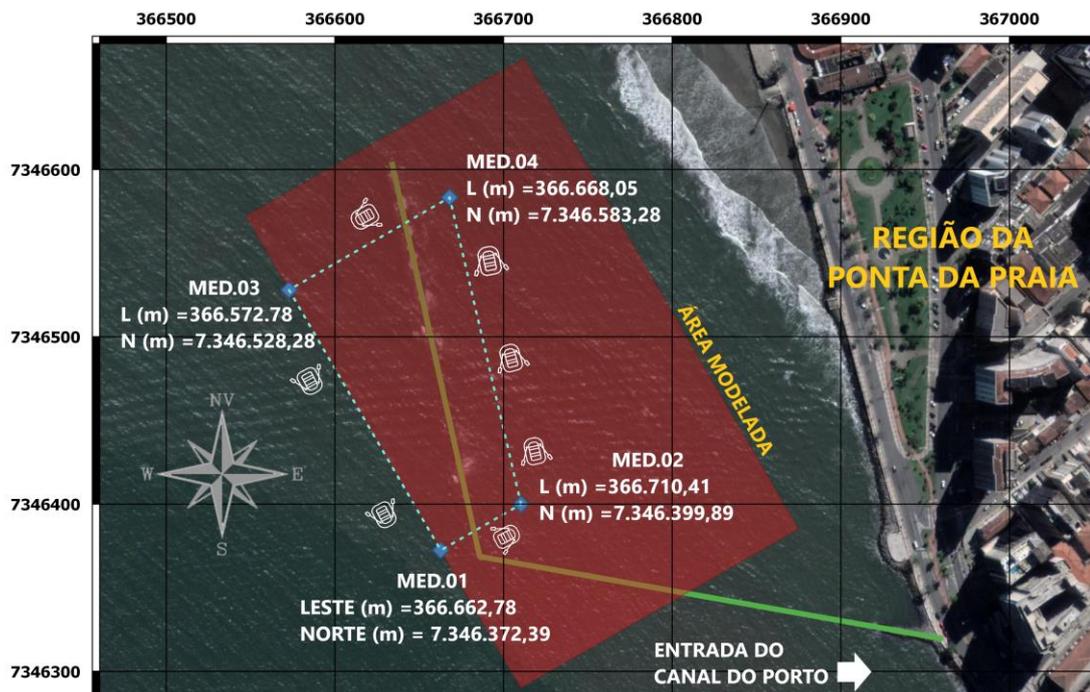


Figura 32: Pontos de medição dos dados de campo.
Fonte: elaborado pelo autor.

- ii. Quatro smartphones foram empregados na coleta de dados, ambos utilizam o sistema operacional Android® e pertencem a linha Galaxy S, da fabricante Samsung. Os dados foram extraídos via o software Telemetria, que registra os valores mensurados por todos os sensores dos aparelhos em um arquivo de texto. A Figura 33 elucidada o aparato de medição montado e instalado no local;



Figura 33: Aparato de medição (Flutuador + Smartphone).
Fonte: elaborado pelo autor.

- iii. Devido a entrada de água no smartphone, o dispositivo de Medição 02 parou de funcionar antes de finalizar a coleta de dados. Sendo assim optou-se por também descartar os dados mensurados pelo dispositivo de Medição 01;
- iv. Já com os dados coletados em mãos, identificou-se o horário de medição em que se iniciou o registro simultâneo nos quatro aparelhos. Durante a Baixa-mar, a partir de 07:53:21 e para Preia-mar, a partir de 14:04:03. É importante ressaltar que os relógios dos dispositivos já estavam sincronizados antes da instalação *in loco*;
- v. Posteriormente, calculou-se o módulo resultante das três acelerações para cada instante de tempo e aplicou-se a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*) para a obtenção do espectro de acelerações;

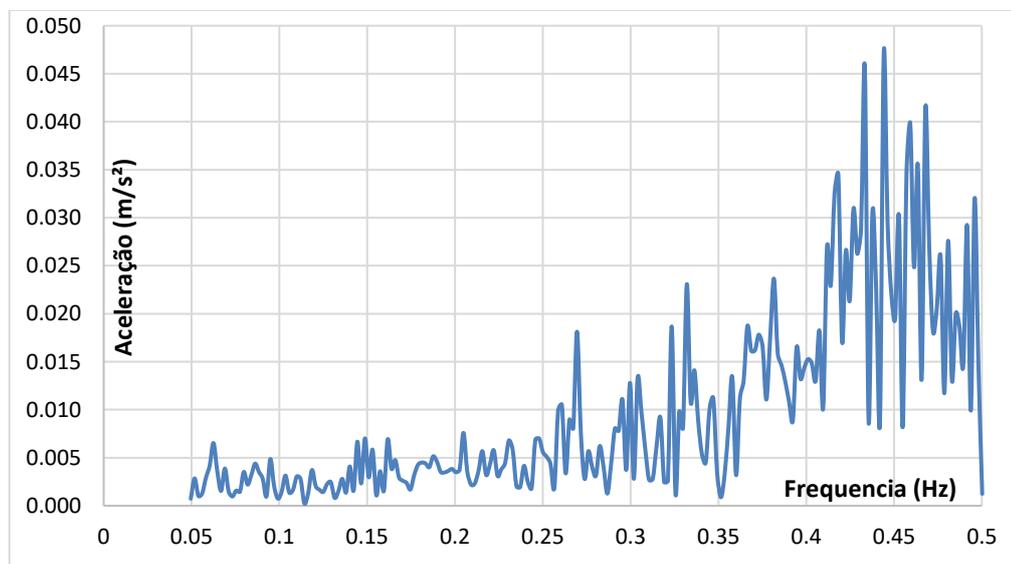


Figura 34: Espectro de acelerações filtrado.
Fonte: elaborado pelo autor.

- vi. Conforme exposto na Figura 34, as frequências medidas fora do esperado para ondas gravitacionais (ou seja, 0,5 a 0,05 Hz ou $T = 2$ a 20 s) foram removidas do processamento;
- vii. Empregando o recurso da dupla integração, o espectro de acelerações foi transformado em um espectro de posição, conforme demandado pelo modelo numérico, vide item 5.2.5;
- viii. Por fim, utilizando a Transformada Inversa de Fourier, o espectro de posição é convertido num trem de ondas capaz de reproduzir a variação da superfície livre. As Figuras 35 e 36 exemplificam dois trens de ondas gerados para um intervalo de 540 segundos (9 minutos), um para cada condição de maré, e permitem a extração dos dados estatísticos.

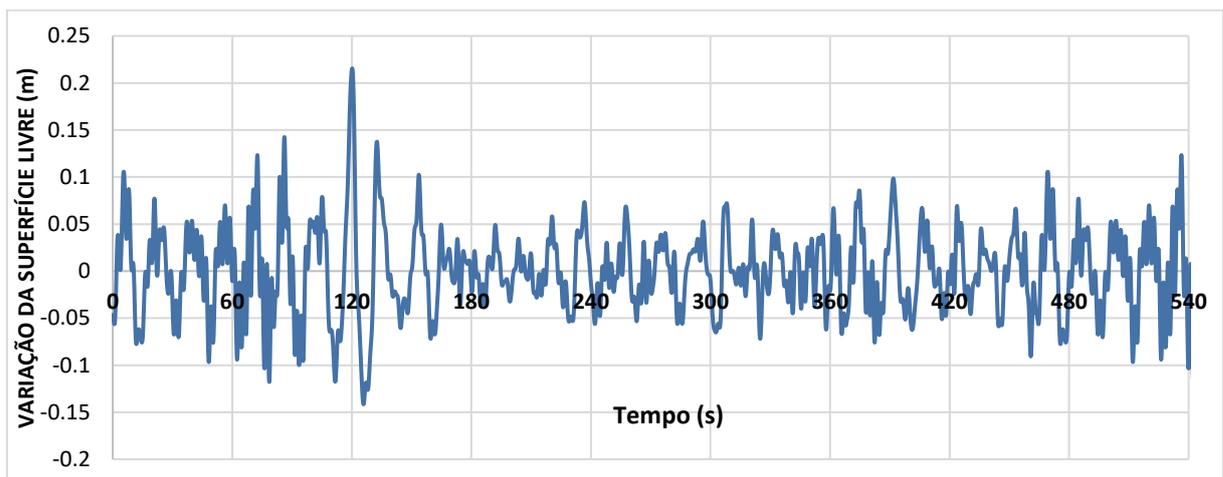


Figura 35: Trem de ondas (540 s) - Ponto de medição 03 (Baixa-mar).
Fonte: elaborado pelo autor.

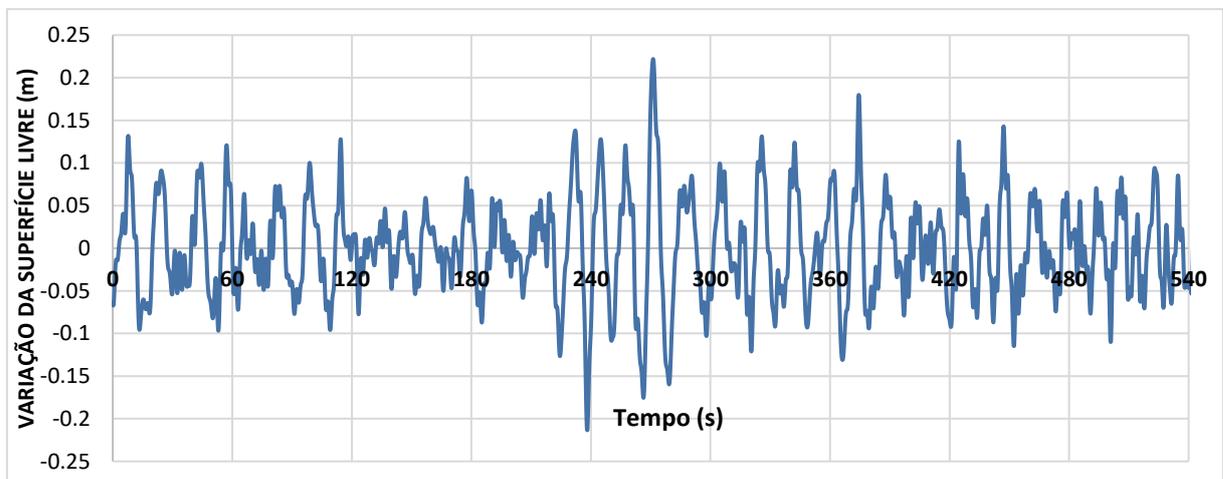


Figura 36: Trem de ondas (540 s) - Ponto de medição 03 (Preia-mar).
Fonte: elaborado pelo autor.

5.2. MODELO COMPUTACIONAL

Para a modelagem numérica do escoamento, foi utilizado o pacote computacional FLOW-3D®, elaborado e fornecido pela *Flow Science Inc.* O software resolve as equações de Navier-Stokes com média de Reynolds em nível de volumes elementares e apresenta uma ampla variedade de opções físicas e numéricas. O próprio foi escolhido após um extenso mapeamento sistemático da literatura que visou identificar a ferramenta numérica que, no momento da elaboração do trabalho, possuía produção acadêmica relevante para a temática do estudo. Ademais, o software possui excelentes interfaces de pré e pós processamento.

Foram simulados quatro cenários, os cenários 01 e 02 utilizaram os dados coletados em campo durante a baixa-mar e a preia-mar para calibração e validação do modelo. Posteriormente, os demais cenários reproduziram a hidrodinâmica na hipotética ausência do quebra-mar submerso, vide Tabela 9. Ambos os cenários visaram a investigação dos efeitos de águas rasas e dissipação de energia provocados pela estrutura.

Tabela 9: Cenários de simulação

Cenário	Nível médio do mar (m)	Período de simulação (HH:MM:SS)	Duração (s)
01 - Baixa-mar	0,12	07:53:21 – 08:02:21	540
02 - Preia-mar	1,25	14:04:03 – 14:13:03	540
03 - Baixa-mar sem a estrutura	0,12	07:53:21 – 08:02:21	540
04 - Preia-mar sem a estrutura	1,25	14:04:03 – 14:13:03	540

Fonte: elaborado pelo autor.

Para efetuar as simulações, foi utilizado uma máquina com as seguintes características: processador Intel® Core™ i7-3960X 3.3Ghz, 32GB RAM e placa de vídeo NVIDIA® Quadro® 4000 GPU 2GB.

5.2.1 Modelo digital de elevação (MDE)

O levantamento topográfico forneceu pontos identificados e georreferenciados (cotas e coordenadas), que serviram de base para a criação do modelo digital de elevação (MDE) da região da Ponta da Praia. Os pontos coletados, já com as devidas correções de nível detalhadas no item 5.1.2, foram importados para o software AutoCAD Civil 3D® da Autodesk, que permite a modelagem de superfície a partir de

pontos, curvas de nível e objetos CAD (*Computer aided design*). Posteriormente, o tratamento de dados e geração do MDE procedeu-se na seguinte ordem:

- i. Conforme elucidado na Figura 18, foi delimitada por meio de pontos georreferenciados, uma poligonal fechada que compreende a superfície modelada, vide Tabela 10;

Tabela 10: Coordenadas poligonal superfície modelada.

Ponto	Coord. Leste (m)	Coord. Norte (m)
Q1	366.712,33	7.346.666,58
Q2	366.547,33	7.346.572,36
Q3	366.710,28	7.346.290,12
Q4	366.874,83	7.346.385,12

Fonte: elaborado pelo autor.

- ii. Foram removidos manualmente os pontos levantados de maneira equivocada, devido ao balanço do prisma durante a medição e ao deslocamento em relação ao alinhamento das seções estabelecidas;
- iii. Visto que as distâncias entre as seções levantadas são elevadas e o software não realiza uma interpolação adequada, tal como seria a declividade da praia na situação real, foram adicionados pontos auxiliares para facilitar a geração da superfície;
- iv. Gerou-se a superfície de nível da área de estudo (Figura 37);

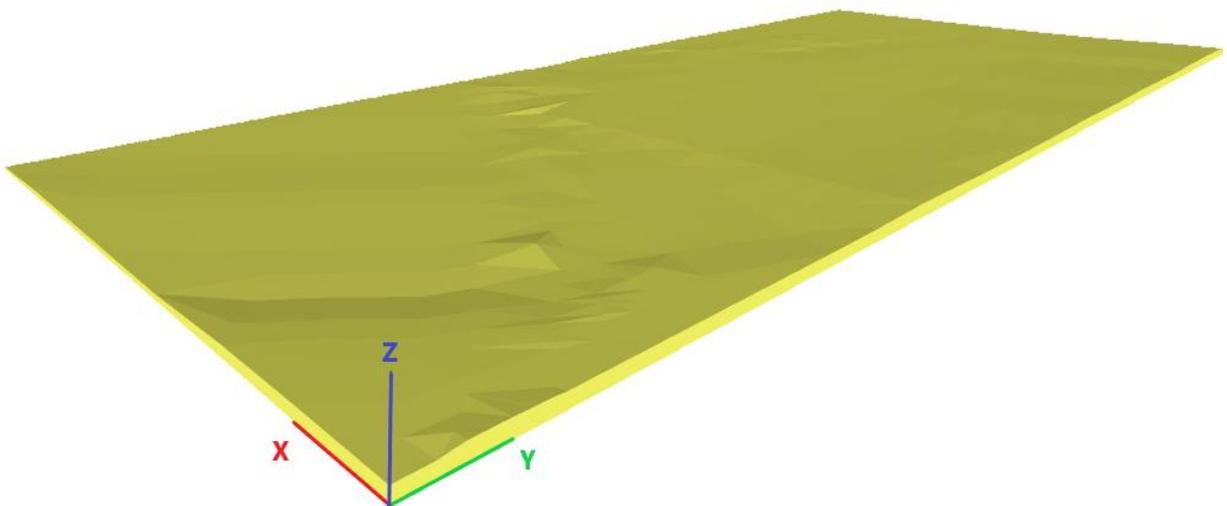


Figura 37: Modelo digital de elevação.

Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.2 Geometria do tanque de ondas

Após a geração do MDE, se fez necessário a modelagem da estrutura do quebra-mar submerso em 3D para complementar a geometria do tanque de ondas. Sendo assim, optou-se por modelar a geometria dos geotubos por meio do software SketchUp, que apresenta uma grande quantidade de ferramentas e opções que dão agilidade a esse processo.

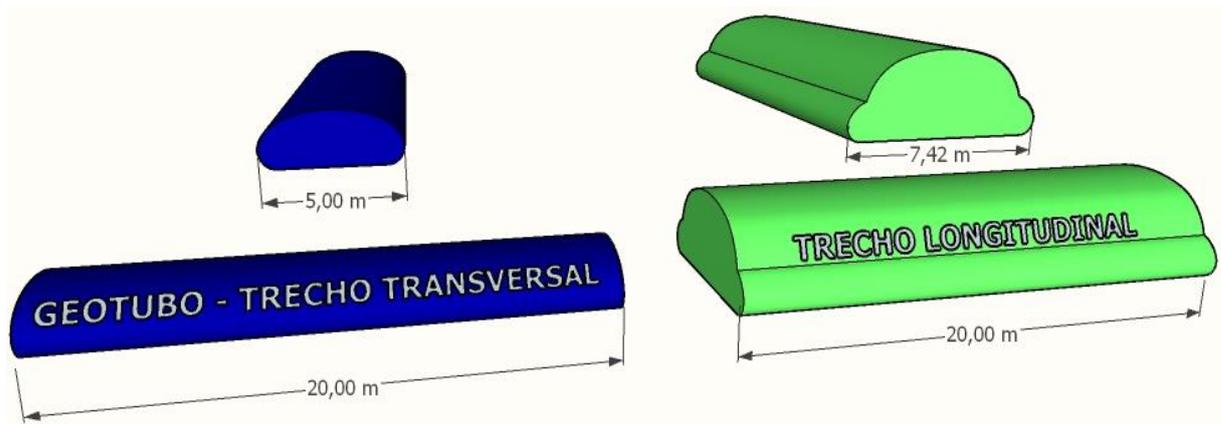


Figura 38: Geotubos em 3D.
Fonte: elaborado pelo autor.

O FLOW 3D® possui uma interface com softwares do tipo CAD, a qual permite a exportação de um sólido diretamente para o modelo computacional. O processo de exportação é feito por meio da conversão dos sólidos da geometria em arquivos tipo STL (*Stereolithography*). Este tipo de arquivo descreve a superfície de um objeto tridimensional, por meio de uma superfície não estruturada de triângulos, sem se preocupar com nenhum atributo adicional, como cor, textura etc., caracterizando-o como um fator facilitador para elaboração de contornos sólidos complexos.

Além disso, a possibilidade de entrada de sólidos de maneira independente é fator primordial para a melhor construção da geometria do modelo. Desta maneira, no presente trabalho foram inseridos sólidos independentes, essa medida visa a definição de propriedades físicas específicas para cada componente sólido do modelo (superfície e geotubos), conforme elucidado na Figura 39.

Antes da importação definitiva para o ambiente de trabalho, foi realizada a checagem e validação dos contornos tridimensionais existentes através dos softwares ADmesh v.0.98.1, presente no pacote FLOW-3D® e MeshLab 2016. Esse procedimento garante que todas as fronteiras da geometria estejam fechadas.

