



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**

**Kelly Kawai Venancio**

**Resposta de modelos numéricos costeiros a variações  
batimétricas provenientes do monitoramento de obra-  
piloto submersa**

**CAMPINAS**

**2022**

**Kelly Kawai Venancio**

**Resposta de modelos numéricos costeiros a variações  
batimétricas provenientes do monitoramento de obra-  
piloto submersa**

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

**Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Dalsoglio Garcia**

**Coorientador: Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE  
DEFENDIDA PELA ALUNA KELLY KAWAI VENANCIO E  
ORIENTADA PELA PROFA. DRA. PATRÍCIA DALSOGLIO  
GARCIA.

ASSINATURA DA ORIENTADORA

---

**CAMPINAS**

**2022**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

V551r Venancio, Kelly Kawai, 1991-  
Resposta de modelos numéricos costeiros a variações batimétricas provenientes do monitoramento de obra-piloto submersa / Kelly Kawai Venancio. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Patricia Dalsoglio Garcia.  
Coorientador: Tiago Zenker Gireli.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Erosão costeira. 2. Modelos numéricos. 3. Quebra-mares. 4. Hidrodinâmica. I. Garcia, Patricia Dalsoglio, 1980-. II. Gireli, Tiago Zenker, 1980-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Coastal numerical models response to bathymetric variations from the monitoring of a submerged pilot project

**Palavras-chave em inglês:**

Coastal erosion

Numerical models

Breakwaters

Hydrodynamic

**Área de concentração:** Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

**Titulação:** Doutora em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Patricia Dalsoglio Garcia [Orientador]

Susana Beatriz Vinzon

José Rodolfo Scarati Martins

Paulo Vatauvuk

**Data de defesa:** 19-08-2022

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

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

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-3595-0e30>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/2014817426020023>

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

**Resposta de modelos numéricos costeiros a variações batimétricas  
provenientes do monitoramento de obra-piloto submersa**

**Kelly Kawai Venancio**

**Tese de doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

Profa. Dra. Patrícia Dalsoglio Garcia  
**Presidente e Orientadora/FECFAU/UNICAMP**

Prof. Dra. Susana Beatriz Vinzon  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Profa. Dr. José Rodolfo Scarati Martins  
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Prof. Dr. Paulo Vatauvuk  
**FECFAU/UNICAMP**

Profa. Dra. Celia Regina de Gouveia Souza  
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

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

Campinas, 19 de agosto de 2022.

*Dedico este trabalho à minha vó Rosa  
(in memoriam) e ao meu irmão Reinaldo  
(in memoriam).*

*“His spirit is like the wind,  
The angel guarding me,  
I know he is watching over me”*

## ***Meus agradecimentos***

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (01-P-01879-2016).*

*À minha orientadora Patrícia por ser um exemplo a seguir, tanto como mulher quanto profissional. Agradeço por todos os conselhos e direcionamentos, principalmente nos momentos mais difíceis. Por toda ajuda para enfrentar os mais diversos desafios que a vida acadêmica traz, além de não deixar esvanecer a minha garra para atingir meus objetivos. What a ride!*

*Ao meu coorientador Tiago pela colaboração e confiança.*

*Ao professor Trabanco e aos técnicos de laboratório por toda a colaboração nas coletas e processamentos de dados.*

*Aos colegas de pesquisa pela ajuda com os trabalhos de campo e apoio para desenvolvimento deste trabalho.*

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

*À Hydroinfo e à DHI pelo fornecimento da licença acadêmica dos softwares MIKE 21 e MIKE 3 que foram essenciais para a condução do presente trabalho.*

*À minha mãe Eliana pelo amor incondicional. Agradeço por todo o apoio e incentivo ao longo dessa caminhada, me ajudando a enfrentar e superar obstáculos; e por não permitir que eu desistisse.*

*Ao meu pai Reinaldo e aos familiares que demonstram apoio a sua maneira.*

*Aos meus amigos que sempre me apoiam e se fazem presentes em minha vida, sem os quais eu não seria metade do que sou hoje, e tornam esta jornada muito mais colorida e divertida. Amigos são a família que a gente escolhe. Deixo aqui um trecho do Emicida:*

*“Quem tem um amigo tem tudo, se o poço devorar, ele busca no fundo  
É tão 10, que junto todo o stress é miúdo, é um ponto pra escorar  
quando foi absurdo. Quem tem um amigo tem tudo,  
Se a bala come, mano, ele se põe de escudo  
Pronto pro que vier, mesmo, a qualquer segundo  
É um ombro pra chorar depois do fim do mundo”*

*Adeus.*

*“ELES PARTIRAM, OS DEUSES, no dia da maré estranha. A manhã inteira sob um céu leitoso as águas da baía tinham subido mais e mais, atingindo alturas inauditas, pequenas ondas rastejando sobre a areia crestada que havia anos só era umedecida pela chuva e chegando a lamber a base das dunas. O casco enferrujado do cargueiro encalhado na entrada da baía em algum momento fora do alcance da memória de qualquer um de nós deve ter achado que lhe concediam a oportunidade de um relançamento. Eu nunca mais tornaria a nadar, depois desse dia. As aves marinhas vagiam e mergulhavam, em nada afetadas, ao que parece, pelo espetáculo daquela vasta bacia de água que inchava como uma bolha, de um azul de chumbo e com um fulgor maléfico. Pareciam anormalmente brancas, naquele dia, essas aves. As ondas depositavam na areia uma franja de espuma impura e amarela. Vela alguma desfigurava o horizonte alto. Não voltei a nadar, não, nunca mais.*

*Alguém acaba de pisar na minha cova.”*

*O mar, John Banville.*

## RESUMO

A atração humana pelo ambiente costeiro data de séculos, uma vez que ele é lar de múltiplos recursos, beleza cênica e variados serviços ecossistêmicos. No entanto, as linhas de costa são vulneráveis a diversos riscos, como inundações, processos erosivos, aumento relativo do nível do mar, tempestades, entre outros. Tais perigos, intensificados pela ação antropogênica, podem ser responsáveis por inúmeros prejuízos à infraestrutura existente, resultando em problemas às comunidades locais e autoridades competentes. Para assegurar a proteção costeira, em lugar das obras tradicionais e rígidas, têm entrado em evidência as obras submersas constituídas de materiais de baixo impacto ambiental, como os quebra-mares submersos compostos de geotêxteis. Entretanto, a literatura não apresenta estudos convergentes a respeito dos impactos dessas estruturas na linha de costa, afetando a definição de diretrizes de projeto e posteriores modelagens numéricas. Diante dessa conjunção de fatores, este trabalho teve como principal objetivo combinar o uso de dados batimétricos de monitoramento de obra-piloto e modelagem numérica a partir de um estudo de caso em Santos, para avaliar se a ferramenta desenvolvida é capaz de fornecer resultados consistentes com a realidade hidrodinâmica da região estudada, reproduzindo possíveis falhas na estrutura presente, bem como mudanças provenientes das variações batimétricas dos perfis praiais. Alvo de intensa erosão costeira, Santos é uma das cidades mais importantes da região Sudeste brasileira e abrigo do maior porto da América Latina. Visando reduzir a perda de praia e a atuação da erosão, sobretudo na área adjacente à embocadura do estuário santista, uma estrutura conhecida como projeto-piloto foi implantada nos primeiros meses do ano de 2018 na região da Ponta da Praia. Tal obra, submersa e constituída de geotubos, tem sido continuamente monitorada de forma a fornecer diversos dados batimétricos, além de melhor compreensão sobre os processos atuantes no local. Utilizando os dados de campo, esta pesquisa elaborou um refinamento de malha tanto do modelo hidrodinâmico bidimensional quanto do modelo espectral de ondas, tornando-os sensíveis a pequenas variações batimétricas. A partir disso, foram simulados diversos cenários (utilizando o software MIKE 21, fornecido pela DHI) que consideraram também aberturas e falhas na estrutura do projeto-piloto. Com base na metodologia aplicada, obtiveram-se análises detalhadas sobre o comportamento dos modelos no que concerne a ondas e correntes, à densificação de malhas e à inserção de falhas na obra já existente. Foi observado, portanto, que o modelo é capaz de responder a variações batimétricas localizadas reproduzindo os impactos por elas gerados, como aumento de velocidade de correntes e mudanças de altura e direção de onda, e também se mostrou apto a reproduzir a influência de pequenas aberturas em obras submersas. Desse modo, o uso combinado de dados de campo com modelos computacionais bidimensionais pode contribuir, de forma eficiente, para o estabelecimento de diretrizes a respeito de projetos e implantações de obras submersas de proteção costeira, evitando a utilização de modelos de maior gasto computacional ou que exijam maior diversidade de dados de entrada.

Palavras-chave: erosão costeira, modelagem numérica, quebra-mares submersos, proteção costeira.



## ABSTRACT

Coastal zones are densely populated, holding high rates of urbanization. Mankind has been attracted to coastal environments for centuries due to their important resources, scenic beauty, and ecosystem services. Shorelines are vulnerable to coastal hazards, such as floods, erosion processes, sea level rise, and storms. These risks are intensified by human activity and they may cause countless damages to the local infrastructure, resulting in problems for seaside communities and governments. In this scenario, submerged structures made of low environmental impact materials pose as an alternative to traditional structures, such as submerged breakwaters composed of geotextiles. However, the literature fails to present converging studies regarding the impacts of these structures on the coastline, which affects the definition of design guidelines and subsequent numerical modeling. Given these factors, the main objective of this work was to combine the use of bathymetric data from a pilot structure monitoring and numerical modeling, for a case study in Santos, to assess whether the developed tool is capable of providing consistent results. The consistency of the results is directly related to the model's ability to reproduce the hydrodynamic reality of the region, as well as the reproduction of gaps in the structure, and variations of beach profiles. Santos is one of the most important cities in southeastern Brazil and home to the largest port in Latin America, and the city is subject to these erosive processes. In order to reduce beach loss and erosion, especially in the area adjacent to the Santos estuary, a structure known as the pilot project was implemented in the first months of 2018 in the Ponta da Praia region. This structure is submerged and made up of geotextile tubes and it has been monitored continuously to provide several bathymetric data, in addition to a better understanding of the processes operating at the site. This research conducted a mesh refinement using field data for both models, named the two-dimensional hydrodynamic model and the spectral wave model, to make them responsive to small bathymetric variations. Then, several scenarios were simulated (using the MIKE 21 software, provided by DHI) that also considered gaps and failures in the pilot project structure. From the applied methodology, we obtained detailed analyzes of the behavior of the models, concerning waves and currents. The models were responsive to the densification of meshes, as well as the insertion of gaps in the existing structure. Therefore, we observed that the model is able to respond to small bathymetric variations and reproduce the impacts generated by these variations, such as current speed increments, and changes in wave height and direction. The model was also able to reproduce the influence of small gaps on submerged structures. Thus, the combined use of field data with two-dimensional computational models might contribute to the establishment of guidelines regarding projects and the implementation of submerged structures for coastal protection.

Keywords: coastal erosion, numerical modeling, submerged breakwaters, coastal protection.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Fotografia da zona costeira do município de Paulista, no estado de Pernambuco, em 1974 (A) e em 2004 (B) depois da implantação dos quebra-mares. Fonte: ITEP, 2012. .... 25
- Figura 2. Campo de espigões no litoral oeste da cidade de Fortaleza, Ceará, 1 jul. 2019. Fonte: Google Earth, ©2015 Google Inc. .... 26
- Figura 3. Seção do muro de Galveston (Texas, EUA) sendo preenchida com concreto em 1959, durante sua expansão. Fonte: USACE, 1981. .... 28
- Figura 4. Extremo oeste do muro de Galveston (Texas, EUA) onde é possível ver a continuação dos processos erosivos na praia adjacente, bem como a ausência de praia ao pé do muro, 21 mar. 2018. Fonte: Google Earth, ©2015 Google Inc. .... 28
- Figura 5. Esquema da instalação de um recife artificial considerando a implementação de multifuncionalidades. Fonte: Antunes do Carmo et al., 2009. .... 30
- Figura 6. Algas curtas e ervas marinhas em tubos de geotêxtil em trechos mais rasos do recife artificial de Narrowneck em Gold Coast, Austrália. Fonte: Jackson et al, 2004. .... 31
- Figura 7. Parâmetros relevantes de um recife artificial. a) Altura ( $h_{reef}$ ) e submersão (S). b) ângulo do recife ( $\theta$ ), inclinação da estrutura ( $s_{reef}$ ), distância entre a linha de costa e a crista do recife, e dimensões horizontais. c) geometria do recife (sem ou com plataforma). Fonte: Adaptado de Antunes do Carmo et al., 2011. .... 32
- Figura 8. Ilustração das dimensões de uma estrutura submersa. (B = comprimento da obra, S = distância da linha de costa à estrutura, W = largura da crista, h = profundidade d'água na estrutura,  $h_c$  = profundidade d'água na crista da estrutura, G = largura do vão). Fonte: Adaptado de Pilarczyk, 2003. .... 36
- Figura 9. Efeitos da erosão na praia de Young-Jin, na Coreia do Sul. À esquerda tem-se uma imagem da erosão da costa e à direita uma estrada costeira destruída. Fonte: Adaptado de Oh e Shin, 2006. .... 37
- Figura 10. Planta esquemática da praia de Young-Jin (Coreia do Sul) e da implantação dos quebra-mares submersos. Fonte: Adaptado de Oh e Shin, 2006. .... 38
- Figura 11. Seção transversal esquemática da estrutura de geotêxtil da praia de Young-Jin, Coreia do Sul. Fonte: Adaptado de Oh e Shin, 2006. .... 39
- Figura 12. Acúmulo de areia gerado pelo tubo de geotêxtil. Fonte: Oh e Shin, 2006. .... 39
- Figura 13. Algas marinhas na superfície do tubo de geotêxtil. Fonte: Oh e Shin, 2006. .... 40
- Figura 14. Seção esquemática da redução de energia de onda. Fonte: Adaptado de Alvarez et al., 2007. .... 41

Figura 15. Tubo de geotêxtil induzindo a arrebentação de onda para a atenuação da energia. Fonte: Adaptado de Alvarez et al., 2007. ....	41
Figura 16. (a) e (b): vistas após o acúmulo de areia em direção à costa gerado pelos tubos de geotêxtil. Fonte: Alvarez et al., 2007. ....	42
Figura 17. Projeto de proteção costeira com cinco quebra-mares e uma duna artificial. Fonte: Adaptado de Lopez, 2014. ....	44
Figura 18. É possível notar o alargamento na praia na região em que houve a implementação dos quebra-mares, entretanto sem saliências proeminentes. Fonte: Adaptado de Lopez, 2014. ....	45
Figura 19. Vista da duna artificial em frente ao hotel. Fonte: Lopez, 2014. ....	45
Figura 20. As imagens <i>c</i> , <i>d</i> , <i>e</i> e <i>f</i> mostram que a praia protegida pelos quebra-mares é mais larga e se mantém dessa forma ao longo dos anos, mostrando que o sedimento do local é muito estável. Fonte: Lopez, 2014. ....	46
Figura 21. Granulometria dos sedimentos coletados no pós-praia na região da Ponta da Praia pela equipe da FECFAU-UNICAMP no ano de 2014. Fonte: Elaborada pela autora. ....	57
Figura 22. Localização das intervenções na região da Baixada Santista. 1: canais de drenagem do 1 ao 6 (da esquerda para a direita); 2: tómbolo da Ilha Porchat; 3: enraizamento do Emissário Submarino; 4: canal de acesso ao Porto de Santos; 5: muros de praia, enrocamentos e muretas na região da Ponta da Praia. Fonte: Venancio, 2018. ....	59
Figura 23. Propostas de molhes guia-corrente estudadas para o Porto de Santos. Fonte: Gireli et al., 2018. ....	62
Figura 24. Tendência de evolução da linha de costa na região da Ponta da Praia, obtida durante ensaio em modelo físico. Fonte: Gireli et al., 2018. ....	63
Figura 25. Localização esquemática das duas soluções propostas. À esquerda os molhes guia-corrente e à direita os quebra-mares segmentados. Fonte: Alfredini et al., 2018. ....	63
Figura 26. Alturas significativas de onda (m) durante um evento de tempestade em 20 de julho de 2012, às 15h, para três cenários: A - S1) situação atual; B - S2) molhes guia-corrente; C - S3) quebra-mar segmentado; D – <i>zoom</i> no cenário S3. Fonte: Alfredini et al., 2018. ....	65
Figura 27. Posicionamento do eixo do projeto piloto, seções de levantamento topo-batimétrico e pontos de sondagem. Fonte: Garcia e Gireli, 2019. ....	66
Figura 28. Seção transversal completa do segmento longitudinal da obra-piloto. Fonte: Garcia e Gireli, 2019. ....	67

Figura 29. Seção transversal do segmento transversal da obra-piloto em seu trecho emerso. Fonte: Garcia e Gireli, 2019. ....	67
Figura 30. Seção transversal do segmento transversal da obra-piloto em seu trecho submerso. Fonte: Garcia e Gireli, 2019. ....	68
Figura 31. Estação total (à esquerda) e equipamento GNSS (à direita). Fonte: Venancio, 2018. .....	71
Figura 32. Localização das seções topográficas e pontos de apoio dos levantamentos de campo. Fonte: FECFAU, 2021. ....	72
Figura 33. Ecobatímetro utilizado para levantamento dos dados batimétricos. Fonte: Venancio, 2018. ....	73
Figura 34. Posições da linha de costa na região entre os Canais 5 e 6. Fonte: Venancio, 2018. .....	75
Figura 35. Posições da linha de costa na região entre o Canal 6 e a extremidade da praia. Fonte: Venancio, 2018. ....	76
Figura 36. MDE resultante da subtração dos MDE FUNDESPA (2014) <i>versus</i> MDE FECFAU-UNICAMP (2016). Fonte: Adaptado de Venancio, 2018. ....	77
Figura 37: Áreas de referência utilizadas para cálculo dos volumes modificados entre os levantamentos a partir de fevereiro de 2019. Fonte: FECFAU, 2021. ....	79
Figura 38. MDEs resultantes dos levantamentos de campo na região entre o Canal 6 e a ponta da praia (7 <sup>a</sup> a 12 <sup>a</sup> campanhas). Fonte: Adaptado de FECFAU, 2021. ....	81
Figura 39. MDEs resultantes dos levantamentos de campo na região entre o Canal 6 e a ponta da praia (13 <sup>a</sup> a 16 <sup>a</sup> campanhas). Fonte: Adaptado de FECFAU, 2021. ....	82
Figura 40: Perfil de praia – Seção STOS-29. Fonte: FECFAU, 2021. ....	83
Figura 41: Perfil de praia – Seção STOS-32. Fonte: FECFAU, 2021. ....	84
Figura 42: Perfil de praia – Seção 0. Fonte: FECFAU, 2021. ....	84
Figura 43: Perfil de praia – Seção STOS-23. Fonte: FECFAU, 2021. ....	85
Figura 44: Perfil de praia – Seção STOS-22. Fonte: FECFAU, 2021. ....	85
Figura 45: Perfil de praia – Seção STOS-21 – Seção 2. Fonte: FECFAU, 2021. ....	85
Figura 46: Perfil de praia – Seção 3. Fonte: FECFAU, 2021. ....	86
Figura 47: Perfil de praia – Seção STOS-19. Fonte: FECFAU, 2021. ....	86
Figura 48: Perfil de praia – Seção STOS-18. Fonte: FECFAU, 2021. ....	86
Figura 49: Perfil de praia – Seção 6. Fonte: FECFAU, 2021. ....	87
Figura 50: Perfil de praia – Seção STOS-16. Fonte: FECFAU, 2021. ....	87

Figura 51: Perfil de praia – Seção STOS-15. Fonte: FECFAU, 2021.....	87
Figura 52. Aproximação na área da estrutura submersa de contenção de erosão da Ponta da Praia referente ao levantamento de junho de 2020. No retângulo laranja está a brecha identificada próxima à seção STOS-32 e no retângulo branco tem-se o geotubo desaparecido. Fonte: Adaptado de SPA, 2021.....	89
Figura 53: Variação de cotas (m) entre 10 e 11 de fevereiro de 2020 (16° campanha) e 10 e 11 de outubro de 2019 (15° campanha) – na região entre a extremidade da praia e o Canal 6. Fonte: FECFAU, 2021.....	90
Figura 54. Modelo do sistema estuarino e região litorânea de Santos, batimetria de 2006 interpolada utilizando Mike Mesh Generator e descargas fluviais de longo prazo (m <sup>3</sup> /s). Fonte: Adaptado de Corrêa et al., 2018. ....	95
Figura 55. Recorte no modelo-base. À esquerda tem-se o modelo original e à direita tem-se a área recortada que foi adotada neste trabalho. Fonte: Adaptado de Corrêa et al. (2016); Venancio (2018). ....	96
Figura 56. Malha triangular gerada a partir das bordas do modelo e dos polígonos especificados (os contornos dos polígonos estão em verde, e os pontos estão em vermelho e azul). Fonte: Elaborada pela autora.....	99
Figura 57. Detalhe da malha triangular na região próxima à linha de costa e aos limites do canal do porto de Santos (os contornos dos polígonos estão em verde, e os pontos estão em vermelho e azul). A estrutura em “L” representa o projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora. ....	99
Figura 58. Desenho esquemático da implantação da Opção 1 de quebra-mares submersos e destacados. Fonte: Elaborada pela autora. ....	102
Figura 59. Desenho esquemático da implantação da Opção 2 de quebra-mares submersos e destacados. Fonte: Elaborada pela autora. ....	102
Figura 60. Novo cenário-base: detalhe da batimetria na região próxima ao projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora. ....	105
Figura 61. Cenário 1: detalhe da batimetria na região próxima ao projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora.....	105
Figura 62. Cenário 2: detalhe da batimetria na região próxima ao projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora.....	106
Figura 63. Cenário 3: detalhe da batimetria na região próxima ao projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora.....	106

Figura 64. Cenário 4: detalhe da batimetria na região próxima ao projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora.....	107
Figura 65. Variação de cotas de fundo entre o cenário 1 e o novo cenário-base. Fonte: Elaborada pela autora.....	107
Figura 66. Variação de cotas de fundo entre o cenário 2 e o novo cenário-base. Fonte: Elaborada pela autora.....	108
Figura 67. Variação de cotas de fundo entre o cenário 3 e o novo cenário-base. Fonte: Elaborada pela autora.....	108
Figura 68. Variação de cotas de fundo entre o cenário 4 e o novo cenário-base. Fonte: Elaborada pela autora.....	109
Figura 69. FM-HD: 1ª condição para o instante de meia maré enchente. ....	111
Figura 70. FM-HD: 2ª condição para o instante de meia maré enchente. ....	111
Figura 71. FM-HD: 3ª condição para o instante de meia maré enchente. ....	112
Figura 72. FM-HD: 1ª condição para o instante de meia hora antes da preamar. ....	113
Figura 73. FM-HD: 2ª condição para o instante de meia hora antes da preamar. ....	113
Figura 74. FM-HD: 3ª condição para o instante de meia hora antes da preamar. ....	114
Figura 75. FM-HD: 1ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.....	115
Figura 76. FM-HD: 2ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.....	115
Figura 77. FM-HD: 3ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.....	116
Figura 78. SW: 1ª condição para o instante de meia maré enchente. ....	117
Figura 79. SW: 2ª condição para o instante de meia maré enchente. ....	117
Figura 80. SW: 3ª condição para o instante de meia maré enchente. ....	118
Figura 81. SW: 1ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.....	119
Figura 82. SW: 2ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.....	120
Figura 83. SW: 3ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.....	120
Figura 84. FM-HD: Opção-base para o instante de meia maré enchente.....	122
Figura 85. FM-HD: Opção 1 para o instante de meia maré enchente. ....	123
Figura 86. FM-HD: Opção 2 para o instante de meia maré enchente. ....	123
Figura 87. FM-HD: Opção-base para o instante de 1 hora antes da baixa-mar. ....	125
Figura 88. FM-HD: Opção 1 para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.....	125
Figura 89. FM-HD: Opção 2 para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.....	126
Figura 90. SW: Opção-base para o instante de meia maré enchente.....	127
Figura 91. SW: Opção 1 para o instante de meia maré enchente. ....	127

Figura 92. SW: Opção 2 para o instante de meia maré enchente. ....	128
Figura 93. SW: Opção-base para o instante de 1 hora antes da baixa-mar. ....	129
Figura 94. SW: Opção 1 para o instante de 1 hora antes da baixa-mar. ....	130
Figura 95. SW: Opção 2 para o instante de 1 hora antes da baixa-mar. ....	130
Figura 96. FM-HD: Novo cenário-base para o instante de meia maré enchente. ....	133
Figura 97. FM-HD: Cenário 1 para o instante de meia maré enchente. ....	133
Figura 98. FM-HD: Cenário 2 para o instante de meia maré enchente. ....	134
Figura 99. FM-HD: Cenário 3 para o instante de meia maré enchente. ....	134
Figura 100. FM-HD: Cenário 4 para o instante de meia maré enchente. ....	135
Figura 101. Recorte FM-HD: Novo cenário-base para o instante de meia maré enchente. ...	135
Figura 102. Recorte FM-HD: Cenário 1 para o instante de meia maré enchente. ....	136
Figura 103. Recorte FM-HD: Cenário 2 para o instante de meia maré enchente. ....	136
Figura 104. Recorte FM-HD: Cenário 3 para o instante de meia maré enchente. ....	137
Figura 105. Recorte FM-HD: Cenário 4 para o instante de meia maré enchente. ....	137
Figura 106. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 1 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região do projeto-piloto. ....	138
Figura 107. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 1 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região entre os canais 5 e 6. ....	138
Figura 108. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 2 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região do projeto-piloto. ....	139
Figura 109. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 2 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região entre os canais 5 e 6. ....	139
Figura 110. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 3 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região do projeto-piloto. ....	140
Figura 111. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 3 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região entre os canais 5 e 6. ....	140
Figura 112. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 4 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região do projeto-piloto. ....	141
Figura 113. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 4 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região entre os canais 5 e 6. ....	141
Figura 114. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 4 e o cenário 2 para o instante de meia maré enchente, região do projeto-piloto. ....	144

Figura 115. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 4 e o cenário 2 para o instante de meia maré enchente, região entre os canais 5 e 6. ....	144
Figura 116. Diferenças de batimetria entre os cenários 4 e 2. ....	146
Figura 117. Recorte FM-HD: Novo cenário-base para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ....	147
Figura 118. Recorte FM-HD: Cenário 1 para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ...	147
Figura 119. Recorte FM-HD: Cenário 2 para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ...	148
Figura 120. Recorte FM-HD: Cenário 3 para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ...	148
Figura 121. Recorte FM-HD: Cenário 4 para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ...	149
Figura 122. FM-HD: Cenário 4 para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ....	149
Figura 123. SW: Novo cenário-base para o instante de meia maré enchente. ....	151
Figura 124. SW: Cenário 1 para o instante de meia maré enchente. ....	151
Figura 125. SW: Cenário 2 para o instante de meia maré enchente. ....	152
Figura 126. SW: Cenário 3 para o instante de meia maré enchente. ....	152
Figura 127. SW: Cenário 4 para o instante de meia maré enchente. ....	153
Figura 128. Recorte SW: Novo cenário-base para o instante de meia maré enchente. ....	153
Figura 129. Recorte SW: Cenário 1 para o instante de meia maré enchente. ....	154
Figura 130. Recorte SW: Cenário 2 para o instante de meia maré enchente. ....	154
Figura 131. Recorte SW: Cenário 3 para o instante de meia maré enchente. ....	155
Figura 132. Recorte SW: Cenário 4 para o instante de meia maré enchente. ....	155
Figura 133. Recorte SW: Novo cenário-base para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ....	157
Figura 134. Recorte SW: Cenário 1 para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ....	157
Figura 135. Recorte SW: Cenário 2 para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ....	158
Figura 136. Recorte SW: Cenário 3 para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ....	158
Figura 137. Recorte SW: Cenário 4 para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ....	159
Figura 138. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 4 e o cenário 2 para o instante de uma hora antes da baixa-mar. ....	160
Figura 139. Curva de Sundborg-Hjulström com valores de velocidade crítica para deposição e erosão de acordo com o diâmetro do grão. Fonte: Adaptado de Gireli et al., 2018. ....	161
Figura 140. FM-HD: Detalhe das brechas no cenário 4 para o instante de meia maré enchente. ....	162



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos locais e as estruturas costeiras submersas apresentadas na literatura (B = comprimento da obra, S = distância da linha de costa à estrutura, W = largura da crista, h = profundidade d'água na estrutura, $h_c$ = profundidade d'água na crista da estrutura, $\tan\beta$ = declividade de fundo nos arredores da estrutura). ....	35
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens do uso de modelos físicos. ....	49
Tabela 3 – Estudos de quebra-mares que utilizaram modelagem numérica ou matemática. ...	56
Tabela 4 – Dados de onda e vento considerados na modelagem.....	58
Tabela 5 – Resumo das intervenções antrópicas na orla de Santos. ....	60
Tabela 6 – Tipos de estudos existentes que englobam a região da Baixada Santista.....	61
Tabela 7 – Datas e área dos levantamentos de campo topográficos.....	70
Tabela 8 – Volume erodido para os trechos: i) entre as seções STOS-23 e STOS-21; ii) entre as seções STOS-23 e STOS-18.....	78
Tabela 9 – Volume de sedimentos lançado pela Prefeitura de Santos no período entre os levantamentos de campo (as datas referentes a cada levantamento podem ser consultadas na Tabela 7). ....	80
Tabela 10 – Variação da Zero DHN entre os anos de 2018 e 2020. ....	89
Tabela 11 – Balanço sedimentar e evolução de fundo para o trecho entre a extremidade da praia e o Canal 6. ....	91
Tabela 12 – Balanço sedimentar e evolução de fundo para o trecho entre o Canal 5 e o Canal 6. ....	91
Tabela 13 – Valores das arestas dos triângulos que compõem a malha do modelo antes e depois do processo de refinamento na área do projeto-piloto. ....	103
Tabela 14 – Resumo das condições de malha do modelo, quantidade de elementos e tempo de processamento dos módulos. ....	110
Tabela 15 – Resumo das opções de obras testadas entre os canais 5 e 6 e suas dimensões...	121
Tabela 16 – Descrição dos dados batimétricos alterados para cada cenário de simulação. ...	132

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	19
2. OBJETIVOS .....	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
3.1. Proteção costeira .....	23
3.1.1. Obras costeiras rígidas .....	24
3.1.2. Obras costeiras flexíveis .....	29
3.1.2.1. <i>Estruturas multifuncionais</i> .....	30
3.1.2.2. <i>Estruturas submersas de proteção costeira</i> .....	33
3.2. Tipos de modelagens hidráulicas para zonas costeiras .....	47
3.3. Tipos de modelagem computacional para quebra-mares submersos de proteção costeira .....	51
4. ÁREA DE ESTUDO .....	57
4.1. Santos: Caracterização física das praias .....	57
4.2. Santos: Breve histórico da região, erosão costeira e estudos existentes .....	58
4.3. Santos: Estudos recentes e o projeto-piloto .....	61
4.4. Levantamentos de campo .....	69
4.5. Monitoramento .....	73
4.5.1. Monitoramento pré-obra .....	74
4.5.2. Monitoramento pós-obra .....	78
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	93
5.1. Montagem do modelo numérico .....	93
5.1.1. Modelo numérico Mike 21: hidrodinâmico (FM-HD) .....	93
5.1.2. Modelo numérico Mike 21: ondas espectrais (SW) .....	97
5.2. Refinamento e análise de sensibilidade da malha batimétrica .....	97
5.3. Estudo sobre a sensibilidade do modelo à evolução batimétrica local .....	103
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	110
6.1. Refinamento e análise de sensibilidade da malha batimétrica .....	110
6.2. Estudo sobre a sensibilidade do modelo à evolução batimétrica local .....	131
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	164
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	167

## 1. INTRODUÇÃO

Zonas costeiras são historicamente atrativas à vida humana e suas atividades, e por esse motivo constituem uma das regiões mais desenvolvidas e habitadas do mundo, contendo cerca de 40% da população mundial (MENTASCHI et al., 2018). O ambiente costeiro é reconhecido por possuir recursos abundantes, diversos serviços ecossistêmicos e um riquíssimo panorama, independentemente do tipo de morfologia presente. Entretanto, apesar das inúmeras qualidades, tais áreas estão sujeitas a constantes mudanças, seja por causas naturais, seja por consequência da intensificação das ações antrópicas, podendo ser citados os processos de erosão, inundação, aumento relativo do nível do mar, aumento da frequência de eventos extremos e degradação de ecossistemas (VAN RIJN, 2011; MENTASCHI et al., 2018; VOUSDOUKAS et al., 2020).

Segundo Luijendijk et al. (2018), 31% do litoral não congelado do planeta é arenoso. Dessa porcentagem, 24% está passando por processos erosivos a taxas superiores a meio metro ao ano. Além disso, a obra de Mentaschi et al. (2018) aponta que a área global total erodida é duas vezes maior do que a superfície de terra acrescida. Considerando esse cenário, a erosão costeira é um problema tão relevante quanto os alagamentos, tendo em vista que quaisquer alterações da linha de costa podem afetar as propriedades e atividades humanas (REGUERO et al., 2018). Embora algumas variações da linha de costa sejam naturais, isto é, obedeçam a ciclos temporários de erosão e acreção das praias, a intensificação das mudanças na região costeira devido a ações antrópicas tem resultado na perda de resiliência das praias. Estas, por sua vez, sofrem alterações no processo de sedimentação e restrições em sua movimentação na interface costa-mar (VAN RIJN, 2011; COOKE et al., 2012; MUEHE, 2018).

A alta gama e variedade de causas – tanto naturais quanto humanas – relacionadas ao aumento da erosão, principalmente em áreas costeiras nas quais o valor da terra é elevado, levantam incertezas sobre a melhor forma de combater a erosão costeira (PRASETYA, 2007). Uma abordagem popular na engenharia é o uso de estruturas costeiras para controlar correntes longitudinais e ataques de ondas, visando estancar o aumento das taxas de erosão e aprisionar sedimentos provenientes do transporte longitudinal. Diversas estruturas podem ser planejadas e construídas, tais como molhes, muros de praia, revestimentos, promontórios artificiais, quebra-mares, entre outras. Entretanto, os custos de instalação são dispendiosos, e a população tende a reagir negativamente à implementação de grandes obras constituídas de pedras (PRASETYA, 2007). Além disso, segundo Cooper e McKenna (2008), construções

localizadas dentro da zona de variabilidade dinâmica da costa são um “problema esperando para acontecer” no que diz respeito às praias, uma vez que isso compromete sua habilidade de se ajustar às novas condições.

Diante das frequentes desaprovações e resistências públicas às obras da engenharia tradicional, o uso de quebra-mares submersos tornou-se bastante atrativo no que se refere à proteção costeira, principalmente em áreas litorâneas voltadas ao lazer e à moradia, uma vez que possuem impactos ambientais e visuais reduzidos (SHARIF AHMADIAN, 2016).

Segundo Sharif Ahmadian (2016), os quebra-mares submersos são apropriados para todas as linhas de costa, desde que seu projeto seja desenvolvido de forma precisa e eficaz. Geralmente são construídos para a proteção ou restauração de praias erodidas e podem atuar na redistribuição dos padrões do transporte de sedimentos, criação de desejáveis recursos praias e de zonas calmas em portos, bem como na prevenção de assoreamento ou de alteração na deposição de sedimentos em canais de acesso portuário. Ademais, essas estruturas podem contribuir para a dissipação de energia de ondas incidentes e prover uma área calma e abrigada na sua zona de sombra.

Levando em consideração que as regiões costeiras apresentam uma alta complexidade hidrodinâmica e morfológica, a aplicação de modelos numéricos em problemas de engenharia costeira tem sido cada vez maior graças aos avanços computacionais (CHAU, 2010). Entretanto, é necessária uma compreensão abrangente do domínio do problema para que se escolha o modelo numérico apropriado, além de uma representação teórica adequada (SHARIF AHMADIAN, 2016), já que a modelagem numérica é limitada, por não ser capaz de simular todas as condições que ocorrem em campo (JACKSON et al., 2002).

Isto posto, a combinação de modelos numéricos com dados de monitoramento de campo torna-se um diferencial nos projetos de soluções costeiras. De acordo com Sharif Ahmadian (2016), a precisão dos modelos computacionais está relacionada, principalmente, à qualidade dos dados batimétricos, às configurações do modelo e aos dados usados para calibração. Além disso, modelos de processos costeiros necessitam de dados batimétricos espacialmente abrangentes, de forma que possam reproduzir a batimetria verdadeira do instante simulado e satisfazer as condições de contorno do modelo (PLANT et al., 2009).

Assim como o resto do mundo, a costa brasileira não está fora do cenário do aumento das taxas de erosão. O Brasil tem 40% do seu litoral sob processos erosivos (MUEHE, 2018). Desse percentual, cerca de 80% das áreas estão erodidas em razão de interferências antropogênicas, relacionadas sobretudo às construções de estruturas urbanas

próximas às praias, implementação de obras rígidas para proteção costeira ou expansão portuária (MUEHE, 2006).

O estado de São Paulo, por sua vez, é o estado mais rico do Brasil e tem uma costa de 622 km, na qual cerca de 60% das praias são arenosas, com muitos trechos sob progressiva erosão. Pode-se citar, entre as cidades afetadas, Ilha Comprida, Peruíbe, Guarujá e Santos (MUEHE, 2018). Santos, lar da área de estudo do presente trabalho, é uma das cidades mais importantes da região Sudeste brasileira, pois conta com o maior complexo portuário da América Latina, o Porto de Santos. Entretanto, seus sete quilômetros de praia também são de suma importância, uma vez que abrigam atividades de turismo e lazer (VENANCIO et al, 2020).

A região da Ponta da Praia, área adjacente à entrada do canal do Porto de Santos, é a que mais sofreu com aumento da taxa de erosão costeira na última década, levando à perda de grandes volumes de areia e alterações no perfil praiar (VENANCIO et al., 2020). Logo, visando reduzir os impactos do crescimento desenfreado da erosão costeira e tendo em vista a complexidade dos processos hidromorfodinâmicos da região, assim como a dificuldade de se obter um modelo computacional condizente com a realidade local, Garcia e Gireli (2019) propuseram a implantação de um projeto-piloto na região da Ponta da Praia. Essa obra, um quebra-mar submerso composto de tubos de geotêxtil, foi finalizada em abril de 2018 e vem sendo monitorada periodicamente desde então.

Além de aperfeiçoar a compreensão dos fatores e fenômenos envolvidos nos processos hidrodinâmicos da região, o monitoramento contínuo também fornece um grande volume de dados batimétricos que pode ser utilizado para alimentar modelos numéricos, em especial os hidrodinâmicos, uma vez que são significativamente sensíveis à batimetria (KHANARMUEI et al., 2020).

Dessa forma, partiu-se da seguinte hipótese: para a elaboração de modelos numéricos costeiros mais precisos e mais fiéis à realidade local, é necessária maior discretização do domínio do modelo por meio do uso de informações batimétricas provenientes do monitoramento de campo da área de estudo. Sendo assim, o modelo se tornaria sensível a variações de batimetria localizadas e seria capaz de reproduzir possíveis falhas ou diferentes espaçamentos na estrutura da obra proposta, bem como as alterações devido a condições de bom ou mau tempo do perfil praiar.

Consequentemente, espera-se que o uso combinado de dados de campo de obras-piloto e modelos numéricos adequados se torne uma ferramenta atraente para a elaboração e análise de soluções de proteção costeira eficientes e potencialmente definitivas.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar se modelos hidrodinâmicos bidimensionais (2D), aliados a modelos de ondas espectrais, têm capacidade de reproduzir, a partir de alterações batimétricas medidas em campo, o impacto de aberturas em obras submersas de proteção costeira em regiões de alta complexidade hidrodinâmica.

Tem ainda, os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a sensibilidade do modelo hidrodinâmico bidimensional e do modelo espectral de ondas às alterações de densidade da malha e quantidade de dados batimétricos utilizados para interpolação de informações;
- Estudo de caso em relação ao projeto-piloto implantado em Santos (São Paulo) nos seguintes aspectos:
  - Avaliar a sensibilidade dos modelos numéricos supracitados a diferentes vãos entre segmentos de quebra-mares submersos em regiões costeiras;
  - Avaliar se os modelos numéricos utilizados são sensíveis a pequenas mudanças batimétricas que ocorrem na região costeira, onde as velocidades de corrente são menores;
  - Avaliar a qualidade de resposta dos modelos numéricos mencionados em relação às brechas existentes no quebra-mar submerso (projeto-piloto) em uma região com influência de embocadura estuarina.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A presente revisão da literatura se propõe a apresentar um recorte sobre obras de proteção costeira que podem ser relacionadas à área de estudo e à modelagem numérica conduzida neste trabalho. Ressalta-se ainda que o foco está voltado para obras flexíveis, uma vez que a obra existente no estudo de caso é do tipo submersa e composta por tubos de geotêxtil.

Ademais, apresenta-se também um recorte sobre os tipos de modelagens hidráulicas para zonas costeiras, bem como tipos de modelagem computacional para quebra-mares submersos voltados para proteção costeira.

#### **3.1. Proteção costeira**

A proteção costeira data de tempos remotos, desde que as comunidades humanas deixaram de ser nômades, tornaram-se sedentárias e começaram a se estabelecer ao longo dos litorais, além de estar certamente vinculada à criação e ao desenvolvimento de portos (CHARLIER et al., 2005). Diversos materiais e técnicas vêm sendo desenvolvidos, visto que a proteção costeira é um assunto amplamente discutido e envolve interesses públicos e privados. Entretanto, é necessário fazer alguns apontamentos, uma vez que o termo “proteção costeira” possui significados diversos a depender da abordagem das áreas correlacionadas. Para um ecólogo, por exemplo, pode indicar que os ecossistemas costeiros estão funcionando de forma natural, enquanto que para um engenheiro indica a proteção de propriedades e a prevenção da erosão costeira (COOPER; MCKENNA, 2008).