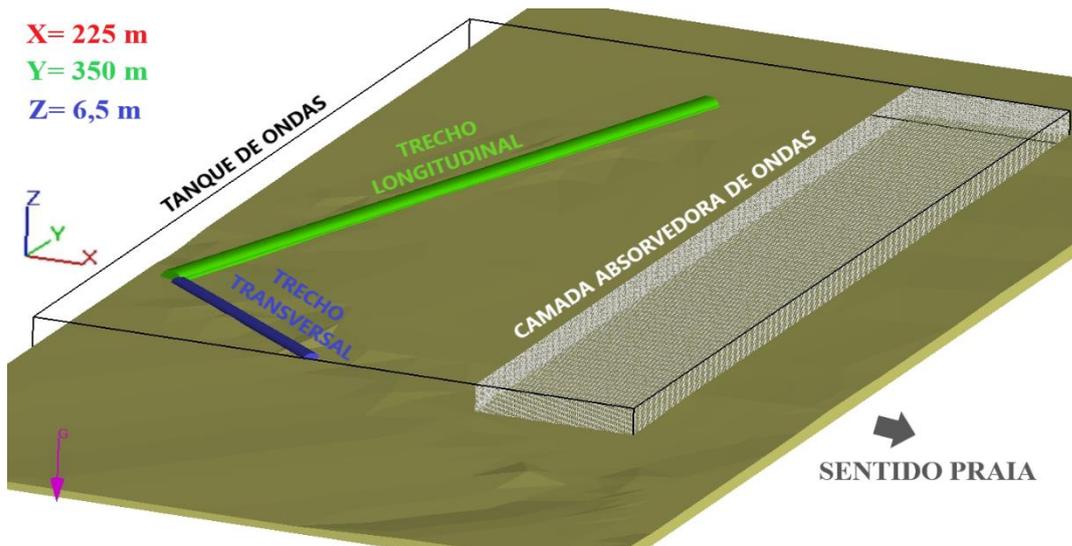


Figura 39: Geometria do tanque de ondas.
Fonte: elaborado pelo autor.

O tanque de ondas numérico é constituído por um bloco retangular em escala real. É recomendável definir o comprimento do tanque entre três a cinco vezes o comprimento de onda (L) na região da camada absorvedora de ondas. Assim, é garantida a estabilidade numérica da propagação de onda e diminui-se os efeitos de reflexão na fronteira de saída por um tempo razoável de propagação. (DIDIER et al., 2017). Determina-se o comprimento de onda a partir da equação:

$$L = \left(\frac{g \cdot T^2}{2\pi} \right) \tanh \left(\frac{2\pi}{L} h \right) \quad (22)$$

onde (T) é o período médio de onda e (h) a profundidade em relação ao nível do mar em repouso. Foi adicionado um comprimento de onda como camada absorvedora, para dissipar as ondas antes da fronteira de saída e evitar a reflexão. A altura do tanque deve ser superior ao somatório da profundidade d'água e altura de onda significativa. Conforme testes iniciais, a altura do tanque foi definida de acordo com a Equação (22), visto que ocorrem os efeitos de reflexão, quebra de onda e galgamento da estrutura durante as simulações:

$$H_t = h_{m\acute{a}x} + 3H_s \quad (23)$$

Para a definição das dimensões supracitadas, foi considerado o cenário de simulação mais desfavorável (preia-mar). A Tabela 11 resume os parâmetros

utilizados, extraídos dos itens 5.1.3 e 5.1.4, e apresenta as dimensões do tanque de onda representado na Figura 39. A largura do tanque de ondas (B_T) foi definida exclusivamente em função das dimensões do quebra-mar.

Tabela 11: Dimensões do tanque de ondas.

Parâmetros	Valores
Período de onda médio (T)	8,31 s
Profundidade máxima ($hmáx$) - cenário preia-mar	4,50 m
Comprimento de onda (L)	45,00 m
Altura de onda significativa (H_s)	0,21 m
Comprimento mínimo do tanque (C_T)	225 m
Altura mínima do tanque - adotada (H_T)	6,5 m
Largura do tanque (B_T)	350 m

Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.3 Malha Computacional

Após a definição da geometria é necessário dividir o tanque de ondas numa malha computacional, que pode ser caracterizada como uma ferramenta de discretização do domínio utilizado na simulação numérica. Em problemas tridimensionais, a malha deve ser composta por no mínimo dois planos em cada direção ($X_{MÍN}$ e $X_{MÁX}$, $Y_{MÍN}$ e $Y_{MÁX}$ e $Z_{MÍN}$ e $Z_{MÁX}$), sendo que, as quantidades escalares são resolvidas no centroide de cada célula, enquanto as quantidades vetoriais (velocidades) são resolvidas nas faces da célula (MALISKA, 2004).

Neste trabalho, uma malha do tipo estruturada foi definida no sistema cartesiano de coordenadas. Isto simplifica o processo de resolução computacional e provém maior estabilidade a solução numérica (FORTUNA, 2000).

O FLOW-3D® conta com o recurso de blocos múltiplos de malha (Multi-Block), indicado para a modelagem de regiões de fluxo sinuosas ou problemas onde uma pequena área de interesse requer alta resolução. Os blocos são classificados como inseridos, quando um bloco está alojado dentro do outro, ou como ligados, quando compartilham um limite comum entre si (vide Figura 40). Em ambos os casos, o recurso permite ao usuário simular o fluxo com maior precisão, utilizando menos células do que em um único bloco.

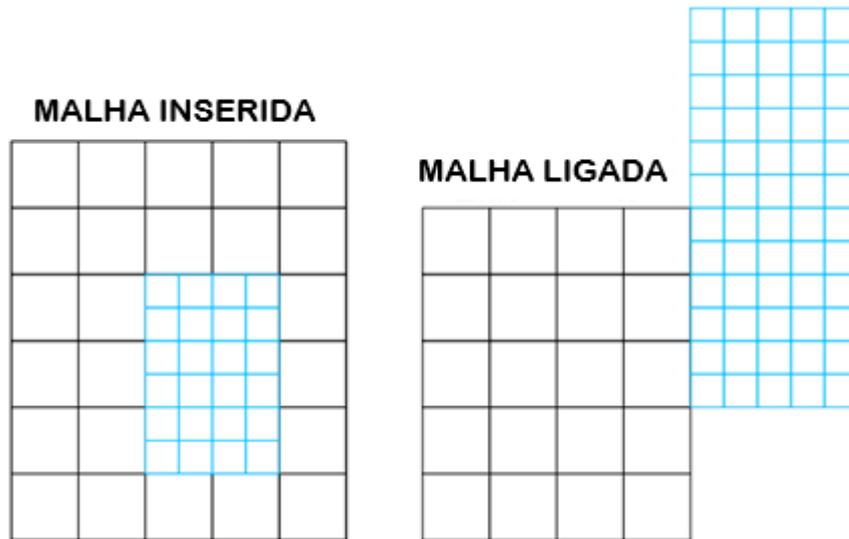


Figura 40: Blocos múltiplos no Flow3D®.
Fonte: elaborado pelo autor.

Para minimizar erros de interpolação na construção de blocos múltiplos, o manual do usuário recomenda que a relação entre as dimensões ortogonais da célula seja próxima de 1,0 e alerta que este valor não deve exceder 3,0. Também indica que a relação entre dimensões de células adjacentes não deve exceder 2,0, conforme elucidado na Figura 41 (FLOW SCIENCE, INC., 2015).

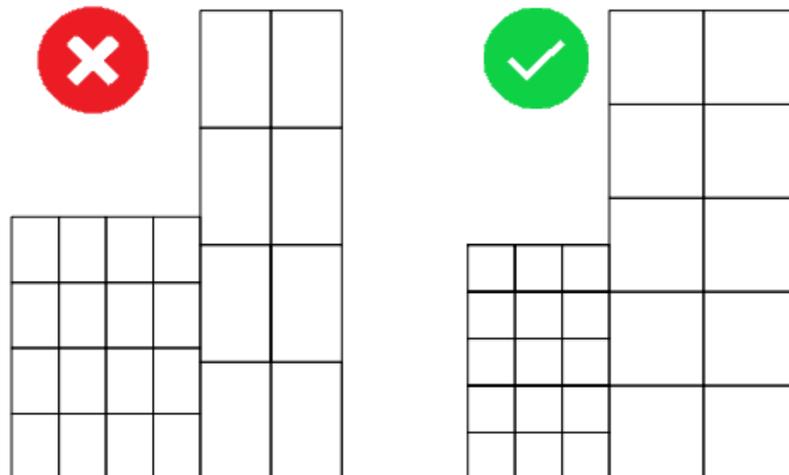


Figura 41: Relação entre células.
Fonte: elaborado pelo autor.

No presente trabalho, os blocos múltiplos foram utilizados para criar uma malha com maior refinamento na região dos geotubos, conforme elucidado nas Figuras 42 e 44. Isto resulta em uma melhor representação geométrica da estrutura e aumenta a precisão da solução numérica.

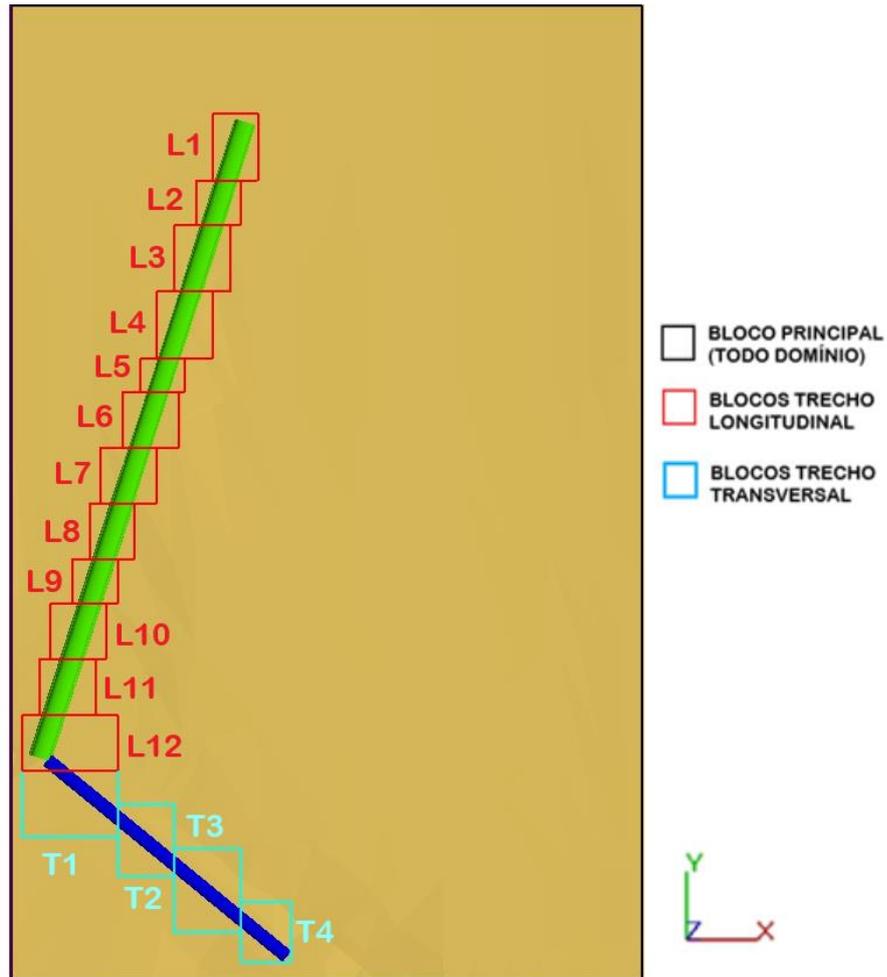


Figura 42: Disposição dos blocos de malha no tanque de ondas.
Fonte: elaborado pelo autor.

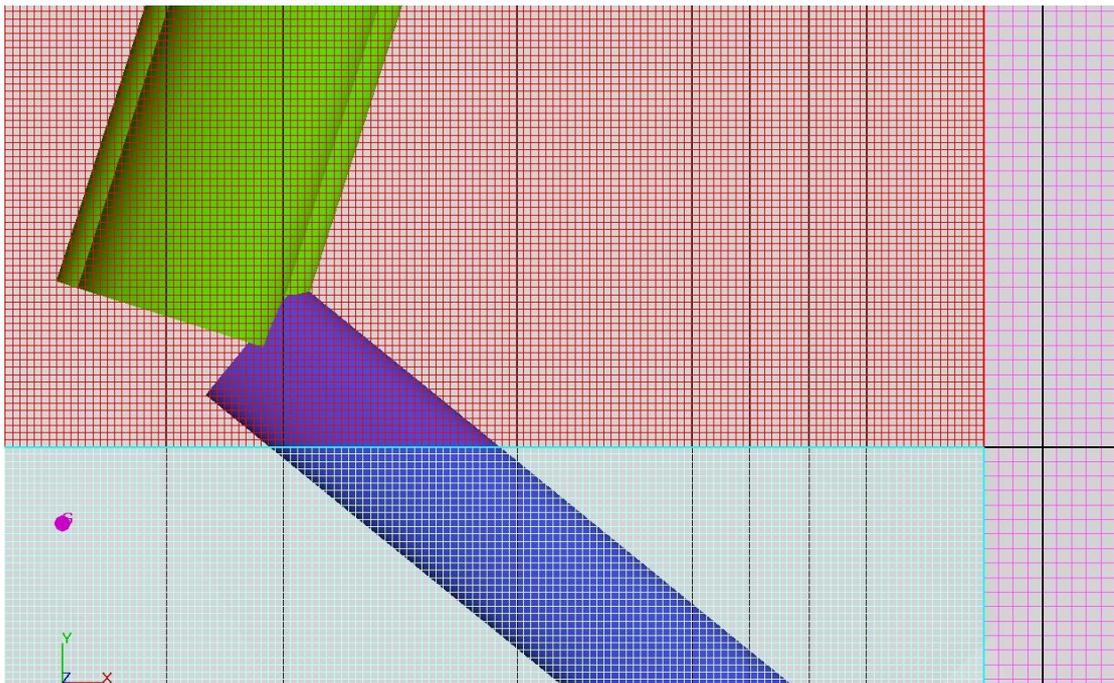


Figura 43: Conexão entre os blocos múltiplos do tanque de ondas.
Fonte: elaborado pelo autor.

Uma das principais vantagens do FLOW-3D® é a utilização de malha conformada. Esta opção permite refinar a malha apenas envolta do domínio de interesse, seja um domínio aberto para o fluxo, ou um domínio sólido. Tudo ocorre dentro da extensão do blocos de malha selecionado, conforme exposto na Figura 44.

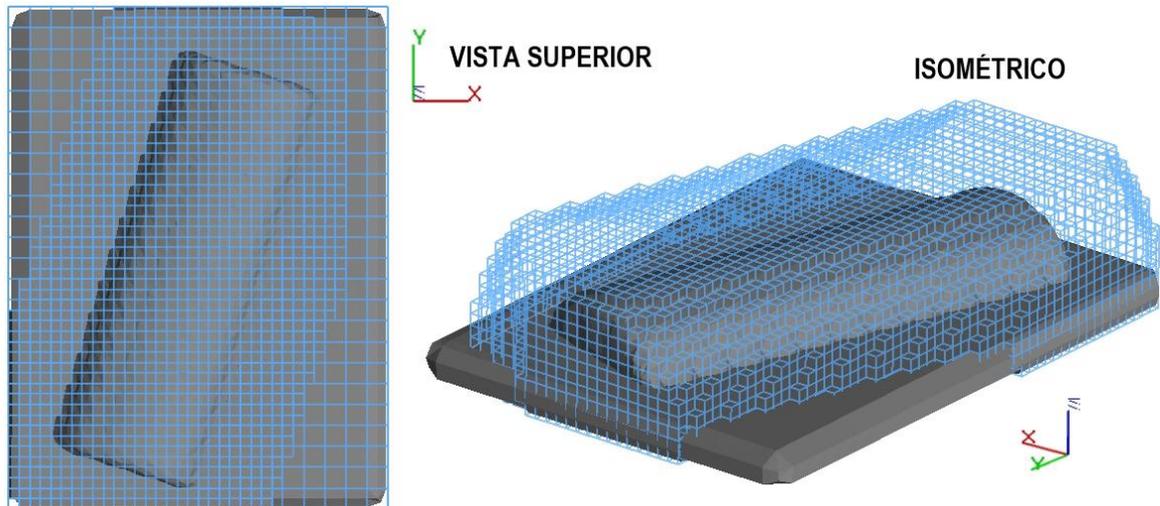


Figura 44: Malha conformada.
Fonte: elaborado pelo autor.

Obviamente, a precisão, o custo em termos de capacidade do hardware e consequentemente, o tempo de simulação dependem do refinamento da malha. Sendo assim, é necessário atingir um compromisso entre a precisão de cálculo desejada e as limitações impostas pelos recursos computacionais.

5.2.4 Modelos Físicos

O FLOW 3D® possui pacotes para simular vários fenômenos físicos da mecânica dos fluidos. Estes pacotes, também conhecidos como modelos físicos, são habilitados na etapa de pré-processamento, conforme a necessidade da simulação. A correta seleção destes modelos é uma escolha de vital importância, visto que, caso os modelos corretos não sejam selecionados adequadamente os resultados e conclusões decorrentes não serão válidos. Dentre esses pacotes, alguns são essenciais para o a correta simulação da hidrodinâmica costeira, levando-se em consideração a interação com um quebra-mar submerso:

- *Gravity*: O pacote mais essencial, ou seja, deve estar presente em praticamente todas as simulações de fluidos. Ele define quais são as acelerações externas

do fluido nas três direções cartesianas. O mais usual é considerar apenas a aceleração da gravidade na direção negativa do eixo vertical;

- *Viscosity and Turbulence*: Responsável pela simulação das forças viscosas e variações turbulentas do escoamento. É um dos modelos mais importantes para a correta simulação de escoamentos com altos números de Reynolds. No presente trabalho, foi utilizado o modelo conhecido como RNG, que se trata do modelo K- ϵ renormalizado;
- *Air Entrainment*: Em alguns escoamentos, o ar pode ser arrastado para a superfície livre devido à turbulência e outras condições, como por exemplo, a quebra de onda ou um jato colidindo contra a superfície. Em suma, o modelo calcula o ar arrastado e pode ser utilizado tanto no fluxo laminar, quanto no fluxo turbulento. O coeficiente da taxa de arrastamento deve ser definido como um valor positivo, sendo assim, foi utilizado o valor padrão de 0,5, sugerido como um ponto de partida adequado para a maioria dos casos.

A quebra de onda é uma consequência natural da dinâmica dos fluidos e não requer o uso de formulações empíricas ou critérios de quebra adicionais para simulações CFD (CHOPAKATLA et al., 2008). Portanto, neste trabalho optou-se pela não utilização do pacote ‘‘*Shallow Water Model*’’. Para maiores informes sobre tal modelo, vide Flow Science, Inc. (2015).

5.2.5 Condições de Contorno

Condições de contorno são as características do escoamento atribuídas aos limites do domínio de interesse. Elas são peças essenciais para que haja o fechamento do sistema de equações e reprodução correta dos fenômenos físicos desejados. No FLOW-3D® encontram-se disponíveis dez tipos de condições de contorno diferentes, para a definição de seis condições de contorno de cada bloco de malha, sendo que as condições são definidas nas faces dos blocos, ou seja, duas em cada uma das direções cartesianas. As condições de contorno variam de modelo a modelo, de acordo com as necessidades do usuário e dependem dos resultados esperados e dos dados iniciais disponíveis. As condições disponíveis são *Continuative*, *Grid overlay*, *Outflow*, *Periodic*, *Specified Pressure*, *Specified Velocity*,

Symmetry, Volume Flow Rate, Wall e Wave. A seguir serão descritas apenas as condições de contorno utilizadas no presente trabalho:

- *Simetria (Symmetry)*: Face do domínio onde o escoamento é simétrico de tal forma que o gradiente das variáveis normal à face é nulo. Desta forma, o escoamento de um lado do plano é uma imagem espelhada do outro lado. Essa condição de contorno é aplicável em todas as faces da malha em que não exista uma condição imposta, basicamente mantendo as características do interior da malha. Esta condição foi aplicada em todas as faces dos blocos malha localizados ao redor do quebra-mar, além das faces (YMín) e (YMáx) do bloco principal;
- *Parede (Wall)*: A condição de contorno parede considera velocidades nulas na fronteira, tornando-a impermeável. Contudo, ainda é possível que existam velocidades tangenciais e, conseqüentemente, tensões tangenciais. No tanque de ondas, esta condição foi definida na face (ZMín) do bloco de malha principal, caracterizando a superfície praial;
- *Pressão (Pressure)*: Há duas opções relacionadas à condição de contorno Pressão. Na primeira opção a pressão local é estática e, portanto, assume a distribuição hidrostática de pressões ao longo do domínio. A segunda opção trata-se da pressão de estagnação, que considera o acréscimo da parcela referente à pressão dinâmica atuante no escoamento. Neste trabalho, utilizou-se a condição de pressão de estagnação no topo do domínio computacional (face ZMáx), com a imposição da pressão atmosférica no nível do mar.
- *Ondas (Waves)*: Uma condição de contorno de onda pode ser definida nas faces (XMín), (XMáx), (YMín) e (YMáx) para problemas de superfície livre. A onda pode ser linear, Stokes, senoidal, solitária ou irregular. Isto posto, uma onda irregular foi definida na face (XMín) do bloco principal utilizando várias componentes de ondas senoidais. Para tal, foram inseridos períodos, amplitudes e fases independentes para caracterizar as condições mensuradas em campo, descritas no item 5.1.4. Além disto, foi necessário inserir a profundidade média do fluido, uma vez que, a onda é gerada em um reservatório numérico com fundo plano, que se supõe existir fora do domínio computacional e imediatamente adjacente a face (XMín), vide Figura 45;

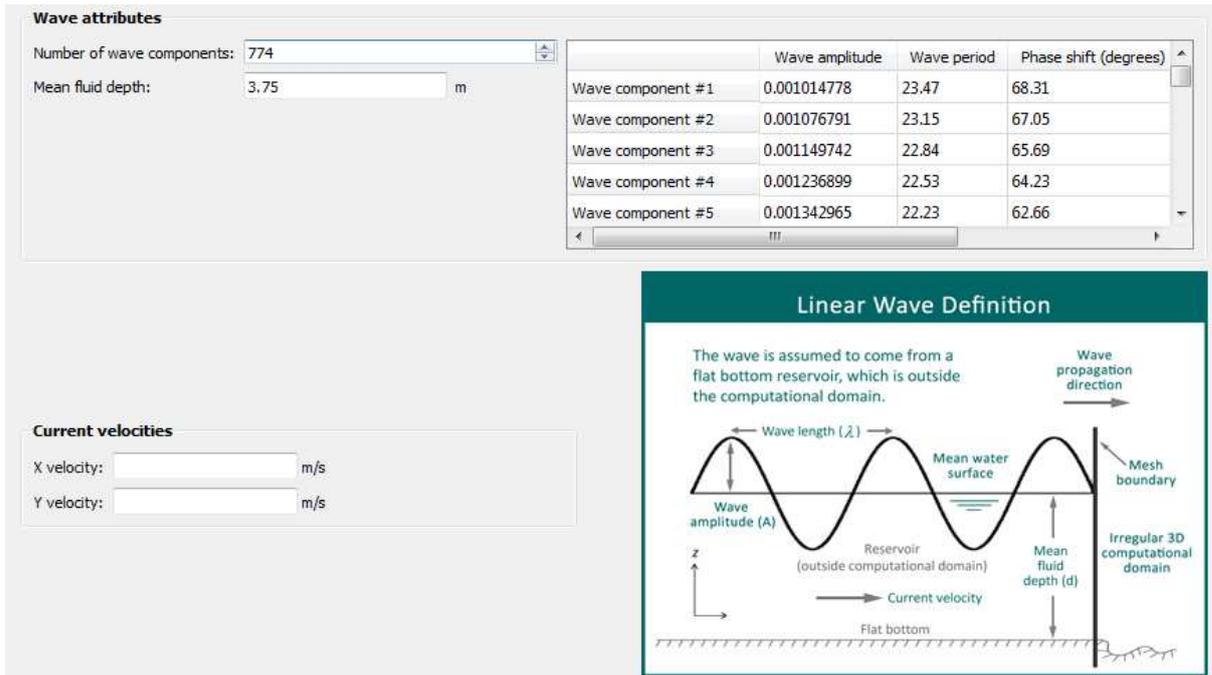


Figura 45: Inserção do espectro de ondas no Flow3D®.
 Fonte: (FLOW SCIENCE, INC., 2015).

- *Wave-absorbing Layer (Sponge Layer) at Outflow Boundary:* Uma camada absorvedora de onda ou camada de esponja é uma região especial instalada antes de um limite de fluxo de saída para absorver o movimento das ondas, o que reduz a reflexão das ondas a partir do limite de saída (Figura 46). O comprimento da camada absorvedora de ondas foi indicado no item 5.2.2, e a descrição completa da técnica foi abordada no item 3.4.1.3;

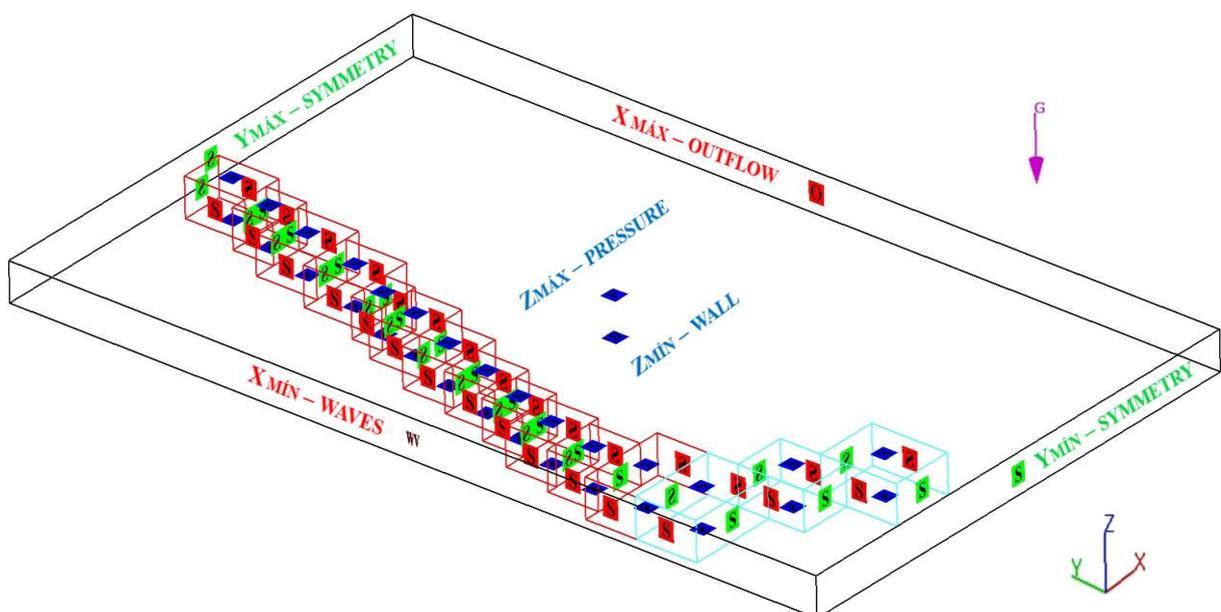


Figura 46: Condições de contorno.
 Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.6 Condições Iniciais

Toda simulação numérica necessita de uma condição inicial para que então seja possível iniciar a resolução matemática do problema. As equações fundamentais da dinâmica de fluidos presentes no software do FLOW-3D® e que regem o movimento de um escoamento enquadram-se na categoria de problemas de valor inicial. Assim sendo, é necessário conhecer a solução nos limites (condições de contorno) e a solução inicial (em $t=0$). A condição inicial mais simples seria deixar o domínio do problema totalmente desprovido de fluido e deixar que, a partir das fronteiras, o modelo fosse preenchido com água e então iniciasse o escoamento. O problema com esse tipo de condição é o grande tempo necessário para atingir a condição desejada, além da possibilidade de se criar instabilidades numéricas. Esta é uma etapa fundamental do pré-processamento, dado que a definição da condição inicial pode ter um grande impacto nos resultados da simulação. Assim, as condições iniciais do escoamento devem tentar reproduzir da melhor maneira possível a condição final desejada (FLOW SCIENCE, INC., 2015).

O movimento das ondas também pode ser definido como uma condição inicial, permitindo que a onda exista inicialmente em todo o domínio computacional, de modo que o tempo de computação para alcançar o movimento de onda constante possa ser encurtado. A elevação inicial da onda e a velocidade do fluido são geradas usando o mesmo gerador de ondas e os mesmos parâmetros de onda que os da condição de contorno "waves".

5.2.7 Propriedades dos fluidos

O interior do domínio é comumente nomeado em trabalhos acadêmicos como zona de fluido. Portanto, durante a configuração do modelo, é necessário inserir as propriedades dos fluidos que serão empregados na simulação. A Tabela 12 resume as características dos fluidos utilizados neste trabalho:

Tabela 12: Propriedades dos fluidos

Fluido	Ar	Água
Massa Volumétrica (kg/m ³)	1.225	1025
Viscosidade Dinâmica (kg/m.s)	1.7894E-05	1.0800E-03
Fase	Primária	Secundária

Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.8 Extração de dados

A extração de dados do modelo computacional pode ser realizada através de duas ferramentas disponíveis no FLOW-3D®, sendo a primeira denominada como sonda de histórico (*history probe*) e a segunda, superfície de fluxo (*baffles*). *History probes* são ferramentas de medição, que não influenciam no comportamento do fluxo, tendo como objetivo a coleta de parâmetros em um ponto fixo. Cada *probe* calcula e armazena todos os parâmetros relevantes da simulação, sendo possível ajustar o intervalo de coleta de dados desejado. Neste trabalho, foram usados para a coleta de importantes parâmetros de análise, como a variação da superfície livre, antes e depois do quebra-mar submerso, em intervalos de tempo de 0,2 segundos. Vale destacar que as ferramentas de medição indicadas na Figura 47, foram locadas em posições equivalentes aos pontos de coleta de dados de onda, indicados no item 5.1.4.

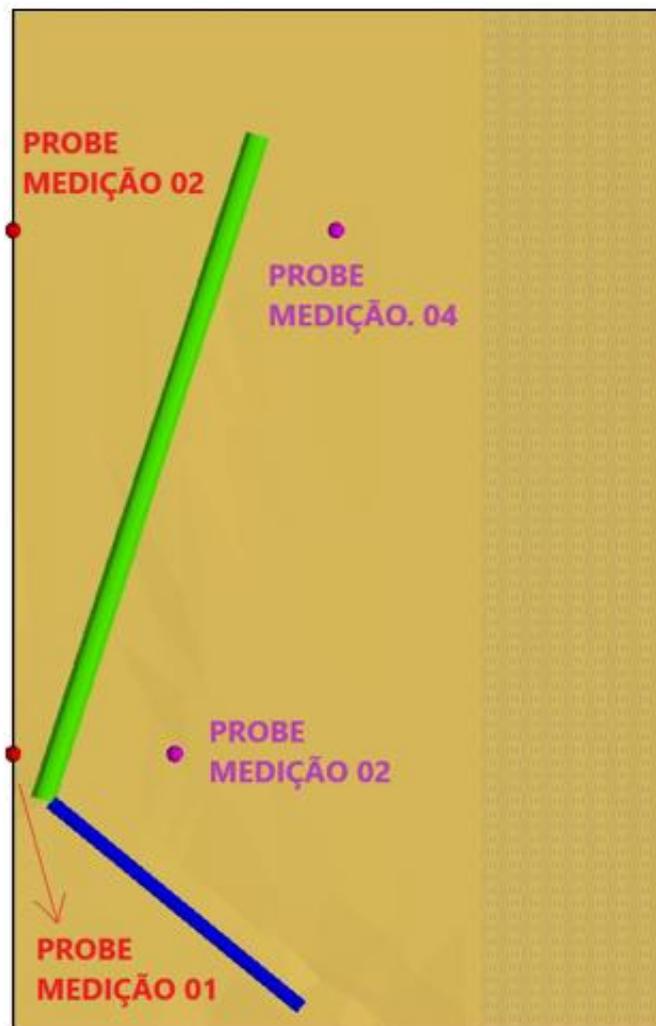


Figura 47: Posição das ferramentas de extração de dados no modelo.
Fonte: elaborado pelo autor.

Além das opções indicadas, também é possível acessar os dados da solução computacional que são gravados periodicamente em um arquivo de dados binários. Este arquivo também pode ser usado pelo pós-processador para extrair dados para plotagem de gráficos, importação para planilhas eletrônicas ou para continuar um cálculo por meio de uma operação de reinicialização.

Por fim, o pós processamento pode ser realizado dentro do ambiente FLOW-3D® ou através de um software complementar desenvolvido especificamente para este fim, denominado FlowSight.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. REFINAMENTO DA MALHA

A primeira etapa realizada para definir o tamanho das células da malha foi a análise por meio do método FAVOR™, ou seja, foi verificado que tamanho de célula é capaz de reproduzir os objetos geométricos dentro do domínio computacional. O manual do usuário FLOW-3D® enfatiza que para a correta representação de um elemento curvo é necessário utilizar a relação $\Delta x, \Delta y, \Delta z \leq \text{raio} / 2$. Vale ressaltar que embora células menores aproximem a representação do contorno, continuamos apenas nos aproximando de uma superfície curva.

Desta forma, chegou-se aos valores de $\Delta x, \Delta y, \Delta z = 0,50$ m para o bloco principal e $\Delta x, \Delta y, \Delta z = 0,25$ m, para os blocos conformados ao redor do quebra-mar. A Figura 48 exemplifica o processo de refinamento da malha computacional, a fim de ilustrar seus efeitos sobre a representação da geometria modelada.

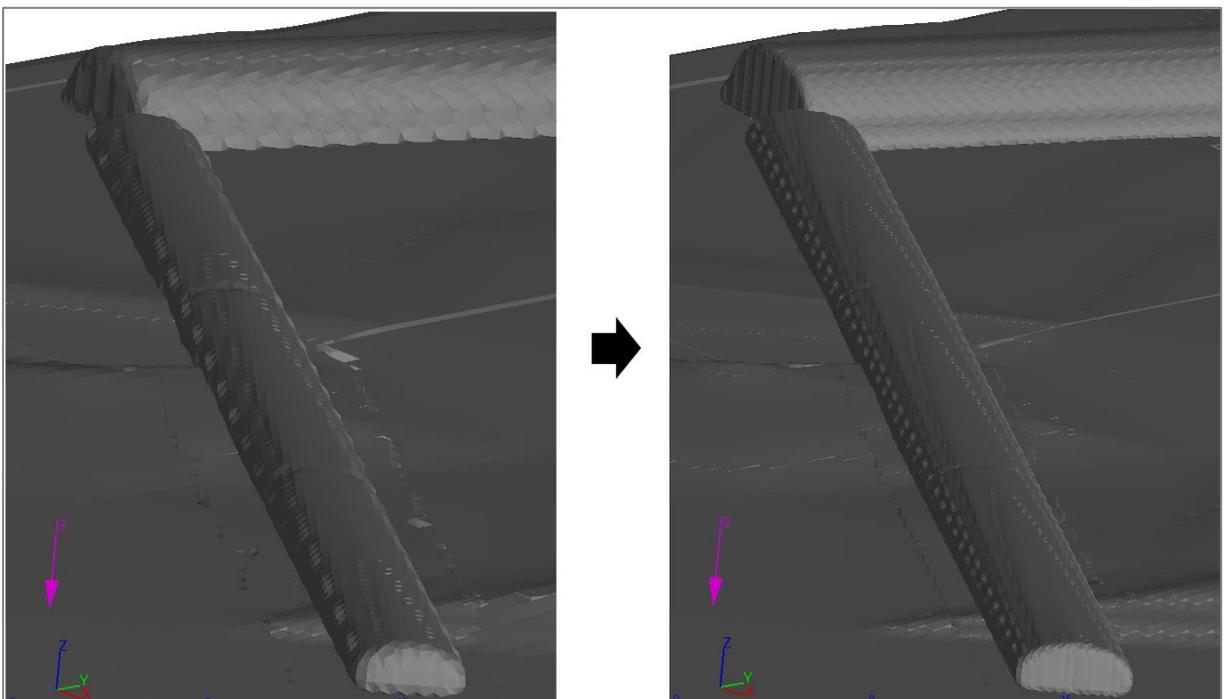


Figura 48: Análise da malha computacional por meio do método FAVOR™.
Fonte: elaborado pelo autor.

A segunda etapa visou analisar a discretização do ponto de vista numérico. Para isto, foi utilizado o procedimento para estimativa de erro de discretização recomendado por Celik (2008), um método simples de aplicar, bem justificado e

destinado a facilitar o desenvolvimento de trabalhos de modelagem CFD, especialmente quando o foco é um trabalho de aplicação. Na sequência são apresentados os passos realizados durante a aplicação do referido procedimento.

De início, foi necessário estimar um tamanho de célula inicial a partir do volume do domínio e quantidade de células desejada. Contudo, neste trabalho foi adotado como estimativa inicial o valor encontrado por meio do método FAVOR™.

Na segunda etapa são definidos tamanhos de célula variados e, posteriormente, executadas simulações para determinar o valor de uma importante variável (ϕ) do objeto de estudo. Neste caso, foi analisada a variação da superfície livre após a interação com o quebra-mar nas duas condições de maré.

Celik (2008), indica que o fator de refinamento malha ($r = \Delta_{grossoiro} / \Delta_{fino}$) deve ser maior que 1,3. Além disto, o autor alerta que o refinamento da malha deve ser estruturado, mesmo se a malha não for estruturada. De modo que $\Delta_{fino} < \Delta_{inicial} < \Delta_{grossoiro}$ e $r_{21} = \Delta_{inicial} / \Delta_{fino}$, $r_{32} = \Delta_{grossoiro} / \Delta_{inicial}$. Isto posto, a Tabela 13 apresenta informações sobre os níveis de refinamento utilizados:

Tabela 13: Níveis de refinamento da malha.

Nível de refinamento	$\Delta_{principal}$ (m)	$\Delta_{geotubos}$ (m)	Quantidade de células
Grossoiro	0,625	0,3125	3.528.786
Inicial	0,50	0,25	7.044.856
Fino	0,40	0,20	13.739.598

Fonte: elaborado pelo autor.

A terceira etapa calculou a ordem aparente (p) do método, por meio das seguintes equações:

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right| + q(p) \right| \quad (24)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^{p-s}}{r_{32}^{p-s}} \right) \quad (25)$$

$$s = 1 \operatorname{sgn} (\varepsilon_{32} / \varepsilon_{21}) \quad (26)$$

sendo $\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$ e $\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$. Caso estes valores tivessem se aproximado de zero, o presente método não seria indicado, pois tal condição indica uma convergência oscilatória ou, em raras situações, pode indicar que a solução

“exata” foi atingida. Em seguida foi calculado o valor extrapolado de (ϕ) que engloba as três variáveis levantadas em um único valor representativo:

$$\phi_{21_{ext}} = (r_{21}^p \phi_1 - \phi_2) / (r_{21}^p - 1) \quad (27)$$

Da mesma forma calcula-se $\phi_{32_{ext}}$

A estimativa de erro relativo aproxima do erro relativo extrapolado, além do índice de convergência da malha são descritos na quarta e última etapa por meio das seguintes equações:

$$e_{aprox.}^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (28)$$

$$e_{ext.}^{21} = \left| \frac{\phi_{21_{ext}} - \phi_1}{\phi_{21_{ext}}} \right| \quad (29)$$

$$GCI_{fino.}^{21} = \frac{1,25 e_{aprox.}^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (30)$$

Analogamente encontra-se o valor de $e_{aprox.}^{32}$, $e_{ext.}^{32}$, $GCI_{fino.}^{32}$, embora seu uso não seja explorado. As Figuras 49 e 50 apresentam os valores obtidos utilizando as três malhas supracitadas e $\phi_{21_{ext}}$ em ambas condições de maré, para aproximadamente um comprimento de onda,

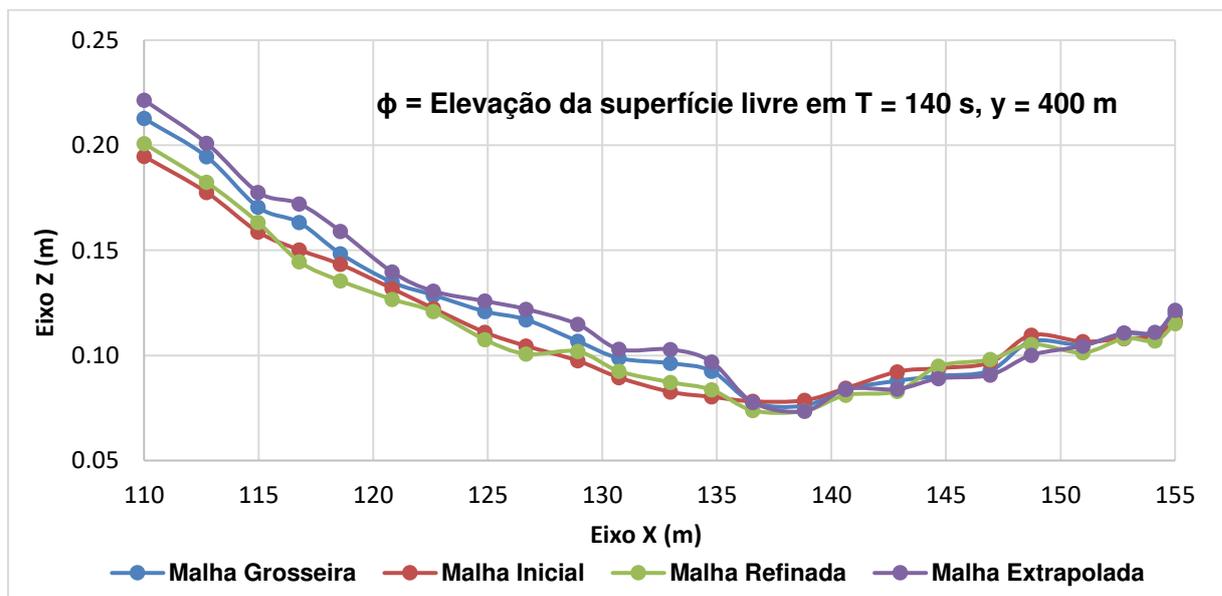


Figura 49: Teste de refinamento da malha (Baixa-mar).
Fonte: elaborado pelo autor.