As obras de proteção costeira nem sempre apresentam os mesmos objetivos em relação ao que será protegido contra os efeitos da erosão e retração da linha de costa. Pode-se pretender a proteção das construções e equipamentos urbanos na orla, mas também é possível ter como propósito combinar a proteção costeira com a preservação e recuperação das praias e recursos naturais, principalmente em locais onde há incentivo ao turismo (MANGOR et. al, 2017; RANGEL-BUITRAGO et al., 2015).

Segundo Charlier et al. (2005), durante os séculos XIX e XX, os projetos de proteção costeira contra o avanço do mar concentraram-se em alimentação artificial e, principalmente, em estruturas rígidas como, por exemplo, molhes, quebra-mares, muros de praia, tetrápodes, entre outros. As estruturas rígidas convencionais são responsáveis por causar grandes danos à dinâmica do ecossistema costeiro, uma vez que elas se destinam a

fixar a linha praial contra a retração resultante de processos erosivos, preservando, assim, apenas construções no tardo da obra (KOMAR, 1998; CHARLIER et al., 2005).

Desse modo, a preocupação com os impactos ambientais tem conduzido buscas por alternativas mais sustentáveis. Segundo Mangor et al. (2017), uma proteção costeira é considerada sustentável se ela tem como objetivo a combinação da proteção da infraestrutura urbana com a preservação das paisagens naturais. O conceito de trabalhar em harmonia com a natureza (“*working with Nature*”) não é recente (CHARLIER et al., 2005), Leonardo da Vinci, no Renascimento, já defendia que a natureza não devia ser confrontada abruptamente ou desafiada, mas sim contornada de forma sábia (“*ne coneris contra ictum fluctus: fluctus obsequio blondiuntur*”) (FRANCO, 1996).

Neste item serão abordadas as obras de proteção costeiras classificadas, inicialmente, em duas categorias: rígidas e flexíveis. As obras rígidas são aquelas relacionadas à engenharia tradicional de composição massiva como blocos de concreto, por exemplo, enquanto as obras flexíveis são as relacionadas ao uso de novas técnicas e/ou materiais de baixo impacto ambiental, tais como tubos de geossintéticos e estruturas de gabião.

### **3.1.1. Obras costeiras rígidas**

Obras costeiras rígidas são estruturas projetadas para fortificar a linha de costa e, dessa forma, resistir à incidência de ondas. Tais obras podem também aumentar a linha praial ou mantê-la fixa (WILLIAMS et al., 2018). Isto é, em geral, são preservadas da erosão apenas as edificações, a infraestrutura e a hinterlândia, resultando em perda de extensão de praia e paisagem costeira. As construções tradicionais mais frequentemente utilizadas são: quebra-mares emersos destacados, espigões costeiros e obras longitudinais aderentes (KOMAR, 1998; MANGOR et al., 2017).

Os quebra-mares emersos destacados são estruturas rígidas implementadas paralelamente à orla, porém a uma distância determinada da linha de costa. Geralmente são compostos de enrocamentos, blocos de concreto e outros materiais semelhantes, e destinam-se a proteger um trecho de praia, pois formam uma barreira contra as ações das ondas incidentes, bloqueando sua energia (VAN RIJN, 2011). Essas obras interferem com menor intensidade no transporte litorâneo, pois não possuem uma estrutura de enraizamento com a costa; entretanto, podem reduzir a qualidade da água das praias e causar impactos visuais (KOMAR, 1998; MANGOR et al., 2017; VAN RIJN, 2011).



Como exemplo de quebra-mares podem ser citadas as obras localizadas ao longo do litoral dos municípios de Paulista e Olinda, no estado de Pernambuco. O litoral de Paulista tem 14,46 km, sendo 9,62 km de praias com sedimento, enquanto os valores para o litoral de Olinda são de 12,26 km e 4,22 km, respectivamente. Dessas extensões, Paulista conta com 2520 m de quebra-mares e Olinda com 5660 m. Devido à ampliação do Porto de Recife e à implantação de estruturas de contenção, houve uma interferência significativa no balanço sedimentar da região, o que acelerou o processo erosivo que já estava em andamento. Tais obras foram realizadas sem o devido conhecimento da dinâmica costeira, geraram custos altíssimos e o resultado foi a extrema modificação das praias, com perda de beleza cênica e impacto na balneabilidade das águas, tornando-as impróprias para banho (ITEP, 2012). Na Figura 1 é possível ver as alterações na zona costeira do município de Paulista (comparação entre os anos 1974 e 2004) e os impactos negativos na orla da construção do sistema de quebra-mares destacados.



Figura 1. Fotografia da zona costeira do município de Paulista, no estado de Pernambuco, em 1974 (A) e em 2004 (B) depois da implantação dos quebra-mares. Fonte: ITEP, 2012.

Os espigões costeiros, por sua vez, apresentam uma estrutura esbelta e são construídos, via de regra, perpendicularmente à linha de costa. São comumente compostos de enrocamentos, podendo ser erigidos também com blocos de concreto ou *geobags* preenchidos com areia ou concreto. Eles interferem de forma contundente no transporte longitudinal de sedimentos, aprisionando-os e criando uma região de amortecimento entre a costa e a zona litorânea. Apesar de solucionar alguns problemas pontuais de erosão, esse tipo de obra pode transferir o problema para regiões imediatamente adjacentes devido ao déficit sedimentar (KOMAR, 1998; MANGOR et al., 2017).

Segundo IEPRO (2018), para conter o avanço do mar ao longo do litoral oeste da cidade de Fortaleza, no estado do Ceará, foram construídos 11 molhes de proteção entre as décadas de 1970 e 1980. O projeto considerou blocos de rochas graníticas para implantação. O primeiro molhe é o maior, com 450 m de extensão, acompanhado por mais 10 estruturas com tamanhos entre 110 m e 270 m de extensão, formando um campo de espigões. Apesar das obras se mostrarem eficientes na proteção da orla contra o ataque de ondas e de acumularem sedimentos na parte leste de cada molhe, os impactos são evidentes (Figura 2). Isto é, há interferência no transporte longitudinal sedimentar, levando erosão às regiões adjacentes, bem como alterações da paisagem, impactando negativamente a beleza cênica (KOMAR, 1988).

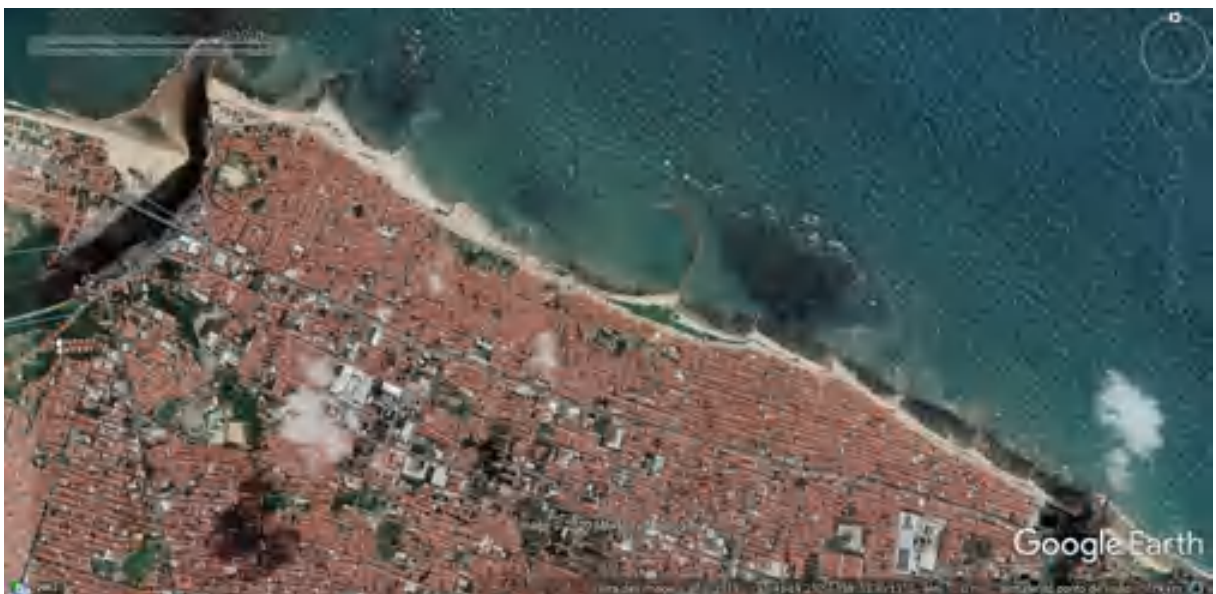


Figura 2. Campo de espigões no litoral oeste da cidade de Fortaleza, Ceará, 1 jul. 2019. Fonte: Google Earth, ©2015 Google Inc.

Já as obras longitudinais aderentes, como o próprio nome sugere, são estruturas paralelas e aderidas à linha de costa, formadas por muros e/ou revestimentos. Os muros,

segundo Komar (1998), são construções maciças que tem por objetivo resistir à força total de ondas incidentes. Em geral, são levemente inclinadas e constituídas de concreto com armadura de aço ou madeira, sendo encarregadas de separar terra e água. Seu projeto pode apresentar degraus ou curvaturas para dissipar e/ou refletir a energia das ondas (MANGOR et al., 2017). Já os revestimentos, apesar de semelhantes aos muros de praia, apresentam menor rigidez e maior facilidade de modificação e manutenção, além de serem capazes de dissipar mais energia das ondas. Podem ser compostos por enrocamentos, blocos de concreto (ou dolos), colchões de gabião, entre outros materiais. São comumente construídos aos pés de dunas, falésias, diques ou como complemento de outras construções (KOMAR, 1998; MANGOR et al., 2017).

Um muro de praia bastante famoso e de grandes dimensões está localizado em Galveston, no estado do Texas, Estados Unidos, frente ao Golfo do México. Após uma grande tempestade em 1900, causada por um furacão, foi criada uma comissão cujo principal objetivo era propor soluções que encontrassem a maneira mais segura e eficiente de proteger a cidade de inundações provenientes do mar. Isso resultou no projeto de um muro de concreto com concha defletora de 5,20 m de altura e 4,90 m de espessura (Figura 3) e que, atualmente, conta com 16 km de extensão. Até meados de 1915, a região contava com uma faixa de areia de praia de aproximadamente 91 m, porém, após forte tempestade nesse mesmo ano, toda a extensão de areia foi perdida e nunca mais recuperada, embora a obra tenha minimizado os danos à cidade (USACE, 1981). Segundo Mangor et al. (2017), é importante ressaltar que os muros de praia podem proteger regiões e infraestruturas urbanas contra inundações devido à elevação do nível do mar, mas agravam os impactos negativos dessa obra como, por exemplo, a intensificação da erosão costeira, levando a perda de extensão de praias e atrativos turísticos (Figura 4).



Figura 3. Seção do muro de Galveston (Texas, EUA) sendo preenchida com concreto em 1959, durante sua expansão. Fonte: USACE, 1981.



Figura 4. Extremo oeste do muro de Galveston (Texas, EUA) onde é possível ver a continuação dos processos erosivos na praia adjacente, bem como a ausência de praia ao pé do muro, 21 mar. 2018. Fonte: Google Earth, ©2015 Google Inc.

Por fim, as obras rígidas têm como principal objetivo a fixação da linha de costa, isto é, elas apenas desaceleram os processos erosivos (como é o caso dos espigões e quebra-mares) ou limitam o final da praia (no caso dos muros). Essas soluções não enfrentam a causa da erosão, apenas tentam mitigar os seus efeitos. Sendo assim, não há recuperação das praias, o que as torna menos atrativas para o lazer e turismo (KOMAR, 1988; MANGOR et al., 2017).

### 3.1.2. Obras costeiras flexíveis

As obras costeiras flexíveis são aquelas que causam pouco impacto ambiental em contraponto às obras tradicionais. Estas últimas geram grandes danos nas áreas adjacentes e alteram significativamente as características originais da praia a ser protegida, além do alto custo financeiro de sua implantação (KIM et al., 2013; OYEGBILE; OYEGBILE, 2017). Sendo assim, sustentabilidade e obras flexíveis estão diretamente relacionadas, pois a premissa adotada é de que haja proteção não só das estruturas urbanas, mas também do ecossistema costeiro e das praias. A abordagem de obras flexíveis consiste em intervenções humanas nos processos naturais, como construção de dunas artificiais, drenagem de praia, entre outros, na intenção de diminuir as taxas de erosão, sem fazer uso, entretanto, de estruturas sólidas permanentes (COOPER; MCKENNA, 2008).

Uma das técnicas de obra flexível amplamente empregada é o engordamento artificial, que consiste na alimentação praial com sedimentos provenientes de outras áreas, os chamados locais de empréstimo. Entretanto, mesmo em regiões em que a alimentação artificial é considerada como um plano de longo prazo, a erosão da linha costeira continua presente. Além disso, apesar da presunção de que é uma técnica ecologicamente benéfica, tal processo pode resultar em grandes impactos na biota das praias (COOKE et al., 2012).

Ademais, assim como as obras rígidas, a alimentação artificial também não enfrenta a causa da erosão. Dessa forma, a elaboração de um projeto de engordamento que não considera todas as variáveis, aliada ao alto custo de implantação dessa solução pode resultar em execuções caríssimas e malsucedidas, gerando uma demanda de constante manutenção (BRASIL, 2018).

Por isso, os subitens a seguir abordarão as estruturas multifuncionais e as intervenções submersas, como quebra-mares e molhes, constituídos de materiais alternativos como geotêxteis e gabiões (JACKSON et al., 2002; RANASINGHE; TURNER, 2006). Segundo Oh e Shin (2006), tem ocorrido uma mudança em relação aos materiais utilizados em obras hidráulicas e de proteção costeira: os tradicionais enrocamentos e compostos de concreto estão sendo substituídos por materiais e sistemas menos onerosos como, por exemplo, gabiões, escórias, geossintéticos, entre outros.

### 3.1.2.1. Estruturas multifuncionais

De acordo com Antunes do Carmo et al. (2011), as estruturas multifuncionais, comumente conhecidas como recifes artificiais multifuncionais (RAMF), são um tipo de quebra-mar submerso que atende a diversas finalidades (Figura 5), representando uma inovação no conceito de proteção costeira. Tais obras permitem aprimorar e incentivar a surfabilidade da região, contribuir com a proteção costeira local, melhorar a qualidade da pesca, atrair o desenvolvimento e expansão da fauna e flora quando utilizados materiais do tipo geotêxtil (Figura 6), entre outros.

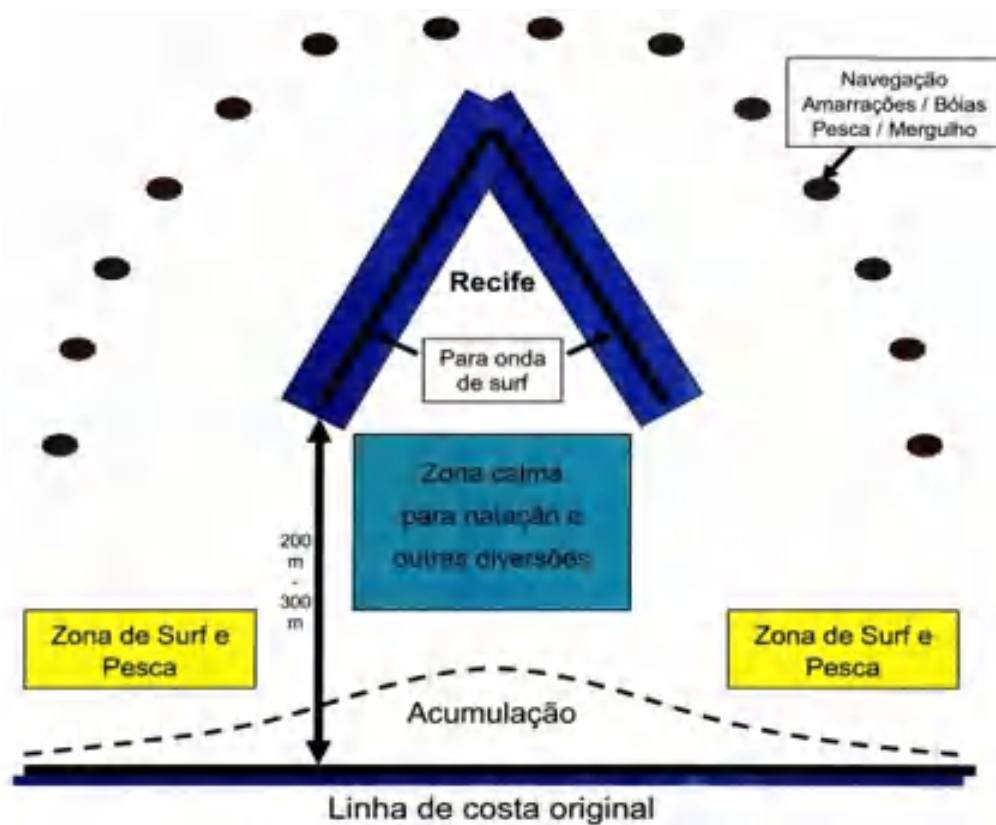


Figura 5. Esquema da instalação de um recife artificial considerando a implementação de multifuncionalidades.  
Fonte: Antunes do Carmo et al., 2009.



Figura 6. Algas curtas e ervas marinhas em tubos de geotêxtil em trechos mais rasos do recife artificial de Narrowneck em Gold Coast, Austrália. Fonte: Jackson et al, 2004.

Antunes do Carmo et al. (2011) comentam ainda que, em contraposição às obras rígidas emersas, que oferecem uma proteção mais direta a determinados trechos da costa, os RAMFs proporcionam proteção indireta, porém com menores impactos. Eles reduzem a carga hidráulica que atinge a costa a um nível que torna possível manter o equilíbrio dinâmico da linha costeira. O *design* dessas estruturas permite que haja certa transmissão de energia das ondas por *overtopping*, assim como por meio de seus poros (se a estrutura for porosa), e/ou arrebenção de ondas seguida da dissipação de energia na crista da obra.

Diversos critérios devem ser considerados ao se desenvolver um projeto de recife artificial de forma que ele proteja a costa e promova as demais funcionalidades. Ao elaborar o *design* é importante considerar a segurança ao surfe, a proteção costeira, o tamanho e localização da obra, as expectativas públicas (que devem ser realistas), a praticidade dos métodos construtivos e as alterações do solo marinho (JACKSON; CORBETT, 2007). Entretanto os parâmetros mais relevantes são apresentados na Figura 7, que são: a) a altura e submersão do recife, b) o ângulo do recife, a inclinação da estrutura, a distância entre a crista da estrutura e a linha de costa e as dimensões horizontais, e c) a geometria (com ou sem plataforma) (ANTUNES DO CARMO et al., 2011; VOORDE et al., 2009).

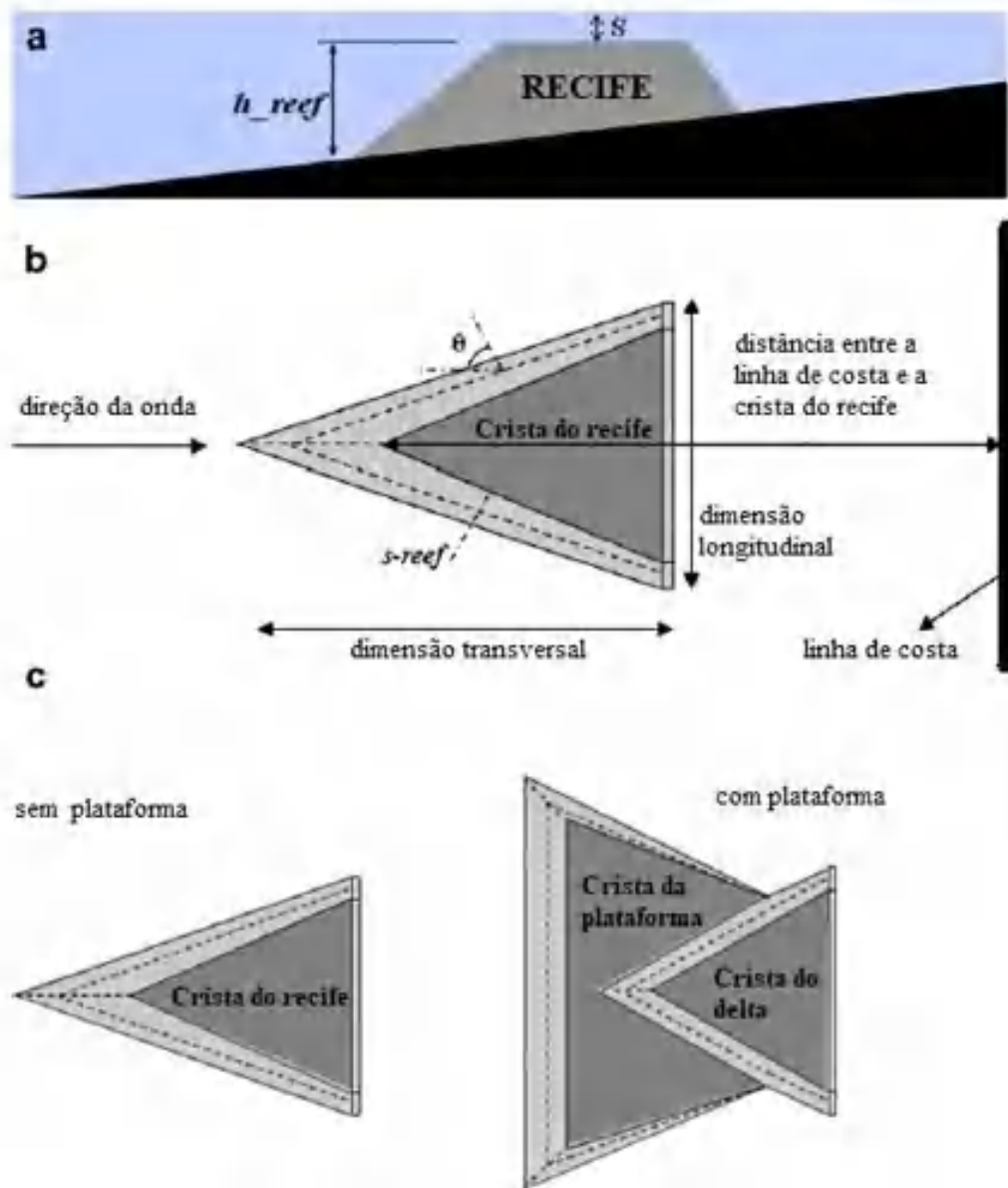


Figura 7. Parâmetros relevantes de um recife artificial. a) Altura ( $h_{reef}$ ) e submersão ( $S$ ). b) ângulo do recife ( $\theta$ ), inclinação da estrutura ( $s-reef$ ), distância entre a linha de costa e a crista do recife, e dimensões horizontais. c) geometria do recife (sem ou com plataforma). Fonte: Adaptado de Antunes do Carmo et al., 2011.

É importante ressaltar que se deve considerar não só a resposta hidrodinâmica a um recife artificial, como também o comportamento morfodinâmico da região em que foi ou será implantada a obra. Ou seja, é fundamental entender, por exemplo, tanto o comportamento das ondas sobre a estrutura (se ela arrebeta, difrata, reflete etc.) como a tendência da linha de costa, isto é, se está erodindo ou crescendo, visto que a ideia destas obras é ter o benefício múltiplo de proteger as praias enquanto aprimora outros aspectos, como a surfabilidade (ANTUNES DO CARMO et al., 2011; RANASINGHE et al., 2006).

Sendo assim, para analisar a resposta da linha de costa à implantação de uma estrutura multifuncional submersa, podem-se destacar três parâmetros: distância da linha



costeira até obra, o nível de submersão da crista e a presença ou ausência de transporte longitudinal significativo de sedimentos (RANASINGHE et al., 2006). Tal análise pode ser realizada por meio de modelagens físicas e numéricas, porém é importante ter em mente que a modelagem possui limitações, uma vez que não é capaz de reproduzir todas as condições que ocorrem *in loco* (JACKSON et al., 2002).

Por fim, o geotêxtil tem se mostrado o material mais apropriado para a implementação dessas obras, pois propicia a diminuição de custos e tem a instalação facilitada em comparação a outras técnicas construtivas. Os contentores de geotêxtil podem ser preenchidos *in situ* com areia, por meio de bombeamento hidráulico (VOORDE et al., 2009). Além disso, tal tecido – que é da categoria dos materiais sintéticos que incluem polietileno, poliéster e polipropileno – é, geralmente, flexível, permeável e durável, sendo resistente a tensões e cisalhamentos (ANTUNES DO CARMO et al., 2011).

### **3.1.2.2. Estruturas submersas de proteção costeira**

De acordo com Ranasinghe e Turner (2006) as estruturas emersas de proteção costeira se mostram eficientes para abrigar determinados trechos de praia, mas a magnitude e quantidade de efeitos desfavoráveis tornam-nas menos atraentes para implementação, podendo ser citados os impactos visuais e alterações das amenidades praias. Consequentemente, as estruturas submersas se tornaram uma alternativa interessante, uma vez que podem prover a proteção necessária sem causar os mesmos impactos das estruturas emersas. Assim, há um aumento de pressões das comunidades locais com relação aos órgãos responsáveis pelo gerenciamento costeiro para que as obras submersas tenham maior preferência de implantação.

Ranasinghe e Turner (2006) afirmam ainda que, apesar da associação entre recifes naturais submersos e saliências na linha de costa (o que sugere que estruturas submersas proveriam proteção das praias), os poucos estudos a respeito do comportamento da linha costeira em relação a essas obras são inconsistentes. Enquanto algumas análises sugerem que os quebra-mares submersos poderiam gerar saliências maiores do que as causadas por quebra-mares emersos de mesmo tamanho, outros estudos indicam que obras submersas poderiam resultar em erosão na linha de costa a sotamar. Pilarczyk (2003) reitera que muitas pesquisas foram realizadas a respeito do comportamento da linha de costa a obras emersas, porém há poucos estudos qualitativos, principalmente fora de laboratório, sobre os efeitos de obras submersas.

Para uma contextualização inicial do conhecimento divulgado na literatura a respeito de obras submersas, a Tabela 1, publicada originalmente por Ranasinghe e Turner (2006), apresenta resumidamente diversos estudos sobre estruturas submersas (ver, na Figura 8, a representação gráfica das dimensões básicas dessas estruturas) que já foram implantadas, contendo o tipo de estrutura, a resposta da linha de costa, se houve ou não alimentação artificial, se há transporte longitudinal de sedimentos, dimensões e o nível de maré de referência. É importante lembrar que há vários níveis de maré de referência, normalmente representados por siglas, algumas são definidas a seguir (NOAA, 201-):

- MLW (Mean Low Water): média das baixa-mares ou altura da baixa-mar média, isto é, altura média inferida de uma longa série de observações (maior que 18,6 anos), das alturas de todas as baixa-mares;
- MWL (Mean Water Level): elevação média da superfície determinada pela média das alturas da água em intervalos iguais de tempo, geralmente de hora em hora. Usa-se o nível médio em regiões com pouca ou nenhuma amplitude de maré;
- MSL (Mean Sea Level): altura média da superfície do mar considerando todas as oscilações na maré em observações de longo período (maior que 18,6 anos). É considerado como correspondente ao nível que existiria caso não houvesse as forças geradoras de maré;
- MLLW (Mean Lower Low Water): média das menores baixa-mares medidas diariamente inferida a partir de um longo período de observações (maior que 18,6 anos).

Tabela 1 – Características dos locais e as estruturas costeiras submersas apresentadas na literatura (B = comprimento da obra, S = distância da linha de costa à estrutura, W = largura da crista, h = profundidade d'água na estrutura,  $h_c$  = profundidade d'água na crista da estrutura,  $\tan\beta$  = declividade de fundo nos arredores da estrutura).

Localização	Referência	Tipo de estrutura	Resposta da linha de costa	Alimentação artificial	Taxa de transporte longitudinal (m <sup>3</sup> /ano)	B (m)	S (m)	W (m)	h (m)	$h_c$ (m)	$\tan\beta$
<b>Delaware Bay, EUA</b>	Douglass e Weggel (1987)	Quebra-mar isolado + 2 molhes de extremidade	Erosão	Sim	Insignificante	300	75	Não reportado	1	MLW	Não reportado
<b>Keino-Matsubara Beach, Japão</b>	Deguchi e Sawaragi (1986)	Quebra-mar isolado	Erosão	Sim	Não reportado	80	85	20	4	2 m abaixo de MLW	0,1 perto da costa e 0,03 <i>offshore</i>
<b>Niigata, Japão</b>	Funakoshi et al. (1994)	Quebra-mar isolado + 2 molhes	Erosão	Não	Existe, mas não foi quantificado	540	400	20	8,5	1,5 m abaixo de MLW	0,02
<b>Lido di Ostia, Itália (#1)</b>	Tomassicchio (1996)	Quebra-mar isolado	Erosão	Sim	50 000	3000	100	15	4	1,5 m abaixo de MSL	0,05
<b>Lido di Ostia, Itália (#2)</b>	Tomassicchio (1996)	Quebra-mar isolado	Acreção	Não	50 000	700	50	15	3-4	0,5 m abaixo de MSL	0,1
<b>Lido di Dante, Itália</b>	Lamberti e Mancinelli (1996)	Quebra-mar isolado	Acreção	Sim	Insignificante	770	150	12	3	0,5 m abaixo de MSL	0,02
<b>Marche, Itália</b>	Lamberti e Mancinelli (1996)	Vários quebra-mares segmentados	Erosão	Não	Insignificante	Não reportado	100-200	10-12	3	0,5 m abaixo de MSL	Não reportado
<b>Palm Beach, FL, EUA</b>	Dean et al. (1997)	Quebra-mar isolado	Erosão	Não	100 000	1260	70	4,6	3	0,7 m abaixo de MLLW	0,04
<b>Vero Beach, FL, EUA</b>	Stauble et al. (2000)	Quebra-mar segmentado	Erosão	Não	30 000	915	85	4,6	2,1-2,7	0,25 m – 0,35 m abaixo de MLLW	0,03
<b>Gold Coast, Austrália</b>	Jackson et al. (2002)	Recife artificial multifuncional para melhora do surfe	Acreção	Sim	500 000	350	100-600	2	2-10	1 m abaixo de MLW	0,02

Fonte: Adaptado de Ranasinghe e Turner, 2006.

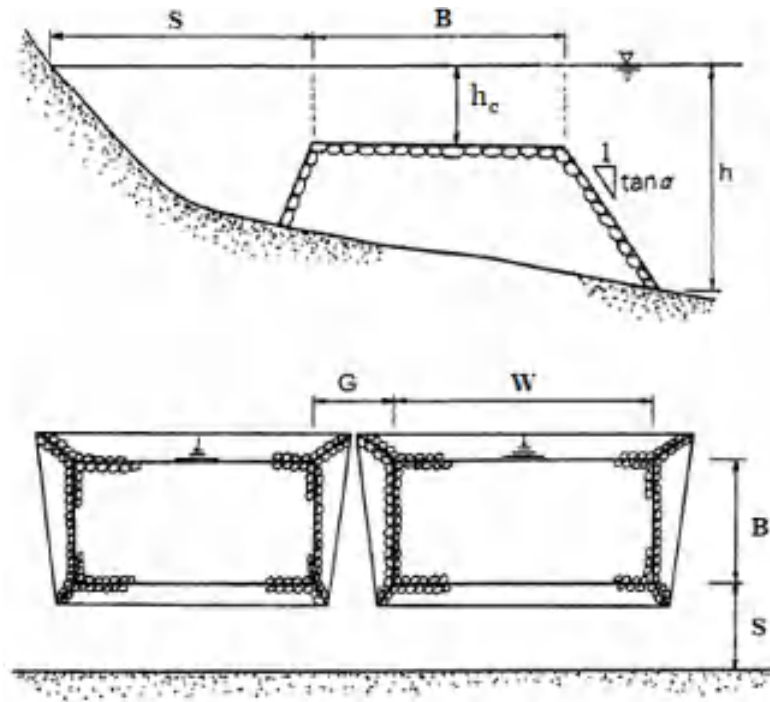


Figura 8. Ilustração das dimensões de uma estrutura submersa. ( $B$  = comprimento da obra,  $S$  = distância da linha de costa à estrutura,  $W$  = largura da crista,  $h$  = profundidade d'água na estrutura,  $h_c$  = profundidade d'água na crista da estrutura,  $G$  = largura do vão). Fonte: Adaptado de Pilarczyk, 2003.

Em sete das dez obras submersas listadas pela Tabela 1 ocorreu erosão da linha de costa como resposta morfodinâmica à presença da estrutura, ou seja, a maioria das obras submersas citadas erodiu a sotamar, contrariando as expectativas de projeto (RANASINGHE; TURNER, 2006). Além disso, nesse trabalho de revisão, os mesmos autores afirmam que há pouco monitoramento e/ou discussões a respeito dos processos que atuam na linha de costa. Podem ser citadas, por exemplo, as obras em Lido di Ostia (Itália): a obra identificada como #1 erodiu, enquanto a #2 cresceu, o que é uma diferença drástica de comportamento. Entretanto, o estudo relativo a elas não apresentou quais processos costeiros seriam responsáveis por tal diferença na resposta morfodinâmica (RANASINGHE; TURNER, 2006).

Ranasinghe e Turner (2006) ressaltam ainda que, tomando como base as análises dos protótipos listados na Tabela 1, não há sequer uma indicação sobre qual seria a relação entre o modo de resposta da linha de costa e as variáveis ambientais e estruturais mensuráveis. Portanto, os parâmetros-chave que comandam o comportamento da linha costeira ainda precisam ser evidenciados para que seja possível prever se a implantação de uma estrutura submersa causaria erosão ou acreção na região estudada.

O principal propósito de uma estrutura submersa é reduzir a carga hidráulica que chegaria à costa, de forma que a carga resultante seja suficiente para manter o equilíbrio

dinâmico da linha costeira. Tal redução é feita por meio da arrebentação das ondas e dissipação de energia sobre a estrutura (PILARCZYK, 2003).

Contudo, como já apontado anteriormente, não há um padrão de comportamento para essas obras, uma vez que elas são dependentes de diversos parâmetros e fatores locais. Isto posto, serão apresentadas a seguir três obras distintas, que tinham por objetivo principal a recuperação das praias, e não somente a proteção da linha de costa. Os três estudos têm o uso de contentores de geotêxtil como característica em comum.

A primeira obra, apresentada por Oh e Shin (2006), visava o enfrentamento da erosão da linha de costa na praia de Young-Jin, na Coreia do Sul. Os processos erosivos estavam afetando a beleza cênica e propriedades públicas, como as estradas (Figura 9), por exemplo. A região de estudo é sujeita a ataques de ondas, marés e correntes produzidas por ventos sazonais, sendo o inverno o período de erosão mais intensa, quando as alturas significativas de onda variam até 4 m.



Figura 9. Efeitos da erosão na praia de Young-Jin, na Coreia do Sul. À esquerda tem-se uma imagem da erosão da costa e à direita uma estrada costeira destruída. Fonte: Adaptado de Oh e Shin, 2006.

Segundo Oh e Shin (2006), os administradores de diversas cidades da costa leste da Coreia do Sul fizeram uso de diferentes tipos de estruturas de proteção costeira ao longo dos anos. Entretanto, a maioria desses gestores se apoiou em apenas um tipo de estrutura e material: quebra-mares compostos de peças de concreto pré-moldado, também conhecidas

como tetrápodes. Essa técnica requer fundações apropriadas para a superestrutura e também exige uso de maquinário pesado. Para contornar as dificuldades da execução de obras tradicionais, o governo local optou pelo uso de uma tecnologia mais barata e sustentável, e assim foram implementados tubos de geotêxtil na praia de Young-Jin.

A estrutura utilizada é composta por duas linhas de tubos de geotêxtil, preenchidos com areia dragada da região próxima à área de estudo, já que essa configuração se mostrou mais estável, eficaz e resistente contra os ataques de ondas no teste hidráulico realizado. O nível de referência considerado foi de 1 m abaixo da superfície da água, de forma a evitar impactos visuais ou danos à navegação, e não houve combinação com alimentação artificial (OH; SHIN, 2006). Nas figuras 10 e 11 é possível visualizar o esquema de implantação, assim como a seção transversal da obra.

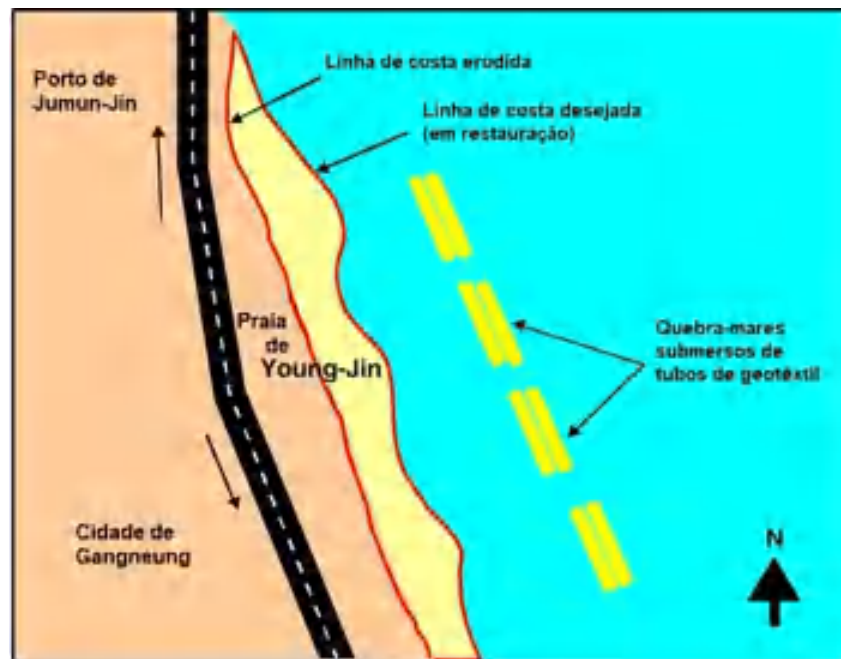


Figura 10. Planta esquemática da praia de Young-Jin (Coreia do Sul) e da implantação dos quebra-mares submersos. Fonte: Adaptado de Oh e Shin, 2006.

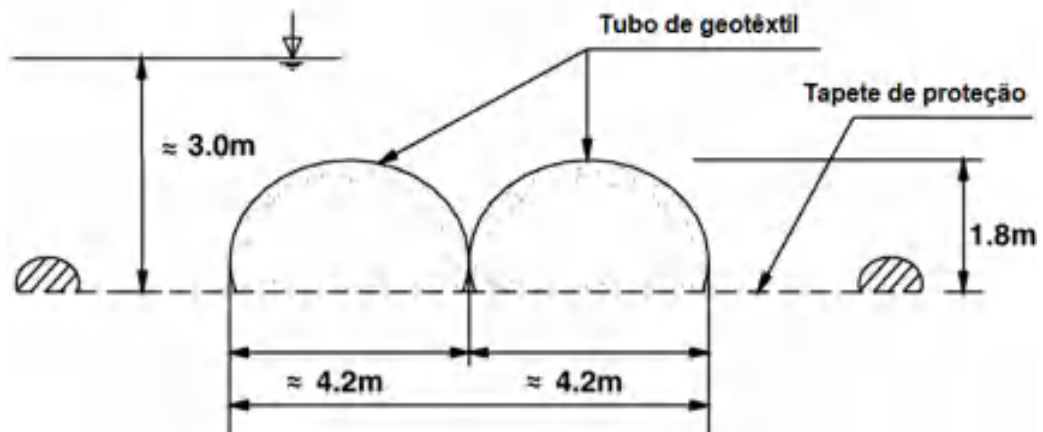


Figura 11. Seção transversal esquemática da estrutura de geotêxtil da praia de Young-Jin, Coreia do Sul. Fonte: Adaptado de Oh e Shin, 2006.

Oh e Shin (2006) apontam que houve uma re-erosão da linha de costa após três meses de implantação da obra, mas a magnitude do processo foi relativamente pequena se comparada à extensão da linha costeira. Portanto, durante os doze meses de monitoramento, pode-se dizer que o desempenho da obra foi satisfatório, gerando acúmulo de sedimentos na zona abrigada (Figura 12). Além disso, após um ano, a superfície do tubo submerso estava preenchida por algas marinhas (Figura 13), levando à conclusão de que o polímero não causaria impactos negativos na vida marinha e poderia ser ambientalmente sustentável para a biota adjacente (OH, SHIN, 2006). No entanto, considerando o período para finalização desse estudo, os autores afirmam que a análise da eficácia da instalação em longo prazo não pode ser avaliada até que mais tempo tenha se passado.



Figura 12. Acúmulo de areia gerado pelo tubo de geotêxtil. Fonte: Oh e Shin, 2006.



Figura 13. Algas marinhas na superfície do tubo de geotêxtil. Fonte: Oh e Shin, 2006.

A segunda obra, apresentada por Alvarez et al. (2007), foi realizada na costa norte de Yucatán, no México, região na qual as praias se encontram em processo erosivo permanente e que aumentou consideravelmente nos últimos quinze anos. Por meio de uma iniciativa do Ministério do Meio Ambiente de Yucatán, as autoridades federais deram início, em 2001, a um programa de restauração de praias (*Beach Rehabilitation Program*). A ideia do projeto era encontrar soluções de longo prazo que não afetassem a dinâmica natural do local, mas que resultassem no acúmulo de sedimentos e em uma praia equilibrada, considerando clima de ondas, batimetria e transporte de sedimentos.

Segundo Alvarez et al. (2007), a solução proposta consistia em quebra-mares submersos paralelos à costa, constituídos de tubos de geotêxtil preenchidos com areia dragada e bombeada de bancos *offshore*. O principal mecanismo de funcionamento seria por meio da dissipação de energia devido à arrebentação das ondas sobre a estrutura com o mínimo de reflexão (Figura 14), uma vez que este fenômeno poderia causar grandes impactos nas correntes que comandam o transporte longitudinal de sedimentos. Com a redução da energia das ondas (Figura 15), o acúmulo de areia seria induzido sem afetar a deriva litorânea, e a praia poderia alcançar seu perfil de equilíbrio sem provocar alterações consideráveis no transporte longitudinal.