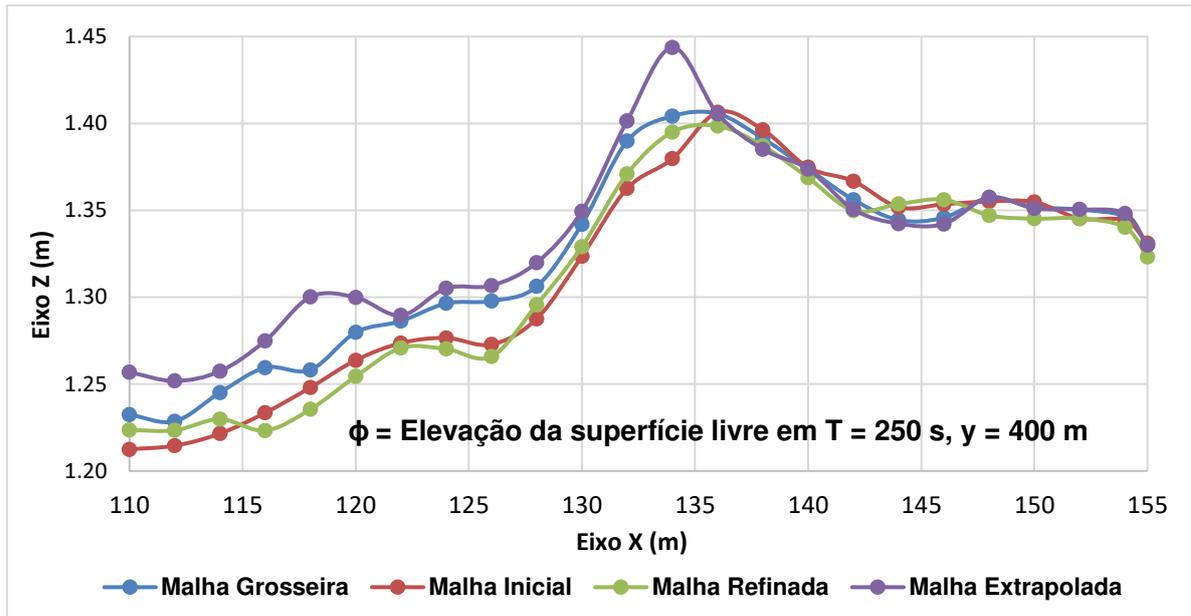


Figura 50: Teste de refinamento da malha (Preia-mar).
Fonte: elaborado pelo autor.

Na baixa-mar, o máximo valor encontrado por meio do índice de convergência da malha foi de 9,42 %, enquanto para preia-mar, foi de 4,17%, além disto, em números absolutos a incerteza numérica não excede 0,03 metros. Tais resultados pautam a utilização do refinamento inicial, pois indicam uma excelente relação entre a incerteza numérica encontrada e o gasto computacional demandado. Sendo assim, as faixas de incerteza encontradas para cada ponto amostral, obtidas pela multiplicação entre $\phi_{21_{ext}}$ e $GCI_{fino.}^{21}$, são apresentadas por meio de barras nas Figuras 51 e 52.

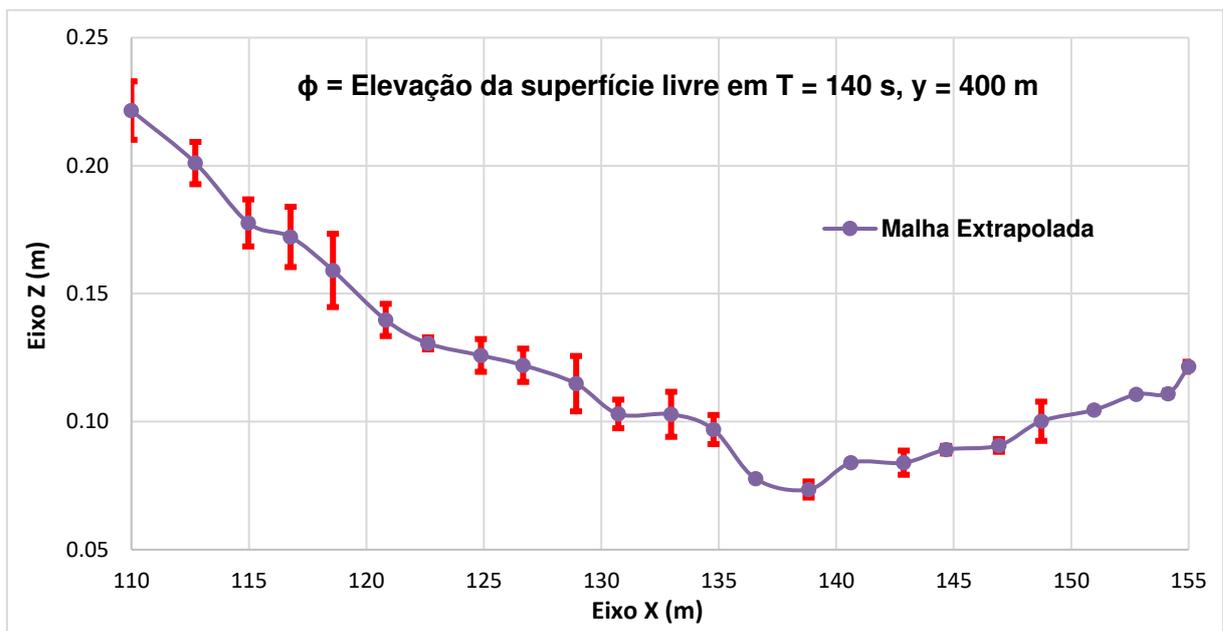


Figura 51: Barras de incerteza numérica (Baixa-mar).
Fonte: elaborado pelo autor.

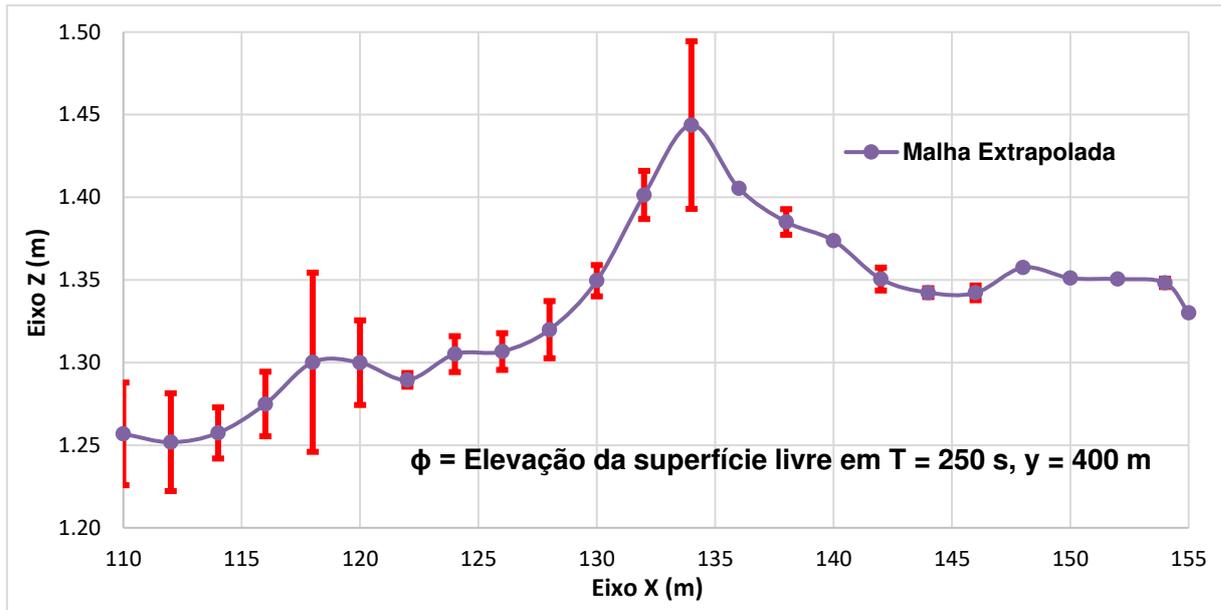


Figura 52: Barras de incerteza numérica (Preia-mar).

Fonte: elaborado pelo autor.

6.2. PROCESSAMENTO E CONTROLE DO SOLUCIONADOR

É de suma importância definir o tempo de simulação adequado ao objeto de estudo, pois isto influencia diretamente na estabilidade da solução numérica, qualidade dos dados de saída e gasto computacional. Deste modo, em virtude da capacidade de armazenamento do hardware, descrito no item 5.2, o tempo de simulação adotado foi de 540 segundos. Este valor garante a propagação de um número significativo de ondas ao longo de todo domínio computacional e provém estabilidade numérica a solução. Informações referentes ao tempo de processamento e tamanho do arquivo de saída são indicadas na Tabela 14.

Tabela 14: Tempos de simulação.

Cenário	Tempo de processamento (HH:MM:SS)	Tamanho do arquivo de saída (Gb)
01 - Baixa-mar	11:22:29	109
02 - Preia-mar	08:47:11	109
03 - Baixa-mar sem a estrutura	08:31:56	109
04 - Preia-mar sem a estrutura	08:08:42	109

Fonte: elaborado pelo autor.

Na análise CFD, além do tamanho dos elementos da malha, o intervalo de tempo (Δt) influencia na convergência da solução. O fluido não pode se mover mais que uma célula num determinado intervalo de tempo, devido a estrutura de cálculo

que leva em conta as células adjacentes. Por padrão, o FLOW-3D® ajusta automaticamente o tamanho do intervalo de tempo para que seja o maior possível, sem exceder nenhum dos limites de estabilidade, como por exemplo o Número de Courant, ou aumentar desnecessariamente o esforço necessário para impor a condição de continuidade. Além disso, a incorreta seleção de modelos de discretização, solucionadores e variáveis de controle também pode afetar a convergência e a solução final do problema.

Recomenda-se fortemente a utilização da configuração padrão, visto que, o ajuste incorreto destas opções numéricas pode ter consequências negativas na precisão da simulação e no tempo de execução. Adotou-se como critério de convergência o valor da máxima pressão residual, que deve ser inferior a 10^{-3} , conforme exposto nas Figuras 53 e 54.

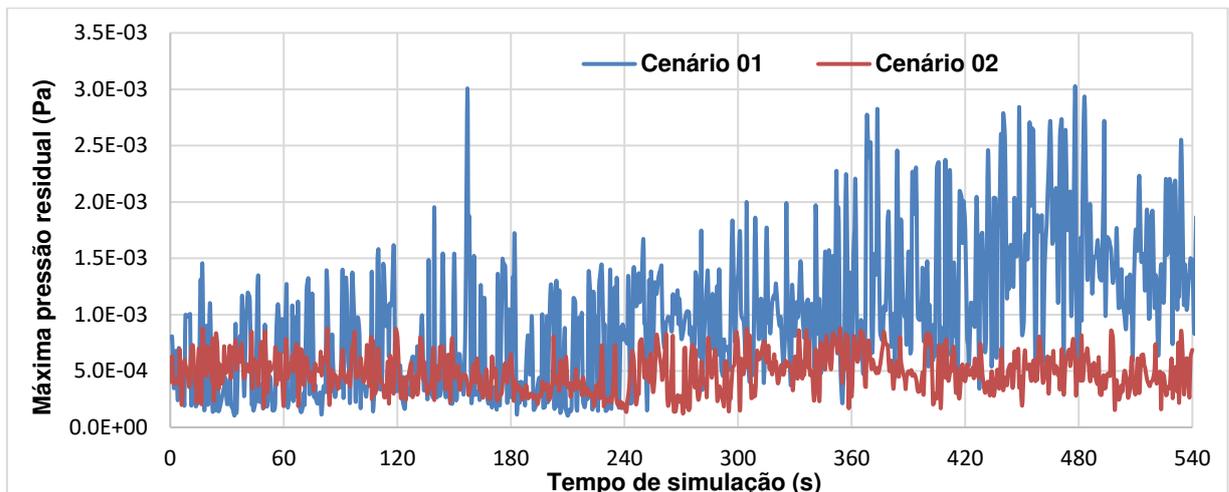


Figura 53: Máxima pressão residual - Cenários 01 e 02.

Fonte: elaborado pelo autor.

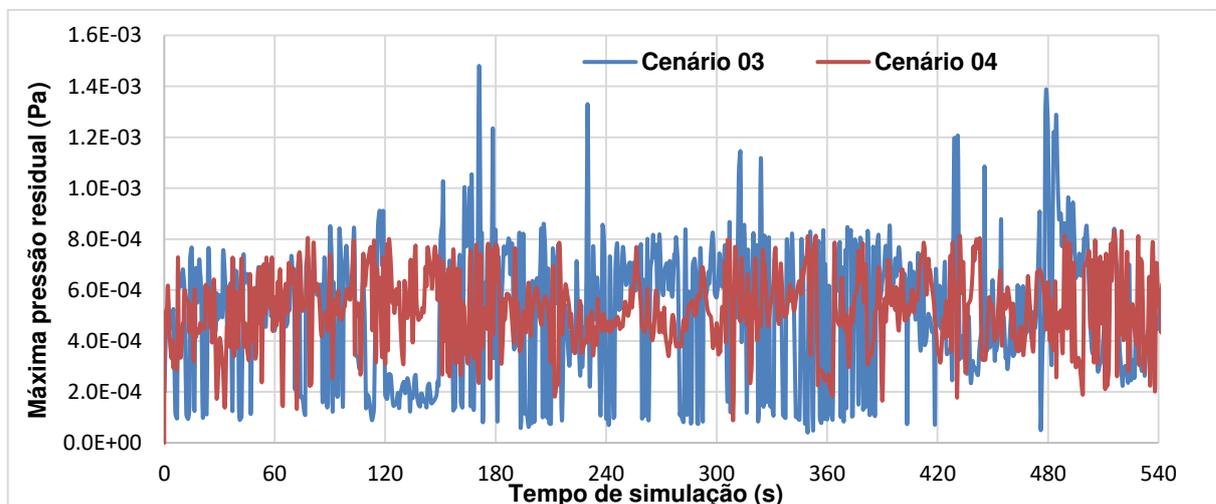


Figura 54: Máxima pressão residual - Cenários 03 e 04.

Fonte: elaborado pelo autor.

Por meio das simulações acima elencadas, observou-se que a perturbação provocada pelo quebra-mar submerso, ou mesmo pela superfície praial, influencia diretamente na convergência da solução e consequentemente, no tamanho do intervalo de tempo, vide Figuras 55 a 56.

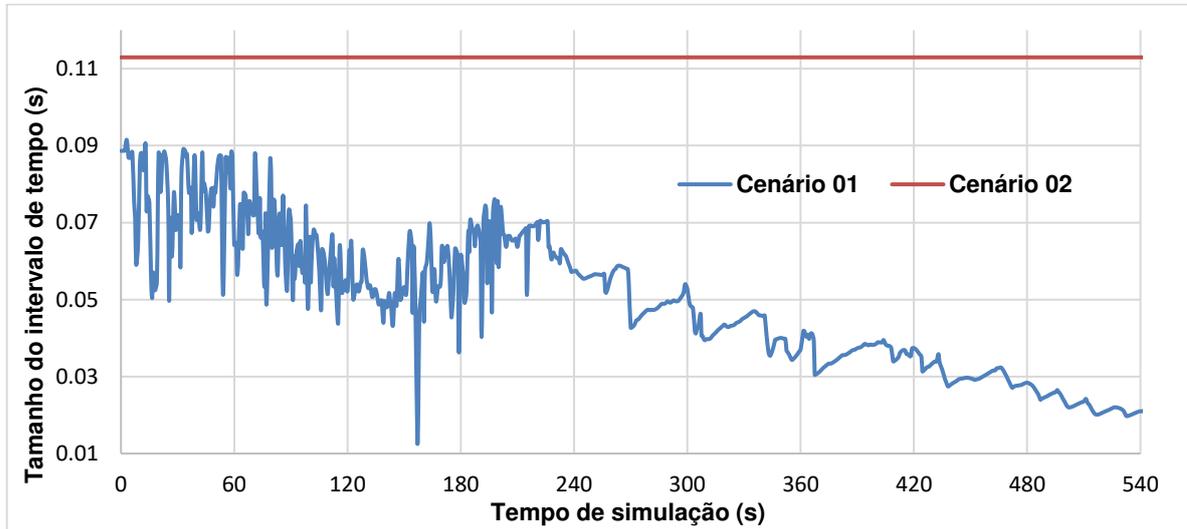


Figura 55: Tamanho do intervalo de tempo - Cenários 01 e 02.
Fonte: elaborado pelo autor.

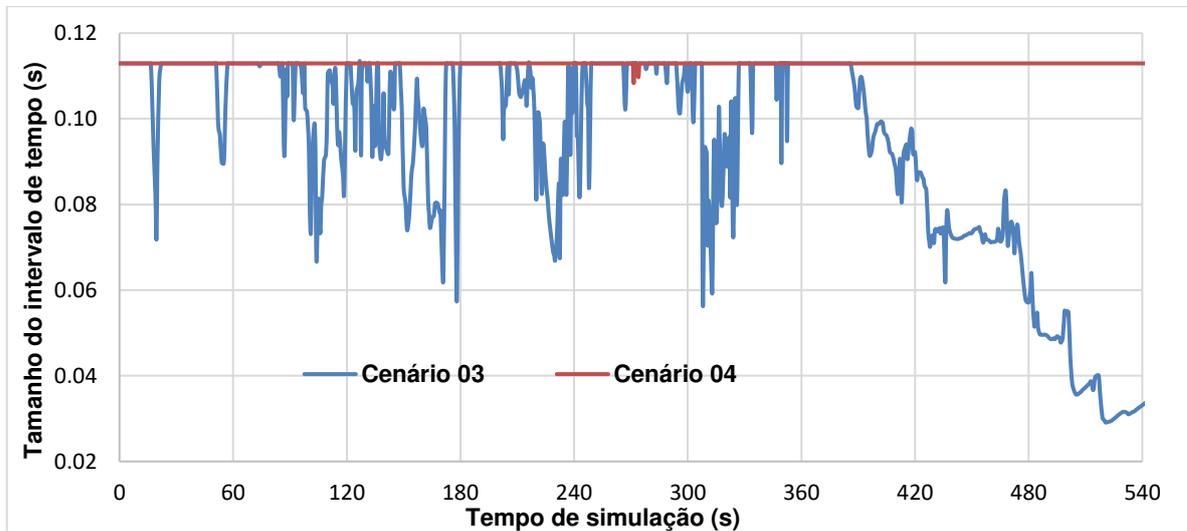


Figura 56: Tamanho do intervalo de tempo - Cenários 01 e 02.
Fonte: elaborado pelo autor.

Devido a isto, o Cenário 01 apresentou o maior tempo de processamento, pois parte das ondas incidentes são obstruídas pela estrutura e, durante alguns instantes da simulação ocorre o galgamento da estrutura, conforme posteriormente descrito no item 6.4.3. Por fim, vale destacar que o FLOW-3D® conta com um recurso de diagnóstico durante a execução, denominado MENTOR™, que monitora o progresso da solução e apresenta aos usuários maneiras de aprimorar a eficiência da solução.

6.3. GERAÇÃO DE ONDAS NO MODELO COMPUTACIONAL

O primeiro teste visou avaliar a capacidade do software FLOW-3D® em reproduzir a variação da superfície livre mensurada em campo, por meio da inserção de espectros de ondas no modelo numérico. Tal medida é de suma importância, pois valida um importante aspecto do método proposto e, provém estatísticas de ondas que posteriormente serão utilizadas na investigação da dissipação de energia provocada pelo quebra-mar submerso. Deste modo, realizou-se a comparação entre os dados de campo (baixa-mar e preia-mar) e os dados extraídos na borda de entrada do modelo (Xmín), conforme elucidado nas Figuras 57 e 58.

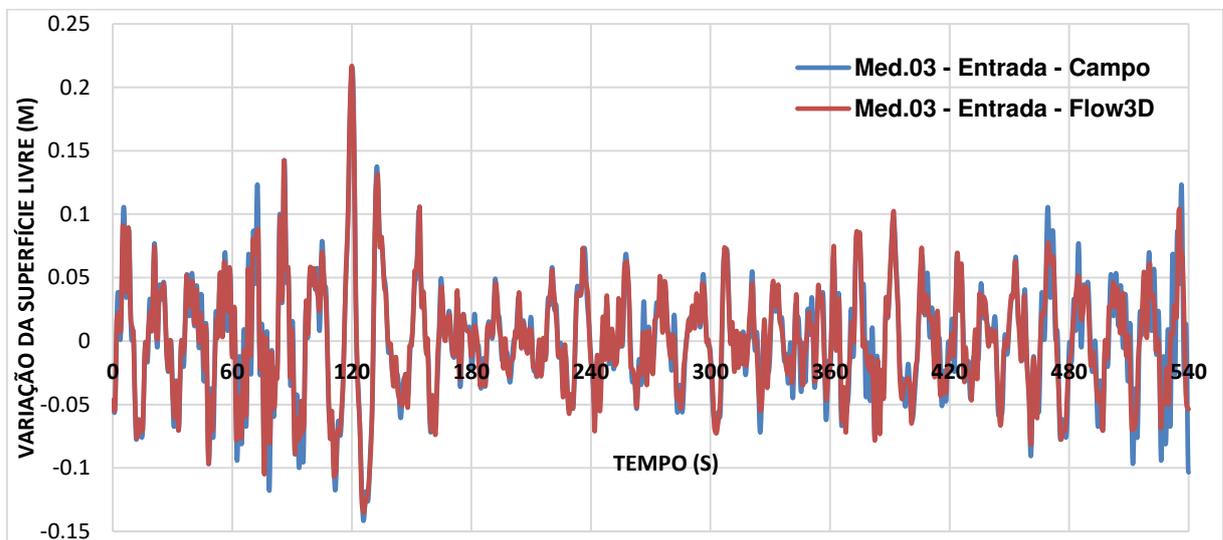


Figura 57: Geração de ondas no modelo (Baixa-mar) - Campo x Flow3D.
Fonte: elaborado pelo autor.

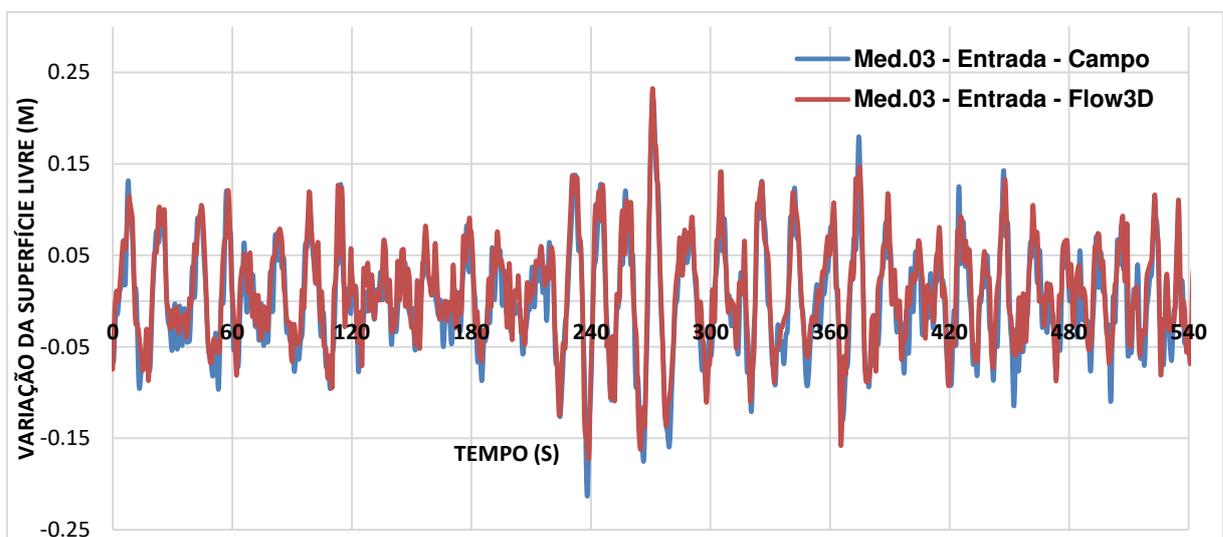


Figura 58: Geração de ondas na entrada do modelo (Preia-mar) - Campo x Flow3D.
Fonte: elaborado pelo autor.

E possível visualizar a forte aderência entre as series de dados apenas com o recurso visual. Contudo, para prover maior solidez aos resultados, foi empregada novamente a medida de erro denominada Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), comumente utilizada para aferir a qualidade de modelos numéricos. O valor máximo de RMSE encontrado no eixo y foi de 0,011 metros para baixa-mar e 0,010 metros para preia-mar. Ademais, também foram extraídas e comparadas estatísticas de ondas, vide Tabela 15.

Tabela 15: Estatística de ondas – Borda de entrada do modelo.

Med.03 - Entrada do Modelo				
Baixa-mar	H_s (m)	H_{médio} (m)	T_s (s)	T_{médio} (s)
Campo	0,147746	0,090468	12,4462	6,9896
FLOW-3D®	0,136763	0,078245	14,2462	8,1432
Diferença Abs.	0,010983	0,012223	-1,800000	-1,153600
Diferença (%)	7,43%	13,51%	-14,46%	-16,50%
Preia-mar	H_s (m)	H_{médio} (m)	T_s (s)	T_{médio} (s)
Campo	0,220026	0,122333	14,3281	8,3139
FLOW-3D®	0,208125	0,118598	19,0921	10,6132
Diferença Abs.	0,011901	0,003735	-4,7640	-2,2993
Diferença (%)	5,41%	3,05%	-33,25%	-27,66%

Fonte: elaborado pelo autor.

O baixo valor de RMSE encontrado em ambas condições, além da pequena diferença em números absolutos encontrada na estatística de ondas, atestam a qualidade da simulação no que diz respeito a geração de ondas de superfície irregulares. Vale ainda ressaltar que o modelo numérico foi capaz de reproduzir não somente a variação da superfície livre provocada pelo *swell*, mas também as vagas geradas pelo vento durante o período do levantamento.

A diferença encontrada pode ser ocasionada pelo refinamento da malha adotado, descrito no item 6.1, que influencia diretamente no resultado da solução numérica, ou ainda pela profundidade média adotada no momento da inserção do espectro no modelo, que está sujeita aos erros de medição descritos no item 5.1.2.

6.4. REPRODUÇÃO DOS EFEITOS DE ÁGUAS RASAS

A capacidade do modelo em reproduzir os efeitos de águas rasas após a interação com o quebra-mar submerso, foi investigada de modo qualitativo por meio das representações gráficas extraídas da solução numérica. Logo, buscou-se

averiguar se os resultados das simulações eram equivalentes a hidrodinâmica observada em campo. Para tal, foram criadas zonas de análise dentro da área modelada, uma vez que este recurso, permite a investigação, discussão e apresentação dos supracitados efeitos de maneira mais elucidativa.

Este procedimento foi aplicado em todo período de simulação dos Cenários 01 e 02. Os resultados exibidos na sequência, representam apenas instantes onde os efeitos são facilmente caracterizados. Sendo assim, a Figura 59 apresenta a divisão por zonas adotada. De início, por meio da análise da variação da superfície livre, observou-se a correta representação do cavado de onda (Zona 02 e 04) que em regiões de águas rasas possui comprimento maior do que a crista.

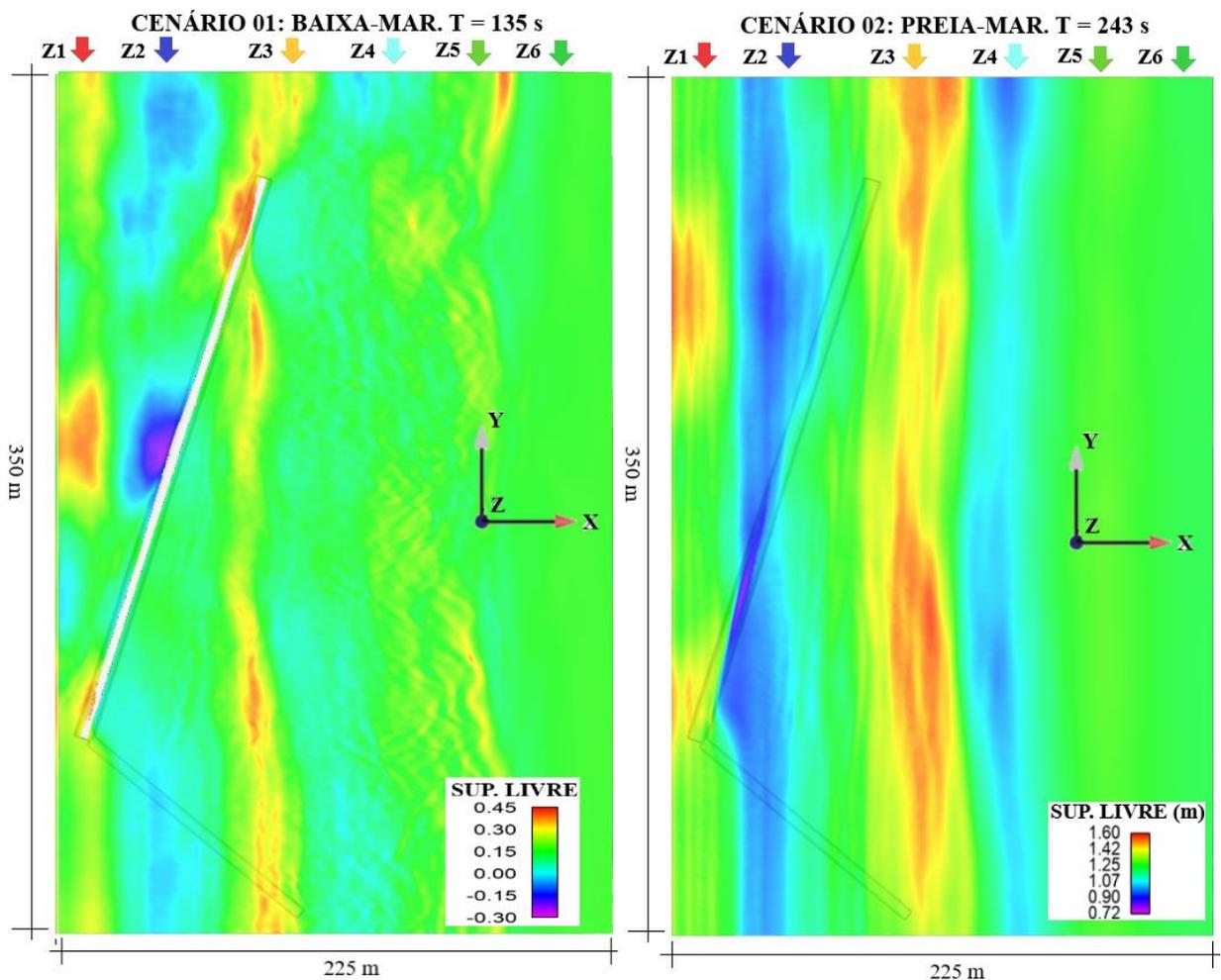


Figura 59: Zonas de análise - Cenário 01 (Baixa-mar) e Cenário 02 (Preia-mar) .

Fonte: elaborado pelo autor.

É importante frisar que não foi investigado o fenômeno da difração, que ocorre quando a frente de ondas desvia sua trajetória após passar pela aresta de um obstáculo, pois trata-se de uma estrutura que na maior parte do tempo fica submersa.

6.4.1 Empolamento e Refração

O empolamento puro consiste na alteração da altura de onda decorrente somente da redução de profundidade. Tal efeito não pode ser visualizado nos Cenários de simulação 01 e 02, pois os efeitos de refração e reflexão ocasionados pelo quebra-mar submerso, que serão abordados na sequência, já deformam a frente de ondas na Zona 01. Logo, a correta reprodução do referido efeito somente pode ser verificada através da análise dos hipotéticos Cenários de simulação 03 e 04, desenvolvidos especificamente para evidenciar e separar os efeitos causados exclusivamente pela interação da frente de ondas com a estrutura submersa.

Basicamente, a redução de profundidade ocasiona a diminuição do comprimento de onda, o que conseqüentemente reduz a velocidade de propagação da forma de onda (celeridade). Para manter o balanço energético a altura de crista é elevada. As Figuras 60 e 61 elucidam este processo acompanhando a variação da superfície livre causada pela interação da frente de ondas com regiões mais rasas.

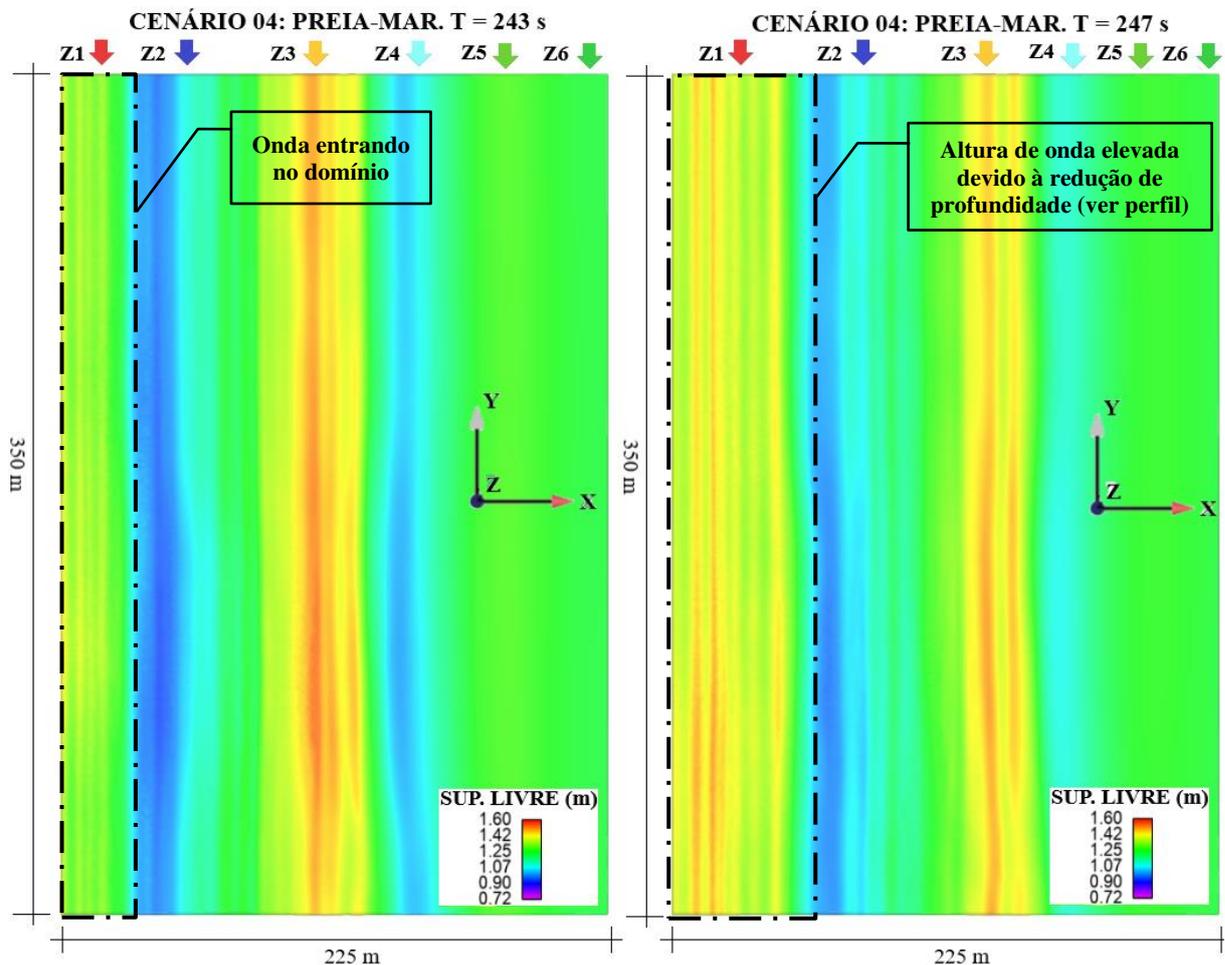


Figura 60: Empolamento puro observado no Cenário 04 (Preia-mar).
Fonte: elaborado pelo autor.

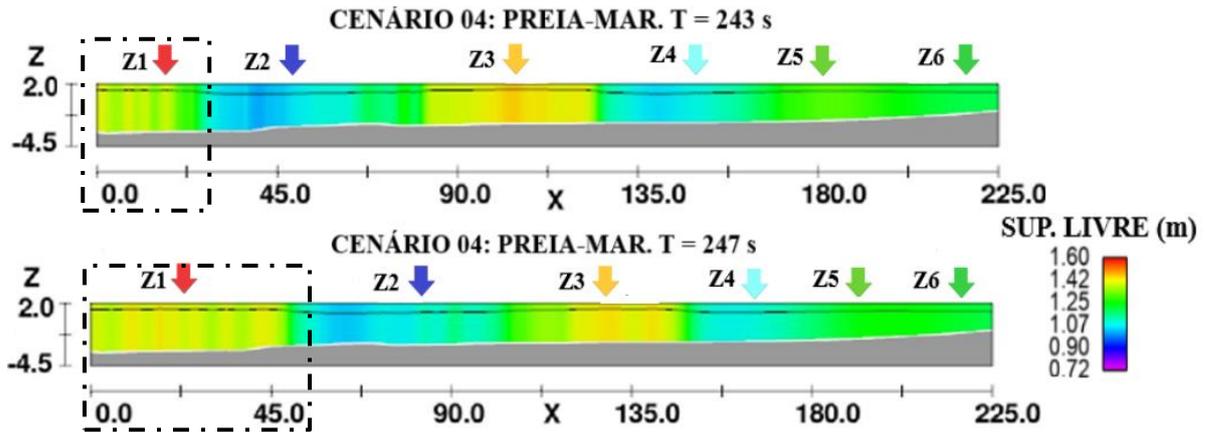


Figura 61: Perfis XZ - Variação da superfície livre. Cenário 04 (Preia-mar).
 Fonte: elaborado pelo autor.

A refração causada pela variação de profundidade imposta pela estrutura submersa faz com que diferentes pontos da mesma frente tenham celeridades distintas. Tal condição gera o encurvamento da frente de ondas, que tende a atingir a praia paralelamente as curvas batimétricas. Foi possível caracterizar este efeito comparando o mesmo intervalo de tempo dos Cenários 01 e 03, vide Figura 62.