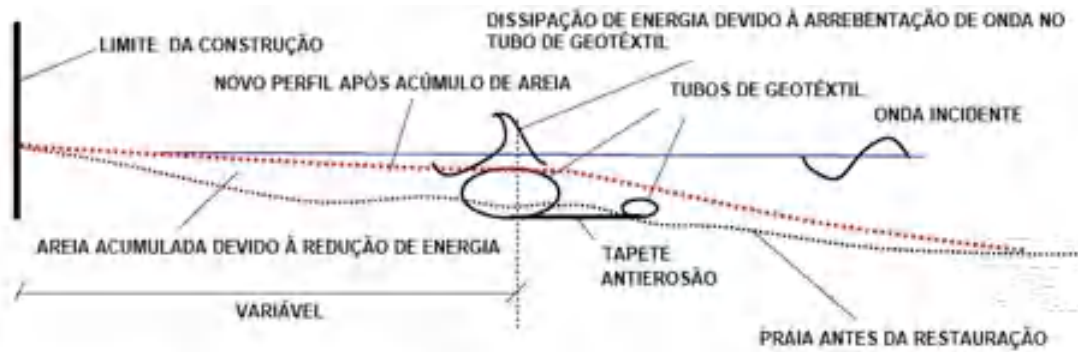


Figura 14. Seção esquemática da redução de energia de onda. Fonte: Adaptado de Alvarez et al., 2007.

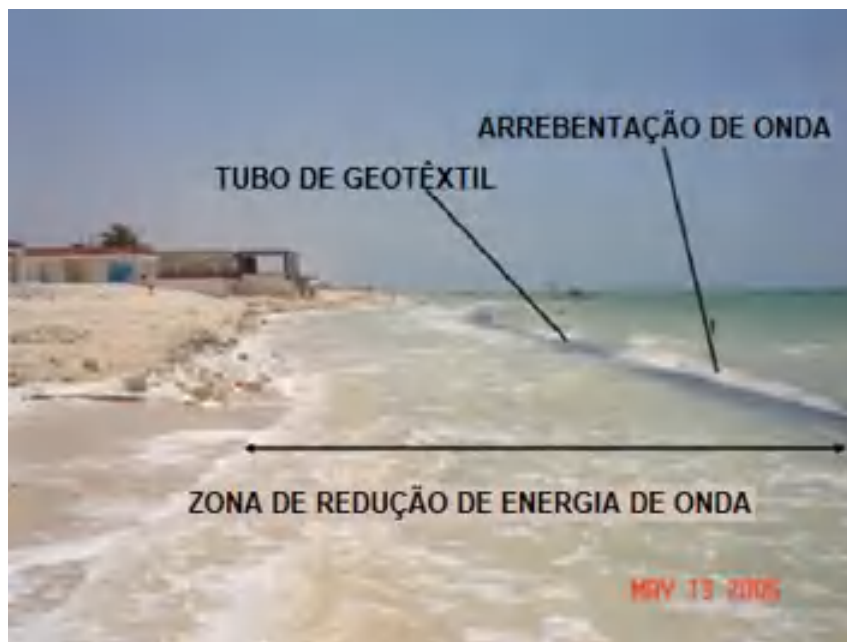


Figura 15. Tubo de geotêxtil induzindo a arrebenção de onda para a atenuação da energia. Fonte: Adaptado de Alvarez et al., 2007.

O nível de referência adotado foi a elevação média da superfície da água. Além disso, os principais parâmetros de projeto foram: altura de arrebenção da onda, período da onda, declividade do perfil batimétrico, amplitude das marés, direção resultante da corrente longitudinal, taxa de deriva litorânea e diâmetro médio do sedimento (ALVAREZ et al., 2007).

A combinação com alimentação artificial, por sua vez, ocorreu somente em trechos críticos, em regiões nas quais a praia estava bastante danificada devido à passagem de tempestades. Entretanto, não foi permitido o uso de bancos de areia *offshore* para esse procedimento, pois o sistema praiar em questão não possui fontes supridoras de sedimentos abundantes (ALVAREZ et al., 2007).

De acordo com Alvarez et al. (2007), o projeto contou ainda com dezoito meses de monitoramento desde que o primeiro tubo de geotêxtil foi instalado, isto é, a obra foi

monitorada até o mês de março de 2006. Foram consideradas duas abordagens para a avaliação do desempenho dos tubos: resposta dos processos marinhos e comportamento dos materiais geossintéticos, ambas atreladas às análises de comportamento da linha de costa e de dissipação de energia das ondas.

Alvarez et al. (2007) concluíram, então, que os tubos de geotêxtil atuando como quebra-mares submersos paralelos à costa são uma alternativa eficaz e ambientalmente amistosa para estabilização das praias. E é a transmissão das ondas sobre os tubos o principal fator que controla a resposta da linha costeira. Na Figura 16 pode-se ver o acúmulo de areia gerado pela implantação da estrutura.

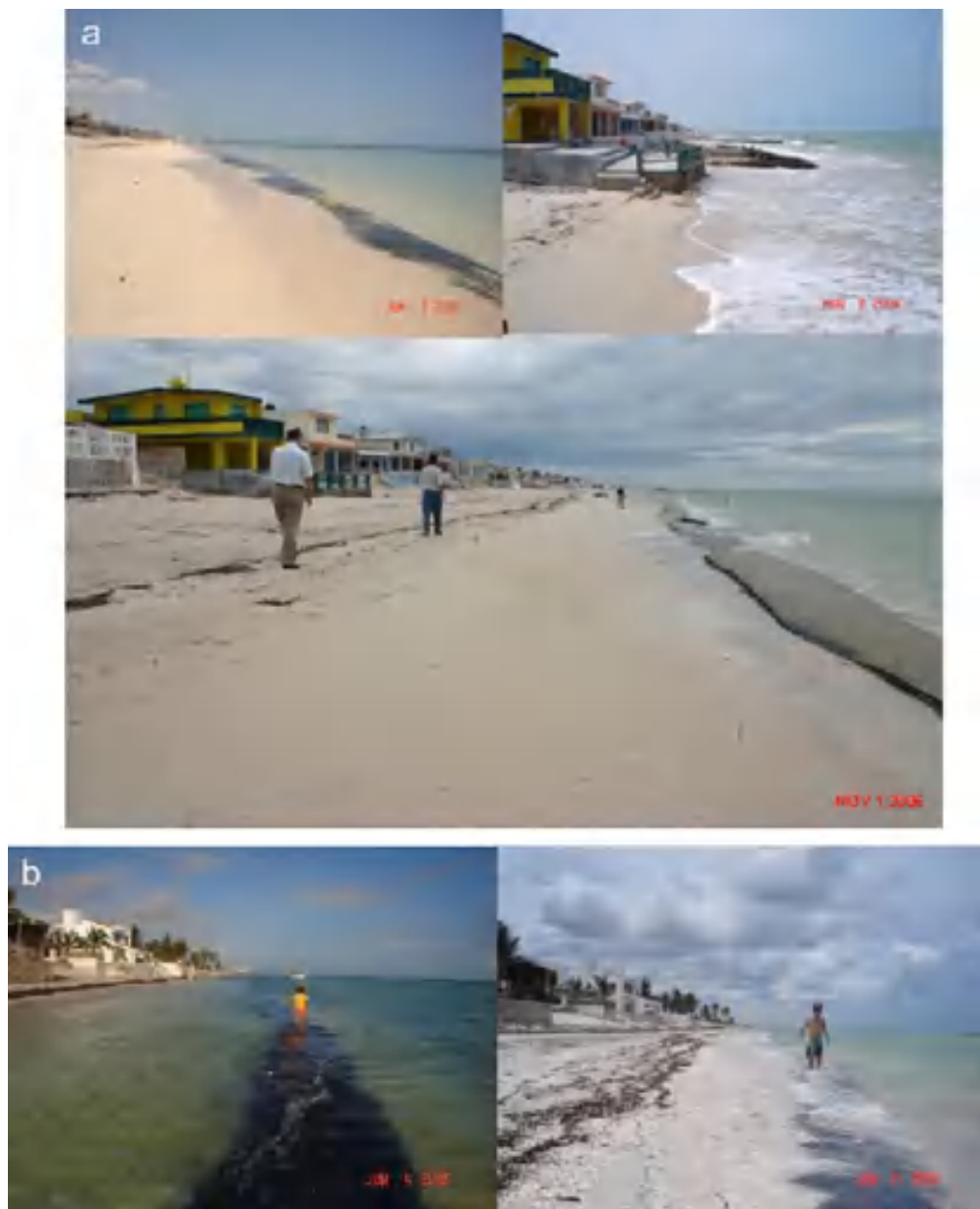


Figura 16. (a) e (b): vistas após o acúmulo de areia em direção à costa gerado pelos tubos de geotêxtil. Fonte: Alvarez et al., 2007.

Por fim, a terceira obra, apresentada por Lopez (2014), também realizada no México, está localizada na Riviera Maya, no estado de Quintana Roo. A região é altamente dependente do turismo e experimentou, sobretudo na última década, uma intensificação dos processos erosivos, o que afeta diretamente as suas praias. As principais causas apontadas foram: aumento de tempestades e furacões, aumento das atividades antrópicas e déficit no balanço sedimentar, pois a área é plana e os rios que desembocam no mar não carregam uma quantidade significativa de sedimentos.

De acordo com Lopez (2014), após o furacão Wilma, que atingiu a região em outubro de 2005, as praias foram severamente erodidas e muitos hotéis tiveram suas estruturas e instalações comprometidas. Entre eles, pode ser citado um hotel chamado Capitan Laffite que, depois da tempestade, teve uma perda de 20 m de praia e suas fundações foram encontradas submersas no mar. Dado o alto custo para sua reconstrução, o imóvel foi vendido e o novo proprietário construiu outro hotel, o Grand Velas Riviera Maya. Além disso, ele investiu em estudos hidrográficos com o propósito de criar um projeto de recuperação e estabilização da praia em frente à propriedade.

O projeto estabeleceu cinco quebra-mares de 70 m de comprimento paralelos à linha de costa, com vão de 30 m entre quatro deles e o último separado por 131 m; o material utilizado foi o “bolsacreto”, um saco impermeável estendido no assoalho marinho e preenchido com cimento. Estabeleceu-se a média das preamares como nível de referência, de forma a prover proteção sem causar grandes impactos visuais. Além disso, foi projetada uma duna artificial de 1,8 m constituída de geotubos preenchidos com areia, posicionada paralelamente ao limite da propriedade (Figura 17). A obra, finalizada em 2008, tem tido um bom desempenho, uma vez que houve acúmulo de areia ao longo da extensão da praia (LOPEZ, 2014).

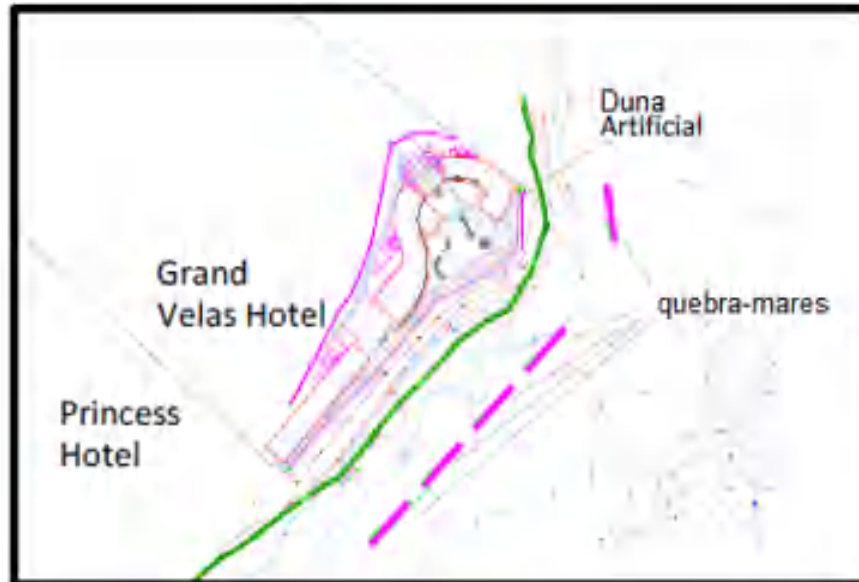


Figura 17. Projeto de proteção costeira com cinco quebra-mares e uma duna artificial. Fonte: Adaptado de Lopez, 2014.

Segundo Lopez (2014), o projeto tinha a expectativa de formação de saliências na zona de sombra dos quebra-mares. Entretanto, mesmo com uma boa resposta da linha de costa, não houve geração de nenhuma saliência bem definida (Figura 18). Em cinco anos, a linha costeira recuperou 20 m em sua melhor parte, localizada na porção central da propriedade, enquanto os demais trechos recuperaram, em média, 14 m. A duna artificial, por sua vez, também obteve bom desempenho, resultando numa aparência natural e proporcionando uma barreira eficiente em caso de tempestades extremas (Figura 19). Como a estrutura escolhida tinha como objetivo reter sedimentos provenientes do transporte longitudinal, não houve a combinação com alimentação artificial.



Figura 18. É possível notar o alargamento na praia na região em que houve a implementação dos quebra-mares, entretanto sem saliências proeminentes. Fonte: Adaptado de Lopez, 2014.



Figura 19. Vista da duna artificial em frente ao hotel. Fonte: Lopez, 2014.

Lopez (2014) concluiu, então, que os quebra-mares ajudaram na recuperação da praia, além de mantê-la estável por seis anos. A comparação entre a topografia de 2008 (após a finalização do projeto) e 2013 mostrou que o acúmulo de sedimentos gerado pelas estruturas foi de 15.867,20 m<sup>3</sup> ao longo de cinco anos. Na Figura 20 pode-se ver a progressão da largura de praia ao longo dos anos, principalmente após a implantação das obras de proteção.



Figura 20. As imagens *c*, *d*, *e* e *f* mostram que a praia protegida pelos quebra-mares é mais larga e se mantém dessa forma ao longo dos anos, mostrando que o sedimento do local é muito estável. Fonte: Lopez, 2014.

Nos estudos previamente apresentados, o uso de geotêxteis mostrou-se uma alternativa bastante promissora na construção de obras de proteção costeira, proporcionando a elas um bom desempenho no que diz respeito à recuperação das praias, conforme seus respectivos monitoramentos. Além disso, os geotêxteis foram considerados ambientalmente amigáveis devido ao baixo impacto na biota local e devido à proliferação de algas na superfície dos tecidos (OH; SHIN, 2006; ALVAREZ et al., 2007; LOPEZ, 2014). Entretanto, considerar apenas a construção das obras sem uma análise mais detalhada dos processos envolvidos pode causar falhas e prejuízos, com efeitos contrários aos esperados, como apresentaram Ranasinghe e Turner (2006). Dessa forma, a modelagem, tanto física quanto numérica, aliada a dados provenientes de monitoramentos de campo, pode ser uma ferramenta para auxiliar o desenvolvimento de projetos de proteção costeira.

### 3.2. Tipos de modelagens hidráulicas para zonas costeiras

Cálculos complexos fazem parte da rotina do engenheiro, mas o processamento manual pode exigir tempo em demasia. Desenvolveram-se, portanto, programas computacionais, notadamente para atender a demandas da indústria aeronáutica e dos programas espaciais (CHADWICK et al., 2004). Posteriormente, engenheiros de *software* passaram a elaborar programas mais sofisticados e, por volta da década de 1980, já era possível produzir simulações adequadas para uma série de problemas hidráulicos do mundo real (CHADWICK et al., 2004).

No entanto, os modelos são apenas uma ferramenta, assim como uma calculadora, ou seja, não devem ser utilizados deliberadamente de forma a ignorar os conhecimentos e habilidades de um profissional da área (MANGOR et al., 2017). Por isso, mesmo diante de um modelo de alta complexidade, é importante que o engenheiro ou cientista esteja ciente das hipóteses que fundamentam o *software* utilizado, bem como dos métodos adotados e suas limitações (CHADWICK et al., 2004; MANGOR et al. 2017).

Segundo Chadwick et al. (2004), alguns problemas podem ser tão complexos que não há como formular um modelo matemático adequado, isto é, o problema estudado não pode ser descrito matematicamente por um conjunto de equações. Torna-se então necessário o uso de estratégias alternativas, como modelos físicos em escala. Essa abordagem, porém, pode levantar algumas questões, como a ausência de uma relação evidente (geométrica, por exemplo) entre o comportamento do modelo e o comportamento de um protótipo em escala real. Portanto, se o engenheiro optar por testes baseados em modelos, ele deverá levar em conta dois problemas: i) o desenho do modelo e do procedimento experimental; e ii) a interpretação correta dos resultados.

Desse modo, as modelagens hidráulicas podem ser divididas, de forma geral, em três categorias:

- a) Modelagem física;
- b) Modelagem matemática ou analítica;
- c) Modelagem computacional ou numérica.

A modelagem física é uma técnica consolidada no âmbito das pesquisas hidráulicas, pois possibilita uma conexão entre processos reproduzidos fielmente por modelos numéricos e situações reais. Além disso, modelos físicos podem ser fontes confiáveis de dados para a validação e calibração de modelos numéricos, cuja eficiência está diretamente

relacionada às suposições adotadas e à qualidade das informações que os embasam (FROSTICK et al., 2011).

Como mencionado, a utilização de modelos físicos é uma alternativa diante de fenômenos muito complexos, uma vez que permite a percepção de eventos que ainda não foram descritos ou que são inacessíveis para a modelagem numérica, além de fornecer um *feedback* visual imediato. A modelagem física pode também integrar forçantes resultantes de processos físicos de forma não simplificada, enquanto os modelos numéricos e analíticos tendem a simplificar suposições em razão de suas limitações de processamento (FROSTICK et al., 2011).

Entretanto, é importante ressaltar algumas desvantagens do modelo físico, principalmente no que concerne à limitação espacial. Uma vez que o espaço disponível não é grande o suficiente, alguns fenômenos devem passar por uma redução de escala em relação ao sistema natural, o que resulta muitas vezes no chamado “efeito de escala”. Isso ocorre quando os modelos físicos são menores que os protótipos, o que não permite a simulação de todas as variáveis relevantes e, desse modo, interfere na relação correta entre as variáveis (FROSTICK et al., 2011). Em outras palavras, os modelos físicos em escala não conseguem replicar de forma simultânea e na proporção correta todos os processos físicos presentes no protótipo, o que gera o efeito de escala (CHADWICK et al., 2004). Um resumo das vantagens e desvantagens do uso de modelos físicos pode ser visto na Tabela 2.



Tabela 2 – Vantagens e desvantagens do uso de modelos físicos.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Permite a percepção de fenômenos ainda não descritos ou compreendidos.	O efeito de escala ocorre em modelos reduzidos.
Integra os processos físicos governantes sem simplificar suposições (o que ocorre em modelos analíticos e computacionais).	Não é possível simular todas as variáveis relevantes de forma que elas se inter-relacionem corretamente.
Pode ser utilizado para obter medições que verificam ou refutam resultados teóricos.	Efeitos de laboratório induzido pelos limites do modelo e por condições forçantes irreais podem influenciar o processo a ser simulado.
Pode ser utilizado para obter medições para fenômenos que são tão complexos que ainda não foi desenvolvida uma abordagem teórica.	As instalações variam bastante e são dispendiosas para implantação e manutenção. O recurso correto a ser adotado pode não estar disponível.
Pode ser utilizado para obter medições para condições extremas não medidas em campo.	
Permite um alto grau de controle experimental, o que propicia a simulação de condições ambientais raras ou até mesmo variadas, ficando a critério do pesquisador.	
Fornecer um <i>feedback</i> visual do modelo: O modelo físico propicia uma impressão qualitativa imediata dos processos físicos que, por sua vez, podem colaborar para definição de um foco de estudo, reduzindo os testes planejados.	

Fonte: Adaptado de Frostick et al., 2011.

A despeito das diversas vantagens associadas ao uso de modelagem física, as dimensões espaciais para instalações de modelos físicos costeiros pode ser uma limitação relevante. Segundo Frostick et al. (2011), a modelagem da resposta de ondas a quebra-mares, por exemplo, requer modelos em escalas de 1:10 ou 1:100, o que demanda grandes áreas e equipamentos.

A modelagem matemática ou analítica, por sua vez, tem como ponto de partida um conjunto de equações que descreve matematicamente o comportamento de um fluido. Esses equacionamentos são, normalmente, compostos por equações diferenciais parciais ou por integrais. Uma vantagem desse tipo de abordagem é a disponibilidade imediata do modelo matemático, isto é, o engenheiro pode acessá-lo de onde estiver (CHADWICK et al., 2004).

Para o caso de zonas costeiras, podem ser citadas algumas relações matemáticas clássicas, como a equação do perfil de equilíbrio praiial, desenvolvida por Dean (1977) com base na proposta de Bruun (1954). Têm-se também os equacionamentos de Hallermeier (1978; 1981) para a definição da profundidade de fechamento.

Entretanto, alguns problemas complexos ainda são um desafio para a análise puramente teórica, sobretudo quando são considerados fluidos em situações bi ou tridimensionais, a exemplo de estuários de geometria complexa e rios (CHADWICK et al., 2004). Para casos como esse, portanto, pode-se adotar o uso de modelos computacionais.

Os modelos numéricos ou computacionais são desenvolvidos a partir dos modelos matemáticos e servem de base para a criação de novos *softwares*. O modelo numérico possibilita que um computador realize os diversos cálculos repetitivos que serão responsáveis por gerar soluções para inúmeros pontos discretizados no espaço e no tempo (CHADWICK et al., 2004).

Para definir um modelo numérico, pode-se resumir as etapas básicas da seguinte forma:

1. Definir a natureza do problema.
2. Reduzir o problema a alguma forma matemática adequada (as equações que compõem o modelo matemático).
3. Fazer todas as simplificações possíveis consistentes com a devida modelagem (o que implica raciocínio crítico sobre a importância relativa de cada aspecto do problema).
4. Substituir as equações simplificadas por sistemas de equações de diferenças finitas ou outros sistemas finitos.
5. Estabelecer uma representação do domínio (normalmente, alguma forma de uma “grade”) no tempo e no espaço.
6. Definir os limites do domínio e as condições (de escoamento etc.) nesses limites (“condições de contorno”). (CHADWICK et al., 2017, p. 384).

A precisão dos modelos computacionais, portanto, está diretamente relacionada às condições de contorno, aos parâmetros do modelo e ao esquema numérico adotado. Além disso, a experiência do engenheiro com relação aos processos abrangidos é essencial, uma vez que os modelos numéricos são ferramentas que envolvem determinadas premissas e/ou limitações acerca de seu funcionamento (CHAU, 2010).

Considerando as aplicações costeiras, notadamente a modelagem de ondas, Chadwick et al. (2017) afirmam que os modelos possuem limitações inerentes (em geral ressaltadas em seus manuais), dificultando a simulação simultânea de todos os processos, ainda que diversos modelos tenham sido desenvolvidos nas últimas décadas. Jackson et al. (2002) também relatam que as respostas dadas pelas modelagens são resultados médios para

uma quantidade limitada de casos e não representam totalmente a ampla variedade de perfis de ondas e dinâmica sedimentar que podem ocorrer na área de estudo.

Por fim, para desenvolver uma modelagem computacional adequada para zonas costeiras é necessário compreender os fenômenos de transformação das ondas, já que as ondas geradas em águas profundas estão sujeitas a diversos processos físicos complexos ao se aproximarem de águas rasas. Segundo Sharif Ahmadian (2016), o modelo ideal deveria ser capaz de simular a ampla gama de fenômenos relacionados à transformação das ondas como empolamento, refração, difração, geração de ondas pelo vento, dissipação da energia de onda devido à arrebentação ou fricção de fundo etc. Entretanto, seria extremamente difícil ter um modelo numérico 3D completo que reproduza todos os fenômenos. Dessa forma, cabe ao pesquisador ou engenheiro escolher o modelo computacional que melhor atenda às suas necessidades.

### **3.3. Tipos de modelagem computacional para quebra-mares submersos de proteção costeira**

O uso de estruturas costeiras como molhes, espigões, diques, quebra-mares emersos e muros de praia é comum na engenharia. Essas estruturas são projetadas para controlar correntes longitudinais e a energia das ondas (geradas na zona *offshore*) que atingem a costa. Tal controle tem o objetivo de reduzir a erosão costeira ou aprisionar os sedimentos provenientes do transporte longitudinal (PRASETYA, 2007). Contudo, como apresentado no item 3.1, essas obras geralmente possuem dimensões massivas que resultam em diversos impactos ambientais e visuais.

Os quebra-mares submersos, por sua vez, passaram a ganhar destaque como opção de proteção costeira, principalmente em regiões litorâneas voltadas para lazer e habitação, já que possuem impactos visuais e ambientais reduzidos em comparação às obras tradicionais. Além disso, os quebra-mares submersos são apropriados para todos os tipos de linha de costa (SHARIF AHMADIAN, 2016).

Somando esse cenário ao fato de que a aplicação bem sucedida de quebra-mares submersos está diretamente relacionada à qualidade do projeto, principalmente no que concerne a um desenho preciso e eficaz (SHARIF AHMADIAN, 2016), este item faz uma breve apresentação de alguns tipos de modelagem computacional para tais estruturas.

Conforme abordado no item 3.2, é essencial que se tenha uma compreensão ampla do domínio do problema estudado, bem como uma representação teórica adequada dos

processos físicos. Somente assim será possível definir o modelo numérico mais apropriado para obtenção de resultados precisos e razoáveis.

As modelagens podem ser categorizadas de acordo com diversos parâmetros. Utilizando as dimensões espaciais, os modelos são classificados em: unidirecional, bidimensional, tridimensional parcial e tridimensional completo. A resolução dos sistemas de equacionamento envolvidos em cada tipo de modelo e fornecimento de soluções numéricas adequadas requer técnicas de discretização, tais como: método das diferenças finitas, método dos elementos finitos, método dos volumes finitos, método de elementos de contorno, método dos elementos espectrais, esquemas de discretização de alta resolução etc. (SHARIF AHMADIAN, 2016; MANGOR et al., 2017; TOGNATO, 2020).

Os modelos numéricos de ondas, por sua vez, podem ser classificados em duas categorias principais: modelos de resolução das fases de cada componente da onda (*phase-resolving models*) e modelos de resolução da fase média dos componentes das ondas (*phase-averaged models*). O primeiro tipo é de limitada aplicação, sendo adequado apenas a pequenas regiões, devido ao grande gasto computacional, a exemplo dos modelos de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) como o FLOW-3D®. Já o segundo tipo pode ser utilizado para áreas maiores e abrange os modelos espectrais (SHARIF AHMADIAN, 2016; TOGNATO, 2020).

Atualmente há uma infinidade de técnicas, modelos numéricos e programas computacionais que podem ser aplicados para resolver problemas de engenharia costeira, sobretudo em relação a estruturas submersas ou a outros tipos de obras costeiras (SHARIF AHMADIAN, 2016; MANGOR et. al, 2017). No entanto, o foco desta revisão narrativa é apresentar brevemente os modelos de ondas mais empregados, principalmente no que concerne a suas equações, aplicabilidades, principais recursos e limitações. Os modelos de propagação de onda aqui abordados serão, portanto, modelos espectrais (*spectral models*), modelos de Boussinesq e modelos de ondas em declive suave (*mild-slope equations models*).

Os modelos espectrais de onda podem ser aplicados para uma ampla variedade de problemas, desde águas profundas a águas rasas. São capazes de simular a propagação e transformação, em águas costeiras, de ondas do tipo aleatórias, geradas pelo vento ou de crista curtas (*short-crested*). O modelo espectral considera, para as ondas do mar, uma infinidade de ondas lineares, nas quais cada componente possui seus próprios parâmetros como amplitude de onda, direção e frequência. Além disso, pode prever espectros de ondas, altura de onda significativa, direção média de onda, período médio, tensão de radiação e movimentação de fundo (SHARIF AHMADIAN, 2016).

Embora estejam aptos para simular diferentes processos costeiros – interações não lineares entre ondas, empolamento, refração, arrebentação induzida por profundidade etc. –, os modelos espectrais não são apropriados para regiões próximas (*near-field*) de estruturas com inclinação acentuada onde os efeitos de difração são relevantes. O uso mais adequado se dá para grandes escalas, águas profundas e regiões de campo distante (*far-field*) (SHARIF AHMADIAN, 2016).

Para regiões mais próximas da costa, é mais pertinente o uso dos modelos de Boussinesq. As equações utilizam médias das profundidades e são inicialmente restritas a águas intermediárias e rasas. A aplicação é limitada em regiões onde há, por exemplo, variação brusca de batimetria ou arrebentação de ondas, gerando resultados menos precisos. Entretanto, diversos pesquisadores têm aprimorado as equações de Boussinesq na tentativa de superar suas limitações, de forma que sua modificação permita a simulação da propagação de ondas superficiais de águas intermediárias para águas rasas (a razão entre profundidade e comprimento de onda é de aproximadamente 0,5), assim como a simulação da interação entre ondas e correntes (LIU, 1995; SHARIF AHMADIAN, 2016).

Por fim, os modelos de ondas em declive suave (*mild-slope equations models – MSE*) são utilizados para ondas lineares tanto em águas profundas quanto águas rasas. Têm por base ondas lineares e profundidades de variação lenta com limites laterais, sendo adequados para o cálculo de campo de ondas levando em conta os efeitos de difração de ondas da zona *offshore* para a zona litorânea (SHARIF AHMADIAN, 2016).

As equações de declive suave foram inicialmente desenvolvidas para propagação de ondas em fundos levemente inclinados, combinando sobretudo os efeitos de difração, refração e empolamento em um único modelo consistente. Elas calculam, então, as amplitudes de velocidade da onda e do fluxo. Ademais, um recurso útil desse tipo de equacionamento é a consideração correta do perfil vertical de velocidades, baseando-se na teoria linear de ondas (LIU, 1995; SHARIF AHMADIAN, 2016).

Há, porém, alguns fatores limitantes: o equacionamento do MSE só pode ser aplicado para problemas lineares, nos quais não há interação entre ondas; e a dissipação de energia devido à arrebentação de ondas ou atrito de fundo não está inclusa nesse modelo. Portanto, especialmente para casos de quebra-mares submersos, a aplicação deve ser cuidadosa, e o equacionamento deve ser modificado para incluir os fenômenos de arrebentação de ondas, atrito de fundo e variações bruscas e rápidas de topografia (SHARIF AHMADIAN, 2016).

Conforme mencionado, há diversos *softwares* disponíveis no mercado atualmente. Alguns podem ser vistos como “pacote de módulos”, como é o caso do Mike 21 e do Delft3D, capazes de atender uma ampla variedade de problemas em ambientes costeiros e marinhos.

O Mike 21 é uma ferramenta de modelagem numérica bidimensional (2D) desenvolvida pelo Danish Hydraulic Institute (DHI) e possui diversos módulos que podem ser integrados para resolver problemas envolvendo ondas, correntes, transporte de sedimentos, mudanças morfológicas etc. (SHARIF AHMADIAN, 2016; DHI, 2017a?). Com relação à modelagem de ondas, há dois módulos disponíveis: Spectral Waves (SW) e Boussinesq Waves (BW).

O equacionamento espectral completo do Mike 21 SW fundamenta-se na conservação da ação das ondas, sendo a frequência direcional do espectro de ondas sua variável dependente. Esse módulo, porém, não faz o cálculo dos fenômenos de difração e reflexão. Para esses casos, o Mike 21 BW se mostra mais adequado, uma vez que é baseado na solução numérica das formulações no domínio do tempo das equações de Boussinesq, podendo cobrir áreas complexas nas quais os modelos espectrais (*phase-averaged*) podem ser insuficientes. As equações de Boussinesq são particularmente benéficas para os casos em que os efeitos de difração e reflexão de ondas são relevantes, mas são de uso restrito quando se trata de variações bruscas de profundidade, como ocorre em zonas estuarinas (DHI, 2017b; 2017c; SHARIF AHMADIAN, 2016).

O Delft3D, desenvolvido pela Deltares, é uma ferramenta que permite modelagens bi e tridimensionais, viabilizando a simulação de ondas geradas pelo vento de crista curta, correntes, transporte de sedimentos, portos, estruturas costeiras etc. (DELTAIRES, 2018?). O módulo de ondas do Delft3D, conhecido como SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) e desenvolvido pela Delft University of Technology, é um modelo que resolve a fase média dos componentes da onda (*phase-averaged model*). Assim como o Mike 21 SW, o SWAN é um módulo espectral completo que pode prever altura significativa de onda, período médio e direção da onda, tensão de radiação e espectro direcional (SHARIF AHMADIAN, 2016).

Para fins exemplificativos, a Tabela 3 apresenta alguns estudos de quebra-mares que utilizaram *softwares* de modelagem numérica. Foram sumarizadas informações sobre o modelo adotado, os resultados obtidos, e os tipos de obras e ondas considerados. É importante ressaltar que há uma ampla variedade de ferramentas de modelagem numérica com funções bastante similares. Desse modo, a escolha do modelo mais adequado para o estudo em

questão deve ser pautada pelos objetivos a serem alcançados por meio das simulações, bem como pelo conhecimento da região de interesse e pelos processos presentes.

Tabela 3 – Estudos de quebra-mares que utilizaram modelagem numérica ou matemática.

Referência	Modelo	Saídas ( <i>Outputs</i> )	Tipo de quebra-mar	Ondas
<b>Van der Biezen et al. (1998)</b>	Delft3D, desenvolvido pela Delft Hydraulics, um módulo de resolução de fase [ <i>phase-resolving</i> ], baseado nas equações de águas rasas não lineares	Velocidades no plano horizontal e elevação da superfície livre	Quebra-mar de enrocamento com núcleo impermeável, inclinação de 2:3 em ambos os lados	Ondas regulares e com incidência de 90° na praia
<b>Johnson et al. (2005)</b>	Método de resolução de fase média [ <i>phase-averaged</i> ] (profundidade média 2D ou <i>quasi</i> -3D) e um método de resolução de fase [ <i>phase-resolving</i> ] (modelo tipo 2DH-Boussinesq)	Onda e campo de corrente	Quebra-mar submerso	Ondas regulares e irregulares
<b>Johnson (2006)</b>	MIKE 21 PMS – modelo de refração/difração baseado na aproximação parabólica da equação de inclinação suave (MSE)	Elevação da superfície da água	Quebra-mar submerso	Ondas regulares e irregulares
<b>Zanuttigh e Martinelli (2008)</b>	Modelo conceitual	Energia de transmissão ( $K_t$ e espectro de ondas)	Estruturas emersas permeáveis e de crista baixa	Ondas regulares e irregulares
<b>Zanuttigh e Martinelli (2008)</b>	MIKE 21 modelo 2DH	Descargas de galgamento	Quebra-mares destacados com presença de vão, estruturas emersas e submersas na cota zero	Ondas regulares e irregulares
<b>Vicinanza et al. (2009)</b>	Modelo matemático	Transmissão de onda	Quebra-mar isolado e destacado com crista baixa e comprimento finito	Ondas regulares e irregulares
<b>Maiolo et al. (2020)</b>	Modelo acoplado Mike 21/3 FM (módulo hidrodinâmico HD + módulo de ondas espectrais SW)	Altura significativa de onda, mudança do nível de fundo e fluxo de sedimentos	Quebra-mar submerso	Ondas regulares
<b>Vieira et al. (2020)</b>	SWAN e XBeach	Altura significativa de onda, direção média, altura de onda média (RMS) e estimativa de erosão/acrecção	Quebra-mar destacado emerso, quebra-mar destacado submerso e recife artificial multifuncional	Ondas irregulares

Fonte: Adaptado de Sharif Ahmadian, 2016.



## 4. ÁREA DE ESTUDO

### 4.1. Santos: Caracterização física das praias

As praias de Santos são compostas por areia fina e podem ser classificadas como dissipativas e de baixa energia, mas oscilam entre os estágios intermediários da classificação morfodinâmica estabelecida por Wright e Short (1983) (SOUZA et al., 2012). Na Baía de Santos, o grão tem diâmetro médio ( $d_{50}$ ) de 0,11 mm e  $d_{90}$  equivalente a 0,12 mm (SONDOTÉCNICA, 1977). Em 2014, a equipe da FECFAU-UNICAMP coletou amostras de sedimentos da região pós-praia próxima à ponta da praia, obtendo um  $d_{50}$  correspondente a 0,125 mm e a curva granulométrica apresentada na Figura 21.

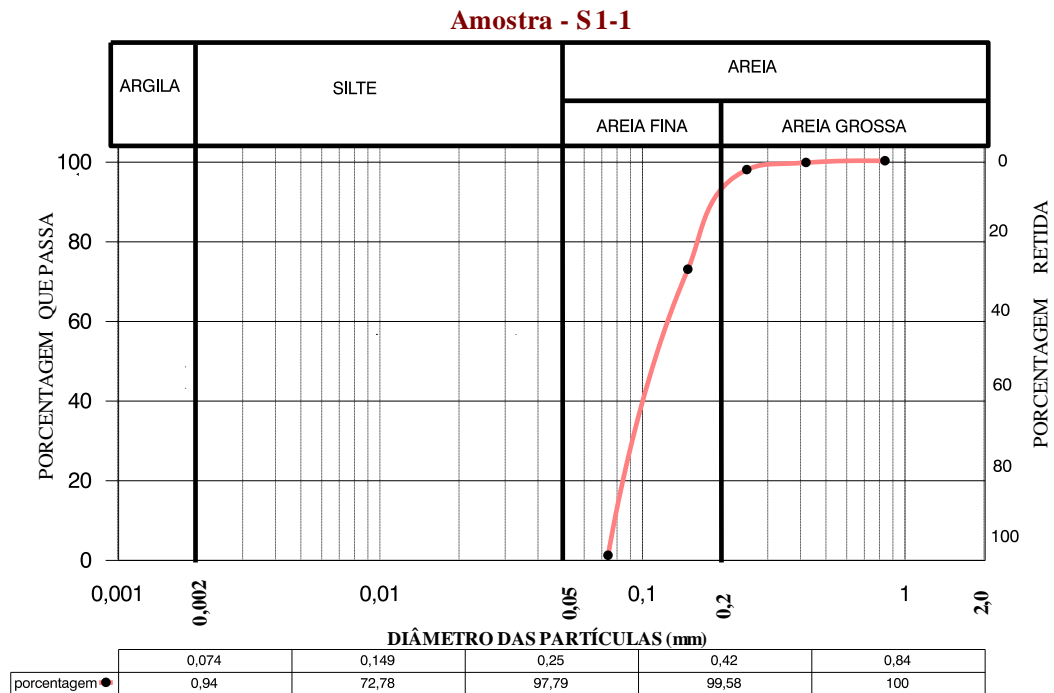


Figura 21. Granulometria dos sedimentos coletados no pós-praia na região da Ponta da Praia pela equipe da FECFAU-UNICAMP no ano de 2014. Fonte: Elaborada pela autora.

A atuação das ondas de maré que se propagam ao longo dos estuários de Santos e São Vicente é responsável, de forma geral, por definir a circulação hidrodinâmica na zona costeira santista (ROVERSI et al., 2016b; VENANCIO et al., 2020). Os níveis da maré astronômica variam entre 0,27 m (MHLW – média as baixa-mares de sizígia) e 1,4 m (MHHW – média das preamares de sizígia) (MARMIL, 2015a; 2015b). Além disso, a região está sujeita a efeitos meteorológicos que se somam aos efeitos astronômicos e podem causar alterações na elevação das marés de até  $\pm 0,5$  m, uma estimativa calculada a partir da diferença

entre a previsão astronômica e as medidas reais de um marégrafo local (SONDOTÉCNICA, 1977).

Na costa sudeste do Brasil, são raros os registros de dados de onda; quando existem, estão geralmente associados à implementação de grandes projetos em áreas costeiras (MUEHE, 2018). Entretanto, o Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH) fez medições contínuas de ondas na baía de Santos entre os anos de 1972 e 1973, apresentadas em Brasil (1974). Décadas depois, Garcia et al. (2002) analisaram as alturas significativas de ondas e chegaram à conclusão de que as ondas mais frequentes variavam entre 0,6 m a 1,2 m de altura. Esse registro obteve a medida de 2,9 m para a maior altura significativa de onda. Por fim, as ondas vieram mais frequentemente da direção sudeste, apesar das ondas mais energéticas serem provenientes da direção sul.

FUNDESPA (2013a), por outro lado, utilizou um ondógrafo para medir a altura de onda no meio da baía de Santos durante eventos de ressaca entre 2006 e 2012. Nesse registro, há uma onda bastante energética identificada como evento 51 (ocorrido em 21 de agosto de 2006), assim como o registro de vento e que contam com as características apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados de onda e vento considerados na modelagem.

Evento	Dados de Onda				Dados de Vento			
	Data	Hs (m)	T (s)	Direção	Ângulo (°)	n° evento	V (m/s)	direção (°)
	21/08/2006	3,52	11	Sul	180	51	5	230

Fonte: Venancio, 2018.

#### 4.2. Santos: Breve histórico da região, erosão costeira e estudos existentes

O município de Santos ocupa uma posição de destaque entre as nove cidades pertencentes à Região Metropolitana da Baixada Santista, uma vez que abriga o Porto de Santos, maior complexo portuário da América Latina. Segundo o relatório mais recente da análise do movimento físico do porto, compilado pela Companhia de Docas do Estado de São Paulo (CODESP, 2018), a atividade econômica em Santos representou 28% da balança comercial brasileira em 2017, o que corresponde à movimentação de 103,3 bilhões de dólares. A soma da influência dos outros cinco maiores portos brasileiros no mesmo período, correspondente a 100,1 bilhões de dólares movimentados, não supera a participação do porto santista.

A relevância de Santos não se restringe ao impacto econômico: deve-se considerar também seus sete quilômetros de costa, dos quais diversos trechos estão sob acentuada erosão. Por ser uma das cidades mais antigas do Brasil, fundada em 1546 (IBGE, 2017), a região sofreu diversas modificações ao longo dos anos. As mudanças na linha de costa estão relacionadas principalmente à intensa atividade antropogênica, responsável por interferir no transporte sedimentar e modificar a hidromorfodinâmica local (FUNDESPA, 2010; TESSLER et al., 2006;). Há diversos estudos que englobam as praias de Santos e suas dinâmicas, como os apresentados por FUNDESPA (2010, 2011, 2013b e 2014), Souza (2009) e Souza et al. (2012). A Figura 22 e a Tabela 5 localizam e listam, respectivamente, algumas das principais intervenções da costa da baixada santista.