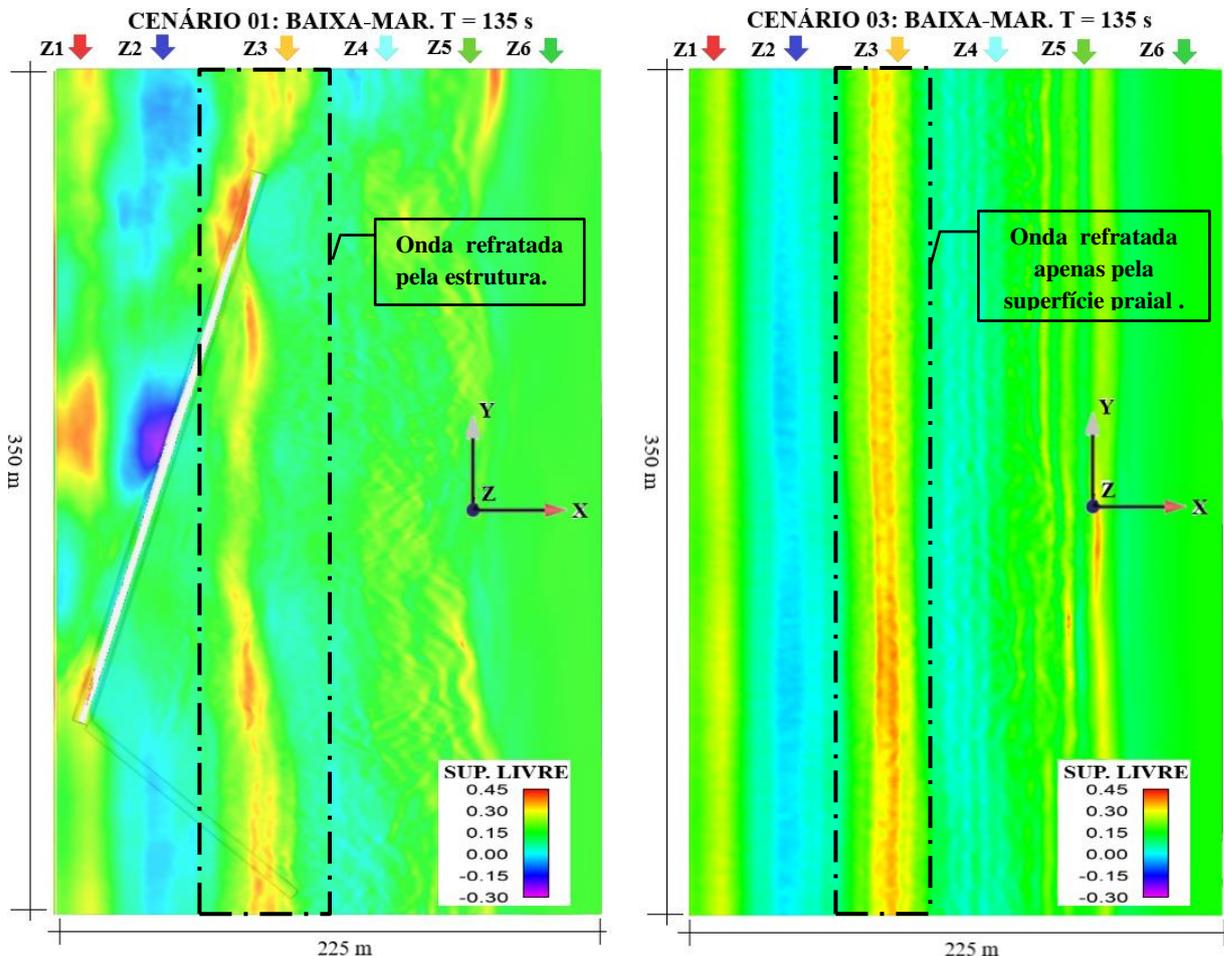


Figura 62: Refração causada pela estrutura: Cenário 01 x Cenário 03 (Baixa-mar).
 Fonte: elaborado pelo autor.

Na Zona 03 do Cenário 01 (Figura 62) constatou-se que a refração provocada pelo trecho do quebra-mar submerso transversal à praia é inferior a ocasionada pelo trecho longitudinal, pois em sua região de influência, a frente de ondas está tão avançada quanto na região que não possui contato com a estrutura. Este resultado está dentro do esperado, visto que, o projeto apresentado por Garcia e Gireli (2019) indica que este trecho não tem como objetivo provocar uma redução de profundidade tão significativa quanto o trecho longitudinal.

O efeito de empolamento devido a refração é caracterizado pelo aumento ou diminuição da altura de onda em função da aproximação ou distanciamento das cristas refratadas. Por meio da Figura 63 é possível verificar a existência desta condição na Zona 03 do Cenário 02, visto que, é possível observar diversos pontos da mesma frente de ondas com amplitudes amplificadas. Em contrapartida, no Cenário 04 tal efeito não é reproduzido, pois a refração provocada somente pela superfície praial não é o bastante para ocasionar esta condição.

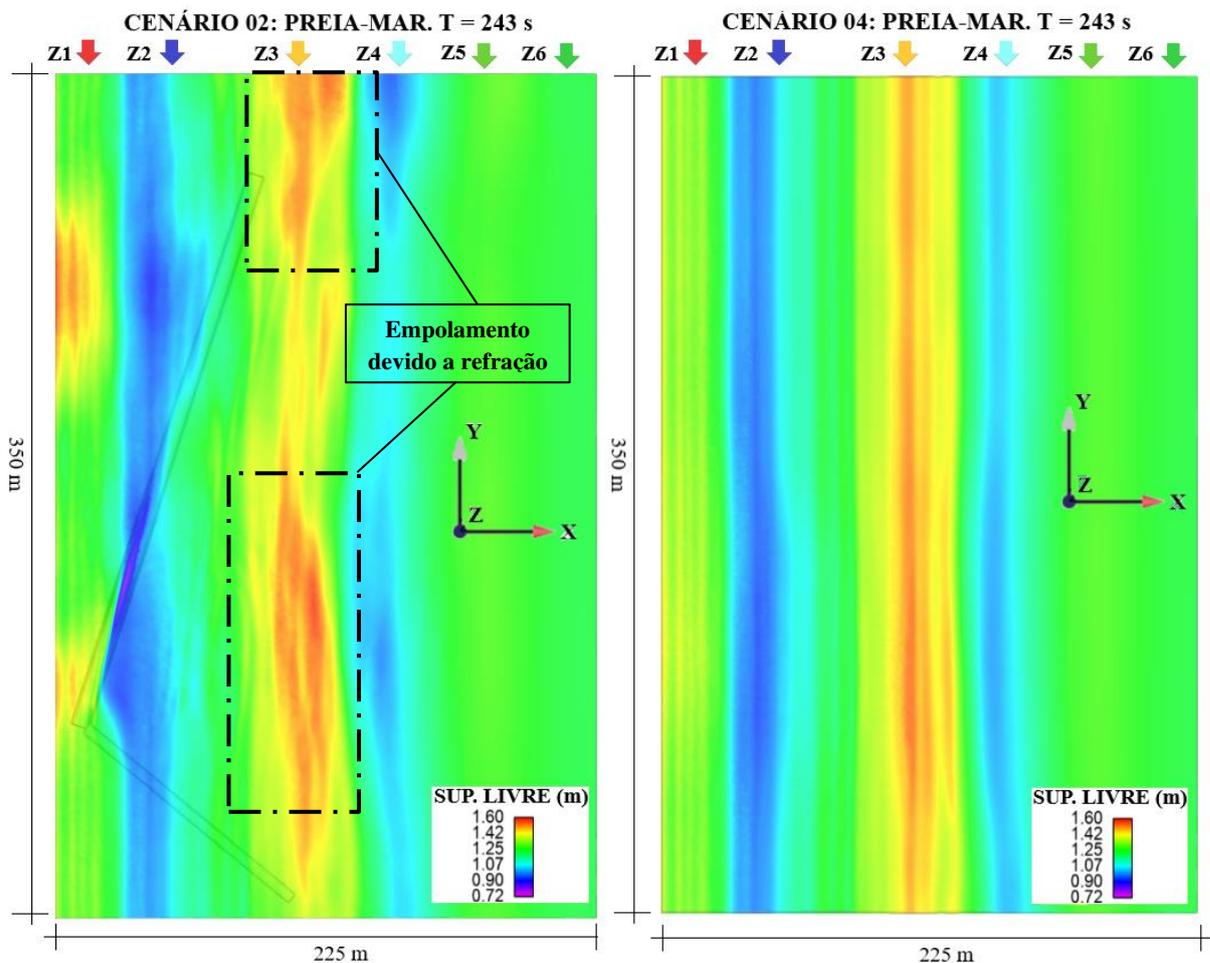


Figura 63: Empolamento devido à refração: Cenário 02 x Cenário 04 (Preia-mar).
Fonte: elaborado pelo autor.

6.4.2 Reflexão

Quando onda incidente e refletida se justapõem e, estão na mesma fase, o resultado é uma onda maior do que as que lhe deram origem. Este tipo de combinação é conhecido como interferência construtiva. Por outro lado, quando as ondas estão em fases distintas, a interferência é denominada destrutiva, pois o resultado é uma onda de menor intensidade ou inexistente.

A reflexão de ondas gerada pela estrutura foi verificada no modelo proposto, pois uma parcela das orbitas são obstruídas pelo quebra-mar submerso e retornam no sentido inverso de propagação. Vale ressaltar que não foi possível visualizar a onda refletida em si, apenas os efeitos gerados por ela, como a construção e destruição em alguns pontos da frente de ondas, conforme pode ser observado nas Zonas de análise 01 e 02 dos Cenários de simulação 01 e 02. A ausência deste efeito nos Cenários 03 e 04 corrobora a hipótese de que a estrutura provoca a reflexão.

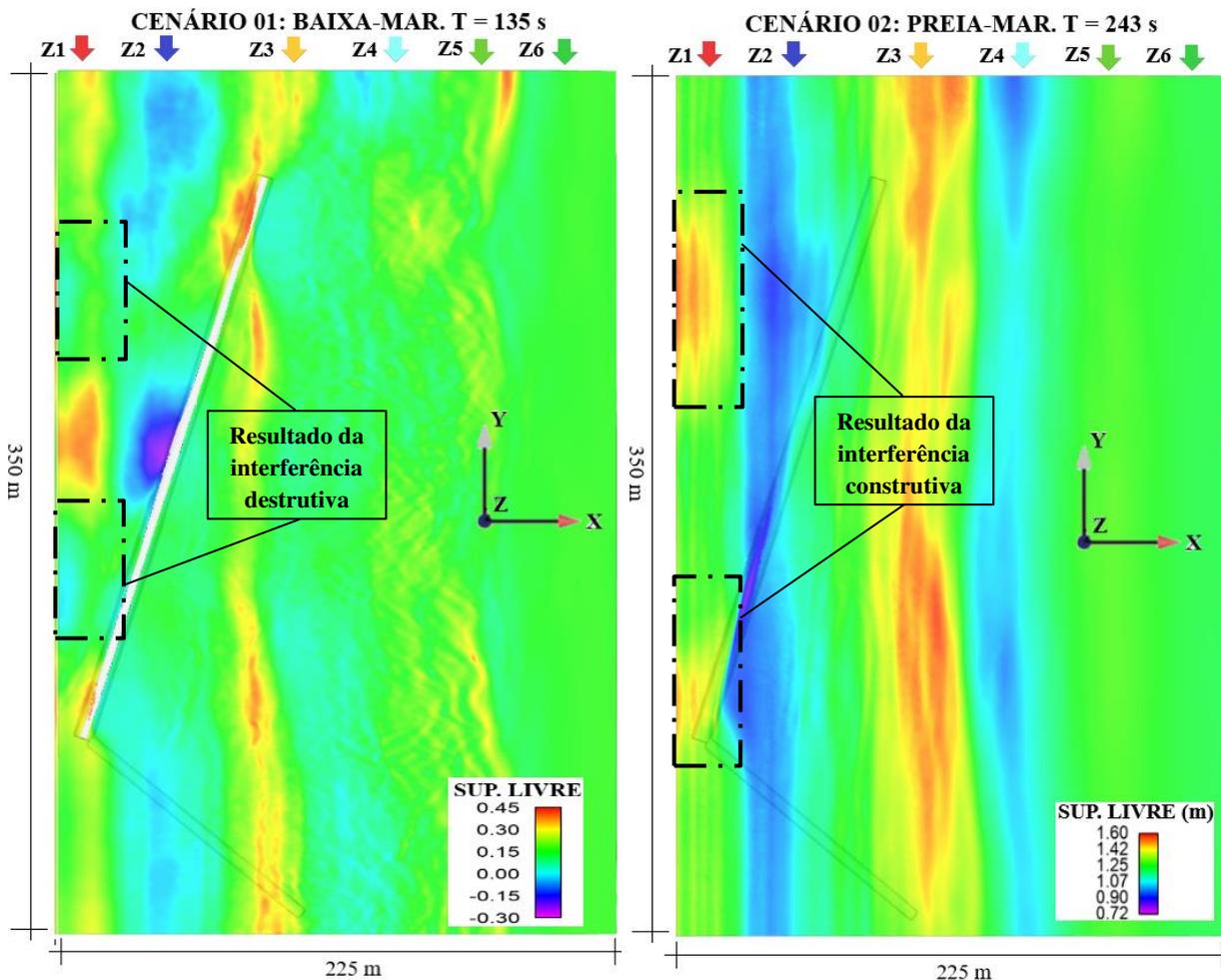


Figura 64: Efeitos da reflexão de ondas observados nos Cenários 01 (Baixa-mar) e 02 (Preia-mar).
 Fonte: elaborado pelo autor.

6.4.3 Galgamento e Arrebentação

A capacidade de reprodução do galgamento de estruturas foi verificada por meio do Cenário 01, onde em apenas poucos instantes tal efeito pode ser observado. A Figura 65 representa o intervalo de tempo onde ocorre o galgamento da frente de ondas sobre o trecho longitudinal do quebra-mar submerso.

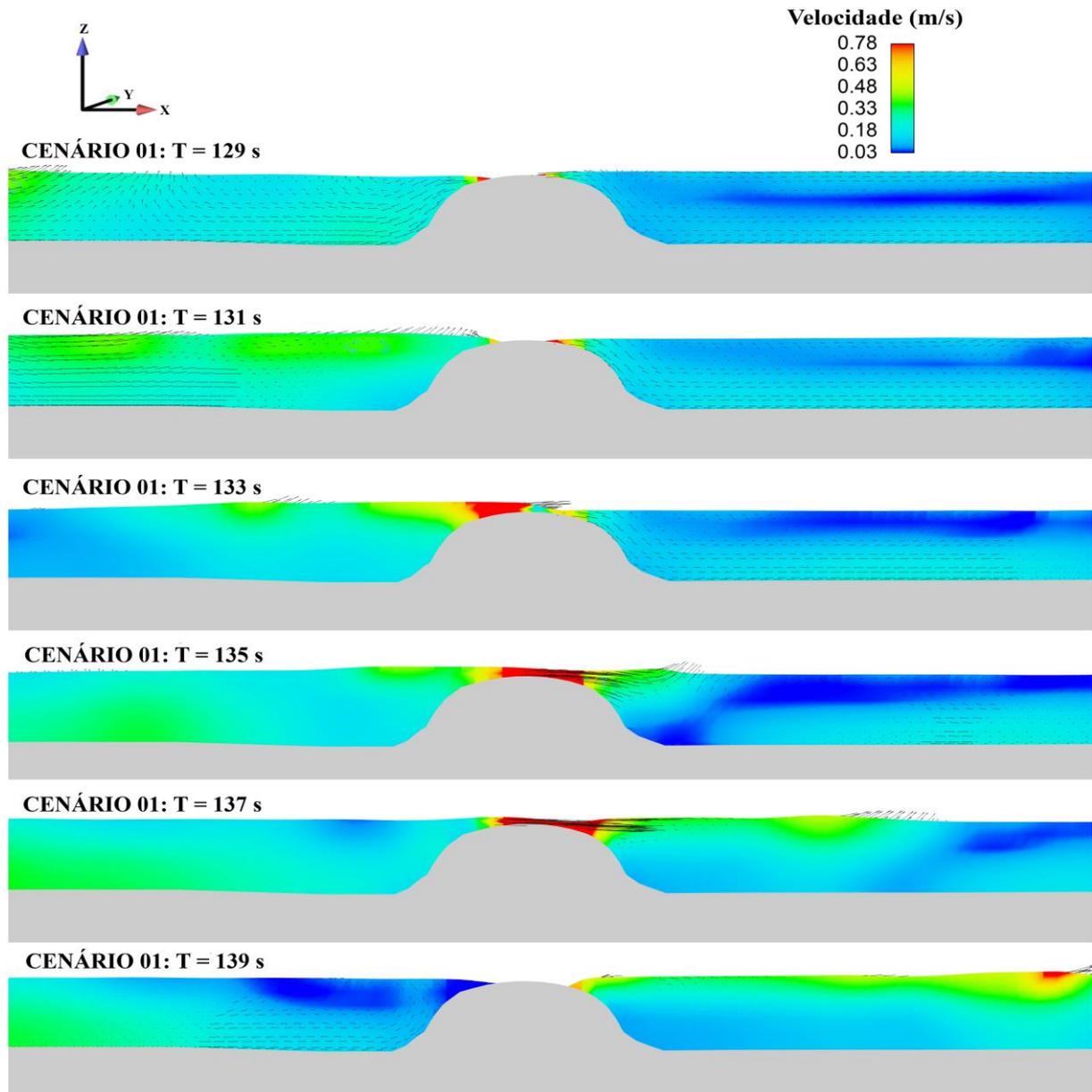


Figura 65: Galgamento da estrutura - Cenário 01 (Baixa-mar).
Fonte: elaborado pelo autor.

Em profundidades rasas, a celeridade de onda diminui ao mesmo tempo em que a altura aumenta, como consequência, a onda torna-se cada vez mais esbelta, de modo que a crista avança sobre a região do cavado onde não existe sustentação e acaba arrebentando. A região de abrangência do modelo não chega a profundidades

tão baixas a ponto de provocar a arrebentação das ondas. Contudo, a camada absorvedora descrita no item 3.4.1.3, induz uma força de amortecimento artificial popularmente denominada como praia numérica, capaz de reproduzir o supracitado fenômeno na Zona 05 do Cenário 01, conforme também pode ser visto na Figura 64.

Por fim, é possível pressupor que toda a energia restante na frente de ondas após a interação com o quebra-mar submerso é dissipada pela camada absorvedora ainda na Zona 05, visto que na Zona 06, o nível médio do mar permanece imutável ao longo de todo o período de simulação, em todos os cenários simulados. Este resultado é de suma importância, pois indica que reflexão de ondas provocada pela borda de saída do modelo ($X_{máx}$) foi contornada.

6.5. DISSIPACÃO DA ENERGIA DAS ONDAS

A interferência gerada pelo quebra-mar submerso no fluxo, ocasiona a dissipação de energia das ondas por efeito de atrito e turbulência, vide Figura 66.

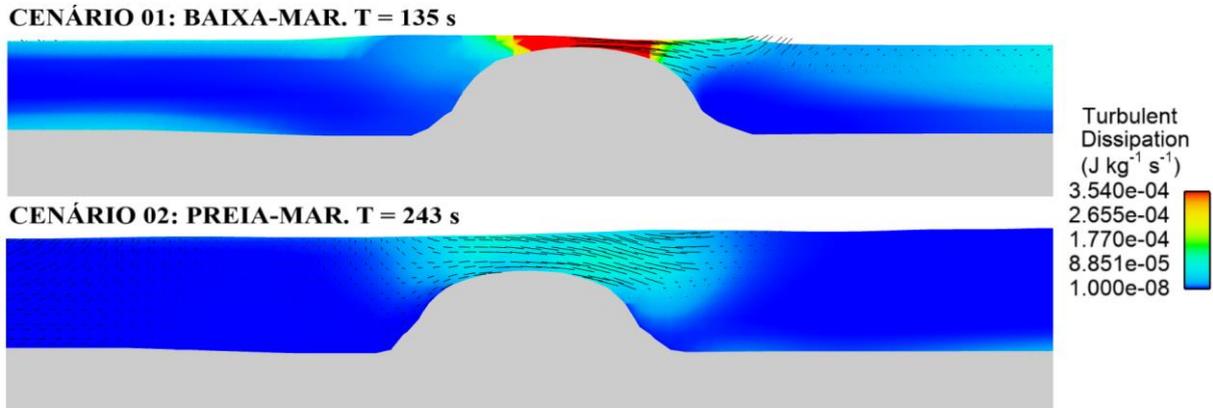


Figura 66: Dissipação de energia turbulenta sobre o quebra-mar.
Fonte: elaborado pelo autor.