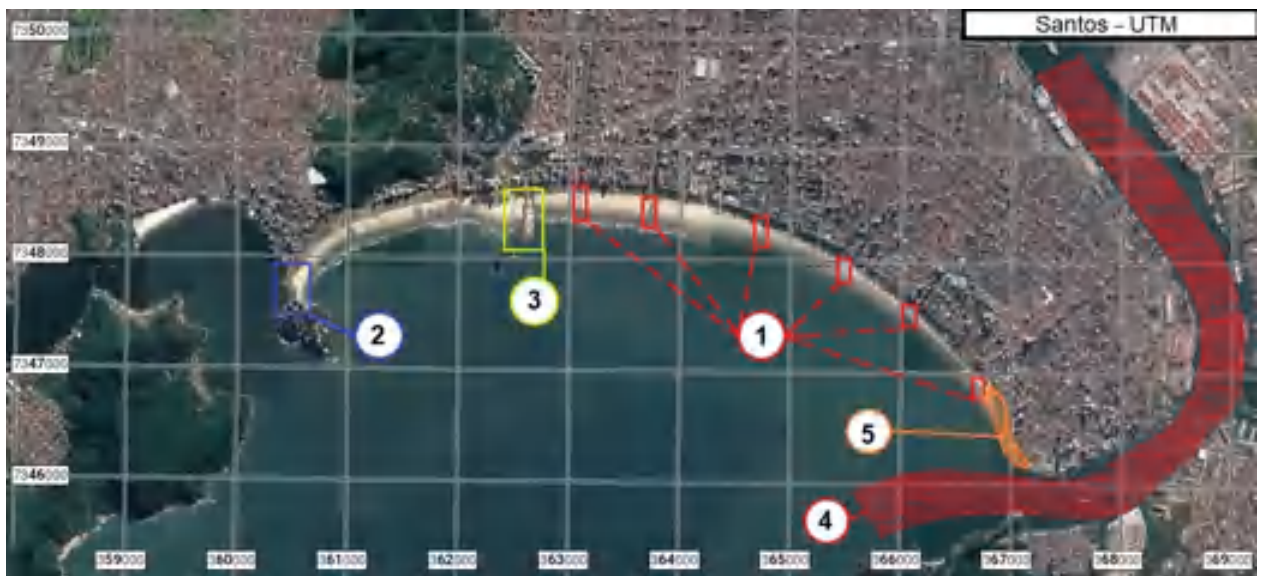


Figura 22. Localização das intervenções na região da Baixada Santista. 1: canais de drenagem do 1 ao 6 (da esquerda para a direita); 2: tômbolo da Ilha Porchat; 3: enraizamento do Emissário Submarino; 4: canal de acesso ao Porto de Santos; 5: muros de praia, enrocamentos e muretas na região da Ponta da Praia. Fonte: Venancio, 2018.

Tabela 5 – Resumo das intervenções antrópicas na orla de Santos.

<b>Intervenção</b>	<b>Período</b>
<b>Canais de Drenagem Pluvial</b>	1905 a 1927
<b>Sinais da presença da avenida da praia (composta de areia)</b>	1921
<b>Jardins de Orla (Canais 2 e 3)</b>	1935 a 1939
<b>Inauguração do Aquário Municipal</b>	1945
<b>Aterramento tómbolo Ilha Porchat</b>	1946
<b>Inauguração do Emissário Submarino</b>	1978
<b>Alargamento da avenida da praia entre os canais 4 e 5 (pavimentada)</b>	Início da década de 1980
<b>Expansão do Aquário Municipal</b>	2006
<b>Expansão do Emissário Submarino e Inauguração do Parque Roberto Mário Santini</b>	2009
<b>Atividades de dragagem de aprofundamento e alargamento do canal do porto</b>	2010

Fonte: Venancio, 2018.

A análise de dados de campo da área entre o Canal 5 e a Ponta da Praia, combinada com imagens de satélite relativas ao período de 2009 a 2017, gerou resultados que indicaram a intensificação da erosão na linha de costa a partir de 2010, mesmo ano em que as atividades de dragagem para expansão do Porto de Santos foram iniciadas (VENANCIO et al., 2017). Além disso, a primeira década de 2000 também foi marcada por uma alta incidência de ressacas, computando um total de 61 eventos (FUNDESPA, 2013a; SOUZA et al., 2013; SOUZA et al., 2019). Entretanto, foi o estudo de Venancio et. al (2020) que analisou isoladamente, a partir da modelagem numérica com uso de cenários, os impactos da dragagem nos processos erosivos da região. Tal estudo comprovou que as atividades de dragagem contribuíram para a intensificação dos processos erosivos.

Os fenômenos e fatores aos quais a região da Ponta da Praia é suscetível podem ser sintetizados em: influência hidrodinâmica da embocadura do estuário Santista, ação de correntes de maré, incidência direta de ondas e presença de estruturas rígidas provenientes da obra humana, como os muros de praia, por exemplo (FUNDESPA, 2010; ROVERSI et al., 2016b; VENANCIO, 2018).

A concomitância de diversos fenômenos e fatores resulta em uma dinâmica complexa, o que torna impraticável a modelagem numérica de todas as condições de campo.

Sendo assim, os estudos são moldados conforme seus objetivos e principais variáveis. De acordo com Venancio (2018), há diversos estudos utilizando modelos computacionais envolvendo a Baixada Santista (alguns sumarizados na Tabela 6). Entretanto, os objetos de estudo estavam atrelados ao Sistema Estuarino Santista ou ao Emissário Submarino, além de adotar o uso de escalas macro.

Tabela 6 – Tipos de estudos existentes que englobam a região da Baixada Santista.

<b>Tipos de estudo</b>	<b>Conduzido por</b>	<b>Área de interesse</b>	<b>Modelos numéricos adotados</b>
<b>Propagação das ondas de maré</b>	Harari e Camargo em 1998 (apud Baptistelli, 2008)	Região da Baixada Santista	POM
<b>Hidrodinâmico, dinâmica sedimentar e ondas</b>	CODESP em 2002 (apud Baptistelli, 2008)	Região da Baixada Santista	MOHID
<b>Padrões de circulação e transporte</b>	SABESP em 2006 (apud Baptistelli, 2008)	Região oceânica próxima à Baía de Santos e Praia Grande	POM (Princeton Ocean Model)
<b>Dispersão de efluentes</b>	Baptistelli (2008)	Baixada Santista com ênfase no sistema de estuários de Santos/São Vicente	Delft3D, Mike 21 e POM
<b>Monitoramento praias</b>	Souza (2009), FUNDESPA (2010, 2011 e 2013b), Porto de Santos (2017)	Praias de Santos	Não se aplica
<b>Escoamento do estuário</b>	Harari e Camargo (2003), IME (2008), Roversi et al. (2016b) e Souza (2017)	Sistema estuarino santista	Mike 21, POM e SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental),
<b>Hidrodinâmico, ondas e transporte de sedimentos</b>	FCTH (2017)	Canal de acesso do Porto de Santos	Delft 3D e SWAN

Fonte: Elaborada pela autora.

#### **4.3. Santos: Estudos recentes e o projeto-piloto**

Estudos mais recentes como os de Gireli et al. (2017), Gireli et al. (2018) e Alfredini et al. (2018) apresentaram propostas para solucionar o problema de manutenção da profundidade na embocadura do Canal do Porto de Santos por meio de estruturas rígidas, a exemplo do uso de molhes guia-corrente (Figura 23).

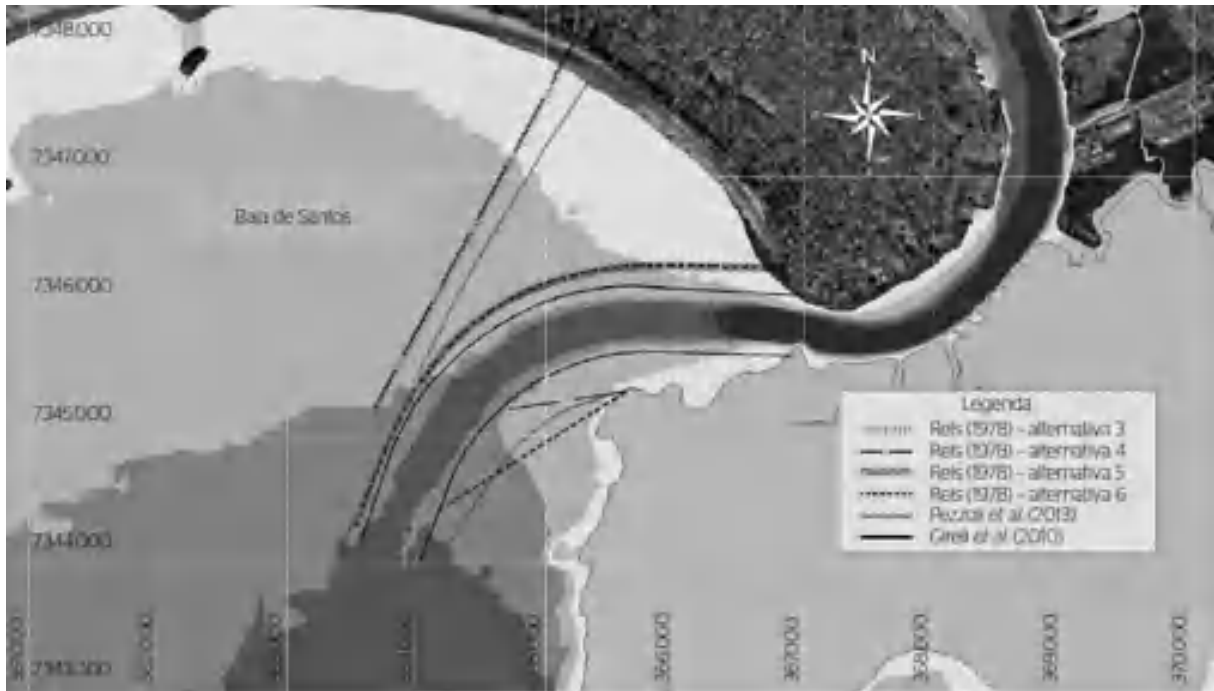


Figura 23. Propostas de molhes guia-corrente estudadas para o Porto de Santos. Fonte: Gireli et al., 2018.

O estudo de Gireli et al. (2017) avaliou o desempenho das obras propostas para a manutenção de profundidade do canal do Porto de Santos. Utilizando modelagem numérica, os autores puderam analisar variações de profundidade, dispersão de efluentes e velocidade de corrente. O principal objetivo dessas investigações era encontrar meios economicamente viáveis para otimizar o funcionamento do porto, mas não avaliaram os possíveis impactos nas praias adjacentes.

Visando complementar o estudo anterior, Gireli et al. (2018) fez uso de modelagem física para também avaliar o desempenho de molhes guia-corrente curvos e ligeiramente convergentes, representado na Figura 23 como a opção “Gireli et al. (2010)”. Apesar das limitações do modelo físico, como a adoção de fundo fixo, foi possível examinar qualitativamente, por meio da técnica da pasta de areia, o transporte de sedimentos e a tendência da evolução na linha costeira na região adjacente à obra. Segundo Gireli et al. (2018), o modelo respondeu com uma tendência à acreção de sedimentos, revertendo a predisposição à continuidade dos processos erosivos na região da Ponta da Praia. Contudo, como foi uma avaliação de caráter qualitativo, os autores recomendaram uma investigação mais minuciosa dos processos envolvidos, seja por modelos físicos ou numéricos.



Figura 24. Tendência de evolução da linha de costa na região da Ponta da Praia, obtida durante ensaio em modelo físico. Fonte: Gireli et al., 2018.

Alfredini et al. (2018), por sua vez, estudaram duas opções de obra visando notadamente a otimização da navegabilidade do canal do Porto de Santos e a redução da necessidade de dragagens periódicas. Os projetos estudados consistiam em dois tipos de estrutura: molhes guia-corrente e quebra-mares destacados (Figura 25). Os autores usaram modelagem física e numérica como ferramenta para análise dos resultados.

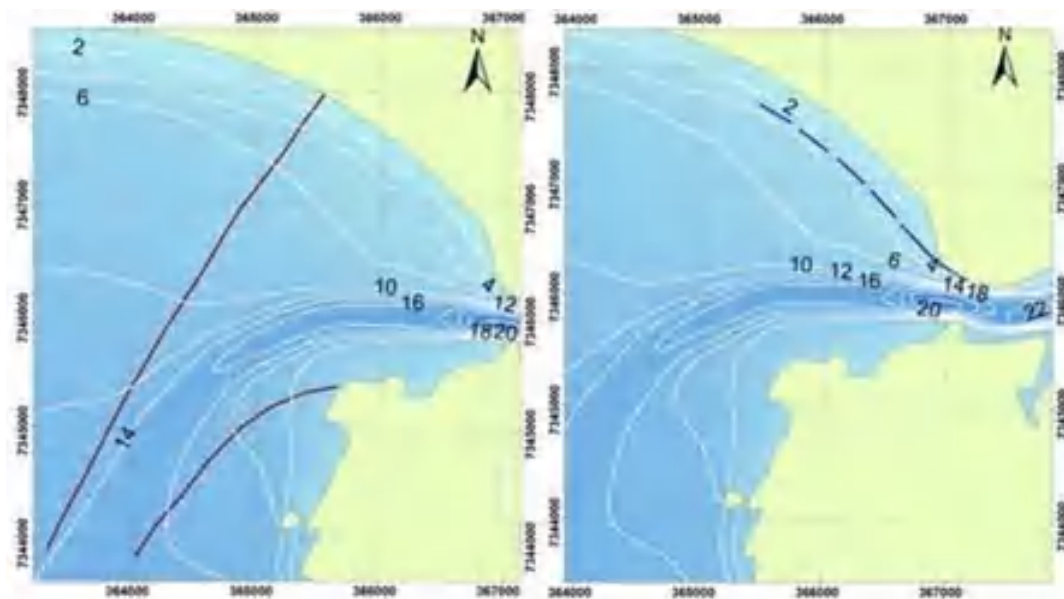


Figura 25. Localização esquemática das duas soluções propostas. À esquerda os molhes guia-corrente e à direita os quebra-mares segmentados. Fonte: Alfredini et al., 2018.

Alfredini et al. (2018) consideraram três cenários para a modelagem numérica: S1) sem nenhuma estrutura, isto é, a situação atual; S2) implantação de molhes guia-corrente, tendo em conta os efeitos de longo prazo para melhoria da navegação; S3) implantação de quebra-mares segmentados, tendo em conta efeitos de curto prazo na proteção costeira. As análises foram baseadas em variação da altura significativa de onda e sua direção, e variação da intensidade e direção da corrente. O cenário S3 incluiu também uma análise sobre a renovação das águas, visto que os quebra-mares podem interferir diretamente na circulação local. As dimensões e composição das estruturas simuladas não foram fornecidas.

Conforme as conclusões de Alfredini et al. (2018), as simulações com o quebra-mar segmentado apresentaram eficácia em reduzir a altura significativa de onda em mais de 50% na região da Ponta da Praia, resultando em redução de 75% da energia de onda num evento de tempestade. Todavia, segundo os autores, a presença dessa estrutura pode afetar a balneabilidade das praias, já que interfere na renovação das águas.

Ainda segundo os autores, as simulações com os molhes guia-corrente apontaram um aumento na velocidade das correntes dentro do canal de acesso do Porto de Santos, indicando a possibilidade de se reduzir as taxas de dragagem. A presença da estrutura também resultou numa redução de altura significativa de onda na região da Ponta da Praia (Figura 26), o que poderia gerar melhoria na proteção costeira.

No entanto, como não houve uma análise detalhada do transporte de sedimentos na região e considerando a posição da obra proposta, pode-se concluir de antemão que os molhes guia-corrente interfeririam de forma massiva na região da Ponta da Praia, afetando a balneabilidade e a própria existência da praia no que diz respeito ao formato e extensão da sua faixa de areia.



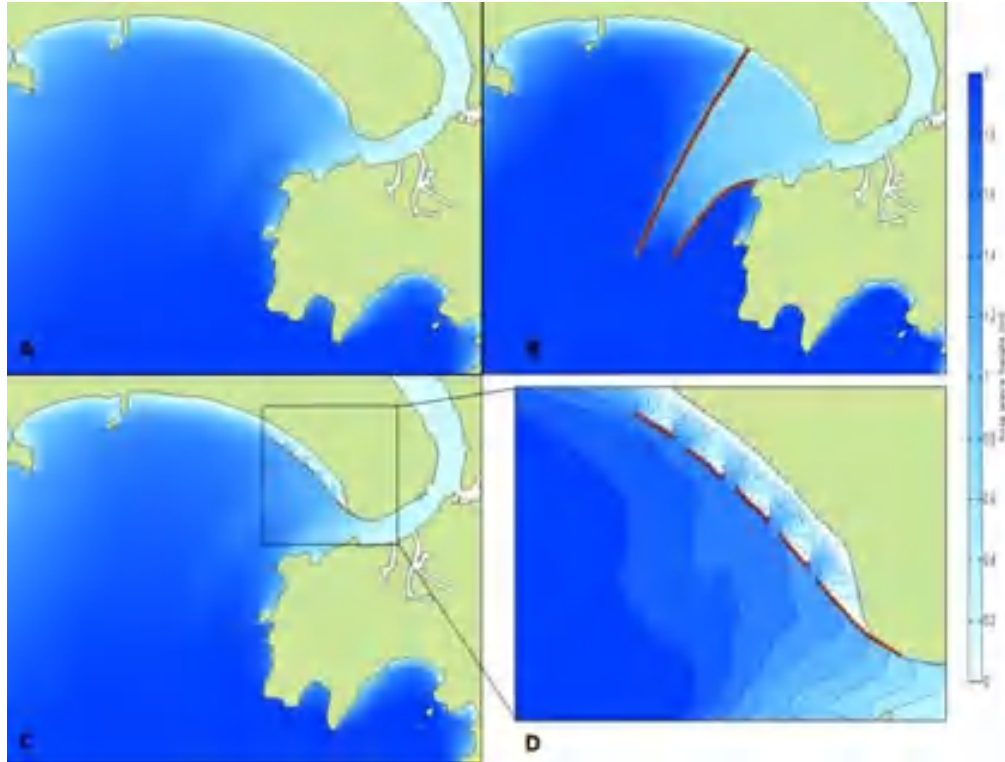


Figura 26. Alturas significativas de onda (m) durante um evento de tempestade em 20 de julho de 2012, às 15h, para três cenários: A - S1) situação atual; B - S2) molhes guia-corrente; C - S3) quebra-mar segmentado; D – *zoom* no cenário S3. Fonte: Alfredini et al., 2018.

Dada a complexidade hidromorfodinâmica da região devido aos diversos fatores e fenômenos atuantes previamente apontados, Garcia et al. (2018) afirmam que a representação dos modelos numéricos para os efeitos de ondas em águas rasas não ocorre conforme a realidade da área de estudo, em especial no que diz respeito aos fenômenos de difração e reflexão. Com o objetivo de contornar tais dificuldades, elaborou-se um Convênio de Cooperação de Pesquisa entre a Prefeitura de Santos e a Universidade Estadual de Campinas para o desenvolvimento de um projeto-piloto (GARCIA; GIRELI, 2019).

De acordo com Garcia e Gireli (2019), o projeto consiste em uma estrutura submersa constituída por geotubos preenchidos com areia das praias da própria região. As principais premissas eram: baixo impacto visual, baixo custo e fácil remoção (para caso a obra não atuasse de forma benéfica). A obra foi planejada para ser implantada entre a ponta da praia e o Canal 6 (Figura 27), com uma cota de coroamento de -0,5 m DHN (relativo ao zero da Diretoria de Hidrografia e Navegação) e altura máxima de onda de 2 m. O eixo da obra, dividido em dois segmentos lineares, foi estabelecido de forma que as ondas, ao atingirem o projeto-piloto, refratassem e atingissem a costa com um ângulo quase ortogonal. Os segmentos, um transversal e um longitudinal, foram projetados conforme detalhes:

- O trecho transversal possui 275 m de extensão. Foi enraizado junto ao muro de praia, com rumo de  $280,15^\circ$  em relação ao Norte Verdadeiro e assentado em profundidades de cerca de 3,5 m em relação ao Nível de Redução da Marinha (NR) da região. Os primeiros 75 m, considerando o ponto de enraizamento, foram protegidos com uma camada emersa de blocos de enrocamento para evitar ações de vandalismo;
- O trecho longitudinal, também chamado de principal, possui 240 m de extensão. Foi posicionado de forma a ficar paralelo aos muros de proteção presentes na ponta da praia, com rumo de  $347,53^\circ$  em relação ao Norte Verdadeiro. Seu assentamento acompanha quase totalmente a isóbata de 3,5 m em relação do NR.

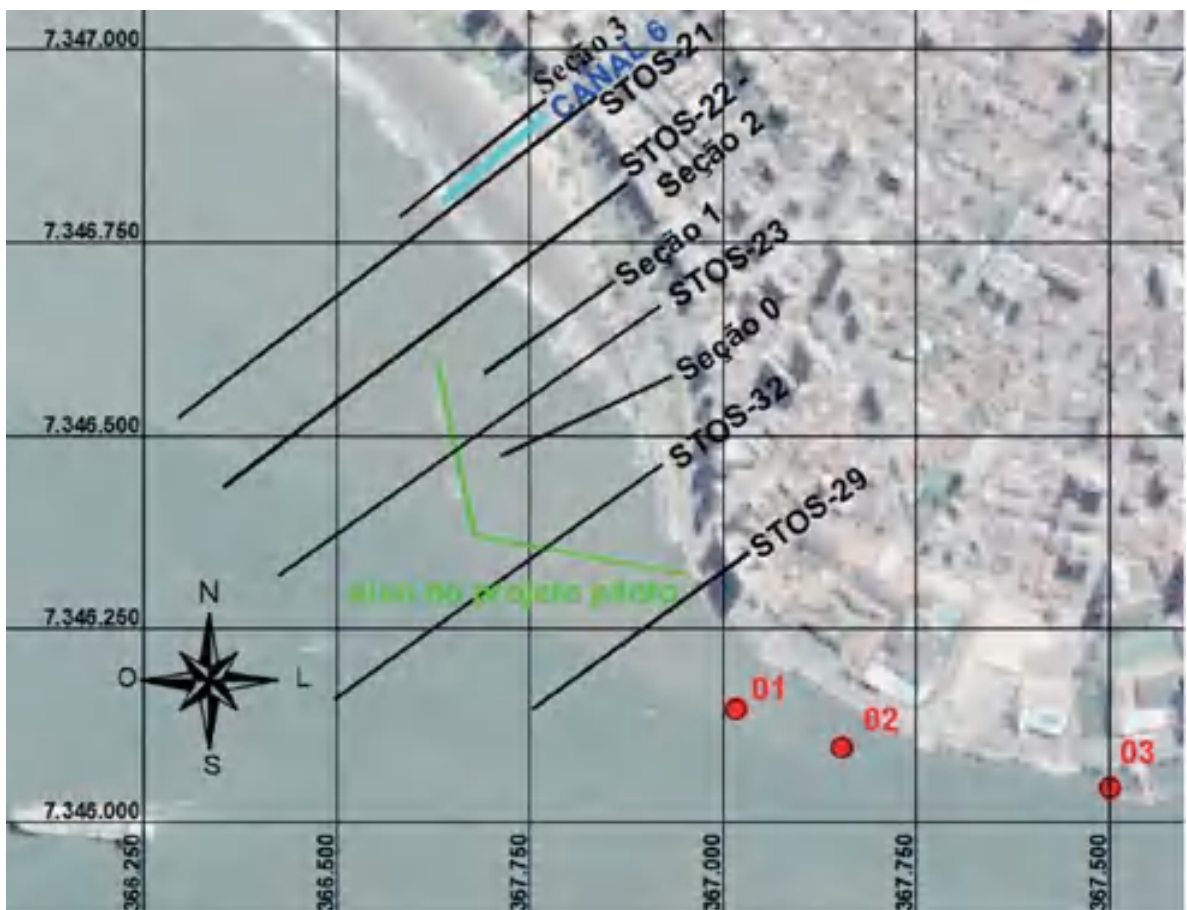


Figura 27. Posicionamento do eixo do projeto piloto, seções de levantamento topo-batimétrico e pontos de sondagem. Fonte: Garcia e Gireli, 2019.

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam as seções transversais dos segmentos longitudinal e transversal, sendo este último composto por um trecho emerso e um trecho submerso. As letras de A a G se referem aos seguintes elementos (GARCIA; GIRELI, 2019):

- A: geotubo de tecido com perímetro de 9 m e comprimento de 20 m;
- B: geotubo de tecido com perímetro de 12 m e comprimento de 20 m;
- C: tapete antissocavação (ou antierosão) de 20 m de comprimento;
- D: mini-bag de tecido com 20 m ou 25 m de comprimento;
- E: geotubo de tecido com perímetro de 9 m e comprimento de 25 m;
- F: geotubo de tecido com perímetro de 12 m e comprimento de 20 m;
- G: proteção de não-tecido.

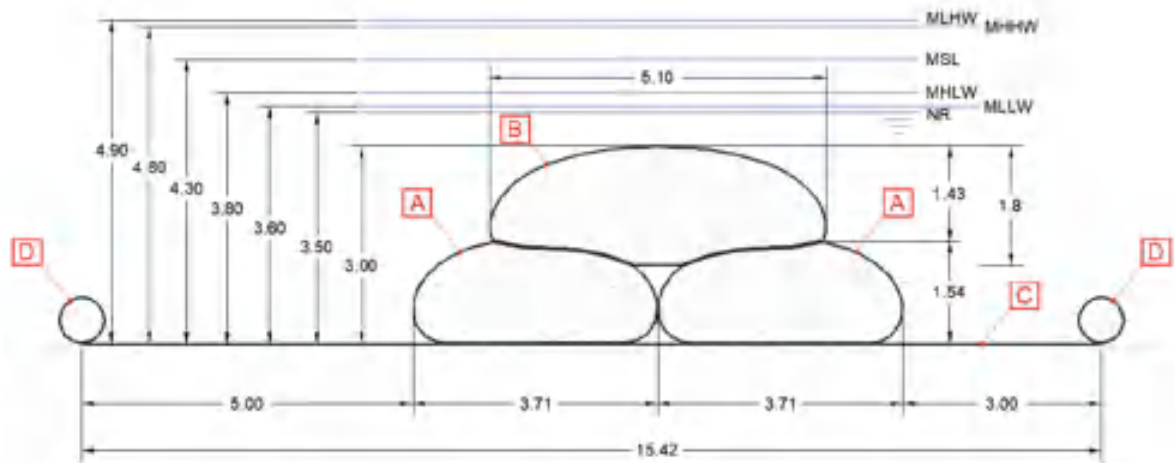


Figura 28. Seção transversal completa do segmento longitudinal da obra-piloto. Fonte: Garcia e Gireli, 2019.

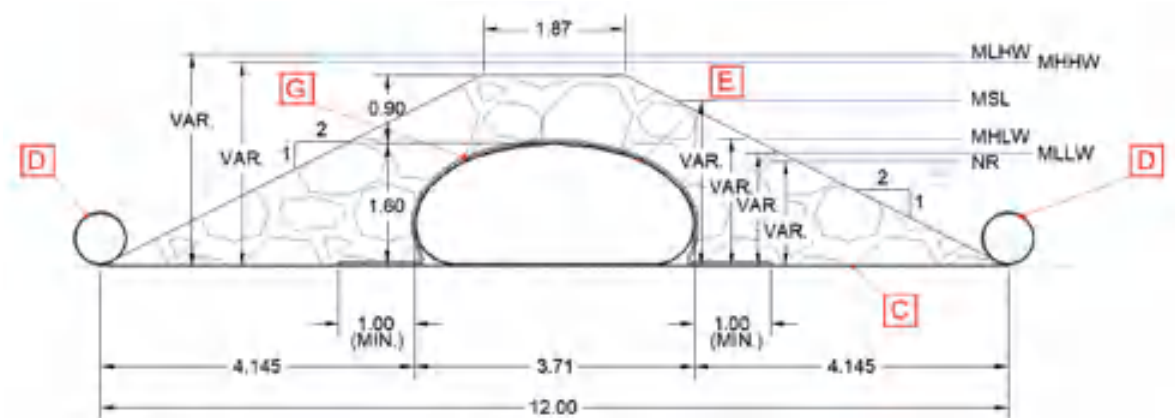


Figura 29. Seção transversal do segmento transversal da obra-piloto em seu trecho emerso. Fonte: Garcia e Gireli, 2019.

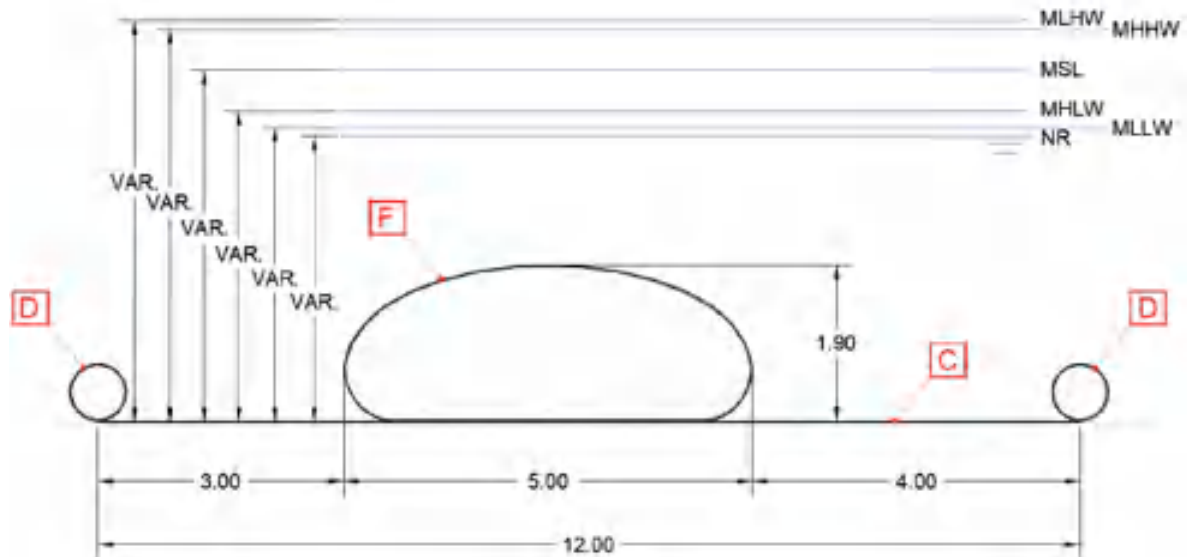


Figura 30. Seção transversal do segmento transversal da obra-piloto em seu trecho submerso. Fonte: Garcia e Gireli, 2019.

A obra foi implantada entre os meses de janeiro e abril do ano de 2018. A principal intenção ao se adotar o segmento transversal era evitar a concentração de correntes e, conseqüentemente, o carreamento de sedimentos para dentro do canal do Porto de Santos, além de evitar a formação de cavas nas adjacências da estrutura (GARCIA; GIRELI, 2019).

Embora a metodologia de dimensionamento de obras costeiras com o uso de geotêxtil ainda não esteja consolidada na literatura, os autores do projeto-piloto pautaram sua escolha em algumas vantagens dos geotubos. Caso houvesse uma resposta negativa ou contrária à esperada, por exemplo, os geotubos poderiam ser facilmente rasgados e a areia de preenchimento, proveniente da própria praia, seria redistribuída pelas ondas incidentes. Algumas especificidades técnicas também foram necessárias para a escolha do material, tais como: resistência a raios UV, a abrasão mecânica gerada pela movimentação dos sedimentos e a materiais cortantes ou perfurantes; menor deformabilidade e fluência para garantir estabilidade geométrica da estrutura (GARCIA; GIRELI, 2019).

Garcia e Gireli (2019) afirmam ainda que os resultados preliminares da obra foram promissores, uma vez que houve acúmulo de sedimentos na região diretamente afetada pela estrutura, mesmo num curto período de tempo. O projeto-piloto tem se mostrado uma alternativa econômica e ambientalmente vantajosa, sobretudo se comparado às soluções tradicionais. Os autores ressaltam o monitoramento periódico dos dados de campo possibilitará melhor compreensão do comportamento hidrodinâmico da área estudada, o que pode facilitar a proposição de opções mais eficientes para combater a erosão e para proteger a costa.

#### **4.4. Levantamentos de campo**

Os levantamentos de campo vêm sendo conduzidos desde o primeiro semestre do ano de 2014. A Tabela 7 elenca todas as campanhas topográficas realizadas até o presente momento. Já as campanhas batimétricas foram realizadas em dois períodos: i) setembro de 2016; ii) janeiro e fevereiro de 2018. Há diferenças na quantidade entre os dois tipos de coleta de dados porque os levantamentos batimétricos, além de exigirem maior mobilização de equipamentos e equipe, não são adequados para regiões rasas e onde ocorrem arrebentação de ondas.

Os trabalhos de campo seguiram uma metodologia fixa, que será explicada mais adiante. De forma geral, o processo envolve três etapas básicas: obtenção dos dados brutos, processamento dos dados e, por fim, geração de modelos digitais de elevação (MDEs).

Tabela 7 – Datas e área dos levantamentos de campo topográficos

<b>Campanha</b>	<b>Levantamentos realizados</b>	<b>Área de abrangência das seções levantadas</b>	<b>Incidência de ressaca</b>
1°	08 de maio de 2014	Canal 4 à Seção 1	Sem ressacas em datas próximas
2°	03 de outubro de 2014	STOS-21 e Seção 1	Sem ressacas em datas próximas
3°	06 de fevereiro de 2015	Canal 5 à Seção 0	Sem ressacas em datas próximas
4°	09 de maio de 2015	Seção 8 à Seção 0	20/04/2015 e 19/06/2015
5°	15 de setembro de 2016	Seção 8 à STOS-22	15/09/2016
6°	23 de março 2017	Seção 8 à Seção 0	Sem ressacas em datas próximas
7°	29, 30 e 31 de janeiro de 2018	Canal 4 à Seção 0	Sem ressacas em datas próximas
8°	19 e 23 de abril de 2018	Canal 4 à STOS-32	15/04/2018 – evento meteorológico
9°	3 de julho de 2018	Canal 6 à STOS-29	Sem ressacas em datas próximas
10°	12 de julho de 2018	Canal 5 à STOS-29	Ressaca no dia 10/07/2018
11°	24 e 25 de outubro de 2018	Canal 4 à STOS-29	25 a 27/08/2018 – evento meteorológico
12°	6 e 7 de fevereiro de 2019	Canal 4 à STOS-29	Ressaca no dia 28/10/2018
13°	23 e 25 de abril de 2019	Canal 4 à STOS-29	Sem ressacas no período, porém com dias com ondas superiores a 2,0 m e eventos meteorológicos
14°	17 e 18 de julho de 2019	Canal 4 à STOS-29	Ressaca no dia 06/07/2019
15°	10 e 11 de outubro de 2019	Canal 4 à STOS-29	Sem ressacas em datas próximas (*)
16°	10 e 11 de fevereiro de 2020	Canal 4 à STOS-29	Houve eventos de ressacas e meteorológicos no período (*)

(\*) A Prefeitura de Santos não disponibilizou os dados de ondas do período. As informações foram obtidas a partir de dados de jornais locais.

Fonte: adaptado de Venancio, 2018.

Os levantamentos topográficos seguiram a norma *NBR 13.133/94: Execução de levantamento topográfico* (ABNT, 1994), fazendo uso de uma estação total Classe 2 com precisão média (desvio-padrão/precisão angular  $\pm 7''$ ; desvio-padrão/precisão linear  $\pm (5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm} \times \text{distância})$ ), aliada a um prisma de 3,05 m de comprimento (GUNNEWIEK et al., 2021). A partir do ano de 2019, devido à aquisição de uma nova baliza, o prisma passou a ter uma altura máxima de 4,5 m.

Para uma medição correta e consistente, foi estabelecida uma poligonal enquadada, na qual as coordenadas dos pontos de início e término são conhecidas e definidas por meio de receptores GNSS (Global Navigation Satellite System). Os pontos que constituem a poligonal possuem uma monografia descritiva e foram materializados na calçada por meio de pinos fixos (GUNNEWIEK et al., 2021; VENANCIO, 2018; VENANCIO et al., 2022).

Ainda em relação à consistência dos dados, Gunnewiek et al. (2021) afirmam que foram realizados nivelamento geométrico e contranivelamento Classe II para a correção da cota dos pontos, baseando-se, portanto, no nível médio local do mar. Na Figura 31, são apresentados os equipamentos utilizados em campo.



Figura 31. Estação total (à esquerda) e equipamento GNSS (à direita). Fonte: Venancio, 2018.

Os perfis praias levantados estão localizados na região entre a ponta da praia e o Canal 4, conforme apresenta a Figura 32 (as seções denominadas “STOS-n” mantiveram, de acordo com as possibilidades, a mesma localização proposta pelos monitoramentos conduzidos por Souza et al. (2012). As demais seções foram estabelecidas pela própria equipe

da FECFAU-UNICAMP). A extensão de cada seção transversal medida pela estação total é dada do limite superior da pós-praia, ou seja, o pino fixado na calçada, até a zona de arrebentação, sendo limitada pela altura do prisma. As medições foram feitas ponto a ponto, distando sempre que possível cerca de 10 m um do outro. O alinhamento das seções, por sua vez, se deu com auxílio de referenciais fixos no mar e em terra (por exemplo, boias e postes) de forma a ficar preferencialmente perpendicular à linha de costa (GUNNEWIEK et al., 2021; VENANCIO, 2018).

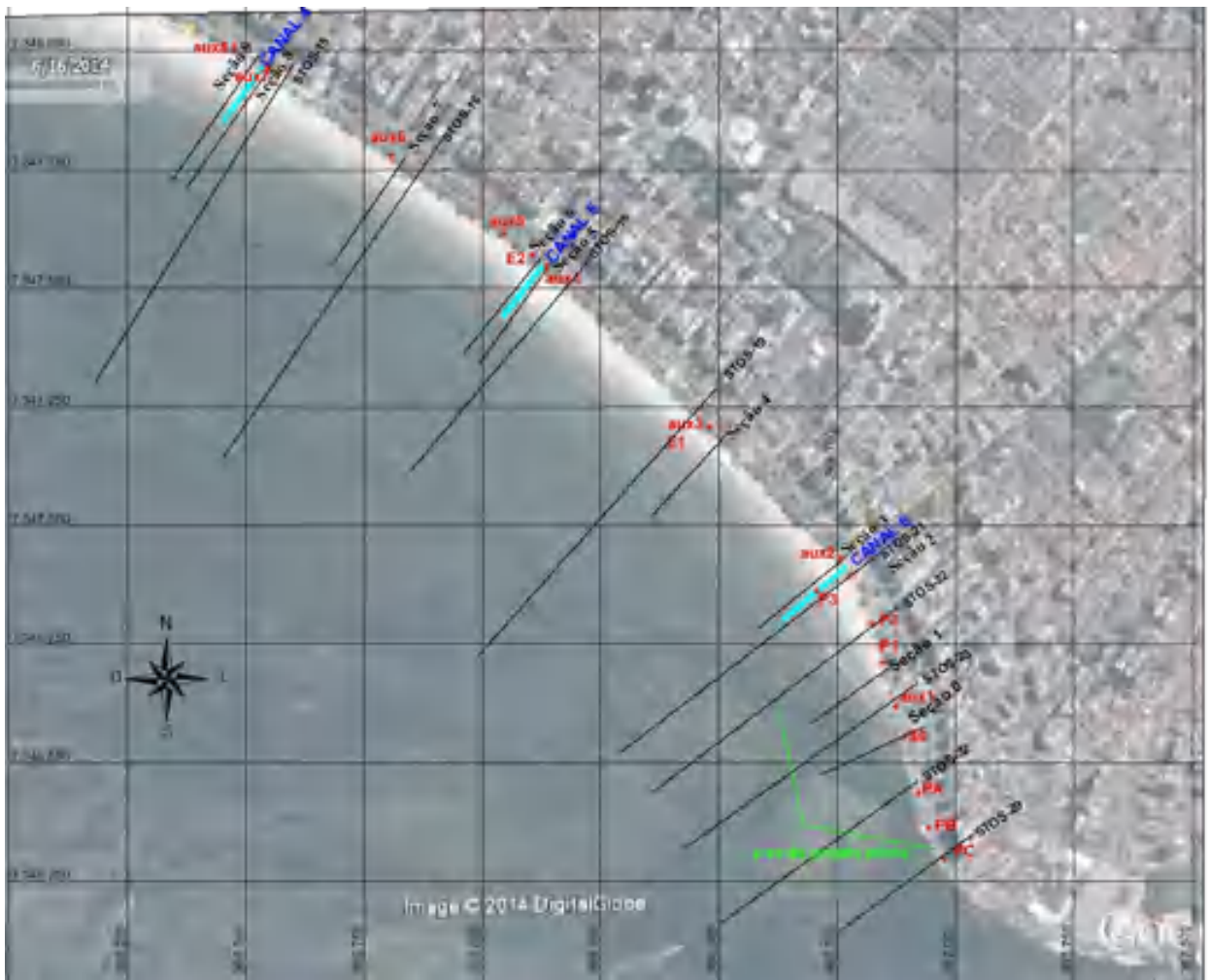


Figura 32. Localização das seções topográficas e pontos de apoio dos levantamentos de campo. Fonte: FECFAU, 2021.

Os levantamentos batimétricos foram conduzidos utilizando um ecobatímetro SyQuest, modelo Bathy-500MF, associado a um transdutor simples de frequência 200 kHz (Figura 33). O equipamento foi acoplado a uma embarcação junto com um receptor GNSS L1/L2 – RTK (GUNNEWIEK et al., 2021).





Figura 33. Ecobatímetro utilizado para levantamento dos dados batimétricos. Fonte: Venancio, 2018.

A base do aparelho GNSS foi posicionada em um dos pontos conhecidos (coordenadas e altitude) da poligonal previamente estabelecida pelo levantamento topográfico. A conexão em tempo real entre o receptor GNSS e sua base permite que as correções sejam feitas imediatamente e garante uma precisão centimétrica. Por meio do *software* HYDROpro Navigation®, desenvolvido pela Trimble, obtiveram-se seções perpendiculares à linha de costa que estão além da zona de arrebentação (GUNNEWIEK et al., 2021).

Por fim, os dados de campo podem ser divididos em duas categorias: i) dados obtidos antes da implantação do projeto-piloto e ii) dados obtidos após a implantação do projeto-piloto. Ou seja, o ano de 2018 é o referencial elementar para a separação de informações. Os itens a seguir apresentam os dados mais relevantes para as modelagens conduzidas no presente trabalho.

#### 4.5. Monitoramento

Como o projeto-piloto foi implantado entre os meses de janeiro e abril do ano de 2018, os dados de campo foram separados em dois grandes blocos: pré-obra e pós-obra.

O monitoramento pré-obra consiste nas análises dos dados de campo em relação à evolução da linha de costa e progressão da erosão. O monitoramento pós-obra analisa a retenção de sedimentos e a resposta da linha de costa à implantação do projeto-piloto.

Ressalta-se ainda que são apresentadas aqui apenas as informações mais relevantes para a condução e análise das modelagens computacionais.

#### **4.5.1. Monitoramento pré-obra**

O monitoramento da erosão na região da Ponta da Praia em Santos iniciou-se antes mesmo da concepção do projeto-piloto. O interesse à época era monitorar o avanço da erosão ao longo do tempo e traçar possíveis prognósticos para a área.

A análise e comparação de dados de campo em contraste com imagens de satélite foram realizadas por Venancio et al. (2017) e Venancio (2018). Os resultados apontam uma intensificação dos processos erosivos após o ano de 2010, quando aconteceram as dragagens de alargamento e aprofundamento do canal de acesso do porto santista. As Figuras 34 e 35 apresentam a variação da linha de costa entre os anos 2009 e 2017, sendo que os dados de campo passaram a ser obtidos no ano de 2014, ou seja, as linhas de costa dos anos anteriores são provenientes das imagens do Google Earth com a devida correção de maré. O recuo na extremidade da praia (Figura 35, detalhe 5) foi da ordem de 57,4 m entre os anos 2009 e 2017.



Figura 34. Posições da linha de costa na região entre os Canais 5 e 6. Fonte: Venancio, 2018.

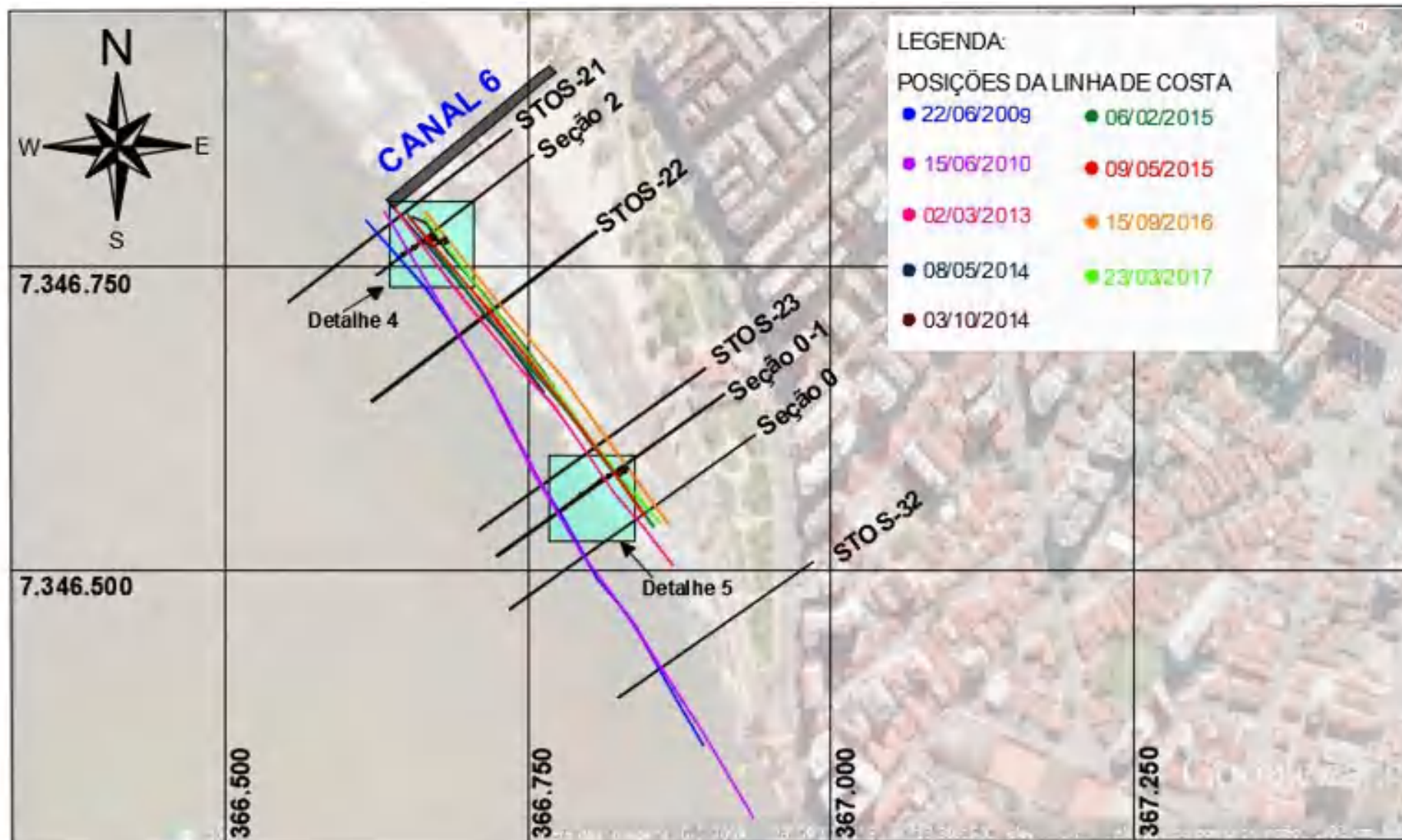


Figura 35. Posições da linha de costa na região entre o Canal 6 e a extremidade da praia. Fonte: Venancio, 2018.

Conforme apontado no item 4.2, Venancio et al. (2020) fizeram uma análise isolada dos impactos da dragagem utilizando modelos numéricos com uso de cenários. O estudo foi capaz de concluir que uma das principais causas do aumento da taxa de erosão foi, de fato, as atividades de dragagem de aprofundamento e alargamento do canal do porto.

A comparação entre os dados batimétricos obtidos por FUNDESPA (2014) com dados batimétricos obtidos pela equipe da FECFAU-UNICAMP (Figura 36) apontou um foco de erosão localizado entre o Canal 6 e a extremidade da praia (entre seções STOS-21 e STOS-23), mesmo local onde foi identificada (e observada em campo pela equipe) uma área de recirculação de correntes. Logo, considerando essa região, cerca de 22% da erosão ocorre em apenas 15% da área, conforme Tabela 8 (VENANCIO, 2018; VENANCIO et al., 2020).

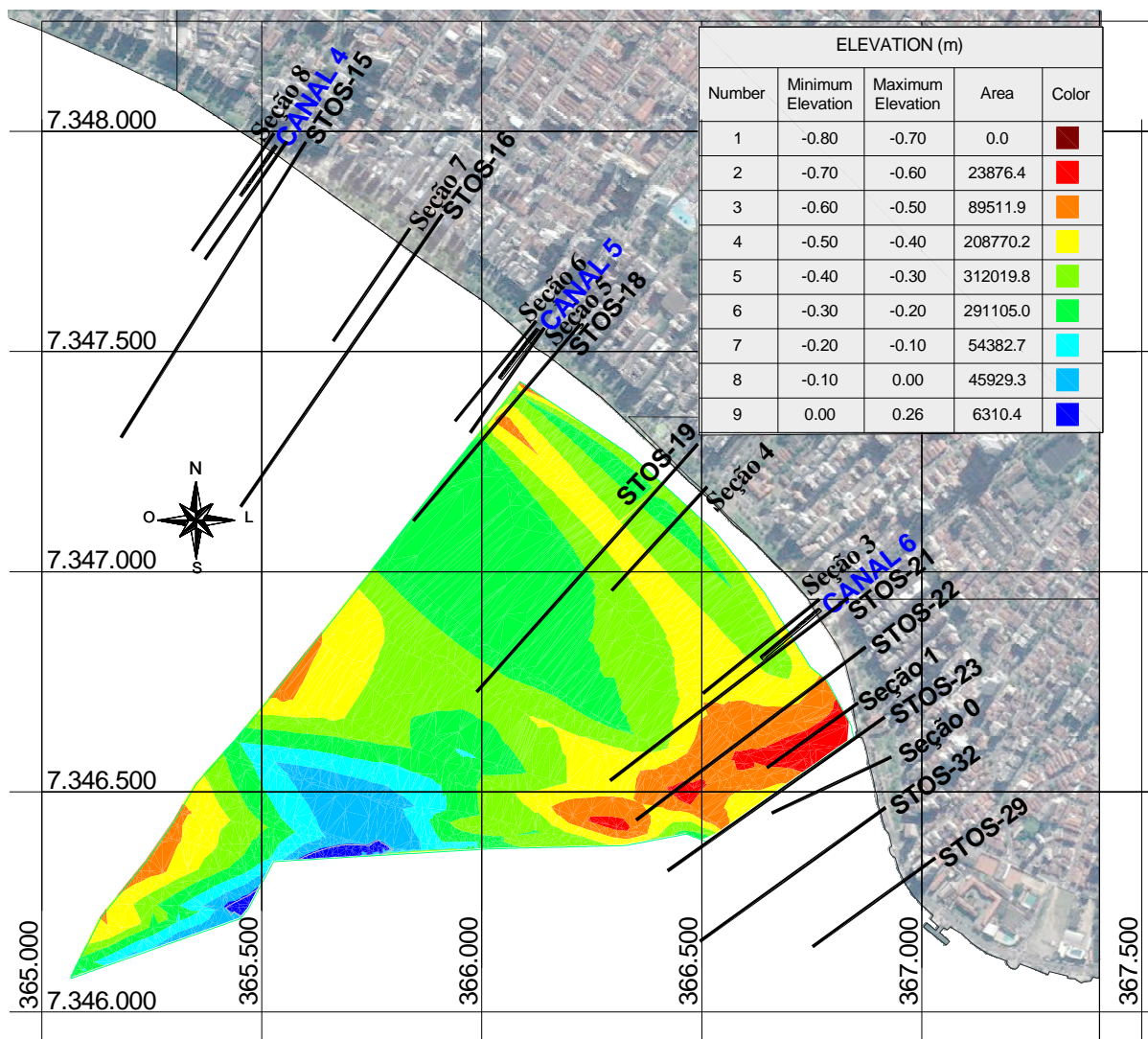


Figura 36. MDE resultante da subtração dos MDE FUNDESPA (2014) versus MDE FECFAU-UNICAMP (2016). Fonte: Adaptado de Venancio, 2018.

Tabela 8 – Volume erodido para os trechos: i) entre as seções STOS-23 e STOS-21; ii) entre as seções STOS-23 e STOS-18.

Trecho	Área (m <sup>2</sup> )	Volume acréção (m <sup>3</sup> )	Volume erodido (m <sup>3</sup> )	Máx. diferença de cotas (m)	Mín. diferença de cotas (m)
STOS-23 a STOS-21	152.261	0	78.288	0,654	0,171
STOS-23 a STOS-18	1.047.436	445	350.646	0,654(erosão)	0,255(acréção)

Fonte: Venancio, 2018.

#### 4.5.2. Monitoramento pós-obra

Os dados de campo foram coletados conforme a metodologia descrita no item 4.4 e, posteriormente, processados e tratados no *software* Civil 3D, desenvolvido pela Autodesk. O tratamento dos dados gerou modelos digitais de elevação (MDE) que contêm superfícies de nível. A partir das superfícies trabalhou-se com três tipos de dados: perfis de praia transversais, linha do zero do Nível de Redução da Marinha (Zero DHN) e volume de sedimentos.

Uma vez que, em campo, há dificuldade em manter um alinhamento constante dos perfis praias devido à força das correntes, os perfis foram traçados nas superfícies dos MDEs. Essa estratégia permite a obtenção de perfis alinhados, diferentemente do que seria obtido por meio dos dados brutos. Ademais, a extração de perfis diretamente das superfícies faz com que os alinhamentos utilizados não se modifiquem com o tempo, facilitando comparações entre os resultados das diferentes campanhas.

A análise da linha do Zero DHN, por sua vez, está relacionada à evolução da linha de costa e utiliza a isómeta de 0 m do Nível de Redução da Marinha como referência principal ao invés de utilizar o nível médio do mar ou outras cotas similares. Essa abordagem possibilita uma avaliação temporalmente mais abrangente, já que também pode ser feita com o uso imagens de satélite, como as obtidas pelo Google Earth®. Ela engloba, assim, períodos nos quais não há dados de campo, ou seja, prévios a 2014. No ano de 2010, por exemplo, foram realizadas as atividades de dragagem para expansão do porto. A comparação entre linhas Zero DHN de diferentes períodos, portanto, traz resultados sobre as variações de recuo ou avanço da linha de costa, resultando em erosão ou progradação, respectivamente. Por meio dessas comparações podem ser analisadas as diversas causas envolvidas no processo erosivo crônico da região.

O cálculo do balanço sedimentar, por fim, é feito por meio da subtração das superfícies dos MDEs. Dessa subtração extraem-se os volumes movimentados em cada uma das oito áreas de referência, conforme apresentado na Figura 37. Os volumes obtidos são tratados no *software* Excel e avaliados em conjunto com os valores de volumes de sedimentos lançados e fornecidos pela Prefeitura de Santos, de forma a verificar se houve erosão ou assoreamento no trecho de praia em questão.

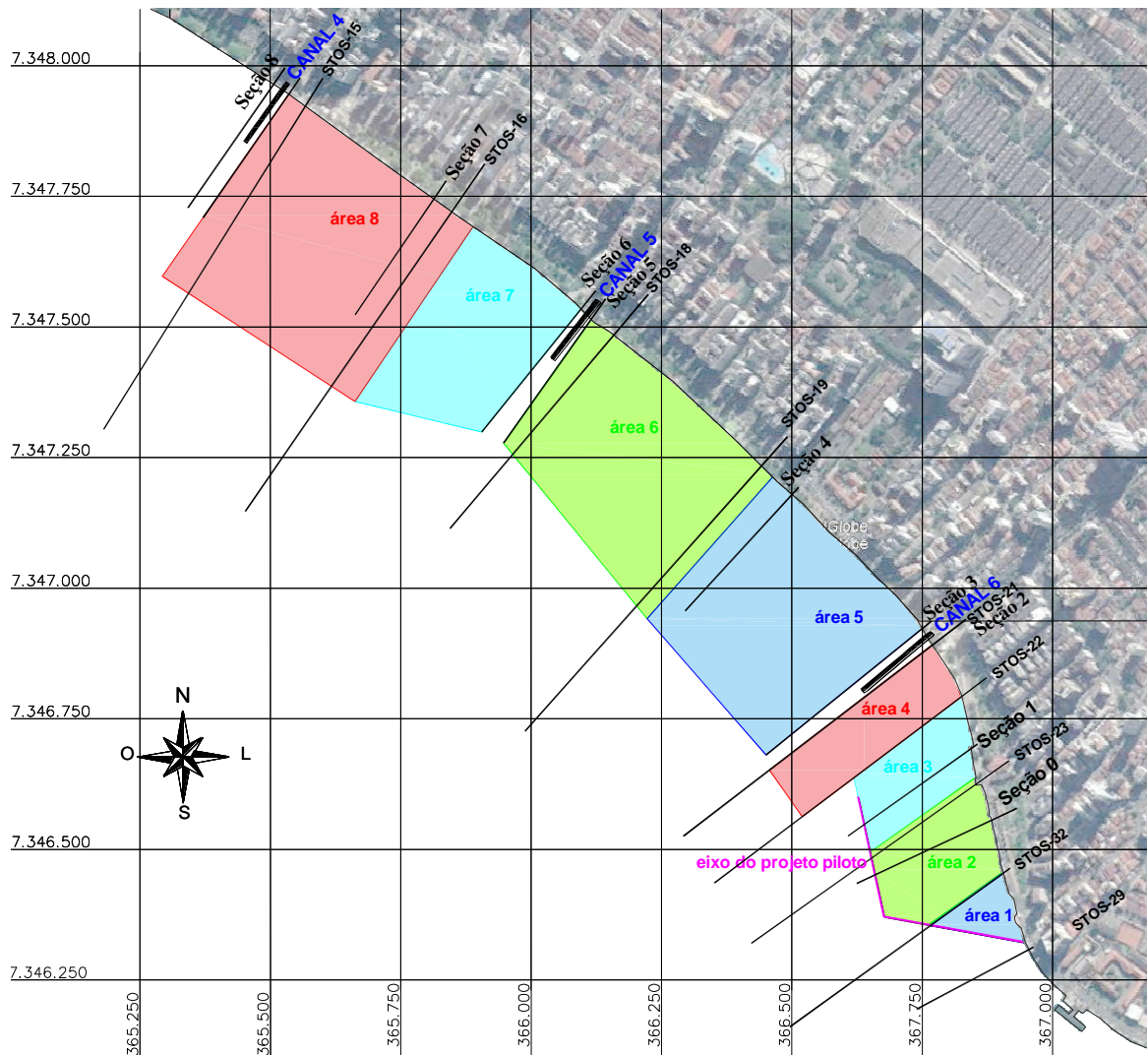


Figura 37: Áreas de referência utilizadas para cálculo dos volumes modificados entre os levantamentos a partir de fevereiro de 2019. Fonte: FECFAU, 2021.

No entanto, é importante esclarecer algumas informações a respeito da retirada e lançamento de sedimentos realizados pela Prefeitura de Santos. O desassoreamento dos canais de drenagem 2 e 3 era feito sempre que necessário, e os sedimentos eram movidos para a região entre a ponta da praia e o Canal 6 sem nenhum controle dos volumes ou do local de lançamento, o que caracteriza uma alimentação artificial emergencial e sem planejamento. Por isso, após a implantação da obra proposta por Garcia e Gireli (2019), em abril de 2018,

sugeriu-se que a alimentação artificial de praia fosse feita de maneira controlada e com maiores volumes conforme Tabela 9, auxiliando a recomposição do perfil praiial. Depois de 2019, a área protegida pela obra se mostrou estável, com significativa redução da erosão, o que levou a Prefeitura de Santos a lançar os sedimentos no trecho de praia entre os canais 5 e 6, que passou a ser o mais erodido (GARCIA et al., 2022, no prelo).

Tabela 9 – Volume de sedimentos lançado pela Prefeitura de Santos no período entre os levantamentos de campo (as datas referentes a cada levantamento podem ser consultadas na Tabela 7).

Nº da campanha inicial	Nº da campanha final	Volume de sedimentos lançado pela Prefeitura de Santos (m <sup>3</sup> )		
		Ponta da praia ao Canal 6	Canal 5 ao Canal 6	TOTAL
7º	8º	-	-	0
8º	9º	1310,4	-	1310,4
9º	10º	-	-	0
10º	11º	4552,8	-	4552,8
11º	12º	3192,0	-	3192,0
12º	13º	756,0	-	756,0
13º	14º	151,2	134,4	285,6
14º	15º	680,4	4359,6	5040,0
15º	16º	907,2	705,6	1612,8

Fonte: Garcia et al., 2022, no prelo.

Conforme pode ser observado na Tabela 9, o volume de sedimentos lançado pela prefeitura entre os levantamentos de janeiro de 2018 e abril de 2018 (7ª e 8ª campanhas) não foi computado, porque a maior parte dessa areia foi utilizada no preenchimento dos geotubos do projeto-piloto. Dessa forma, não foi possível avaliar com precisão o volume de sedimentos retido no trecho da obra. Além disso, foi considerado, para os volumes computados, um fator de compactação de 70% do total medido em relação à caçamba do caminhão, já que o volume de areia no caminhão não é compactado e apresenta baixo teor de umidade, não correspondendo à mesma condição do sedimento na praia (GARCIA et al., 2022, no prelo).

Os MDEs gerados a partir dos dados obtidos em campo estão apresentados nas Figura 38 e 39. Conforme previamente explicado, os perfis transversais de praia são extraídos das superfícies de nível, de modo que o alinhamento das seções seja sempre o mesmo.



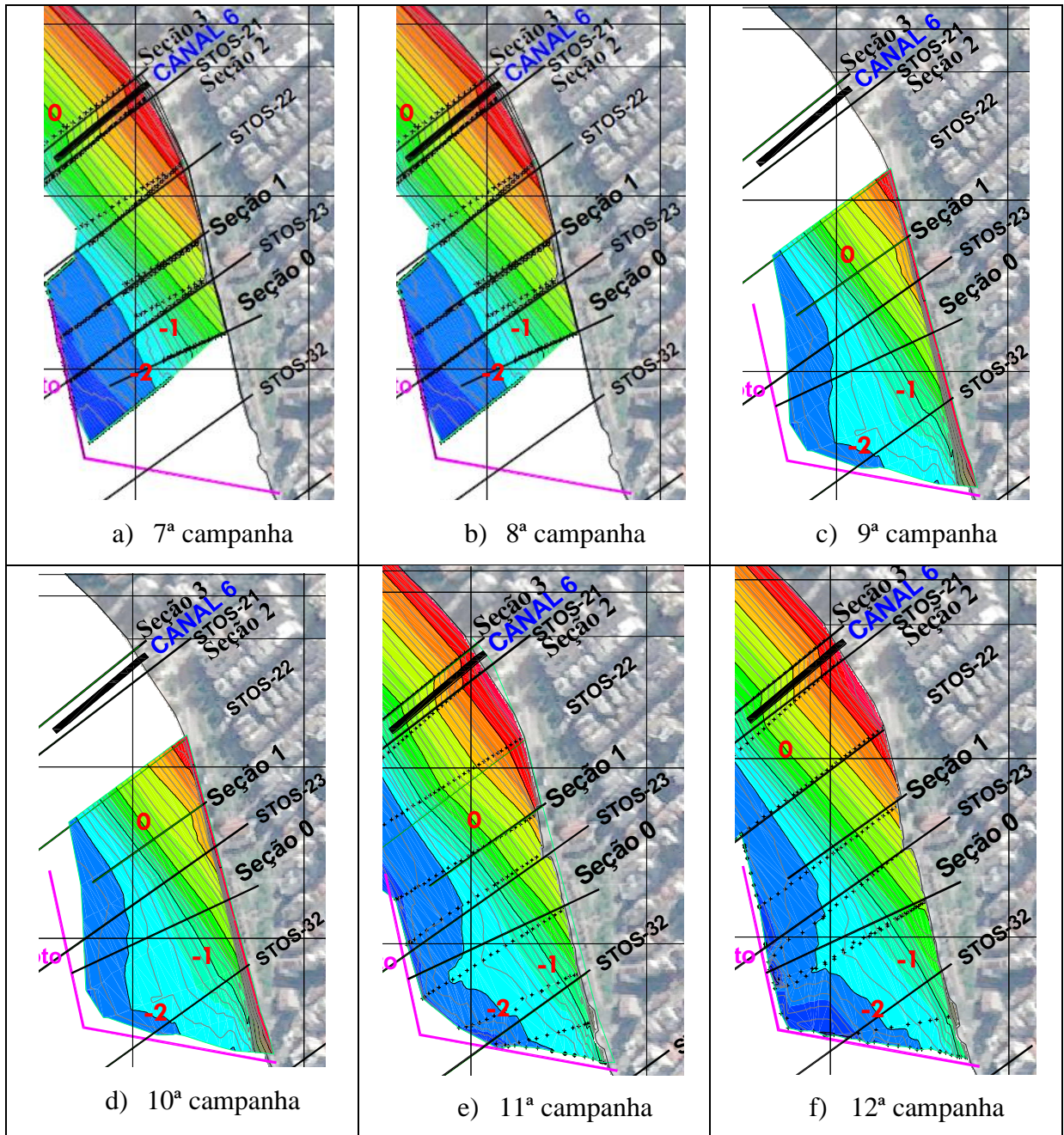


Figura 38. MDEs resultantes dos levantamentos de campo na região entre o Canal 6 e a ponta da praia (7ª a 12ª campanhas). Fonte: Adaptado de FECFAU, 2021.

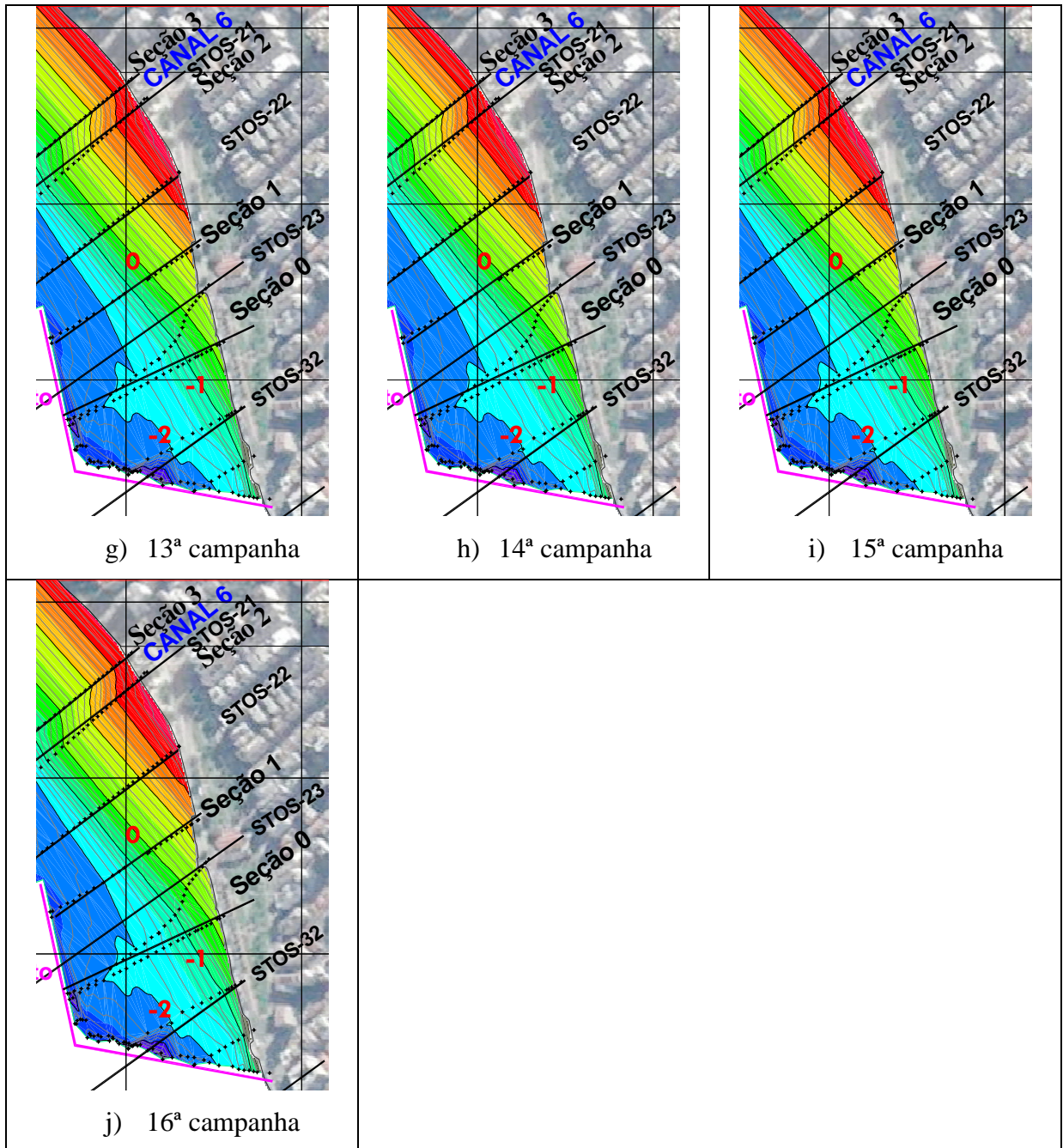


Figura 39. MDEs resultantes dos levantamentos de campo na região entre o Canal 6 e a ponta da praia (13ª a 16ª campanhas). Fonte: Adaptado de FECFAU, 2021.

As figuras de 40 a 51 apresentam os perfis de praia transversais (as seções estão identificadas na Figura 37) e permitem verificar que a metodologia adotada para o levantamento topográfico possibilitou a obtenção de dados próximos à profundidade de fechamento. Esta é definida por Kraus et al. (1999) como ponto a partir do qual não são percebidas trocas expressivas de sedimentos entre o segmento *offshore* e a zona litorânea.

É importante ressaltar que a análise completa dos perfis de praia transversais se encontra no relatório parcial gerado por FECFAU (2021). Dessa forma, as informações aqui

expostas são apenas aquelas que se mostraram relevantes para as análises e discussões das modelagens numéricas conduzidas posteriormente.

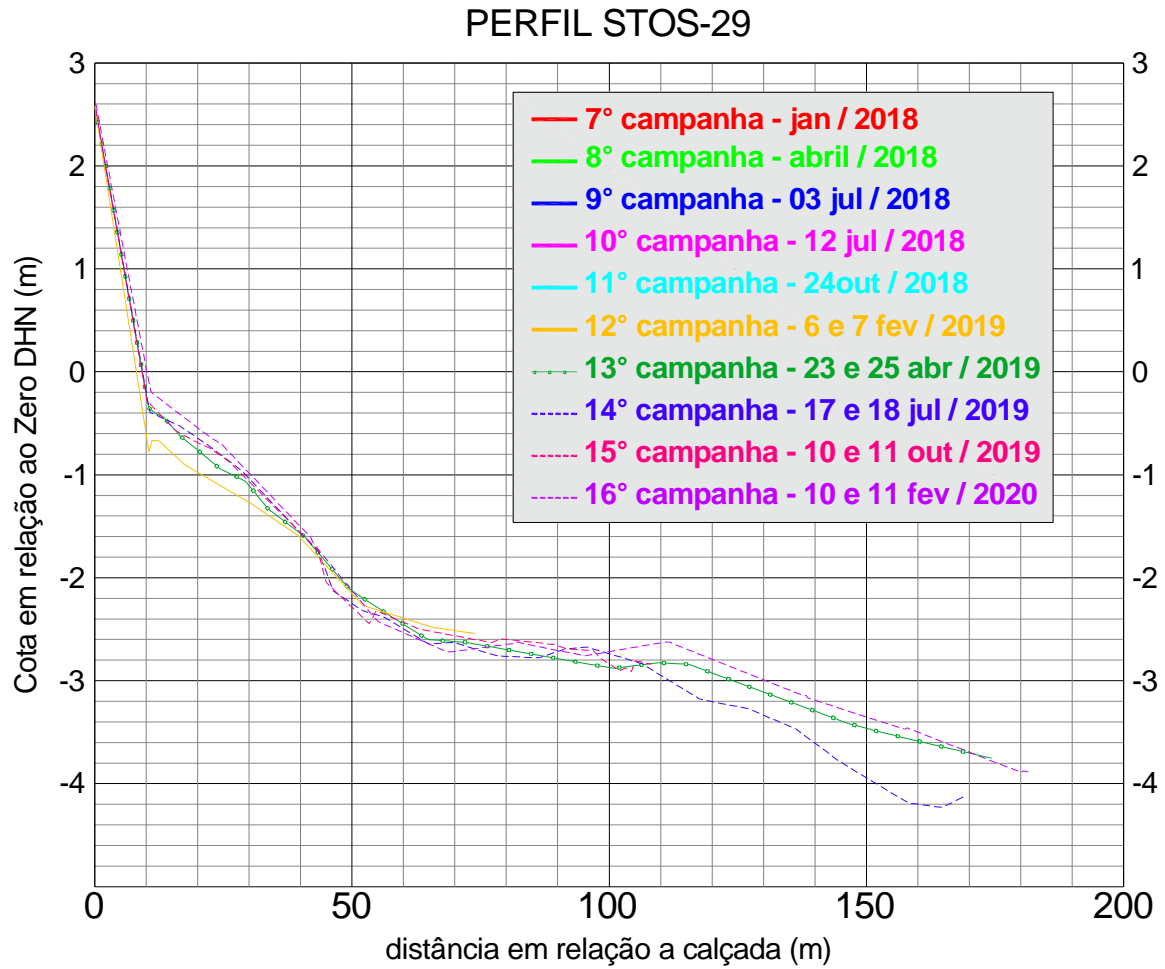


Figura 40: Perfil de praia – Seção STOS-29. Fonte: FECFAU, 2021.

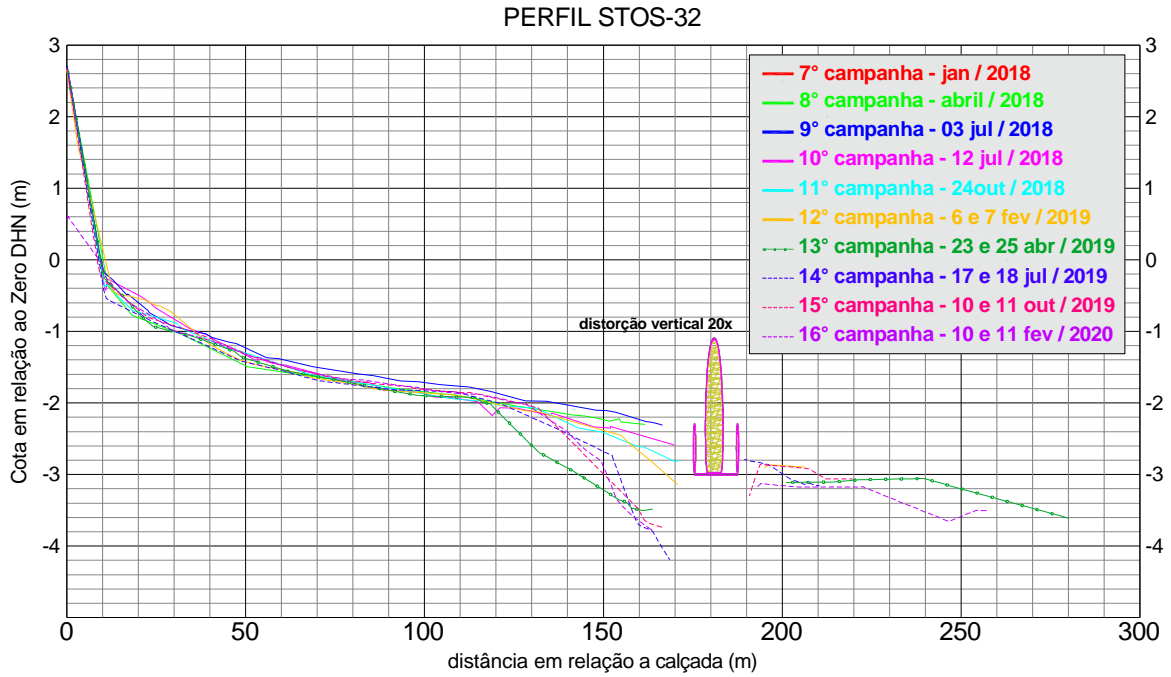


Figura 41: Perfil de praia – Seção STOS-32. Fonte: FECFAU, 2021.

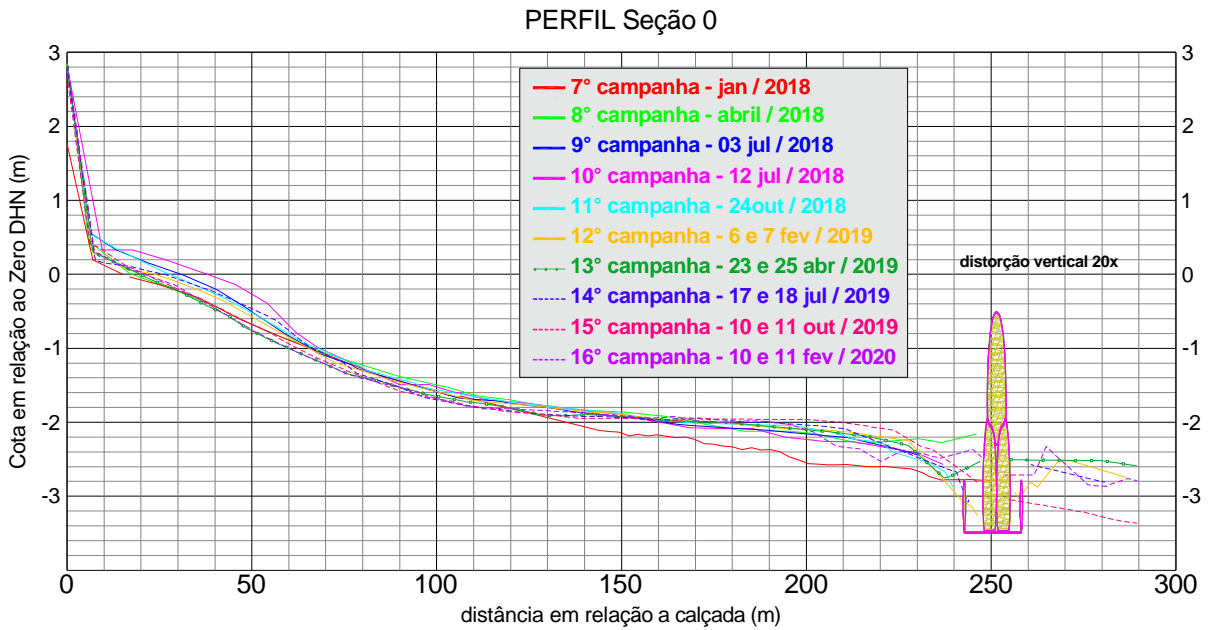


Figura 42: Perfil de praia – Seção 0. Fonte: FECFAU, 2021.

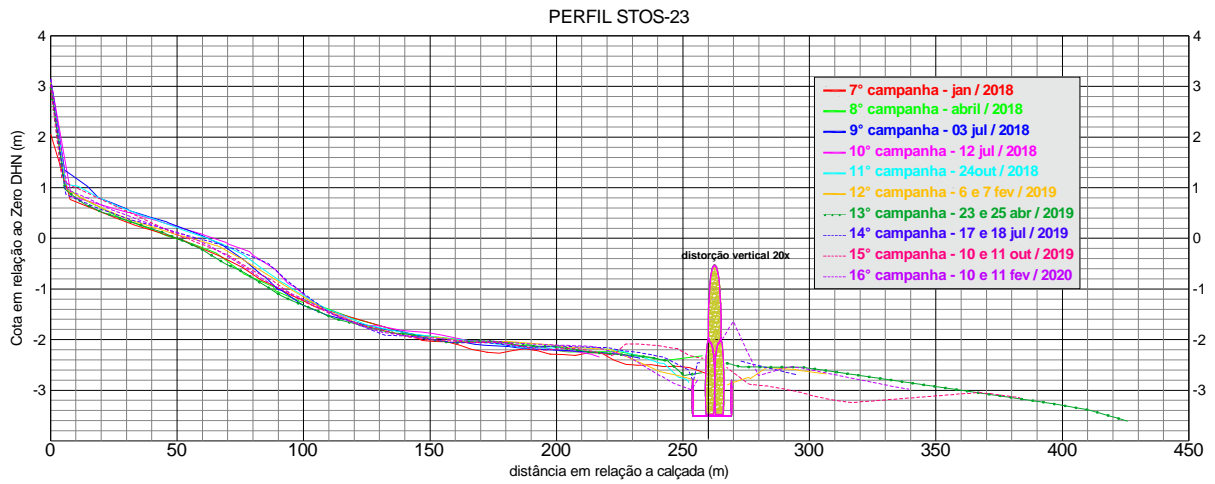


Figura 43: Perfil de praia – Seção STOS-23. Fonte: FECFAU, 2021.

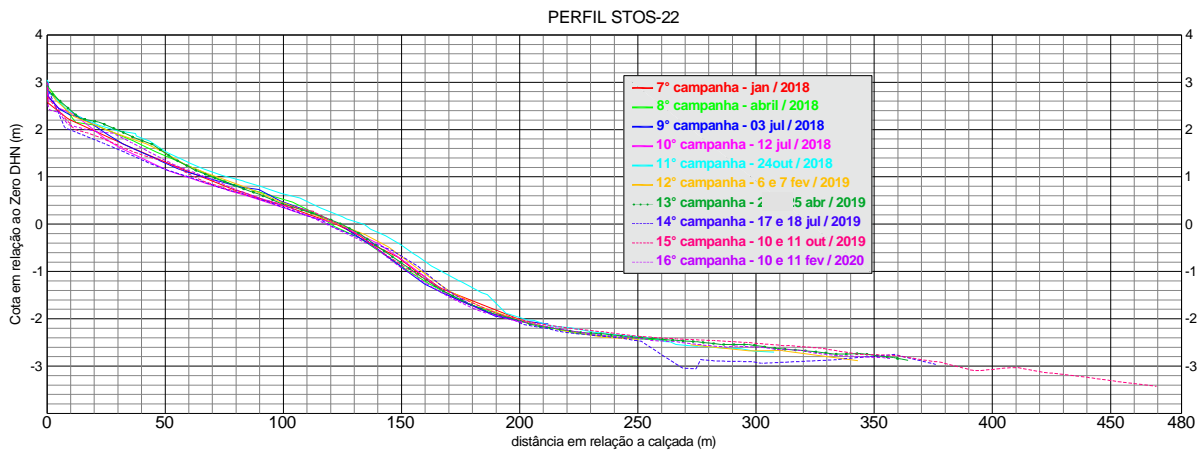


Figura 44: Perfil de praia – Seção STOS-22. Fonte: FECFAU, 2021.