Para avaliar esta dissipação, comumente é utilizado o coeficiente de transmissão de altura de onda, que pode ser definido como:

$$K_T = \frac{H_{TRANSMITIDA}}{H_{INCIDENTE}} \quad (31)$$

Sendo que, quanto menor o valor do coeficiente, maior a eficiência. De início, foi verificada a dissipação de energia por meio dos dados de campo, em ambas condições de maré. Deste modo, as Figuras 67 e 68 descrevem a variação da superfície livre mensurada antes e após a estrutura submersa.

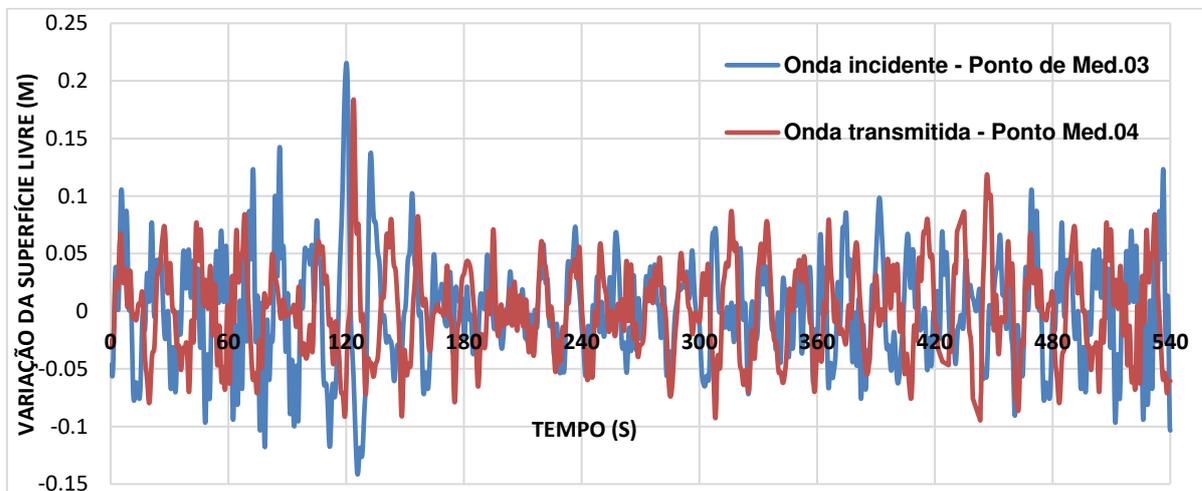


Figura 67: Onda incidente x Onda transmitida - Campo (Baixa-mar).
Fonte: elaborado pelo autor.

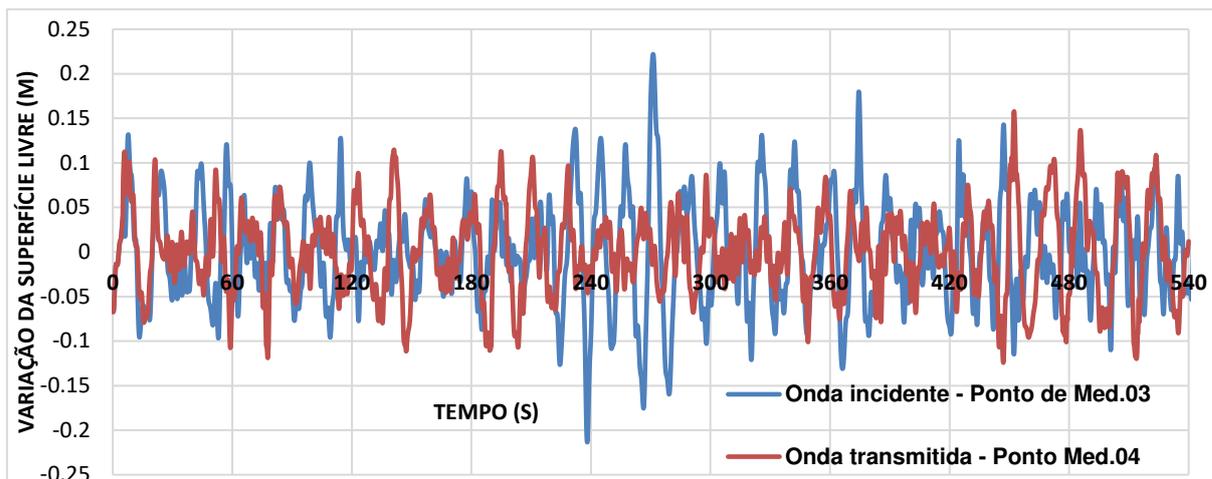


Figura 68: Onda incidente x Onda transmitida – Campo (Preia-mar).
Fonte: elaborado pelo autor.

Além da redução de altura de ondas verificada, também se constatou o deslocamento de fase provocado pela interação com o quebra-mar submerso, sendo que este último efeito é mais intensificado na condição de baixa-mar, evidentemente, pelo maior contato com a estrutura. A Tabela 16 resume os valores estatísticos oriundos dos trens de ondas acima expostos. Tais valores são de suma importância, pois serviram como base de comparação para a validação dos resultados obtidos via modelo numérico.

Tabela 16: Estatística de ondas – Dados de campo.

Baixa-mar	H_s (m)	H_{médio} (m)	T_s (s)	T_{médio} (s)
Onda Incidente	0,148746	0,090468	12,4462	6,9896
Onda Transmitida	0,130541	0,079472	13,8455	7,8627
Diferença Abs.	0,018205	0,010996	-1,3993	-0,8731
Coef. Transmissão (K _t)	0,8776	0,8785	-	-
Preia-mar	H_s (m)	H_{médio} (m)	T_s (s)	T_{médio} (s)
Onda Incidente	0,220026	0,122333	14,3281	8,3139
Onda Transmitida	0,179815	0,102474	13,1128	7,1924
Diferença Abs.	0,040211	0,019859	1,2153	1,1215
Coef. Transmissão (K _t)	0,8172	0,8377	-	-

Fonte: elaborado pelo autor.

Atestou-se que a estrutura é capaz de provocar a dissipação de energia, mesmo em eventos com pequenas ondas. A variação da superfície livre extraída via modelo numérico é apresentada de modo semelhante aos dados de campo. Deste modo, as Figuras 69 e 70 retratam a variação da superfície livre, enquanto a Tabela 17 exhibe a estatística de ondas obtida.

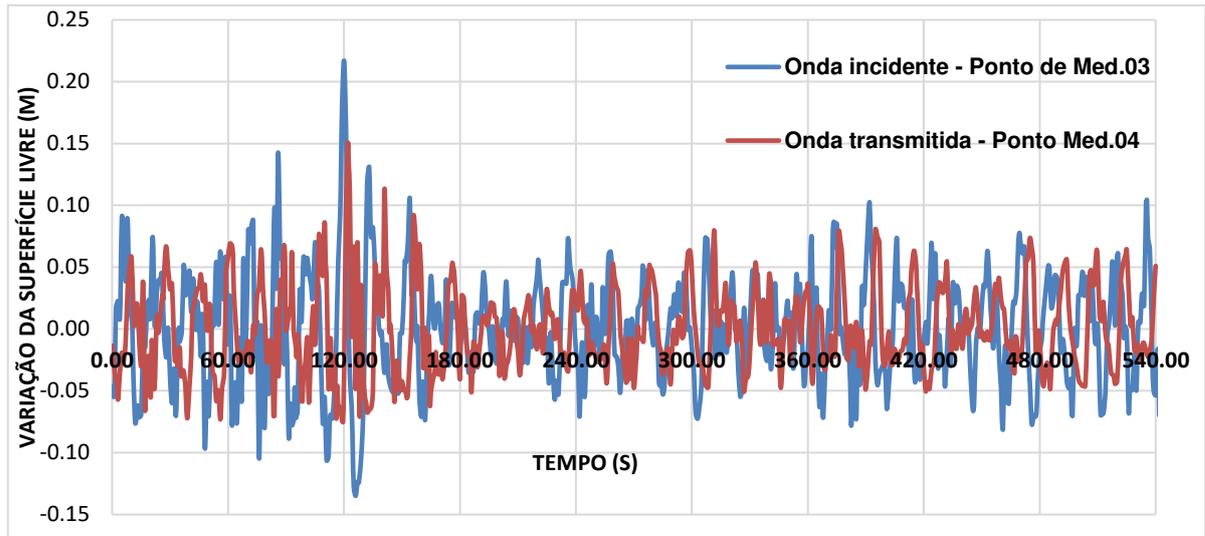


Figura 69: Onda incidente x Onda transmitida – Flow3D® (Cenário 01).
Fonte: elaborado pelo autor.

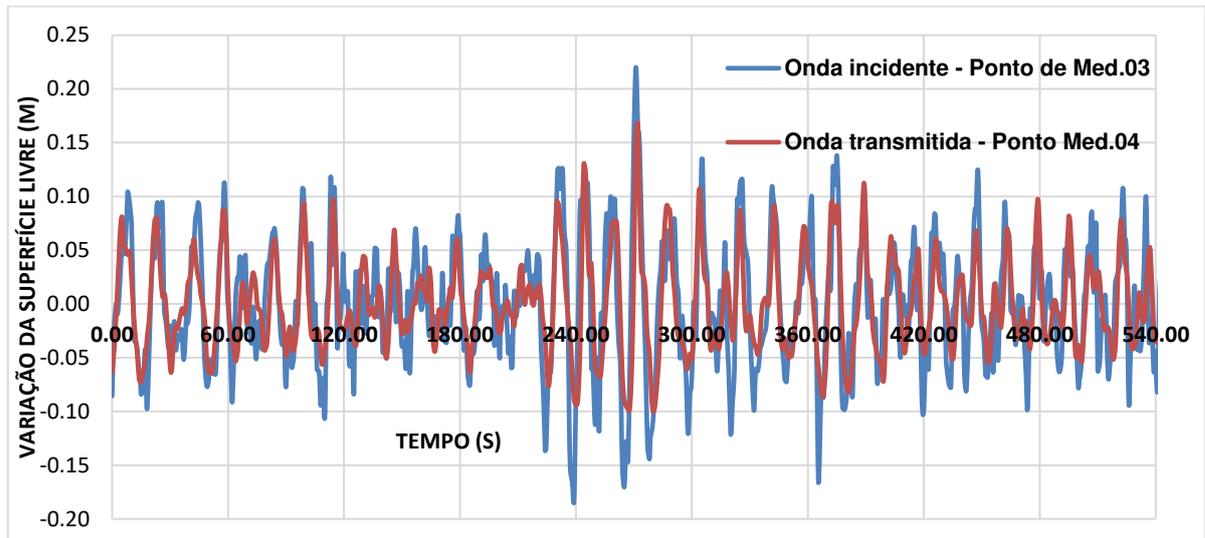


Figura 70: Onda incidente x Onda transmitida – Flow3D® (Cenário 02).
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 17: Estatística de ondas – Simulações Flow3D® (Parte 01).

Cenário 01 - Baixa-mar	H_s (m)	H_{méd} (m)	T_s (s)	T_{méd} (s)
Onda Incidente	0,132763	0,077245	14,2462	8,1432
Onda Transmitida	0,118289	0,069711	20,1086	11,7958
Diferença Abs.	0,014476	0,007534	-5,8624	-3,6526
Coef. Transmissão (K _t)	0,8910	0,9025	-	-
Cenário 02 - Preia-mar	H_s (m)	H_{méd} (m)	T_s (s)	T_{méd} (s)
Onda Incidente	0,208125	0,118598	19,0921	10,6132
Onda Transmitida	0,168069	0,102110	12,1220	8,7527
Diferença Abs.	0,040056	0,016488	6,9701	1,8605
Coef. Transmissão (K _t)	0,8075	0,8610	-	-

Fonte: elaborado pelo autor.

Atestou-se que menores alturas de onda resultam em maiores coeficientes de transmissão. Em contrapartida, alturas de onda mais elevadas obtêm menores coeficientes de transmissão ou, em outras palavras, maior efetividade. Obviamente, a dissipação é maior quando o valor de H_s é utilizado como parâmetro de análise. Tal resultado corrobora a efetividade da estrutura em eventos de maior intensidade energética, condição para qual foi projetada.

Os coeficientes de transmissão alcançados via dados de campo e modelo numérico foram plotados junto à curva de eficiência de quebra-mares submersos construídos com tubos de geotêxtil apresentada por LEIJA et al. (2014), vide Figura 71. No referido trabalho foram realizados diversos testes em modelo reduzido utilizando variadas escalas e configurações geométricas de quebra-mar submerso. O estudo visou caracterizar eficácia deste tipo de estrutura através do estudo do coeficiente de transmissão, sendo que para isto, foram reproduzidos diferentes estados do mar (ondas e níveis de maré). Para construir a curva, os autores partiram da hipótese de que a razão entre profundidade de submersão (P_s) e altura de onda incidente (H_i) é o suficiente para definir o nível de eficiência da estrutura.

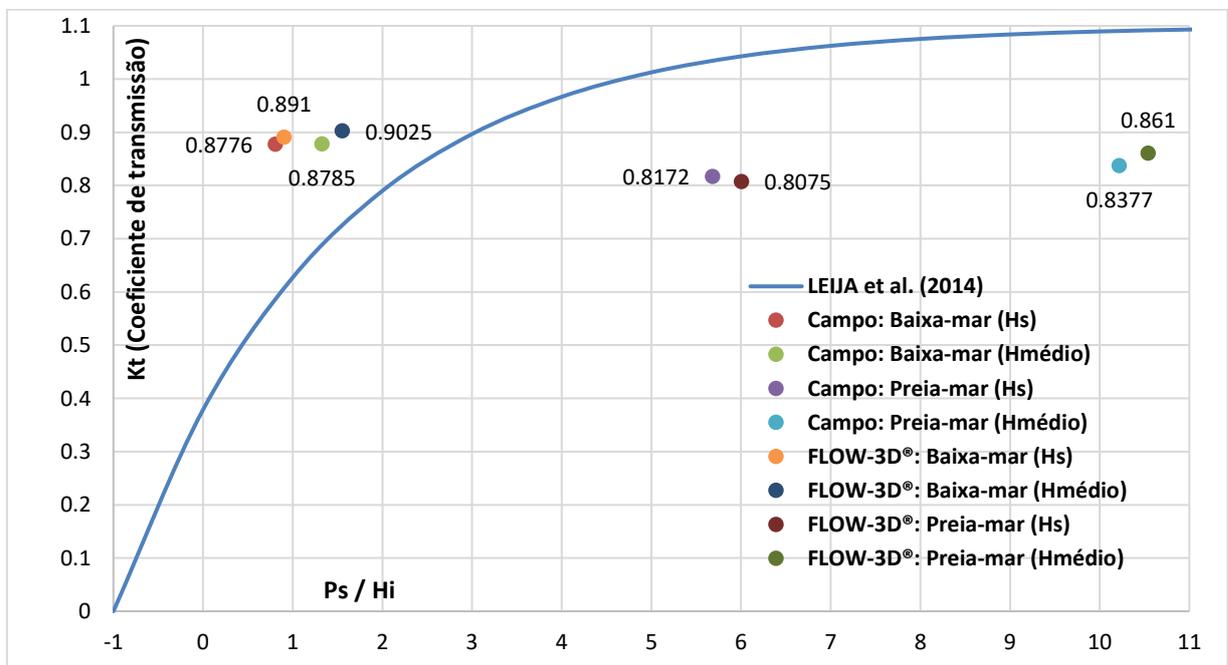


Figura 71: Curva de eficiência de quebra-mares submersos construídos com tubos de geotêxtil (LEIJA et al., 2014) x Dados de campo x Dados modelo numérico.

Fonte: elaborado pelo autor.

Devido a isto, tal ferramenta deve ser utilizada apenas como uma primeira abordagem, uma vez que, os resultados podem ficar fora da realidade devido à

geometria dos tubos, material geossintético utilizado e principalmente da largura do quebra-mar, que é um parâmetro capaz de intensificar o fenômeno dissipativo. Estas considerações explicam a diferença encontrada na Figura 71, onde foi observado que a eficiência da estrutura se mostrou maior do que o previsto na condição de preia-mar e menor na baixa-mar (campo e modelo numérico).

Em relação aos resultados extraídos do modelo numérico, para ambas condições de maré foi verificada uma excelente reprodução do fenômeno de dissipação de energia, sendo que os valores de coeficiente de transmissão, quando comparados com os resultados de campo, divergem minimamente. As diferenças encontradas podem ter sido ocasionadas pela incerteza numérica proveniente do refinamento da malha descrito no item 6.1, ou mesmo pela interpolação de níveis realizada na construção do modelo digital de elevação do terreno.

Tendo em vista a separação entre a dissipação de energia ocasionada pelo quebra-mar submerso da restante gerada pela interação da frente de ondas com a superfície praial, foram avaliados os hipotéticos Cenários 03 e 04, que não possuem a estrutura dentro do domínio. Visualmente é possível constatar por meio das Figuras 72 e 73 que o deslocamento de fase, assim como a atenuação da altura de ondas, é praticamente insignificante em ambos os cenários. Além disto, os resultados apresentados na Tabela 18, extraída dos cenários acima elencados, corroboram esta afirmação.

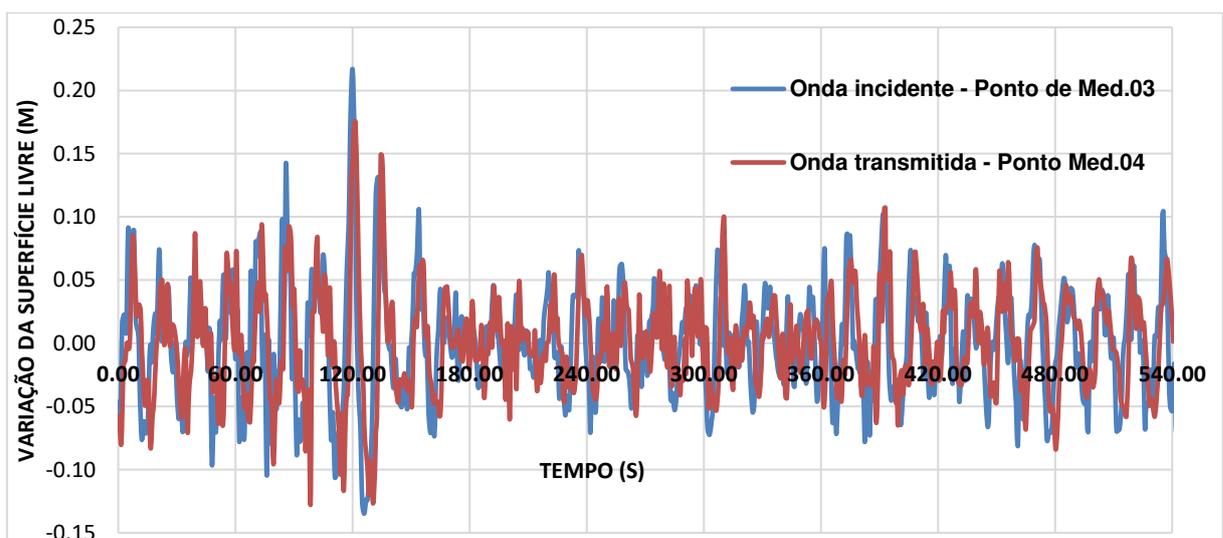


Figura 72: Onda incidente x Onda transmitida – Flow3D® (Cenário 03).
Fonte: elaborado pelo autor.