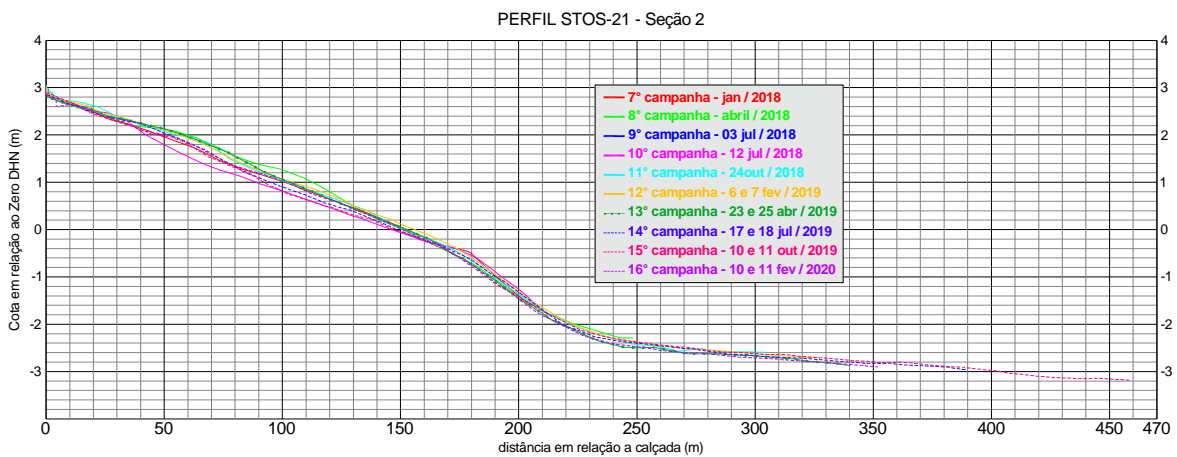


Figura 45: Perfil de praia – Seção STOS-21 – Seção 2. Fonte: FECFAU, 2021.

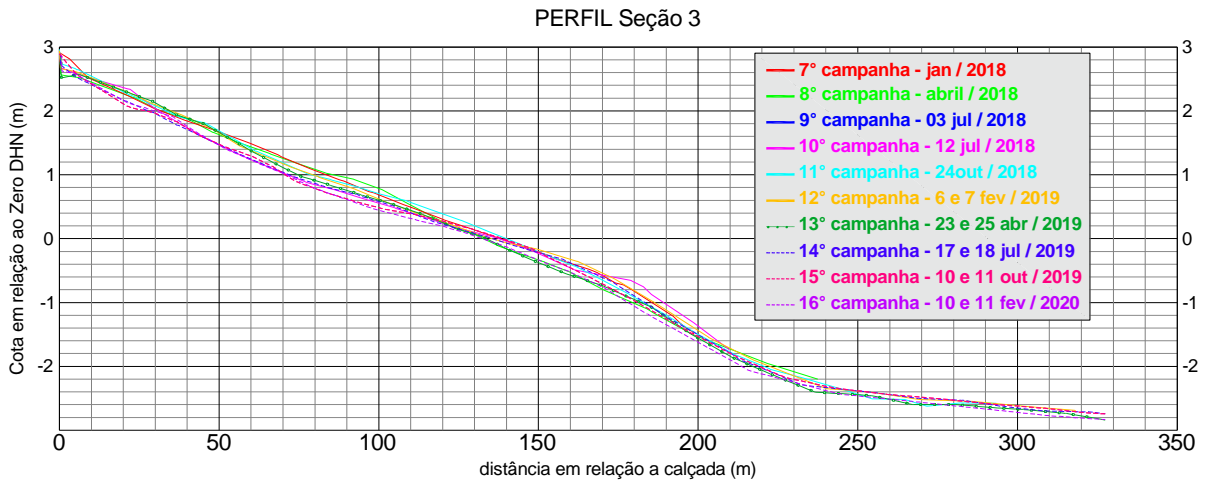


Figura 46: Perfil de praia – Seção 3. Fonte: FECFAU, 2021.

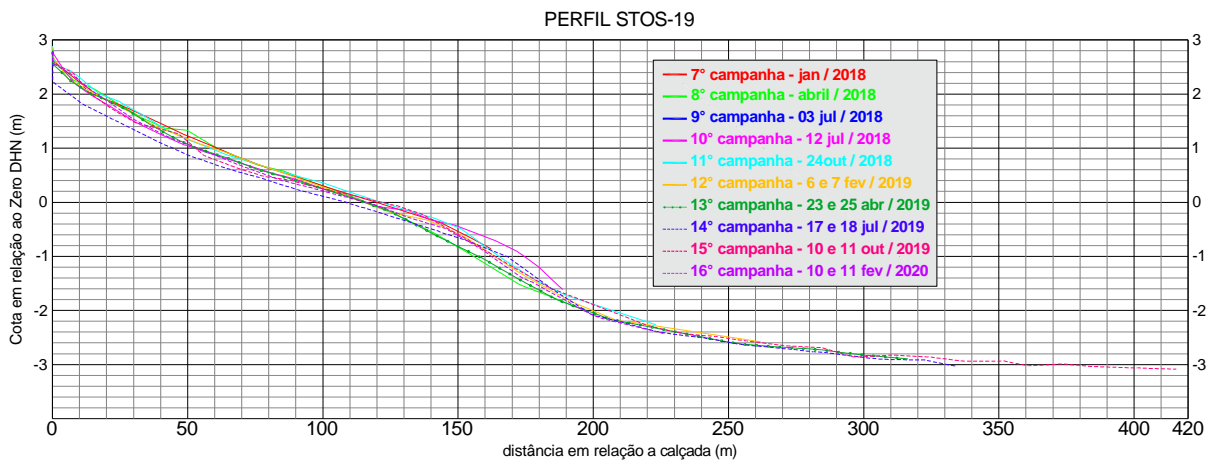


Figura 47: Perfil de praia – Seção STOS-19. Fonte: FECFAU, 2021.

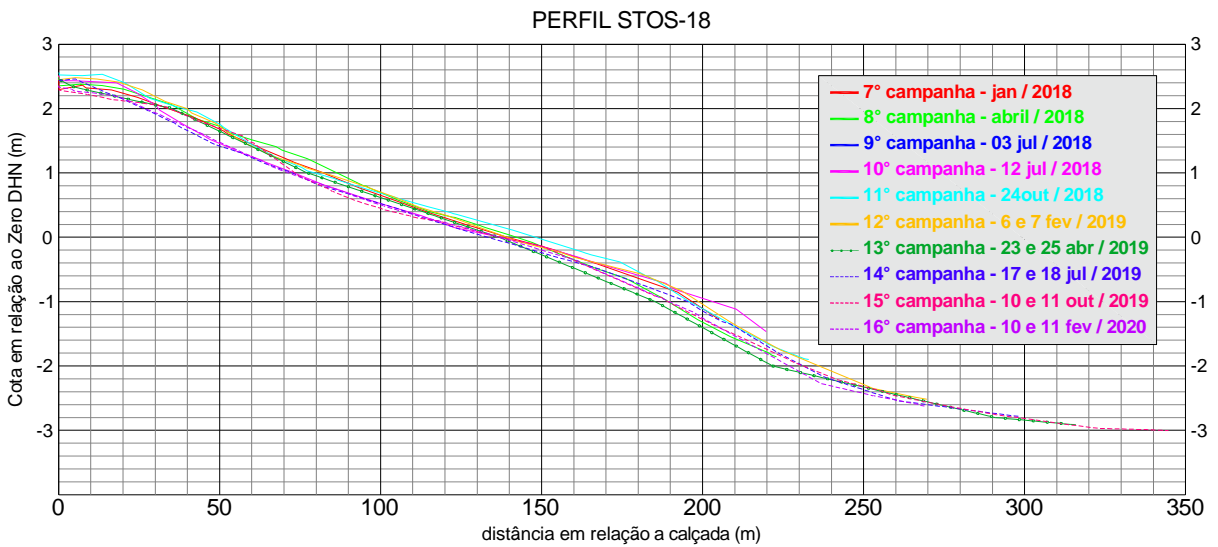


Figura 48: Perfil de praia – Seção STOS-18. Fonte: FECFAU, 2021.

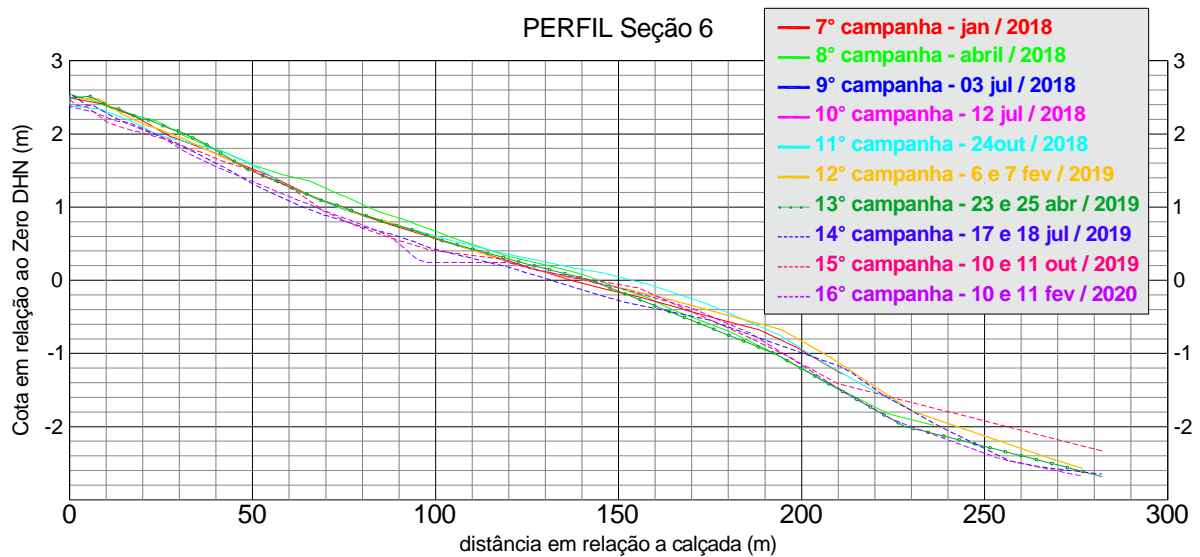


Figura 49: Perfil de praia – Seção 6. Fonte: FECFAU, 2021.

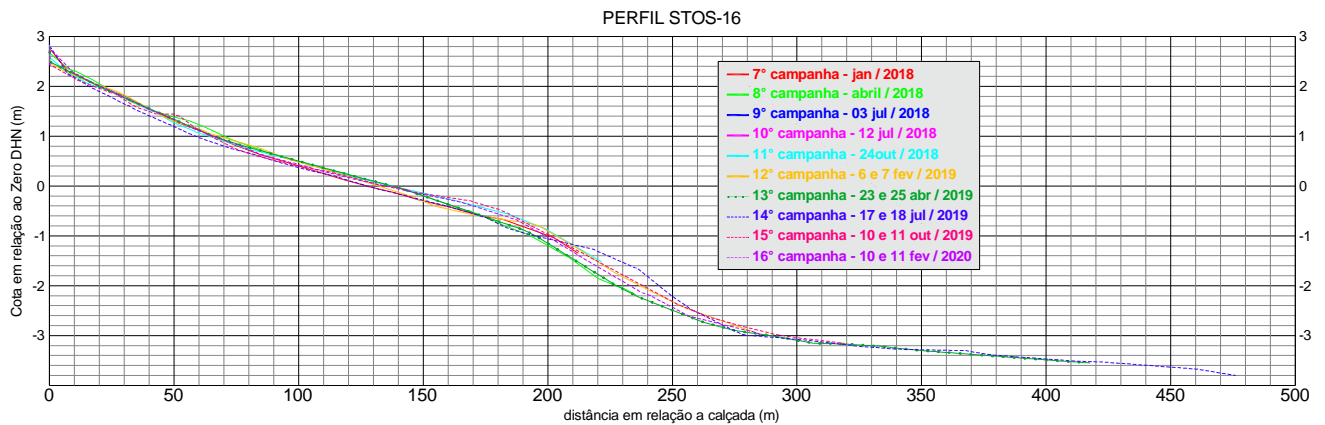


Figura 50: Perfil de praia – Seção STOS-16. Fonte: FECFAU, 2021.

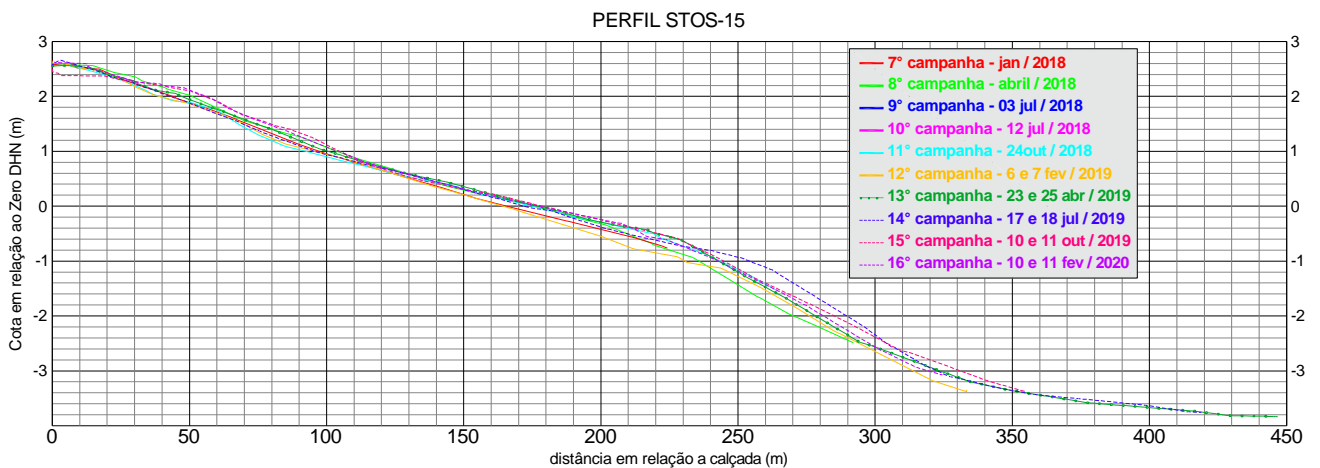


Figura 51: Perfil de praia – Seção STOS-15. Fonte: FECFAU, 2021.

Depois do levantamento de campo de outubro de 2018 (11ª campanha), a equipe da FECFAU-UNICAMP percebeu, em campo, a presença de uma brecha próxima à seção STOS-32 (Figura 41). Imediatamente após essa campanha, houve um evento de ressaca;

entretanto, uma nova coleta de dados só seria realizada em fevereiro de 2019 (12ª campanha). Tendo em vista que a obra é segmentada, ou seja, não é formada por um único geotubo contínuo, e sim por geotubos justapostos, uma provável falha de execução resultou em um espaçamento maior do que o planejado. Dessa forma, a brecha notada na 11ª campanha se transformou em um rebaixamento de cotas (de forma simplificada, um buraco) no pé da obra na região da seção STOS-32, identificado na 12ª campanha. Todavia, devido à metodologia adotada em campo, a brecha não pôde ser medida, uma vez que a obra é submersa, a área é profunda e o nadador portador do prisma tem pouca visibilidade.

Na busca de informações mais detalhadas desse problema, como tamanho da brecha e/ou extensão dos danos, solicitou-se à Prefeitura de Santos a realização de sondagens com vídeo e sonar de varredura lateral, mas não se obteve sucesso. A pandemia de covid-19, decretada em março de 2020, afetou não apenas a periodicidade dos levantamentos de campo como causou o redirecionamento da verba destinada para a recuperação da estrutura do projeto-piloto para a área de saúde pública, postergando qualquer manutenção na obra.

Posteriormente, houve uma aproximação entre a equipe da FECFAU-UNICAMP e a Santos Port Authority (SPA) que resultou na possibilidade da obtenção dos dados a respeito da brecha identificada na estrutura. A SPA realizou medições entre os anos de 2020 e 2021 e gerou relatórios, fornecidos nos meses de junho e dezembro de 2021. Com base nesses relatórios foi possível detectar a brecha supracitada e também o desaparecimento de um geotubo no segmento transversal da obra (este, no entanto, estava presente no levantamento de fevereiro de 2020, 16ª campanha), conforme apresentado na Figura 52.



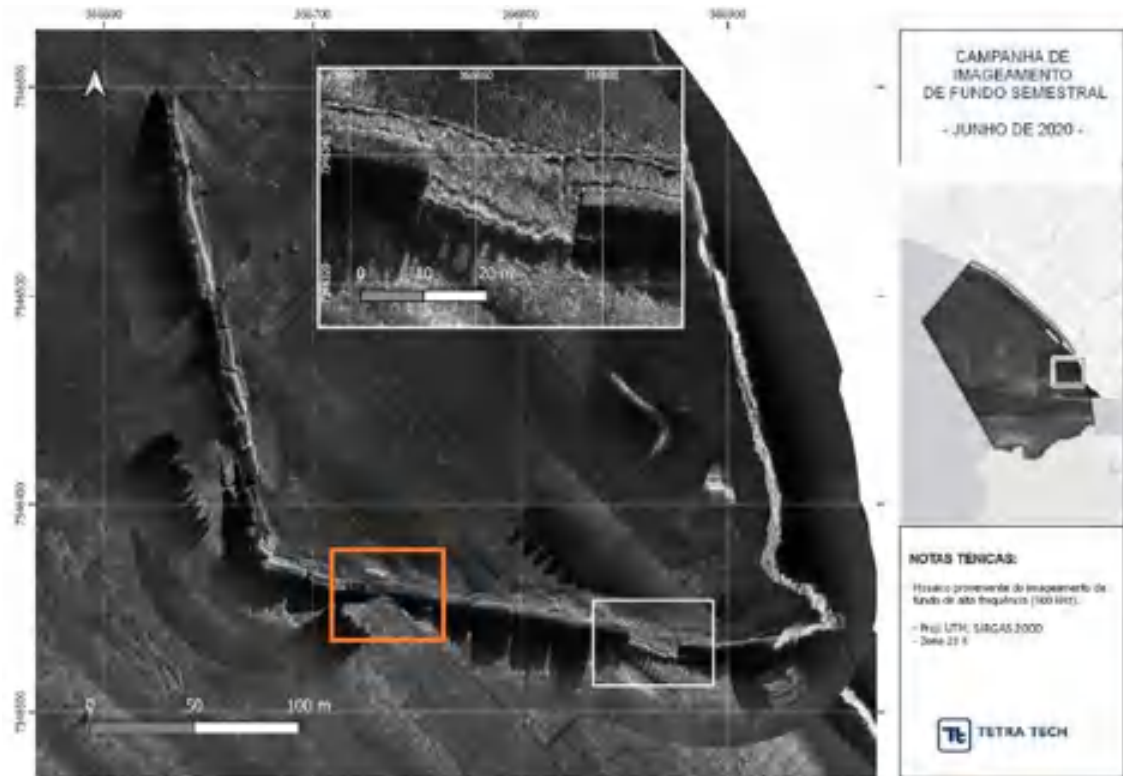


Figura 52. Aproximação na área da estrutura submersa de contenção de erosão da Ponta da Praia referente ao levantamento de junho de 2020. No retângulo laranja está a brecha identificada próxima à seção STOS-32 e no retângulo branco tem-se o geotubo desaparecido. Fonte: Adaptado de SPA, 2021.

De acordo com o relatório parcial emitido para a Prefeitura de Santos (FECFAU, 2021), a variação da linha de costa entre o período de 2018 a 2020 resultou, de forma geral, em diversos pontos de recuo (erosão) na região entre a ponta da praia e o Canal 5. Conforme a Tabela 10 a seguir, apenas no trecho diretamente abrigado pela obra obteve-se um avanço na extensão de praia.

Tabela 10 – Variação da Zero DHN entre os anos de 2018 e 2020.

<b>Localização do trecho</b>	<b>Nome da seção</b>	<b>Variação da Zero DHN (m)</b>
Em cima da STOS-18.	STOS-18	Recuo de 1,6 m
Próxima à seção 4 e à STOS-19	Seção 4'	Recuo de 1,3 m
Oeste do Canal 6	Seção 3'	Recuo de 2,4 m
Leste do Canal 6	Seção 2'	Recuo de 1,0 m
Próxima à seção STOS-23.	Seção 0-1	Avanço de 6,3 m

Fonte: Elaborada pela autora

Por fim, o balanço sedimentar foi calculado, de forma mais efetiva, segundo um parâmetro denominado Evolução Média de Fundo ( $E_f$ ). A adoção desse índice se deve ao fato

de os levantamentos nem sempre cobrirem as mesmas áreas de influência, seja devido ao mau tempo, seja devido ao tamanho da baliza do prisma. A evolução média de fundo é, portanto, a razão entre o volume do balanço sedimentar (diferença de volumes entre levantamentos consecutivos obtida por meio do uso de MDEs, como ilustrado na Figura 53) e sua área de influência, sendo representada pela Equação 1 (Garcia et al., 2022, no prelo).

$$E_f = \frac{\text{volume balanço}}{\text{área de influência}} \quad (1)$$

Convencionou-se que a variação positiva de volumes equivale à acreção de sedimentos na área em questão, enquanto a variação negativa equivale à erosão. Os valores de  $E_f$  para os trechos: i) entre extremidade da praia e Canal 6 e ii) entre Canal 5 e Canal 6 estão apresentados nas Tabelas 11 e 12.

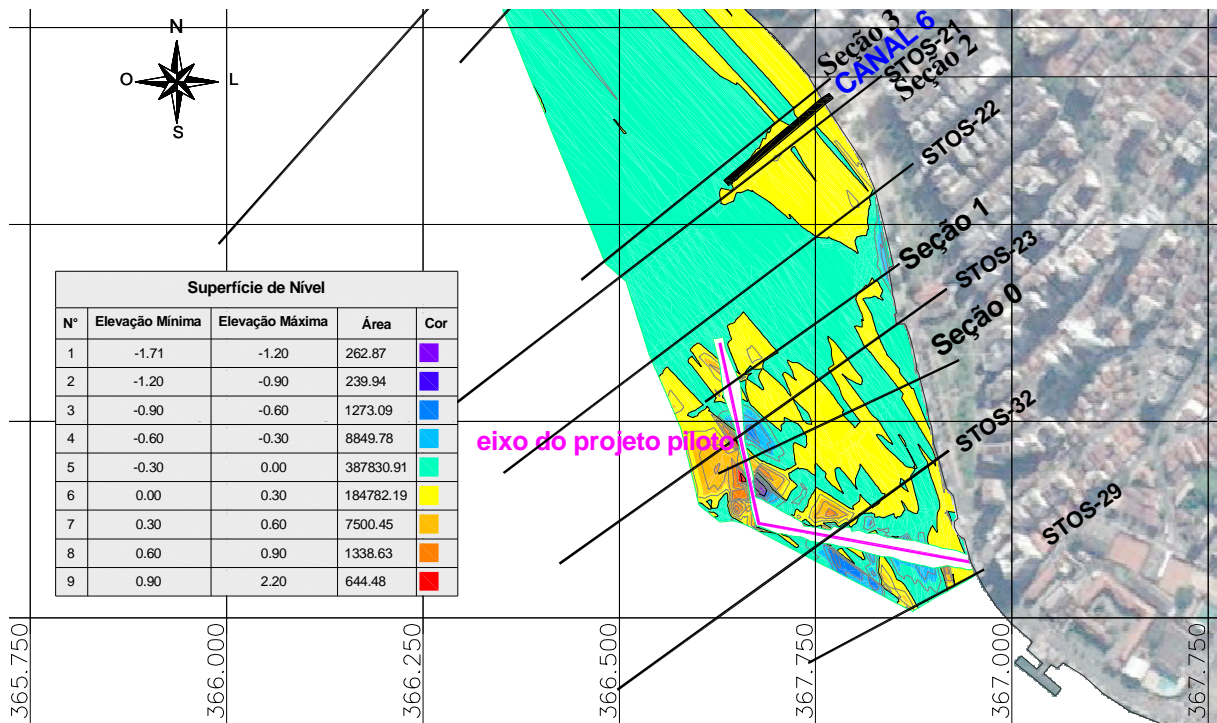


Figura 53: Variação de cotas (m) entre 10 e 11 de fevereiro de 2020 (16ª campanha) e 10 e 11 de outubro de 2019 (15ª campanha) – na região entre a extremidade da praia e o Canal 6. Fonte: FECFAU, 2021.

Tabela 11 – Balanço sedimentar e evolução de fundo para o trecho entre a extremidade da praia e o Canal 6.

Nº da campanha inicial	Nº da campanha final	Área (m <sup>2</sup> )	Balanço sedimentar (m <sup>3</sup> )	Volume lançado pela prefeitura (m <sup>3</sup> )	Evolução média dos fundos – E <sub>f</sub> (cm)
7º	8º	80.070,2	5.497,2	0	6,9
8º	9º	78.184,0	5.306,1	1.310,4	13,7
9º	10º	78.813,4	-3.225,3	0,0	9,6
10º	11º	100.601,3	9.381,4	4.552,8	18,9
11º	12º	113.500,6	-6.625,2	3.192,0	13,0
12º	13º	125.015,4	-4.234,6	756,0	9,7
13º	14º	126.863,6	-3.921,3	151,2	6,6
14º	15º	131.559,8	6.006,2	680,4	11,1
15º	16º	126.351,7	-2.858,9	907,2	8,9

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 12 – Balanço sedimentar e evolução de fundo para o trecho entre o Canal 5 e o Canal 6.

Nº da campanha inicial	Nº da campanha final	Área (m <sup>2</sup> )	Balanço sedimentar (m <sup>3</sup> )	Volume lançado pela prefeitura (m <sup>3</sup> )	Evolução média dos fundos – E <sub>f</sub> (cm)
7º	8º	157.070,6	-1.736,5	0,0	-1,1
8º	9º	-	-	-	-1,1
9º	10º	-	-	-	-1,1
10º	11º	166.741,8	11.075,5	0,0	5,5
11º	12º	170.970,2	-4.213,4	0,0	3,1
12º	13º	229.278,3	-24.017,1	0,0	-7,4
13º	14º	257.745,6	-3.247,5	134,4	-8,7
14º	15º	271.649,2	17.489,0	4.359,6	-2,2
15º	16º	220.206,2	-11.713,9	705,6	-7,5

Fonte: Elaborada pela autora

A análise do balanço sedimentar e da evolução média dos fundos, apresentada nas tabelas 11 e 12, aponta uma estabilidade e/ou ganho de material na região abrigada pelo projeto-piloto (entre o Canal 6 e a extremidade da praia, Tabela 11). Por outro lado, na região entre os canais 5 e 6 há uma tendência de perda de sedimentos (Tabela 12).

No trecho compreendido entre a extremidade da praia e o Canal 6, o aumento médio de cota de fundo atingiu o valor de 18,9 cm em outubro de 2018 (evolução entre as campanhas 10 e 11, tabela 11). No entanto, logo após a 11ª campanha, ocorreu uma ressaca (Tabela 7) e, a partir de então, a região passou a se manter estável – com perdas de sedimentos em períodos de mau tempo e recuperação de sedimentos nos períodos de bom

tempo –, de forma que o volume acumulado não aumentou (FECFAU, 2021; GARCIA et al., 2022, no prelo). Sendo assim, é importante ressaltar dois aspectos:

- Após fevereiro de 2019 (12<sup>a</sup> campanha), a prefeitura de Santos não lançou mais o mesmo volume que costumava lançar na região, volume este que contribuía para que a praia se recuperasse mais rapidamente. Tais volumes foram essenciais para manter a estabilidade dos fundos em períodos anteriores, tais como entre a 10<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> campanha e entre a 11<sup>a</sup> e 12<sup>a</sup>, correspondendo a cerca de 50% do total do balanço sedimentar (Tabela 11).
- A brecha próxima à região da seção STOS-32 (Figura 52) se formou após o evento de ressaca que ocorreu em outubro de 2018, conforme previamente apresentado.

Já no trecho entre os canais 5 e 6, os dados de balanço sedimentar e evolução dos fundos (Tabela 12) reforçam que esta é a região com maior tendência erosiva do período analisado, não apenas na parte emersa, conforme observado nas taxas de recuo da linha de costa (Tabela 10), mas em toda a área de movimentação dinâmica dos sedimentos, chegando ao rebaixamento médio de cota de fundo de 7,5 cm no período entre 2017 e 2020. E certamente tal rebaixamento seria ainda maior se não fosse lançado pela prefeitura um volume considerável de sedimentos (cerca de 25% do total do balanço sedimentar entre a 14<sup>a</sup> e 15<sup>a</sup> campanha) (FECFAU, 2021; GARCIA et al., 2022, no prelo).

Portanto, de forma geral, quando observados o balanço sedimentar e a evolução média dos fundos, fica evidente que a área protegida pelo projeto-piloto teve ganho de volume de material acumulado. Além disso, a alimentação artificial, mesmo que realizada de maneira pouco controlada e sem continuidade, mostrou-se eficaz para o controle da faixa emersa da praia durante os períodos críticos de erosão (FECFAU, 2021; GARCIA et al., 2022, no prelo).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste presente trabalho abrange três etapas principais, sendo elas:

- Montagem e atualização dos modelos numéricos: módulo hidrodinâmico (FM-HD) e módulo de ondas espectrais (SW) do *software* Mike 21;
- Modelagem numérica a partir dos dois módulos para análise de sensibilidade do modelo ao refinamento da malha;
- Modelagem numérica a partir dos dois módulos para a análise de diferentes cenários batimétricos.

As configurações do computador utilizado para a execução das modelagens são:

- Processador: Intel® Core™ i7-3960X CPU @ 3.30GHz
- Memória RAM: 32 GB
- Sistema operacional: Windows 7 Enterprise de 64 Bits.

### 5.1. Montagem do modelo numérico

Os modelos numéricos são representações aproximadas da realidade, especialmente se tratando de modelos da zona costeira. Este trabalho, por sua vez, fez uso do programa Mike 21, desenvolvido e fornecido pelo Danish Hydraulic Institute (DHI), com licença gratuita limitada para fins acadêmicos. Foram utilizados dois módulos bidimensionais específicos: o *Flow Model Flexible Mesh – Hydrodynamic Module* (FM-HD) e o *Spectral Wave Module* (SW). O módulo FM-HD é responsável pela base e simulações hidrodinâmicas, que funcionam como *input* dos demais módulos (DHI, 2016a). Já o módulo SW trabalha com a análise de clima de ondas em regiões costeiras e na zona *offshore*, porém com limitações de cálculo nos fenômenos de reflexão e difração (DHI, 2016b).

#### 5.1.1. Modelo numérico Mike 21: hidrodinâmico (FM-HD)

O modelo-base deste trabalho foi inicialmente atualizado e calibrado por Corrêa et al. (2016) e inclui toda a representação da região estuarina. A batimetria inicial adotada foi composta por um mosaico de informações provenientes de cartas náuticas, folhas de bordo e dados secundários de outros tipos de levantamentos. A seguir, tem-se o detalhamento de tal batimetria (VENANCIO, 2018; VENANCIO et al., 2020):

- Dados batimétricos DHN:
  - FB – 1700-005/82 – De ‘Ilha da Moela’ a ‘Ilha Montão de Trigo’ – escala 1:100000 (GARCIA et al., 2002);
- Cartas náuticas:
  - Carta nº. 1701 (Detalhe de São Vicente) – escala 1:23000 (MARMIL, 2015a);
  - Carta nº. 1711 (Adjacências do Porto de Santos) – escala 1:80000 (MARMIL, 2015b);
- Fontes hidrográficas:
  - CTH – 1976 – Estuário e Baía de São Vicente – escala 1:2000 (GARCIA et al., 2002);
  - INPH – 2006 – Canal de acesso ao Porto de Santos – escala 1:5000 (INPH, 2007);
  - Mangue (estimativa) – Estimou-se as planícies de inundação e partes do canal de Bertioga por meio de interpolação de fontes hidrográficas e imagens do Google Earth (SOUZA, 2017).

O modelo tem como principais forçantes a elevação de maré e ventos (o dado de vento se encontra na Tabela 4). Sendo assim, o estuário de Santos possui uma maré de desigualdades diurnas e a amplitude de maré pode atingir até 1,5 m (HARARI; CAMARGO, 2003), logo, as bordas foram compostas de nove nós e oito segmentos. A forçante de maré para cada nó foi calculada utilizando as nove componentes de maré mais energéticas para a região de Santos (Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2 e M3). Baseando-se em um modelo de plataforma com observações durante 46 anos no porto de Santos (de 1944 a 1989), foi realizado um ajuste de amplitude e defasagem em cada nó para as nove componentes (HARARI; CAMARGO, 1994). O modelo hidrodinâmico apresenta também nove pontos de descarga fluvial ao longo do estuário, conforme apresentado na Figura 54, considerando descargas fluviais de longo prazo apresentadas por Roversi et al. (2016a).

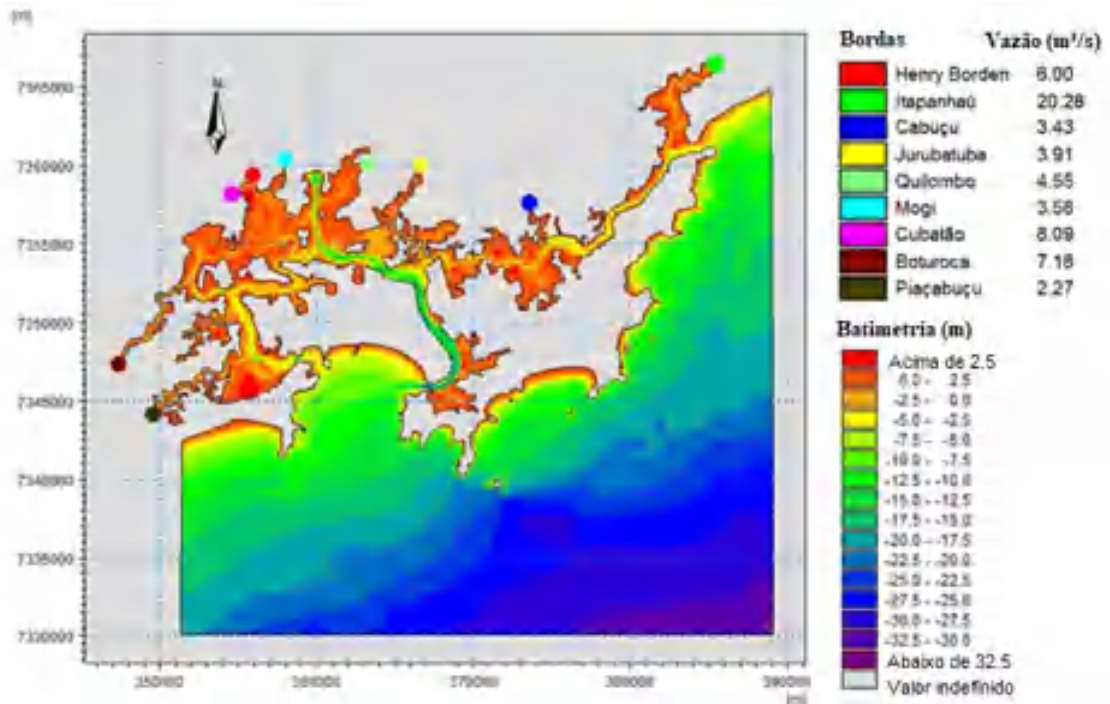


Figura 54. Modelo do sistema estuarino e região litorânea de Santos, batimetria de 2006 interpolada utilizando Mike Mesh Generator e descargas fluviais de longo prazo (m³/s). Fonte: Adaptado de Corrêa et al., 2018.

Posteriormente, a área do modelo foi recortada, abrangendo apenas a Baía de Santos e adjacências, uma vez que era necessário um melhor detalhamento da batimetria na região costeira, principalmente no trecho entre o Canal 4 e a ponta da praia (Figura 55). O recorte na área inicial teve por objetivo a redução do tempo de processamento computacional das simulações (VENANCIO, 2018; VENANCIO et al., 2020).

Dada essa condição, foi adotada como hipótese que as mudanças topobatimétricas impostas à área interna ao recorte não trazem alterações ao regime de correntes de enchente e vazante nas embocaduras dos estuários de Santos e São Vicente, assim como nas bordas marítimas. Dessa forma, as modificações topobatimétricas, utilizadas para produzir os cenários de simulação, impactam apenas a Baía de Santos e suas adjacências.

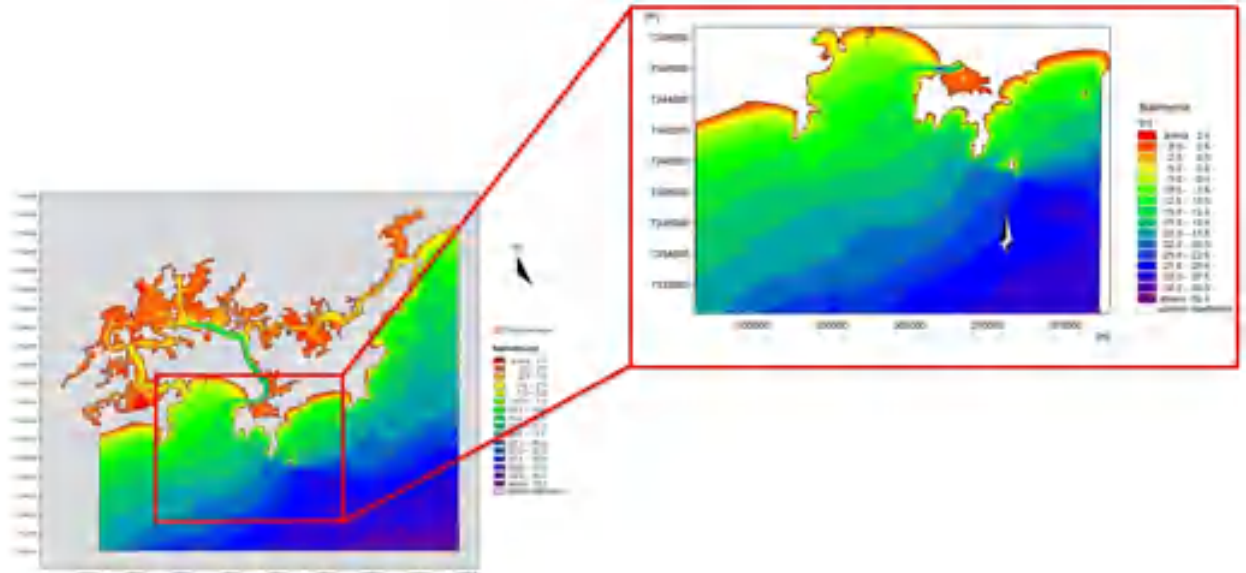


Figura 55. Recorte no modelo-base. À esquerda tem-se o modelo original e à direita tem-se a área recortada que foi adotada neste trabalho. Fonte: Adaptado de Corrêa et al. (2016); Venancio (2018).

A partir do modelo recortado, obteve-se o cenário-base que parte, a princípio, da seguinte descrição (VENANCIO, 2018, p. 100; VENANCIO et al., 2020, p. 6):

atualização do canal do porto para a situação de pós-dragagem de aprofundamento e alargamento [...] com a substituição da batimetria do trecho compreendido entre os limites do canal de acesso e à calçada da orla, com os detalhes descritos a seguir:  
 Perfis batimétricos no trecho entre os Canais 4 e 5 pelas informações coletadas por (FUNDESPA, 2014);  
 Perfis batimétricos no trecho entre o Canal 5 e a ponta da praia pelos dados coletados em campo em 28 de setembro de 2016;  
 Perfis topográficos no trecho entre o Canal 4 e a ponta da praia pelos dados coletados no levantamento realizado em 15 de setembro de 2016.

Neste trabalho, essa definição inicial foi acrescida de dados do projeto da obra-piloto. Portanto, o atual cenário-base inclui a obra-piloto projetada por Garcia e Gireli (2019), sendo assim equivalente ao Cenário 4 de Garcia et al. (2018). A obra-piloto foi implantada nos primeiros meses de 2018 na região da Ponta da Praia, em Santos. De forma resumida, o cenário-base contempla dados anteriores a 2017 (VENANCIO, 2018; VENANCIO et al. 2020) e dados de 2018 do projeto da obra-piloto (GARCIA et al., 2018).

Considerando a importância do uso de modelos numéricos com dados atualizados (VENANCIO et al., 2020) e as diversas mudanças de batimetria que ocorreram na área de estudo nos últimos anos – seja por efeitos das intervenções humanas, seja por fenômenos climáticos –, este trabalho se propôs a utilizar os dados mais recentes disponíveis em congruência com o cenário a ser simulado.



### 5.1.2. Modelo numérico Mike 21: ondas espectrais (SW)

O módulo de ondas espectrais (SW) do programa Mike 21 é utilizado, geralmente, para a visualização do crescimento, decaimento e transformação de ondas geradas pelo vento e marulhos em zonas costeiras ou *offshore*. O módulo possui duas opções de formulação: formulação espectral completa (*fully spectral formulation*) e formulação paramétrica direcional desacoplada (*directional decoupled parametric formulation*).

Para a configuração do módulo SW, neste presente trabalho, foi adotada a formulação espectral completa em associação com as saídas do modelo hidrodinâmico descrito na seção 5.1.1, especificamente os níveis d'água e as condições de corrente na região de interesse.

Posteriormente, o módulo SW foi empregado para simular o comportamento das ondas, fazendo uso dos mesmos cenários adotados para as simulações hidrodinâmicas, bem como para a análise do comportamento associado de ondas e correntes.

Para a calibração do modelo foram necessários: dados da onda de projeto (Tabela 4) e a batimetria do cenário-base. Entretanto, como o SW aceita apenas ondas inseridas na borda, ou seja, distante do ponto de medição, fez-se necessário realizar diversos testes com ondas aleatórias de forma a se obter um trem de ondas com os parâmetros (altura, período, direção e ângulo de incidência) equivalentes ao da onda medida (VENANCIO, 2018). O trem de ondas obtido foi utilizado para na simulação dos demais cenários.

Por fim, como a onda utilizada na calibração do SW já era bastante energética, optou-se por manter esse mesmo dado de onda para todas as simulações que foram conduzidas ao longo do presente trabalho.

## 5.2. Refinamento e análise de sensibilidade da malha batimétrica

Um modelo computacional costeiro apresenta pontos de atenção e objetivos bastante distintos de um modelo hidrodinâmico de análise geral. As diferenças podem ser apontadas desde sua montagem, ou seja, na escolha do tipo de malha e batimetria, até a forma como as análises serão conduzidas, uma vez que o modelo costeiro permite um foco maior na região das praias.

Diversos autores têm apontado a importância de se trabalhar com batimetrias e malhas adequadas dentro dos modelos, buscando uma resposta ótima das simulações (ÁLVAREZ et al., 2020; EIDAM et al., 2020; KHANARMUEI et al., 2020; PLANT et al.,

2009). A suavização ou refinamento da batimetria e, por consequência, da malha compõe uma estratégia para a compatibilização mais adequada entre a grade do modelo utilizado e os dados batimétricos de entrada, de forma a reduzir os erros entre o que foi observado (ou medido) e o que foi modelado. Assim, tem-se um modelo mais alinhado com a realidade.

Plant et al. (2009), por exemplo, trabalharam com uma resolução espacial de  $\Delta x = 10$  m e  $\Delta y = 25$  m, enquanto Álvarez et al. (2020) aplicaram uma grade longitudinal de 25 m e uma grade transversal de 15 m.

No entanto, o modelo adotado no presente trabalho faz uso de uma malha do tipo triangular e não estruturada. Neste tipo de malha, as dimensões dos triângulos são calculadas pelo programa a partir de pontos definidos nas bordas da área de interesse e nas bordas dos polígonos. Tais polígonos, por sua vez, são criados e inseridos dentro da área de interesse de forma a possibilitar a redução do tamanho dos triângulos que compõem a malha, ou seja, o uso de polígonos viabiliza o refinamento da malha em regiões estratégicas.

Sendo assim, para compatibilizar a malha deste estudo com os valores sugeridos pela literatura, criaram-se polígonos nas regiões onde se buscava melhoria da malha, além de adicionar pontos extras nos contornos de polígonos existentes. Em vista disso, houve uma redução na dimensão das arestas dos triângulos.

É importante ressaltar que a malha adotada até aqui contava com polígonos no contorno das ilhas, na entrada da Baía de Santos, na entrada da Baía de São Vicente, nos limites do canal do porto, no entorno da obra do projeto-piloto e no entorno das obras estudadas entre os canais 5 e 6.

Dessa forma, os espaçamentos iniciais entre pontos para as diversas regiões da área de estudo, antes do processo de refinamento de malha, seguiram as diretrizes:

- Espaçamento entre 40 e 60 m na região da praia;
- Espaçamentos maiores que 80 m na região da baía de Santos;
- Espaçamento de 10 m na região do projeto-piloto e em áreas nas quais era previsto fazer testes com inserção de novas obras.

Foi implementada, na nova malha gerada, uma melhoria na região próxima à praia, obtendo-se valores de espaçamento semelhantes aos sugeridos pela literatura, de forma que o modelo pudesse ser capaz de enxergar mais detalhes. Para tal, foi acrescentado um polígono a mais na região em questão, de modo que as novas arestas resultantes dos triângulos fossem de 10 m. Ressalta-se que, em função do tipo de malha, não foi adotada uma resolução espacial diferente entre a grade longitudinal e a grade transversal.

Na Figura 56 é apresentada a malha refinada gerada pelo programa, que foi adotada para o presente trabalho, bem como as delimitações de todos os polígonos descritos anteriormente. Já na Figura 57 é apresentado um detalhe da malha na região próxima à praia, na qual o modelo foi refinado.

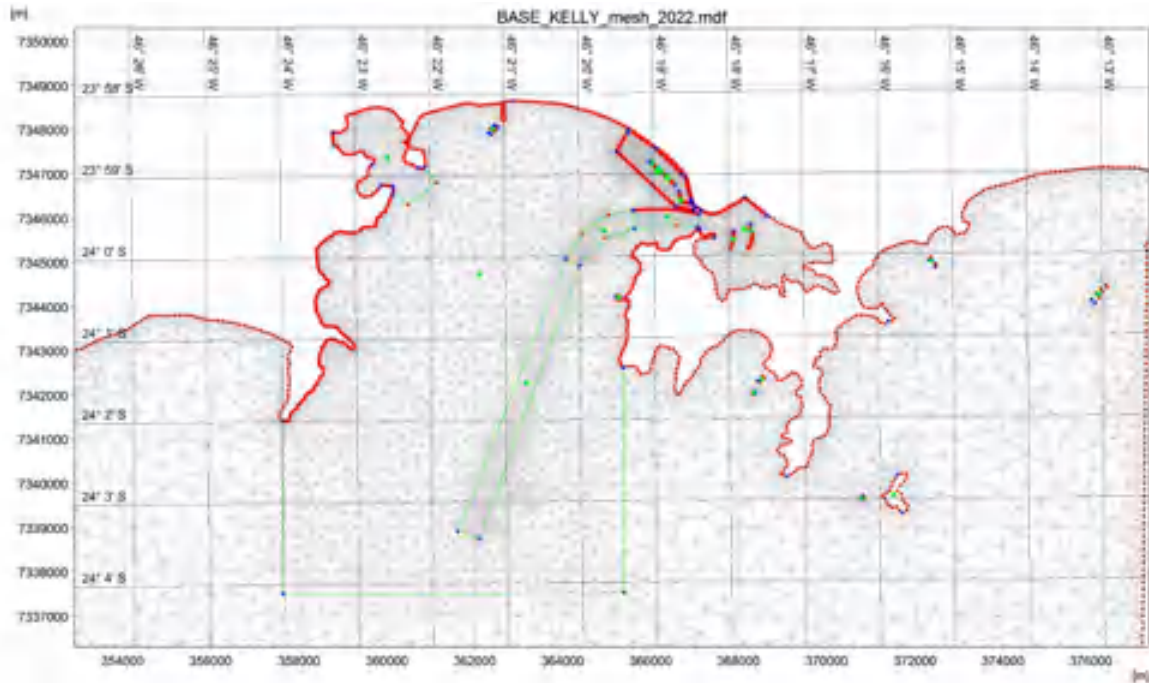


Figura 56. Malha triangular gerada a partir das bordas do modelo e dos polígonos especificados (os contornos dos polígonos estão em verde, e os pontos estão em vermelho e azul). Fonte: Elaborada pela autora.

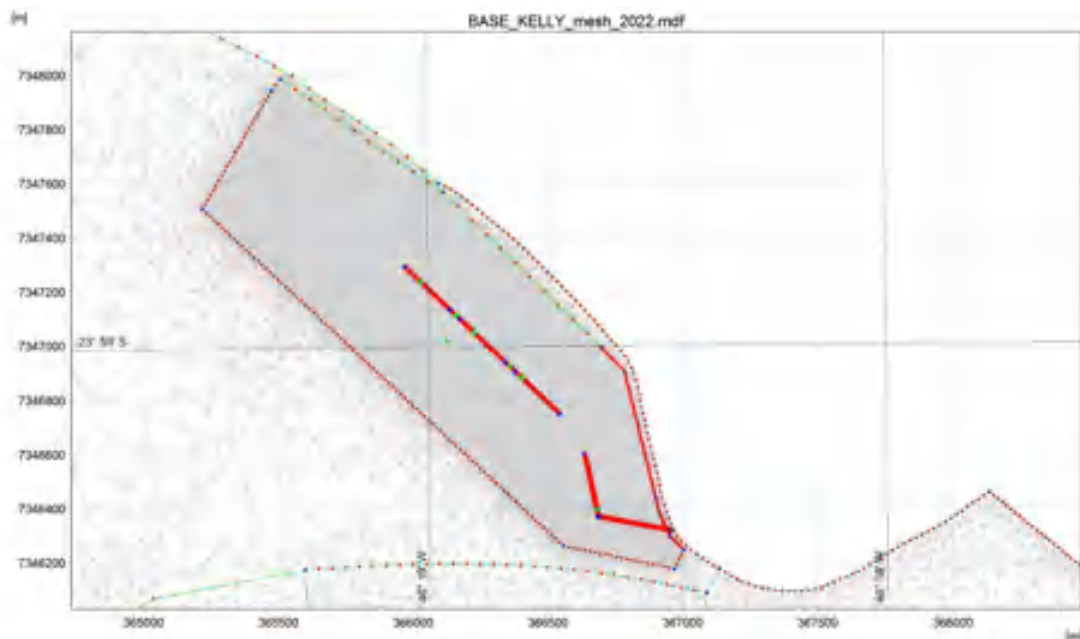


Figura 57. Detalhe da malha triangular na região próxima à linha de costa e aos limites do canal do porto de Santos (os contornos dos polígonos estão em verde, e os pontos estão em vermelho e azul). A estrutura em “L” representa o projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora.

A recomendação de Plant et al. (2009) é de que a suavização e interpolação dos dados batimétricos sejam feitas de forma diferenciada para o modelo de ondas e o modelo hidrodinâmico, uma vez que os modelos utilizam domínios numericamente diferentes e, portanto, apresentam sensibilidades distintas em relação à qualidade dos dados na direção transversal e longitudinal. O modelo hidrodinâmico tem maior sensibilidade à alteração de dados na direção longitudinal, enquanto que o modelo de ondas é mais sensível aos dados na direção transversal.

Entretanto, no presente estudo optou-se por manter a mesma malha para ambos os módulos (SW e FM-HD). Essa escolha se deu pelo fato de o *software* Mike 21 utilizar malha triangular e o módulo SW ser alimentado com saídas do módulo FM-HD, conforme descrito no item 5.1.2, o que permite comparações entre malhas com o mesmo grau de detalhamento.

Além de uma batimetria bem compatibilizada para que a geração da malha seja adequada, é importante que se tenha dados em grande quantidade. Ou seja, deve-se ter um volume alto de pontos cotados com espaçamento satisfatório entre eles para que a interpolação dos dados batimétricos na malha seja de alta qualidade, melhorando a resposta das simulações.

Visando atender os requisitos para a obtenção de uma malha de alta definição, os dados topobatimétricos coletados em campo foram processados utilizando o *software* Civil 3D, conforme descrito no item 4.5.2. A partir das superfícies de nível criadas nos MDEs, foram gerados pontos a cada 5 m, de forma que os arquivos batimétricos (do tipo .xyz) ficassem ricos em informações e permitissem interpolações sem grandes distorções na malha. Contudo, para entender a influência que a quantidade de dados de cotas batimétricas exerce sobre as respostas do modelo, analisou-se o parâmetro de quantidade de pontos cotados. Assim, foi proposta uma condição inicial (descrita a seguir), na qual foram inseridos pontos cotados com espaçamentos entre 40 m e 60 m.

Dessa forma, trabalhou-se com três condições de qualidade de dados:

- **1ª condição:** Malha antiga (menos discretizada na região das praias) na qual os dados batimétricos foram interpolados a partir de um conjunto de pontos cotados, com espaçamentos entre 40 e 60 m. Condição equivalente ao cenário-base descrito previamente no item 5.1.1, juntamente com a inserção da estrutura do projeto-piloto;
- **2ª condição:** Malha antiga (menos discretizada na região das praias) na qual os dados batimétricos foram interpolados a partir de um conjunto de pontos cotados, com espaçamento de 10 m na região da praia e 0,5 m na região do

projeto-piloto. Condição equivalente ao Cenário 4 de Garcia et al. (2019) – condição de implantação do projeto-piloto;

- **3ª condição:** Malha nova (refinada na praia), com triângulos de arestas de no máximo 10 m, na qual os dados interpolados de batimetria foram gerados a partir de um conjunto mais denso de pontos cotados, tal como descrito na 2ª condição (pontos cotados a cada 10 m na região da praia e 0,5 m na região do projeto-piloto).

A análise de sensibilidade do modelo ao refinamento da malha se deu, portanto, comparando-se as saídas das simulações dos módulos FM-HD e SW em cada uma das três condições supracitadas. Analisou-se a qualidade das respostas dos modelos em relação ao nível de densificação de pontos na malha e à quantidade de pontos cotados utilizados para sua interpolação.

Além disso, é importante ressaltar que não é possível se analisar, isoladamente, a atuação das ondas ou das correntes na região da Ponta da Praia (local de implantação do projeto-piloto), uma vez que se trata de uma zona de alta complexidade hidrodinâmica, na qual os dois fenômenos atuam simultaneamente. Tal complexidade está relacionada ao abrigo natural fornecido pela ilha de Santo Amaro (Guarujá) e pela proximidade à embocadura do estuário de Santos. Por outro lado, no trecho compreendido entre os canais 5 e 6 as ondas são o processo dominante, o que permite uma análise complementar com a consideração de outra premissa, detalhada mais adiante.

Dessa forma, a sensibilidade de resposta dos modelos a aberturas (ou vãos) em estruturas em locais nos quais não há influência do estuário também foi analisada. Para isso, foram utilizadas obras entre os canais 5 e 6 (conforme Figura 58), estas sugeridas por Scheltinga (2020; 2021). Diferentes aberturas foram adotadas, porém mantendo triângulos com uma aresta média de 5 m na malha na área das estruturas (3ª condição). Com esse objetivo, consideraram-se três situações:

- **Opção-base:** malha da 3ª condição da análise de refinamento apenas com a presença do projeto-piloto;
- **Opção 1** (Figura 58): malha da opção-base com a inserção de três quebra-mares destacados e submersos entre os canais 5 e 6. Cada quebra-mar com 230 m de comprimento e vão de 50 m entre eles (dimensionamento proposto por Scheltinga, (2020));

- **Opção 2** (Figura 59): malha da base com a inserção de três quebra-mares destacados e submersos entre os canais 5 e 6. Cada quebra-mar com 150 m de comprimento e vão de 130 m entre eles (dimensionamento proposto por Scheltinga (2021)).

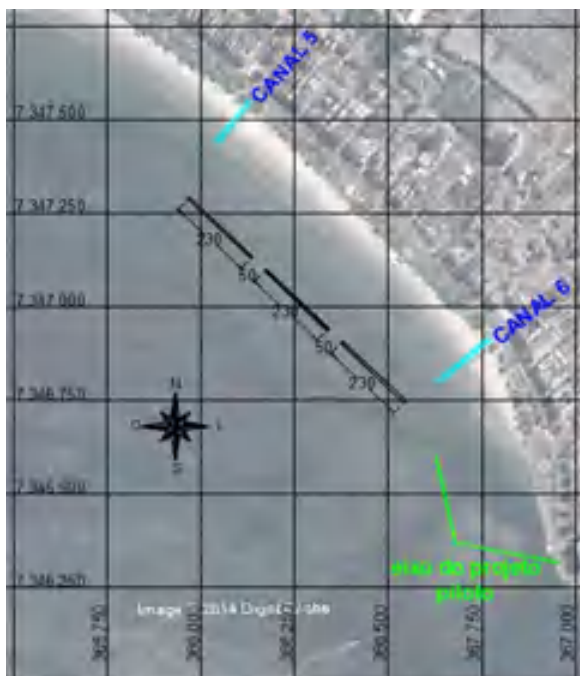


Figura 58. Desenho esquemático da implantação da Opção 1 de quebra-mares submersos e destacados. Fonte: Elaborada pela autora.

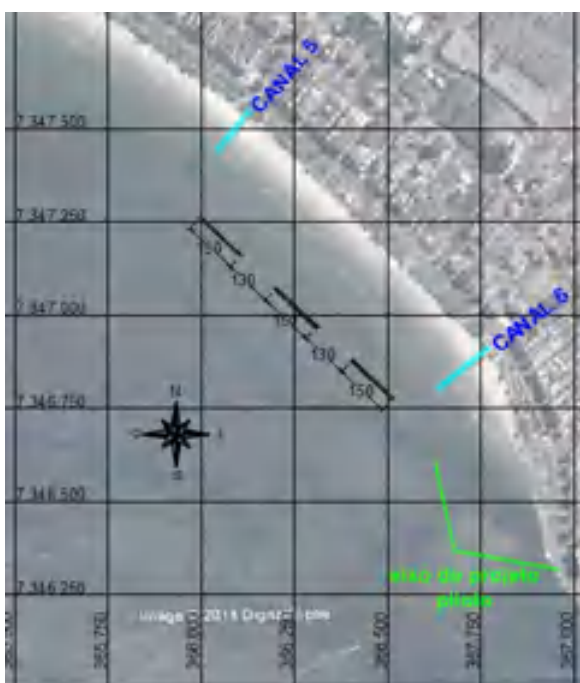


Figura 59. Desenho esquemático da implantação da Opção 2 de quebra-mares submersos e destacados. Fonte: Elaborada pela autora.

Os instantes característicos de maré adotados por Venancio (2018) e Venancio et al. (2020) foram considerados para ambas as análises previamente descritas. Os instantes são: meia maré enchente, meia hora antes da preamar, meia maré vazante e uma hora antes da baixa-mar. Os instantes de meia maré foram escolhidos por apresentarem maiores velocidades, enquanto que os instantes próximos aos estofos foram escolhidos por permitirem uma melhor visualização da recirculação de correntes que ocorre na região da Ponta da Praia.

### 5.3. Estudo sobre a sensibilidade do modelo à evolução batimétrica local

Após o processamento das análises de sensibilidade do modelo, descritas anteriormente no item 5.2, decidiu-se estabelecer um **novo cenário-base** (Figura 60) cuja batimetria passou a ser composta pelo seguinte mosaico de dados:

- Levantamento topográfico de outubro de 2018 (11ª campanha);
- Batimetria do ano de 2020 fornecida pela SPA, porém com ajustes - utilizando dados de FUNDESPA (2014) - para remover os efeitos causados pelas brechas descritas no item 4.5.2 e Figura 52, uma vez que as brechas estão inclusas em outros cenários de simulação;
- Batimetria de dezembro de 2020 para o canal do porto de Santos.

O uso dos dados topográficos de outubro de 2018 é justificado pelo fato de ser o último levantamento de campo realizado antes da percepção da brecha na região do perfil STOS-32. Neste período, a região da Ponta da Praia estava abrigada e com a maior taxa de acúmulo de sedimentos. Já a batimetria da SPA foi adotada por ser mais recente, com maior volume de dados, e também por representar uma condição de bom tempo (mês de dezembro), condizendo com os dados topográficos. Além disso, a malha do modelo (3ª condição) foi refinada na região do projeto-piloto, seguindo os valores descritos na Tabela 13, para uma melhor percepção do modelo em relação à obra implantada e possíveis falhas na estrutura.

Tabela 13 – Valores das arestas dos triângulos que compõem a malha do modelo antes e depois do processo de refinamento na área do projeto-piloto.

	Antes	Depois
<b>Arestas dos triângulos da malha na área do projeto-piloto</b>	média de 10 metros	média de 5 metros

Fonte: Elaborada pela autora.

Os demais cenários, por sua vez, foram determinados de acordo com diretrizes detalhadas adiante. Além disso, um detalhe da batimetria de cada cenário na região do projeto-piloto é apresentado nas figuras de 61 a 64.

- **Cenário 1** (Figura 61): novo cenário-base (segundo descrição prévia) com a inserção de uma brecha no projeto-piloto na região do perfil STOS-32, conforme apresentado no item 4.5.2;
- **Cenário 2** (Figura 62): cenário 1 com a acomodação da batimetria devido à brecha, ou seja, batimetria com um afundamento local na região do perfil STOS-32;
- **Cenário 3** (Figura 63): cenário 1 com a atualização do seguinte grupo de dados, visando simular uma condição de mau tempo:
  - Atualização dos perfis topográficos, inserindo dados de julho de 2019 (14ª campanha);
  - Batimetria de julho de 2020 fornecida pela SPA, de forma a ficar consistente com os dados topográficos.
- **Cenário 4** (Figura 64): cenário 1 com a atualização do seguinte grupo de dados:
  - Atualização dos perfis topográficos, inserindo dados de fevereiro de 2020 (16ª campanha);
  - Batimetria de dezembro de 2020 fornecida pela SPA;
  - Uma segunda brecha de 20 m para representar o geotubo desaparecido no trecho transversal do projeto-piloto, conforme descrito no item 4.5.2 e apresentado na Figura 52.

Em relação ao Cenário 4, é importante frisar que não foi possível realizar outros levantamentos no mesmo ano devido às restrições da pandemia, conforme explicado no item 4.5.2. Então, utilizaram-se os dados mais próximos do período de julho de 2020, quando foi notado o desaparecimento do geotubo a partir dos dados fornecidos pela SPA.



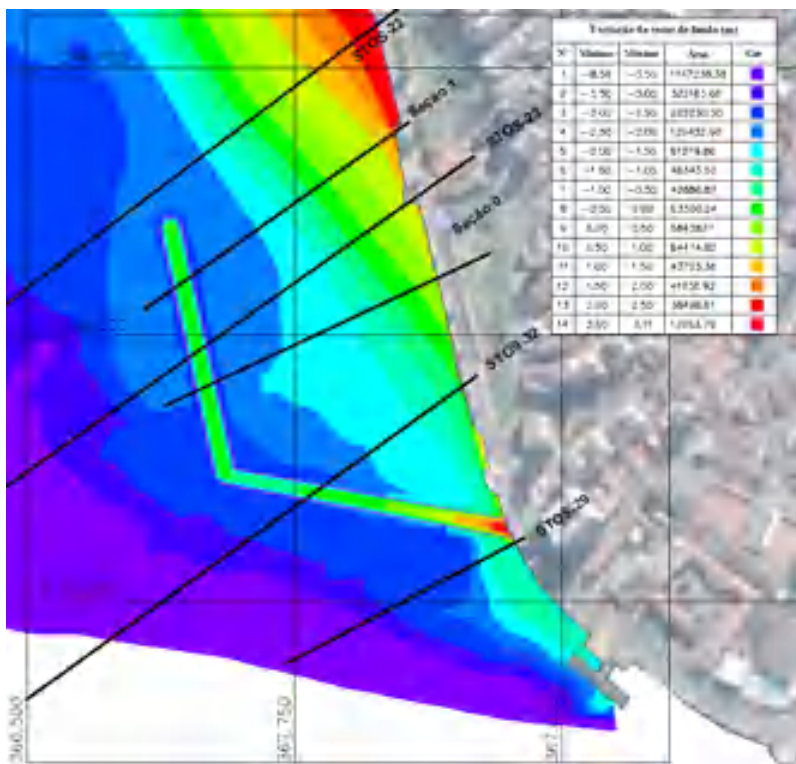


Figura 60. Novo cenário-base: detalhe da batimetria na região próxima ao projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora.

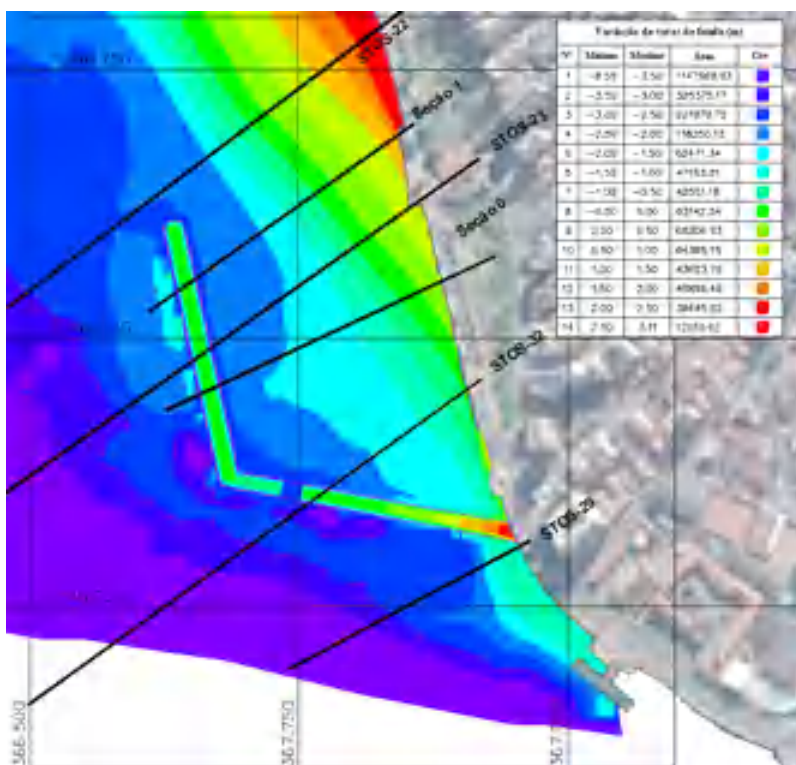


Figura 61. Cenário 1: detalhe da batimetria na região próxima ao projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora.

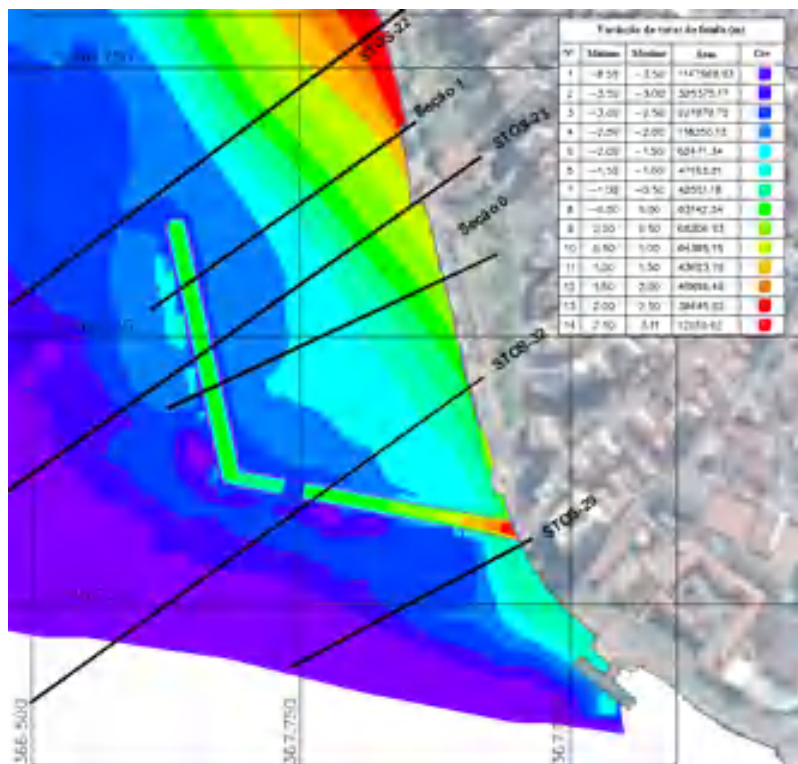


Figura 62. Cenário 2: detalhe da batimetria na região próxima ao projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora.

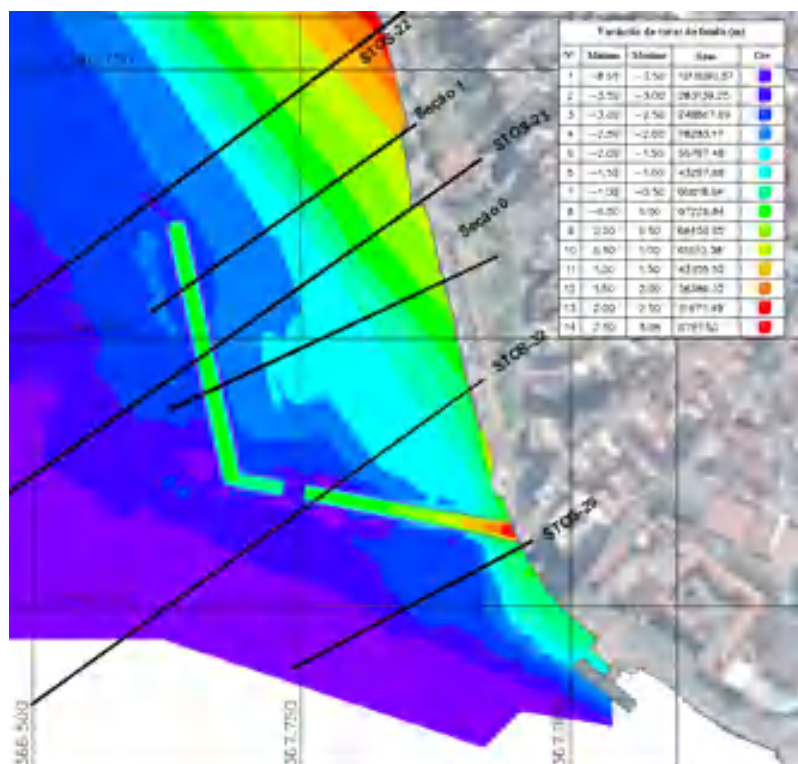


Figura 63. Cenário 3: detalhe da batimetria na região próxima ao projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora.

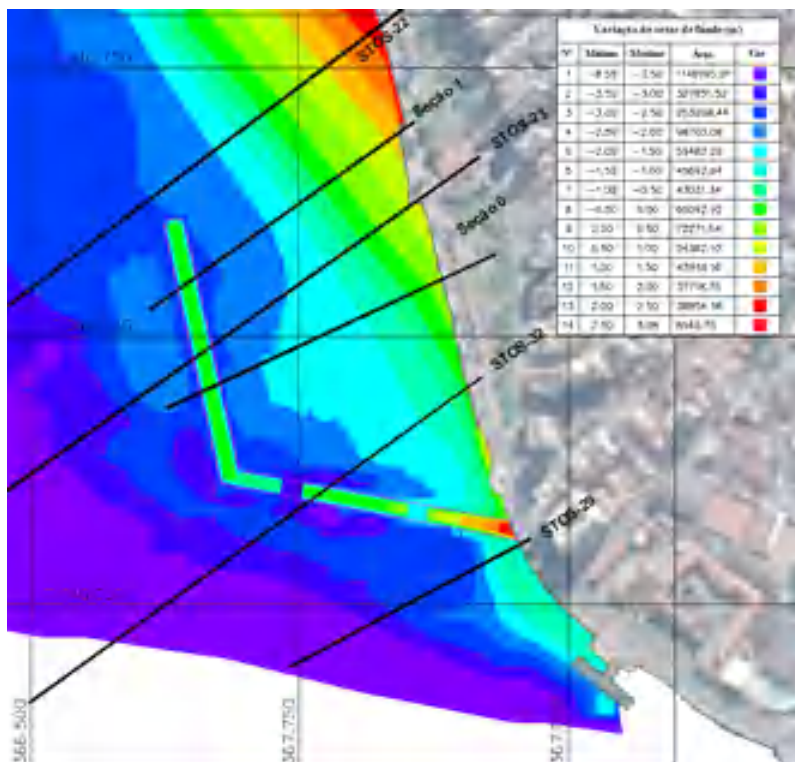


Figura 64. Cenário 4: detalhe da batimetria na região próxima ao projeto-piloto. Fonte: Elaborada pela autora.

Nas figuras de 65 a 68 são apresentadas as variações de cotas batimétricas entre os cenários de 1 a 4 e o novo cenário-base.

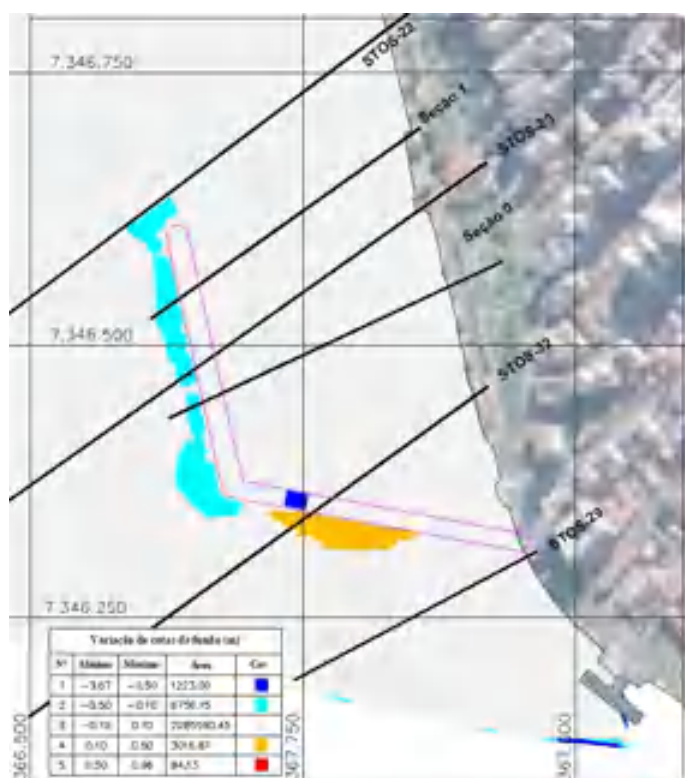


Figura 65. Variação de cotas de fundo entre o cenário 1 e o novo cenário-base. Fonte: Elaborada pela autora.

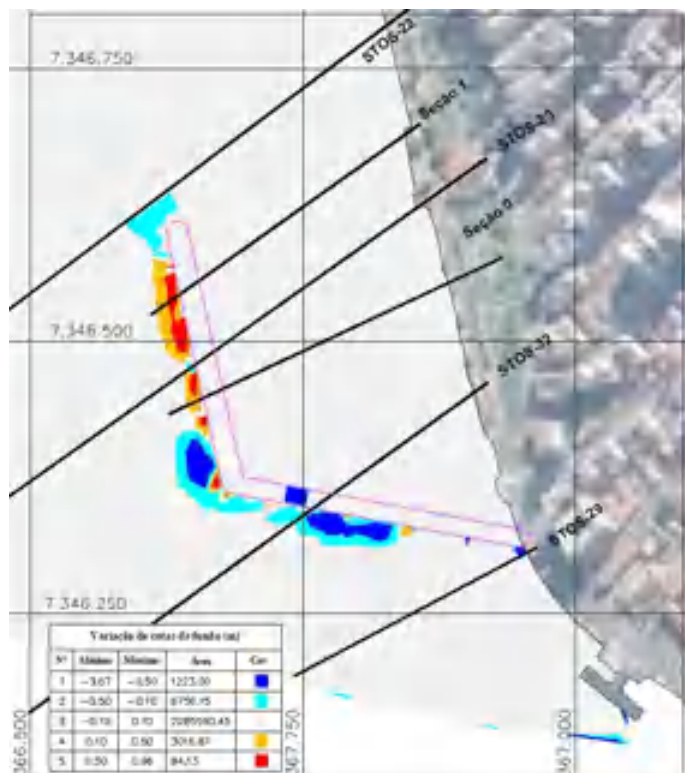


Figura 66. Variação de cotas de fundo entre o cenário 2 e o novo cenário-base. Fonte: Elaborada pela autora.

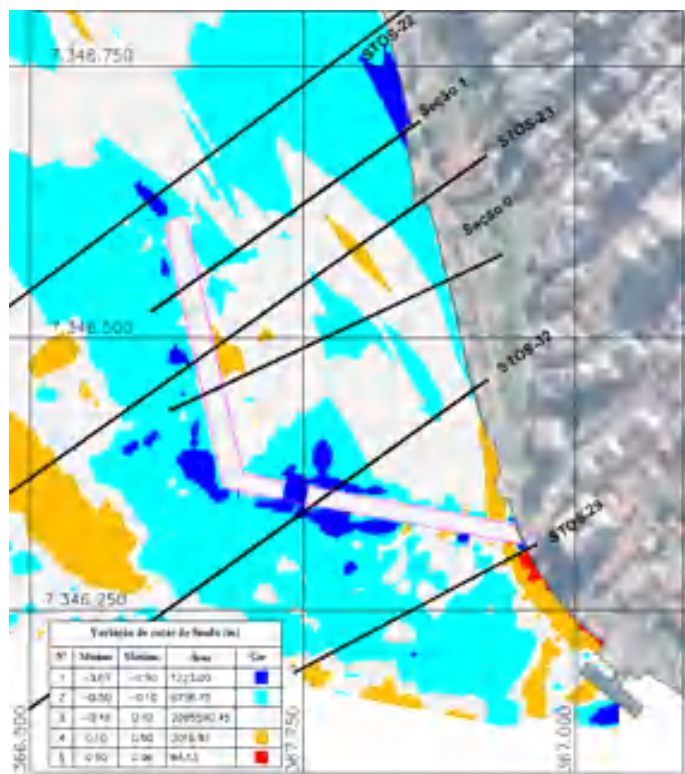


Figura 67. Variação de cotas de fundo entre o cenário 3 e o novo cenário-base. Fonte: Elaborada pela autora.

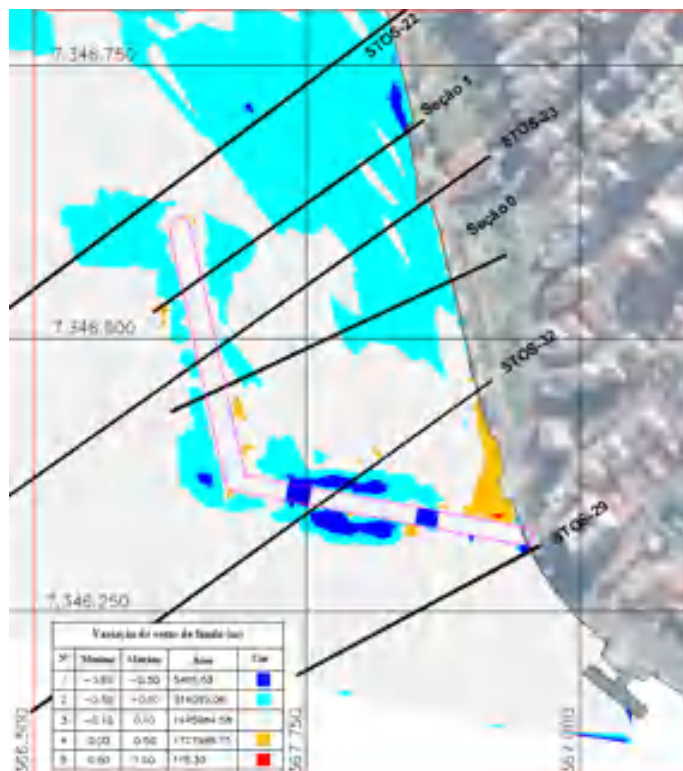


Figura 68. Variação de cotas de fundo entre o cenário 4 e o novo cenário-base. Fonte: Elaborada pela autora.

As simulações foram realizadas tanto no módulo FM-HD quanto no SW para cada cenário supracitado e, para a extração das saídas, adotaram-se os mesmos instantes característicos de maré descritos no item 5.2. As análises foram conduzidas para a avaliação da aderência e consistência do modelo frente às mudanças batimétricas, ou seja, se a resposta obtida por meio das simulações está de acordo com o esperado, baseando-se nos dados obtidos em campo.

Além disso, foram elaboradas figuras com as diferenças percentuais de velocidade de corrente para cada um dos cenários em relação ao novo cenário-base. Isto é, foram realizadas as seguintes subtrações para os devidos instantes de maré: i) cenário 1 – novo cenário-base; ii) cenário 2 – novo cenário-base; iii) cenário 3 – novo cenário-base; iv) cenário 4 – novo cenário-base; e v) cenário 4 – cenário 2, de forma que as análises e discussões pudessem ser incrementadas.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Refinamento e análise de sensibilidade da malha batimétrica

As saídas dos módulos FM-HD e SW foram obtidas para cada uma das três condições de dados (sumarizadas na Tabela 14) e para os quatro instantes de maré previamente estabelecidos (meia maré enchente, meia hora antes da preamar, meia maré vazante e uma hora antes da baixa-mar).

Tabela 14 – Resumo das condições de malha do modelo, quantidade de elementos e tempo de processamento dos módulos.

<b>Nome da condição</b>	<b>Tipo da malha</b>	<b>Espaçamento entre pontos cotados</b>	<b>Quantidade de elementos</b>	<b>Tempo de processamento</b>
<b>1ª condição</b>	antiga	40 a 60 metros	10979	FM-HD: 5 horas SW: 22 horas
<b>2ª condição</b>	antiga	10 metros na região da praia 0,5 metros no projeto-piloto	10979	FM-HD: 5 horas SW: 22 horas
<b>3ª condição</b>	nova	10 metros na região da praia 0,5 metros no projeto-piloto	22712	FM-HD: 8 horas SW: 45 horas

Fonte: Elaborada pela autora.

Nas figuras 69, 70 e 71 são apresentadas as saídas do módulo hidrodinâmico FM-HD para as três condições de dados no instante de meia maré enchente.

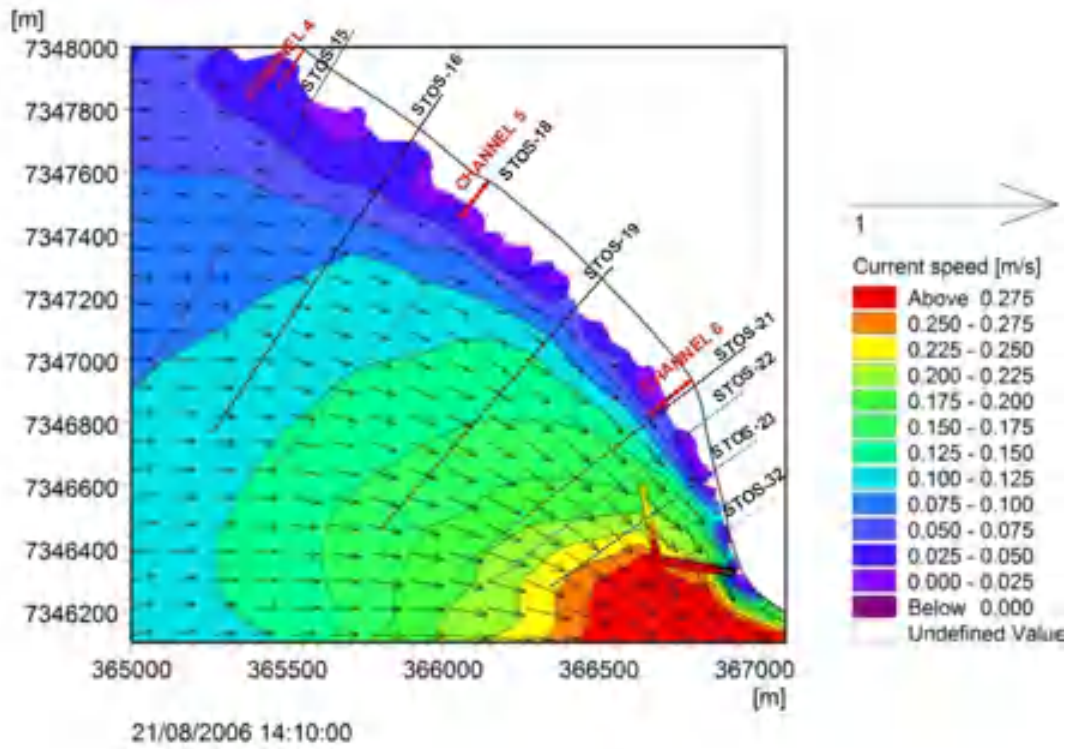


Figura 69. FM-HD: 1ª condição para o instante de meia maré enchente.