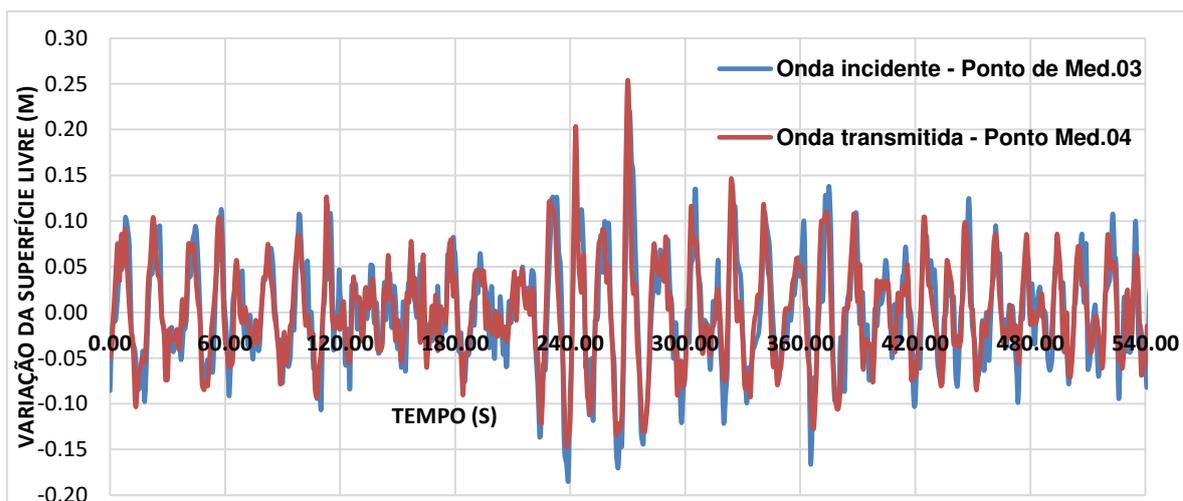


Figura 73: Onda incidente x Onda transmitida – Flow3D® (Cenário 04).
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 18: Estatística de ondas – Simulações Flow3D® (Parte 02).

Cenário 03 - Baixa-mar	H_s (m)	H_{médio} (m)	T_s (s)	T_{médio} (s)
Onda Incidente	0,132763	0,077245	14,2462	8,1432
Onda Transmitida	0,130122	0,076870	14,0579	8,2095
Diferença Abs.	0,006641	0,001375	0,1883	-0,0663
Coef. Transmissão (K _t)	0,9801	0,9951	-	-
Cenário 04 - Preia-mar	H_s (m)	H_{médio} (m)	T_s (s)	T_{médio} (s)
Onda Incidente	0,208125	0,118598	19,0921	10,6132
Onda Transmitida	0,204425	0,118484	20,7221	12,7232
Diferença Abs.	0,003700	0,000114	1,6300	2,1100
Coef. Transmissão (K _t)	0,9822	0,9990	-	-

Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, a diferença entre os coeficientes de transmissão provenientes dos cenários com e sem a estrutura indicam a dissipação de energia provocada somente pela interação com o quebra-mar submerso, vide Tabela 19.

Tabela 19: Dissipação de energia provocada pelo quebra-mar submerso.

Baixa -mar	K_t_H_s	K_t_H_{médio}
Cenário 01	0,8910	0,9025
Cenário 03	0,9801	0,9951
Diferença	0,0891	0,0926
Dissipação (%)	8,91%	8,56%
Preia -mar	K_t_H_s	K_t_H_{médio}
Cenário 02	0,8075	0,8610
Cenário 04	0,9822	0,9990
Diferença	0,1747	0,1380
Dissipação (%)	17,47%	13,80%

Fonte: elaborado pelo autor.

Evidentemente, a dissipação de energia provocada pela interação com a estrutura não é constante em todos os pontos da frente de ondas, principalmente na região de influência do trecho transversal, onde não foi possível realizar a coleta de dados de campo devido a problemas com o equipamento de medição. Nesta região o formato da estrutura é menos esbelto do que no trecho longitudinal, fora a profundidade da superfície praias que é mais acentuada no local. Devido a estas condições e aos resultados obtidos, é possível pressupor que a dissipação de energia na região é inferior a encontrada por meio dos pontos medidos.

7. CONCLUSÕES

A correta avaliação de desempenho de um quebra-mar submerso depende muito da precisão da ferramenta de investigação dos efeitos de águas rasas e dissipação de energia empregada. Atualmente, é possível afirmar que estas ferramentas são imprescindíveis na concepção e monitoramento de estruturas costeiras, pois a incorreta caracterização dos supracitados efeitos pode levar a construção de obras que acentuarão o problema ao invés de resolvê-lo.

Logo, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um tanque de ondas CFD por meio do software FLOW-3D®, capaz de reproduzir a dissipação de energia e os efeitos de águas rasas levando-se em conta a interação com um quebra-mar submerso. Para este fim, foram definidos quatro cenários de simulação, ambos alimentados e validados por dados coletados em campo. Os Cenários 01 e 02 objetivaram a correta reprodução da hidrodinâmica caracterizada durante as condições de baixa-mar e preia-mar respectivamente, enquanto os Cenários 03 e 04 visaram reproduzir a hidrodinâmica diante de uma hipotética ausência da estrutura.

Em primeiro momento, é importante destacar que o estado da arte desenvolvido forneceu informações cruciais sobre as principais técnicas de modelagem aplicadas na elaboração de tanques de ondas CFD. Este procedimento possibilitou o desenvolvimento do modelo numérico de acordo com a vanguarda da tecnologia e ainda forneceu conhecimentos que encurtaram o tempo de calibração.

Durante a construção do modelo numérico foram realizados testes de sensibilidade de malha, visando encontrar a melhor relação possível entre gasto computacional e incerteza numérica. Para isto foi aplicado o procedimento recomendado por Celik (2008), que analisa estatisticamente a variação de uma importante variável de controle, sendo que, nesta dissertação foi investigada a variação da superfície livre decorrente do uso de três diferentes espaçamentos de malha. Os resultados alcançados indicaram que o tamanho de célula sugerido pelo método FAVOR™, ou seja, o tamanho capaz de reproduzir os objetos geométricos dentro do domínio computacional, foi o suficiente para alcançar uma incerteza numérica máxima em números absolutos de apenas de 0,03 metros, isto sem inviabilizar as simulações em função dos gastos computacionais, que ainda são elevados e limitaram o período de simulação em 540 segundos (9 minutos).

Conclui-se via diagnósticos da ferramenta MENTOR™, que a perturbação gerada pelo quebra-mar submerso ou mesmo pela superfície praial influencia diretamente na convergência da solução e conseqüentemente, no tamanho do intervalo de tempo adotado, que é ajustado automaticamente pelo FLOW-3D® para ser o maior possível sem ultrapassar os limites de estabilidade. Isto posto, conforme previsto, o maior tempo de simulação foi encontrado no Cenário 01 onde grande parte das orbitas de ondas é obstruída pela estrutura.

Em relação a capacidade de geração de ondas irregulares a partir da inserção de espectros, os resultados obtidos por meio da extração de dados do FLOW-3D® indicaram uma forte aderência quando comparados aos dados medidos em campo. Para expressar a acurácia das simulações na mesma dimensão da variação da superfície livre, foi empregada a medida de erro denominada Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), que resultou nos valores de 0,010 e 0,011 metros para as condições de baixa-mar e preia-mar respectivamente. Ademais, o modelo mostrou ser capaz de reproduzir até mesmo as vagas geradas pelo atrito do vento com a superfície do mar. Tais resultados, confirmam a excelente qualidade de reprodução do modelo tocante a geração de ondas de superfície irregulares.

A reprodução dos efeitos de águas rasas, com exceção a difração, foi investigada de modo qualitativo por meio da distribuição das propriedades do escoamento ao longo da área modelada. Para isto, foram extraídas representações gráficas da solução numérica e foram identificados instantes onde os efeitos são facilmente caracterizados. A excelente capacidade de reprodução do empolamento puro foi verificada nos Cenários 03 e 04. Os efeitos da reflexão de ondas foram verificados nos Cenários 01 e 02, enquanto galgamento e arrebenção somente puderam ser observados no Cenário 01, devido a presença da estrutura e do nível médio do mar utilizado. Por fim, a refração da frente de ondas pode ser observada em todos os cenários de simulação, evidentemente tal efeito é mais perceptível nos Cenários 01 e 02. Deste modo, comprovou-se que o modelo é capaz de reproduzir de maneira fidedigna os efeitos de águas rasas, mesmo após a interação com a estrutura.

A última parte do trabalho, avaliou a capacidade do modelo em reproduzir a dissipação de energia gerada pelo quebra-mar submerso por meio da análise do coeficiente de transmissão de altura de onda. Para tal, em primeiro momento foi extraída a estatística de ondas proveniente dos levantamentos de campo. Tais dados serviram como base de validação para os resultados obtidos via modelo numérico.

Ademais, comprovaram o efeito dissipativo do quebra-mar submerso construído na região de estudo, até mesmo em eventos com pequenas ondas.

Observou-se que apenas a razão entre profundidade de submersão (P_s) e altura de onda incidente (H_i) não foi o suficiente para antever teoricamente a dissipação de energia provocada pelo quebra-mar submerso estudado. Pressupõe-se que este resultado acontece em função da não incorporação de importantes aspectos construtivos, como a geometria da estrutura, na análise do fenômeno dissipativo.

Os coeficiente de transmissão extraídos dos Cenários 01 e 02 divergem minimamente quando comparados aos dados de campo e, atestam a excelente reprodução do fenômeno por parte do modelo desenvolvido. Além disto, devido aos resultados obtidos, pode-se inferir que o modelo 3D da área de estudo é capaz de reproduzir fielmente a superfície praias e a geometria do quebra-mar submerso. A dissipação de energia gerada somente pela estrutura varia de 8,56% a 8,91% na baixa-mar e 13,80% a 17,47% na preia-mar. Cabe destacar que a parcela dissipada pela superfície praias não excede 2%. Além disto, constatou-se o deslocamento de fase provocado pela interação das ondas com o quebra-mar submerso, obviamente este efeito é mais intensificado na condição de baixa-mar.

Os resultados alcançados comprovam que o tanque de ondas CFD desenvolvido ao longo deste trabalho permite a investigação do desempenho de quebra-mares submersos, com base na topografia e geometria reais, levando-se em conta as interações hidrodinâmicas com o movimento das ondas. Logo, a principal benefício do método proposto é antever, por meio de inúmeras simulações e variáveis de controle, os possíveis efeitos ocasionados na hidrodinâmica costeira após a construção deste tipo de estrutura. Entretanto, é importante ressaltar que este tipo de modelo somente é indicado em situações onde é possível validá-lo a partir de dados mensurados em campo ou modelo reduzido.

7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos a serem desenvolvidos a partir deste, podem-se sugerir os seguintes tópicos:

- i. Investigação dos efeitos de águas rasas de maneira quantitativa;

- ii. Análise da dissipação provocada pela estrutura em eventos mais energéticos;
- iii. Aplicação do modelo desenvolvido na análise de estruturas emersas, visando examinar a correta reprodução da difração;
- iv. Verificar se o aumento da largura de crista do quebra-mar submerso pode provocar uma intensificação do efeito de dissipação de energia considerável;
- v. Estudo do desempenho de estruturas costeiras perante o cenário de mudanças climáticas previsto, assim como o desenvolvimento de um método de análise e atualização destas estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13.133/1994: Execução de levantamento topográfico. 35 p., 1994.

BRASIL. Panorama da erosão costeira no Brasil (recurso eletrônico). **Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial**. Organização Dieter Muehe – Brasília, DF: MMA, 2018.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. [s.l.] Edgard Blücher, 2009.

BAKHTYAR, R. et al. Air–water two-phase flow modeling of turbulent surf and swash zone wave motions. **Advances in Water Resources**, v. 33, n. 12, p. 1560–1574, 2010.

BROWNE, B. The Measurement of Gravity at Sea. **Geophysical Journal International**, v. 4, p. 271–279, 1937.

CAVALLARO, L. et al. Rubble mound breakwater overtopping: estimation of the reliability of a 3D numerical simulation. **Coastal Engineering Proceedings**, v. 1, n. 33, p. 8, 2012.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (MARMIL). Dados de maré, 2019. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/files/dados_de_mare/2019.pdf> Acesso em: 10 mai. 2019.

CELIK, I. B. Procedure for estimation and reporting of discretization error in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, p. 078001, 2008.

CHEN, C.-H. Study on The Application of FLOW-3D for Wave Energy Dissipation by a Porous Structure. 2012.

CHOPAKATLA, S. C.; LIPPMANN, T. C.; RICHARDSON, J. E. Field verification of a computational fluid dynamics model for wave transformation and breaking in the surf zone. **Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering**, v. 134, n. 2, p. 71–80, 2008.

COMPANHIA DE DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (CODESP). Análise do movimento físico do Porto de Santos: dezembro de 2016. **Santos: Codesp**, 9 fev. 2017. Disponível em: <http://189.50.187.200/docpublico/amf_cpt/2016/amf-2016-12.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

DA SILVA NETO, A. R. et al. Modelagem e simulação para análise de operações em sistemas de telecomunicações. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, v. 8, n. 15, p. 176–191, 2016.

DENTALE, F.; DONNARUMMA, G.; CARRATELLI, E. Simulation of flow within armour blocks in a breakwater. **Journal of Coastal Research**, v. 30, n. 3, p. 528–536, 2014.

DENTALE, F. et al. A CFD approach to rubble mound breakwater design. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 10, n. 5, p. 644–650, 2018.

DIDIER, E.; TEIXEIRA, P.; NEVES, M. G. Desenvolvimento de um tanque de ondas numérico RANS-VOF 3D para aplicações em engenharia costeira e marítima. 2017.

FLOW 3D. **Flow 3D – 11.1 User Manual**. Estados Unidos: Flow Science Inc., 2015.

FORTUNA, A.O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. [s.l.] Edusp, 2000.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena**. [s.l.] Visual Books, 2001.

FUNDAÇÃO DE ESTUDOS E PESQUISAS AQUÁTICAS (FUNDESPA). Programa de Monitoramento do Perfil Praial. Parecer técnico. **Santos: Codesp/Fundespa**, 2010.

_____. *RDC -120612 - Estudo sobre a Hidrodinâmica e o Transporte de Sedimentos na Ponta da Praia de Santos e Praia do Góes*. **Santos: Codesp/ Fundespa**, 2013.

G1.COM. **Ressaca inunda avenida da praia em Santos e provoca transtornos**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/santosregiao/noticia/2016/08/ressaca-inunda-avenida-da-praia-em-santos-e-causabloqueios-no-canal-6>>. Acesso em: 08 fev. 2019.

GARCIA, N.; LARA, J. L.; LOSADA, I. J. 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters. **Coastal Engineering**, v. 51, n. 10, p. 991–1020, 2004.

GARCIA, P. D.; GIRELI, T. Z. A pilot project for beach restoration using a submerged breakwater-Ponta da Praia, Santos, Brasil. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 19, n. 1, p. 43-57, 2019.

GIARRUSSO, C. C.; DENTALE, F.; CARRATELLI, E. Pugliese. On the stability of protected beaches. **WIT Transactions on The Built Environment**, v. 70, 2003.

GIRELI, T. Z., SOUZA, C. M. M. A., NOBRE, L. B., GARCIA P. D. “The efficiency of curved jetties in bay of Santos – SP: Numerical modeling. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 22, 19 jan. 2017.

GIRELI, T. Z.; GARCIA, P. D.; PEREIRA, A. H. S. D. G. Avaliação da eficiência de molhes guia-corrente curvos na Baía de Santos, São Paulo: Modelagem física. **Eng. sanitária e ambiental**, v. 23, n. 6, p. 1185-1198, 2018.

HIGUERA, P; LARA, J. L.; LOSADA, I. J. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models: Application to OpenFOAM®. **Coastal Engineering**, v. 71, p. 102-118, 2012.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, 1981.

HSU, T.-J.; SAKAKIYAMA, T.; LIU, P. L.-F. A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. **Coastal Engineering**, v. 46, n. 1, p. 25–50, 2002.

ITALIANI, D. M. **Resposta morfodinâmica à alimentação artificial da Ponta da Praia, Santos, SP**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Geológica) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 93 f., 2014.

LARA, J. L.; GARCIA, N.; LOSADA, I. J. RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. **Coastal Engineering**, v. 53, n. 5–6, p. 395–417, 2006.

LEIJA, M. B. G et al. Experimental Study on Geotextile Tube Applications as Submerged Breakwaters for Beach Protection in Yucatan, Mexico. **Coastal Engineering Proceedings**, v. 1, n. 34, p. 25, 2014.

LIN, P.; LIU, P. L.-F. A numerical study of breaking waves in the surf zone. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 359, p. 239–264, 1998.

LOMAX, H.; PULLIAM, T. H.; ZINGG, D. W. **Fundamentals of computational fluid dynamics**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2013.

LOSADA, I. J. et al. Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. **Coastal Engineering**, v. 55, n. 1, p. 47–62, 2008.

LOEHR, H. et al. Development of a low-cost wave buoy by utilizing smartphone technology. In: **Coasts and Ports 2013: 21st Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 14th Australasian Port and Harbour Conference**. Engineers Australia, p116, 2013.

MAGUIRE, A. E. Hydrodynamics, control and numerical modelling of absorbing wavemakers. 2011.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. [s.l.] Grupo Gen-LTC, 2017.

MICHAEL, L. **Statistical turbulence modelling for fluid dynamics-demystified: an introductory text for graduate engineering students**. [s.l.] World Scientific, 2015.

OH, Y. I.; SHIN, E. C. Using submerged geotextile tubes in the protection of the E. Korean shore. **Coastal Engineering**, v. 53, n. 11, p. 879–895, 2006.

PARK, J. C. et al. Numerical reproduction of fully nonlinear multi-directional waves by a viscous 3D numerical wave tank. **Ocean Engineering**, v. 31, n. 11–12, p. 1549–1565, 2004.

PEZZOLI, A. et al. Impacts of climate changes on management policy of the harbors, land areas and wetlands in the São Paulo state coastline (Brazil). **Advance Research in Meteorological Sciences**, p. 1-8, 2013.

PORTO DE SANTOS. Autoridade Portuária. **Programa de Gestão do Patrimônio Arqueológico, Histórico e Cultural (Etapas Prospecção, Resgate e monitoramento): Obras de Dragagem e Derrocamento no Porto de Santos/SP**. Disponível em: <http://licenciamento.ibama.gov.br/EIA_dragagem/Porto_Santos1/>. Acesso em: 01 nov.2017.

PRATICAGEM DE SANTOS. Dados do Marégrafo da Praticagem: 11 a 22 de outubro. Disponível em: <<https://www.sppilots.com.br>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

RODI, W. **Turbulence Models and Their Application in Hydraulics**. [s.l.] CRC Press, 1993.

SHARIFAHMADIAN, A. **Numerical Models for Submerged Breakwaters: Coastal Hydrodynamics and Morphodynamics**. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2015.

SITE DA PREFEITURA DE SANTOS. Disponível em: <<http://www.santos.sp.gov.br/>>. Acesso em: 11 fevereiro de 2019.

SOUZA, C. R. de G. A Erosão nas Praias do Estado São Paulo: Causas, Consequências, Indicadores de Monitoramento e Risco. **Memórias do Conselho Científico da Secretaria do Meio Ambiente: A Síntese de um Ano de Conhecimento Acumulado. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo**. p. 48-69, 2009.

SOUZA, J. F. A. et al. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21–41, 2011.

TUCKER, M. The accuracy of wave measurements made with vertical accelerometers. **Deep Sea Research (1953)**, v. 5, n. 2–4, p. 185–192, 1958.

VENANCIO, K. K. (2018). **“Evolução Hidromorfodinâmica da Região da Ponta da Praia em Santos (SP) no Período entre 2009 e 2017”**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. [s.l.] Pearson Education, 2007.

WESTPHALEN, J. et al. Focused waves and wave–structure interaction in a numerical wave tank. **Ocean Engineering**, v. 45, p. 9–21, 2012.