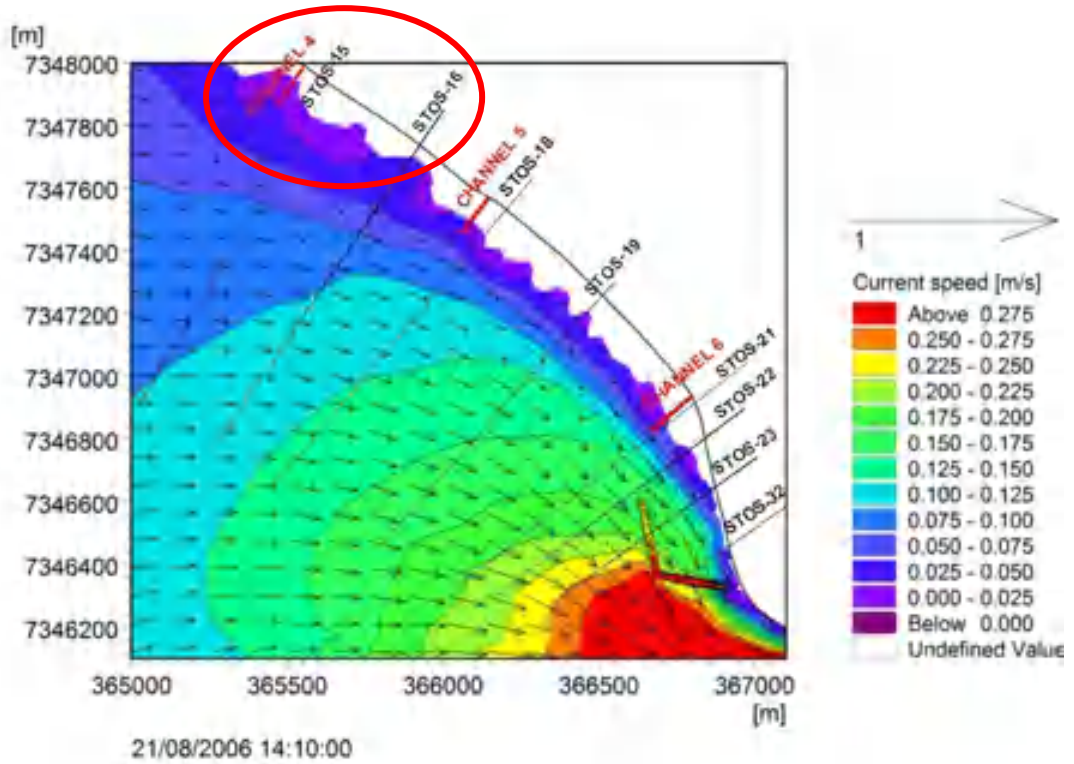


Figura 70. FM-HD: 2ª condição para o instante de meia maré enchente.

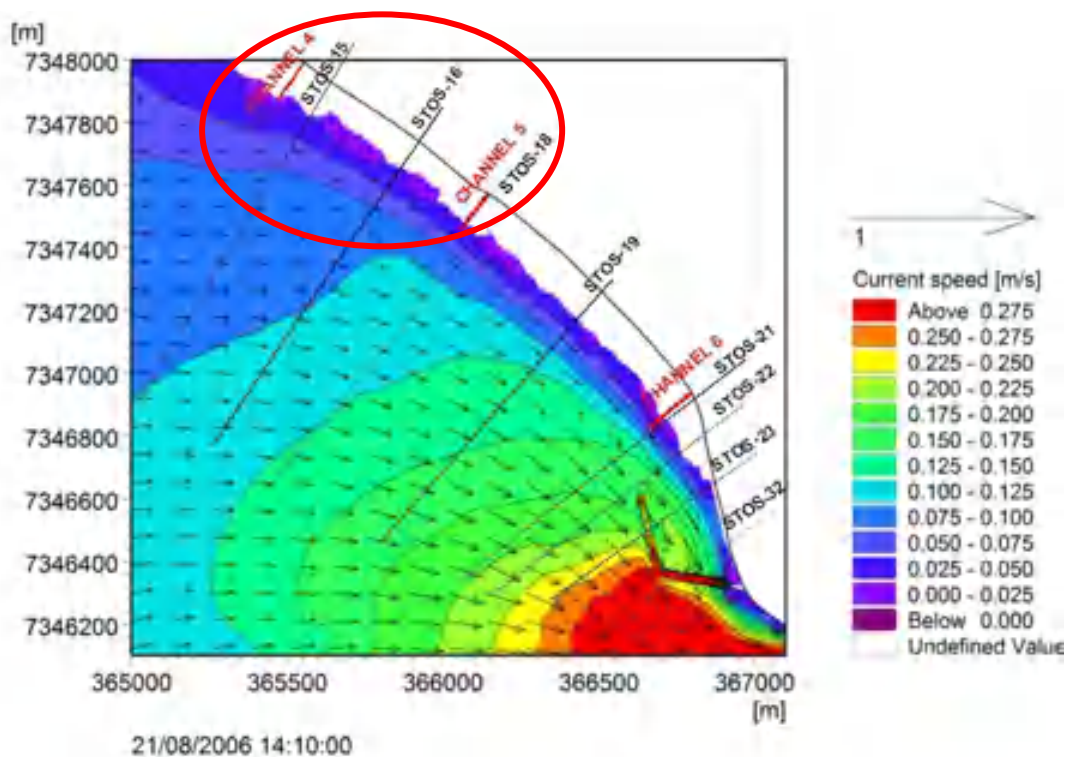


Figura 71. FM-HD: 3ª condição para o instante de meia maré enchente.

A comparação da 1ª condição com a 2ª condição traz apontamentos relevantes em relação ao comportamento das correntes. Na 2ª condição (Figura 70) nota-se que a corrente está mais alinhada na praia e na lateral do canal do porto, na região externa ao projeto-piloto (abaixo da seção STOS-32). O comportamento das correntes também foi alterado na região destacada pelo círculo em vermelho e dentro do canal do porto, mostrando que uma maior densidade de dados batimétricos resulta em uma melhor resposta das simulações. Além disso, as velocidades de corrente são menores na zona abrigada pelo projeto-piloto, o que é esperado, visto que esta é uma das funções da obra. Já a comparação entre a 2ª condição e a 3ª condição reforça as conclusões anteriores, bem como traz correntes ainda mais alinhadas e discretizadas na praia, principalmente na região destacada da Figura 71.

Nas figuras 72, 73 e 74 são apresentadas as saídas do módulo hidrodinâmico FM-HD para as três condições de dados no instante de meia hora antes da preamar.



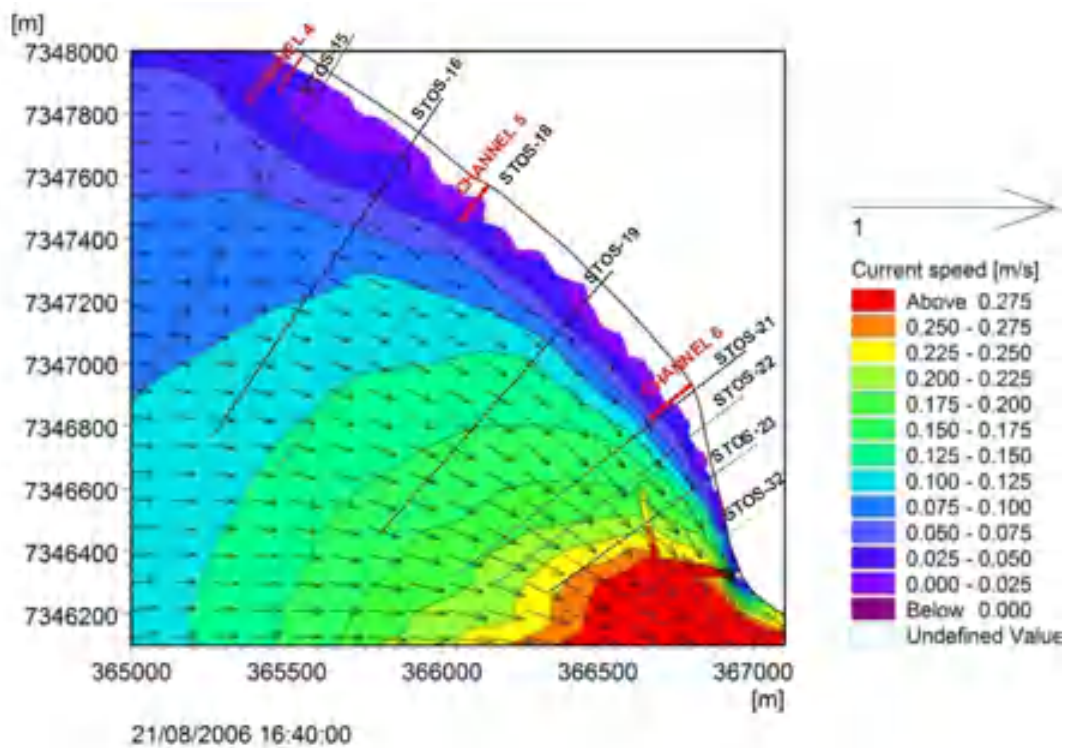


Figura 72. FM-HD: 1ª condição para o instante de meia hora antes da preamar.

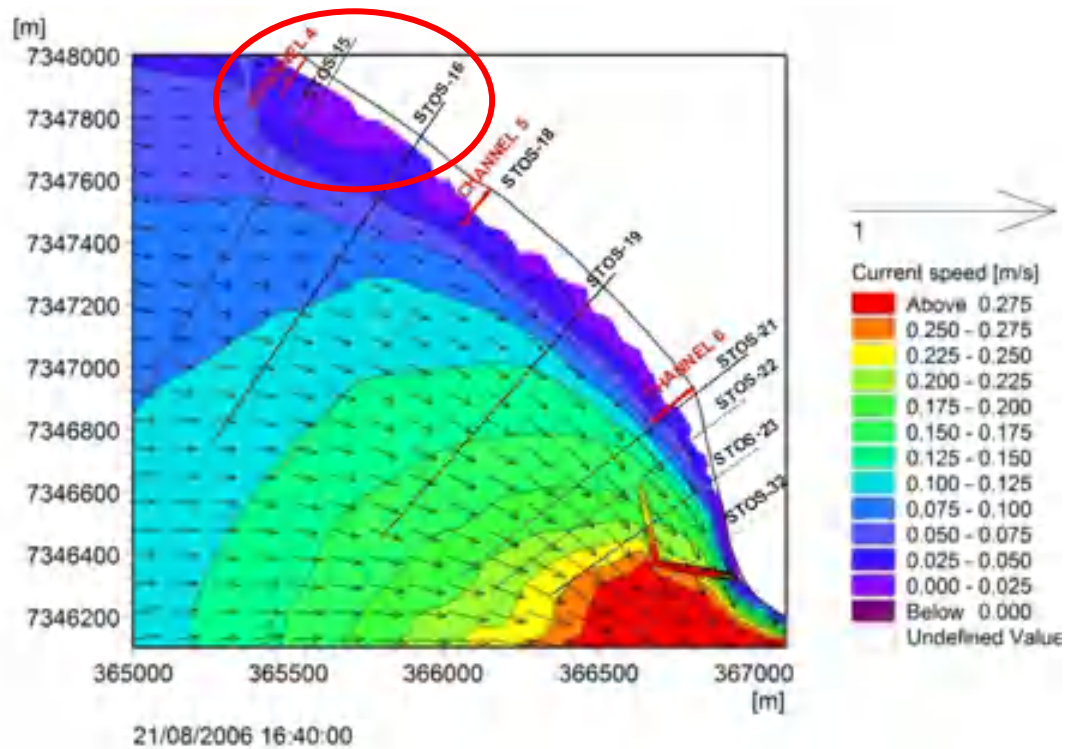


Figura 73. FM-HD: 2ª condição para o instante de meia hora antes da preamar.

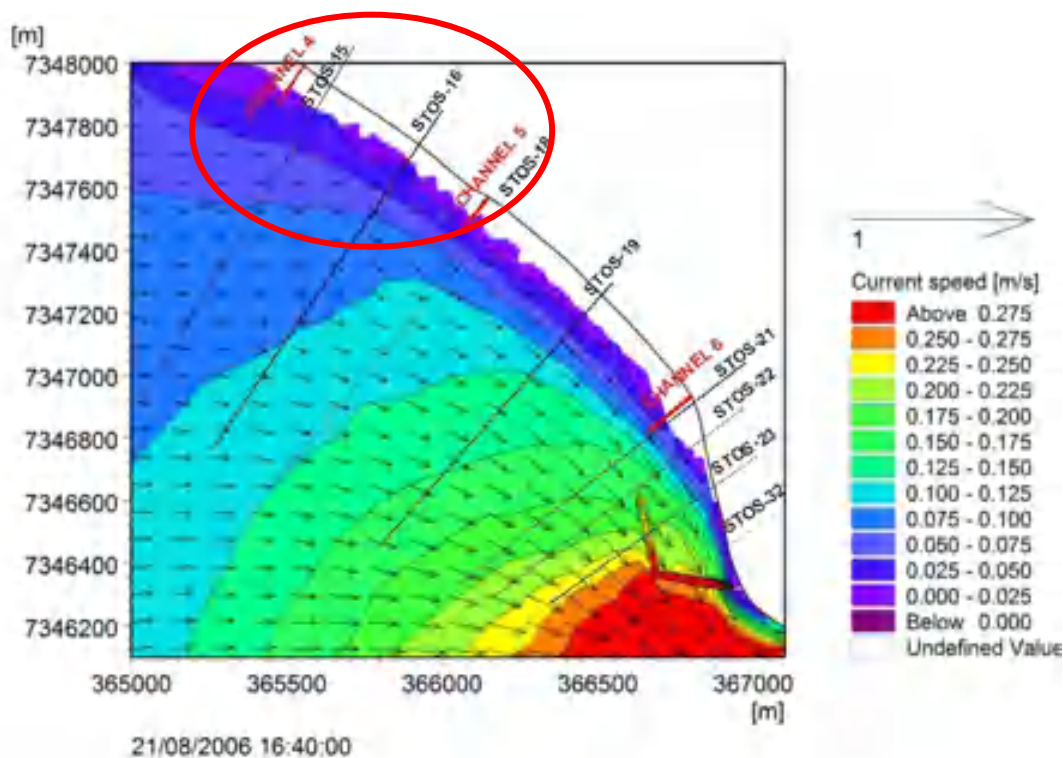


Figura 74. FM-HD: 3ª condição para o instante de meia hora antes da preamar.

As conclusões obtidas por meio da comparação entre as condições de dados são muito similares às obtidas para o instante de meia maré enchente. Na 2ª condição (Figura 73) há uma mudança de velocidades de corrente ainda mais visível na zona abrigada pelo projeto-piloto, a faixa de velocidades entre 0,225 m/s e 0,250 m/s (amarela) deixa de estar presente. Além disso, o comportamento das correntes também foi alterado na região destacada pelo círculo em vermelho tanto para a 2ª condição quanto para a 3ª condição (Figura 74). Tais comportamentos mostram que o modelo está sensível às melhorias de batimetria, isto é, quanto maior a discretização de pontos da malha e a quantidade de dados batimétricos utilizados para interpolação, melhor a qualidade de resposta da simulação, ou seja, a resposta do modelo se mostra mais consistente.

A análise das saídas do módulo FM-HD para as três condições de dados no instante de meia maré vazante não trouxe novas informações a respeito do comportamento das correntes. Dessa forma, optou-se por omitir as figuras desse instante e apresentar figuras do instante seguinte. Nas figuras 75, 76 e 77 são apresentadas as saídas do módulo hidrodinâmico FM-HD para as três condições de dados no instante de uma hora antes da baixa-mar.

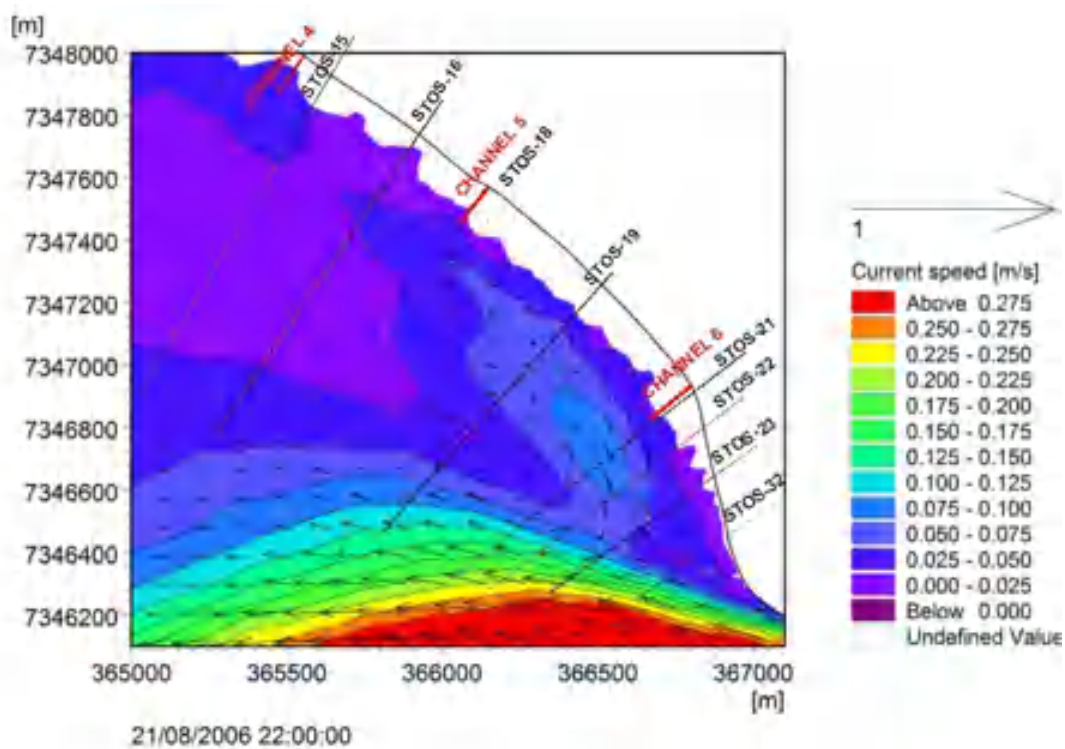


Figura 75. FM-HD: 1ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

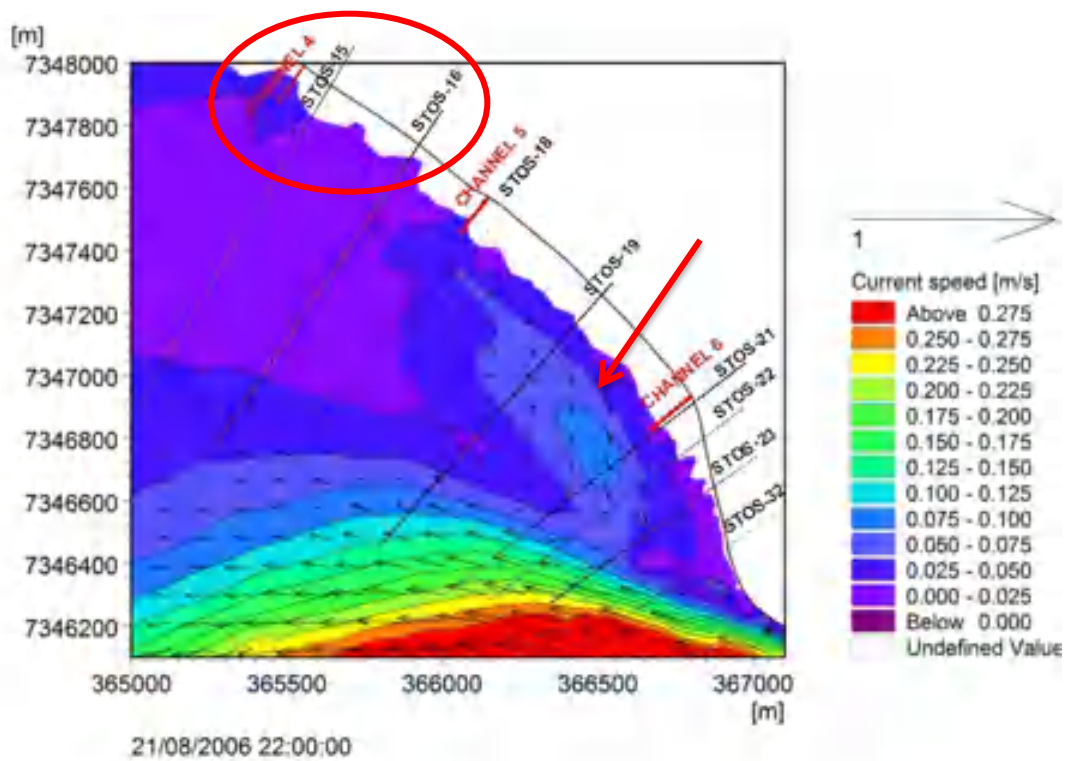


Figura 76. FM-HD: 2ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

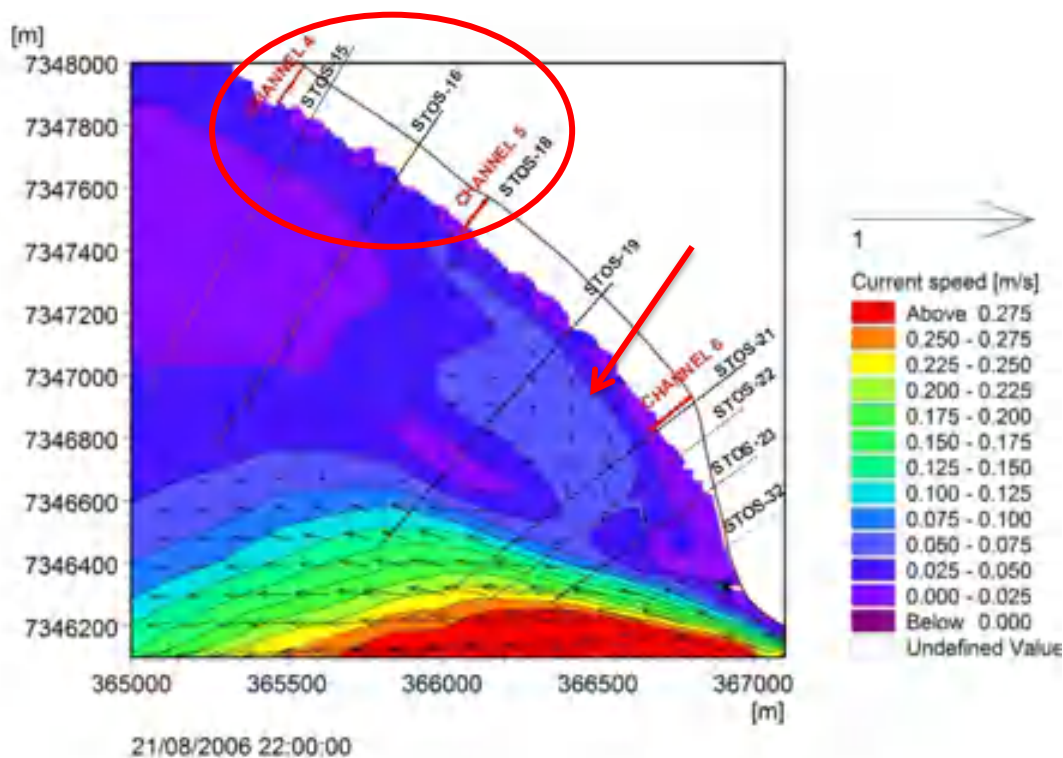


Figura 77. FM-HD: 3ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

Além das mesmas conclusões obtidas nos instantes de maré anteriores, a comparação da 1ª condição com a 2ª condição traz diferenças significativas em relação ao comportamento das correntes. Na 2ª condição (Figura 76) nota-se que há uma alteração no tamanho da área onde ocorre a recirculação de correntes (destacada pelas setas vermelhas), ou seja, a área no qual um vórtice é formado (região central com a faixa de velocidades entre 0,075 m/s e 0,100 m/s). Essa alteração é ainda mais evidente na 3ª condição (Figura 77) onde se pode perceber uma redução de velocidades, isto é, a faixa de velocidades entre 0,075 m/s e 0,100 m/s deixa de estar presente na região apontada pela seta vermelha. Por fim, as correntes destacadas pelos círculos vermelhos na região do Canal 4 (Figuras 76 e 77) também mudam de comportamento. Na 3ª condição nota-se que o modelo apresenta uma resposta mais consistente devido à discretização dos dados, principalmente na região da praia, reforçando que o modelo é sensível à qualidade do material batimétrico.

De forma complementar, nota-se que exatamente sobre a estrutura do projeto-piloto há um aumento de velocidades de corrente. Tal fato é esperado, dado que existe uma menor lâmina d'água sobre a obra, resultando em uma aceleração do fluxo. Esse comportamento reforça ainda mais a consistência verificada no modelo numérico utilizado.

Nas figuras 78, 79 e 80 são apresentadas as saídas do módulo de ondas SW para as três condições de dados no instante de meia maré enchente.

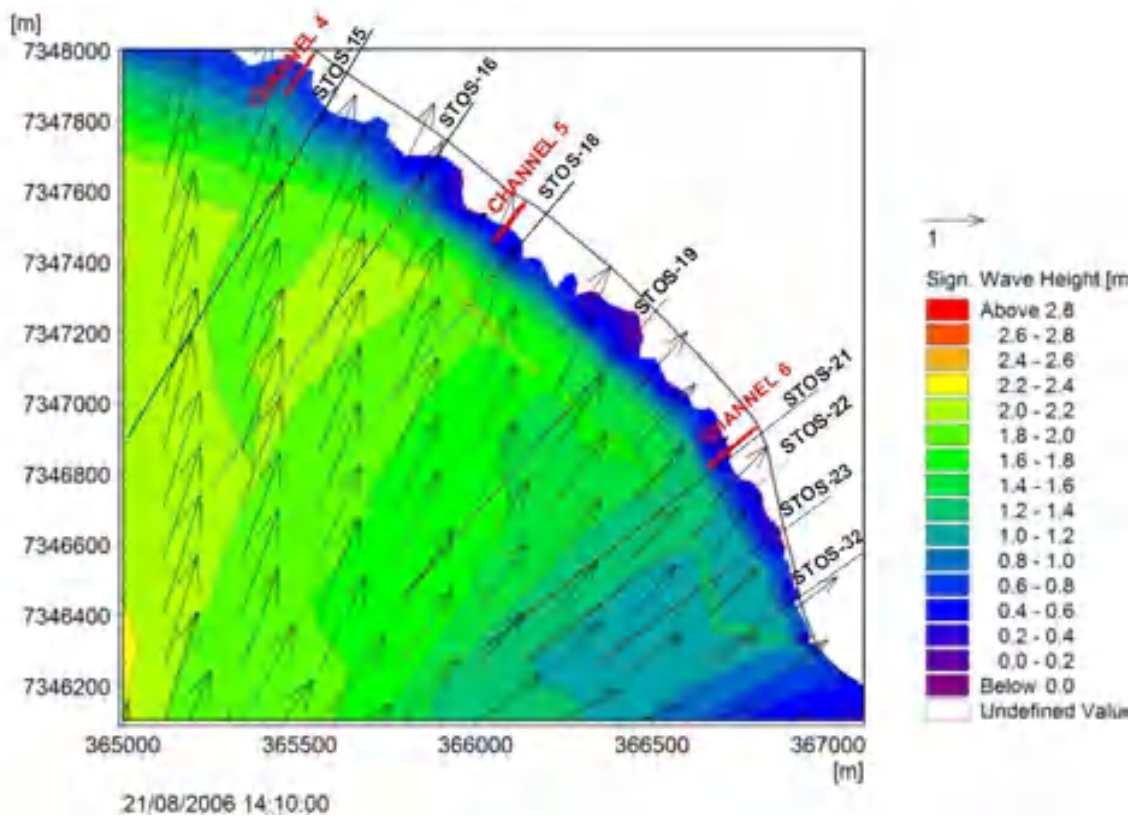


Figura 78. SW: 1ª condição para o instante de meia maré enchente.

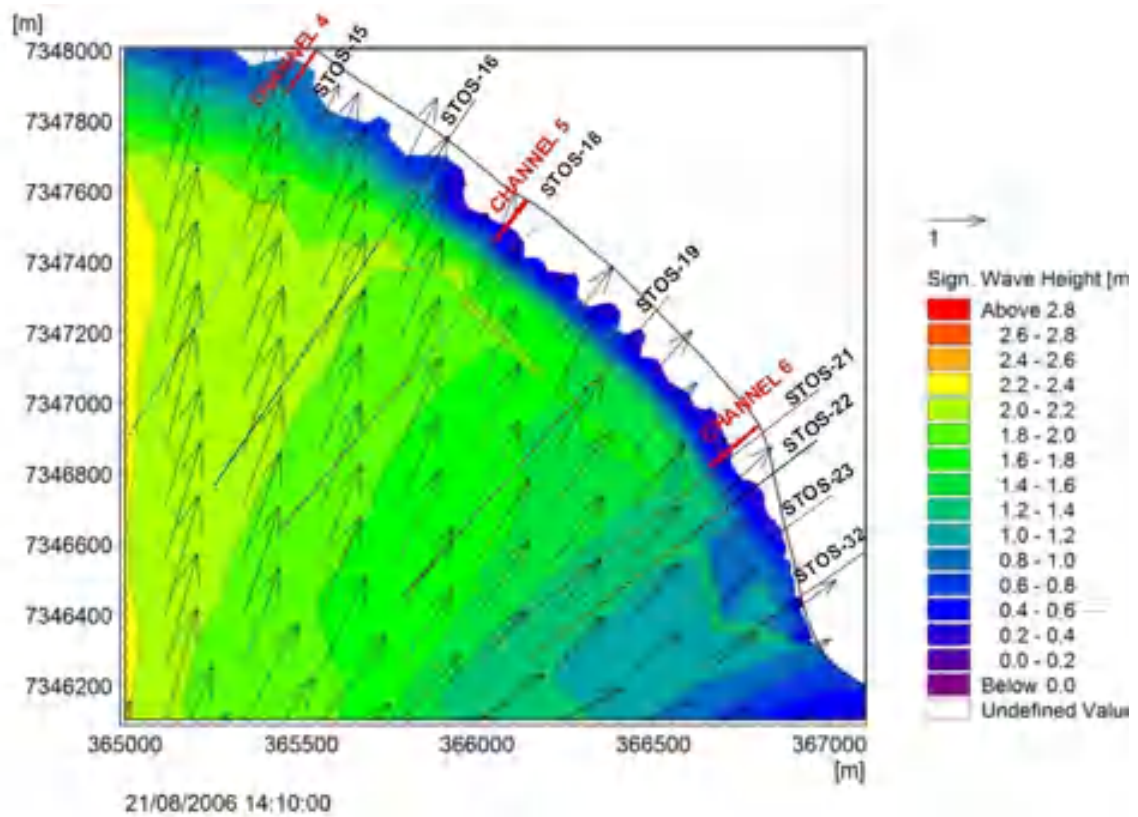


Figura 79. SW: 2ª condição para o instante de meia maré enchente.

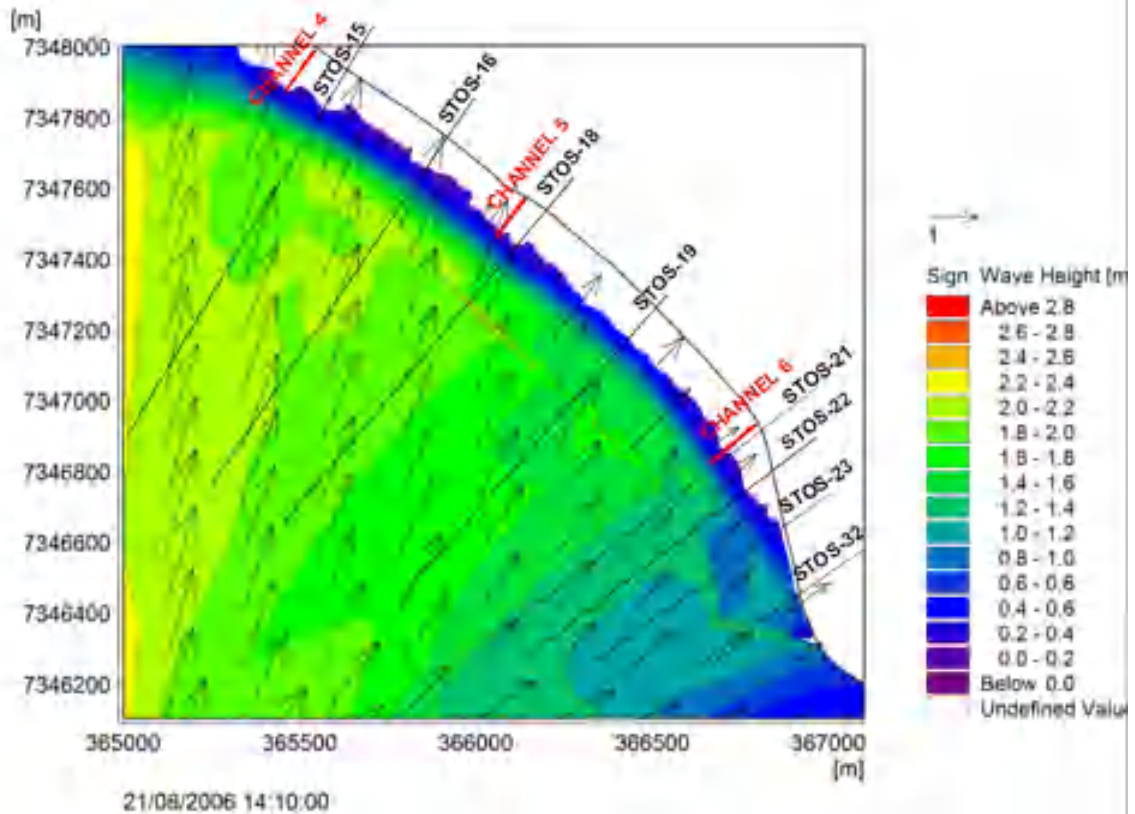


Figura 80. SW: 3ª condição para o instante de meia maré enchente.

Primeiramente, antes de conduzir as análises de comparação, é possível notar na 1ª condição (Figura 78) que o modelo enxerga o trecho da malha que foi discretizado para a inserção de obras entre os canais 5 e 6, gerando uma ranhura no gradiente de valores das alturas de onda. Tal comportamento condiz com as observações de Plant et al. (2009), que afirmam que o modelo hidrodinâmico e o modelo de ondas respondem de forma diferente ao detalhamento da batimetria.

A comparação da 1ª condição com a 2ª condição, por sua vez, traz informações importantes em relação ao comportamento das ondas. Na 2ª condição (Figura 79) notam-se menores alturas de onda na zona abrigada pelo projeto-piloto, o que é esperado dada a função principal do quebra-mar. Isto é, a altura significativa de onda na 1ª condição está no intervalo entre 1,0 m e 1,2 m, já na 2ª condição o intervalo passa a ser entre 0,8 m e 1,2 m. A comparação entre a 2ª condição e a 3ª condição reforça as conclusões anteriores e traz uma sensível mudança na distribuição das alturas de onda, principalmente no trecho entre os canais 4 e 6. Tem-se ainda, para a 3ª condição (Figura 80) um melhor comportamento das ondas na região do Canal 4, mostrando que a qualidade de definição dos dados atinge diretamente a qualidade e consistência de reposta do modelo.

As análises para os instantes de meia hora antes da preamar e meia maré vazante geraram conclusões bastante similares às obtidas no instante de meia maré enchente. Dessa forma, optou-se por omitir as figuras desses instantes para evitar a repetição das observações. Manteve-se, no entanto, a apresentação dos resultados do instante seguinte, trazendo análises complementares. Nas figuras 81, 82 e 83, portanto, são apresentadas as saídas do módulo de ondas SW para as três condições de dados no instante de uma hora antes da baixa-mar.

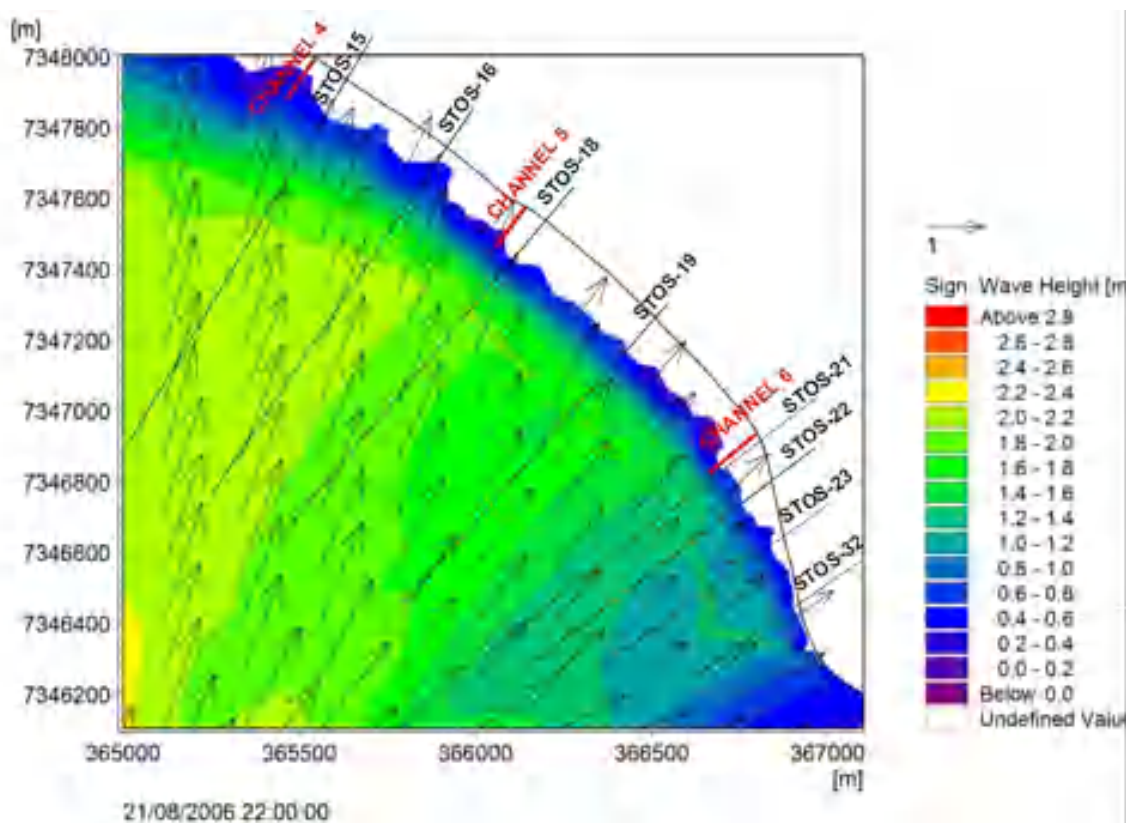


Figura 81. SW: 1ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

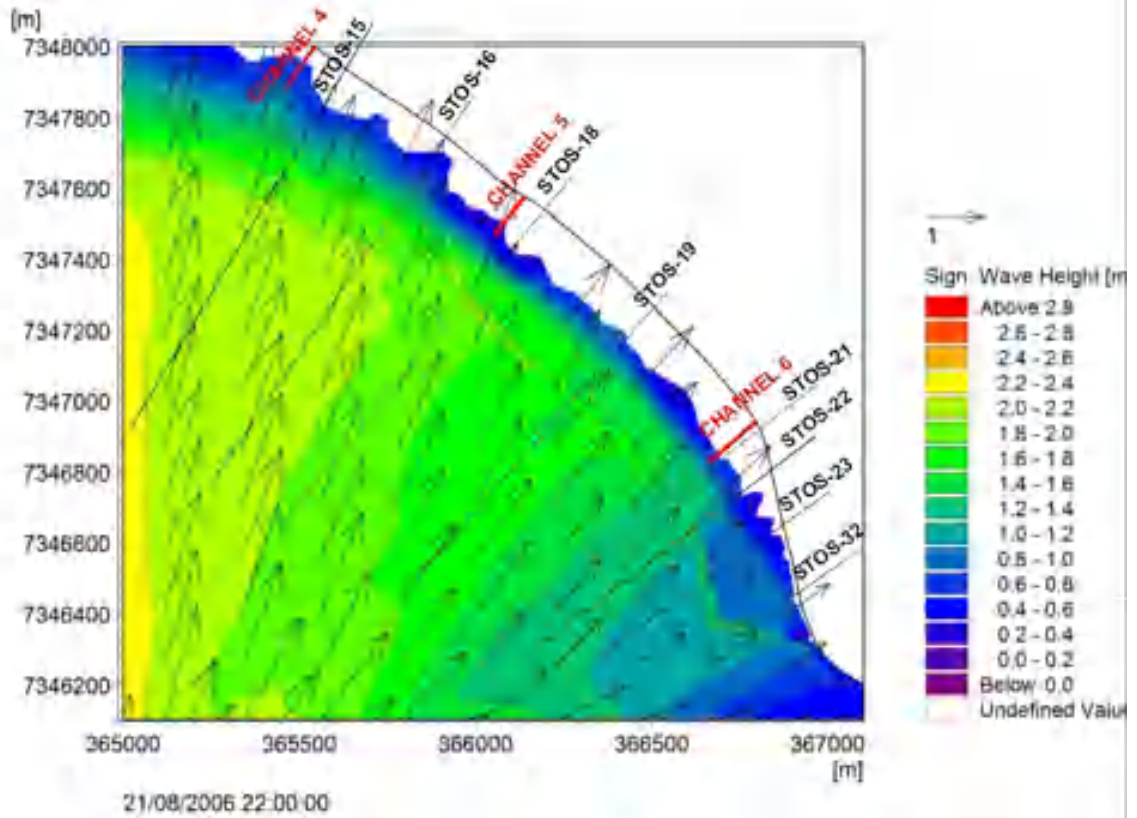


Figura 82. SW: 2ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

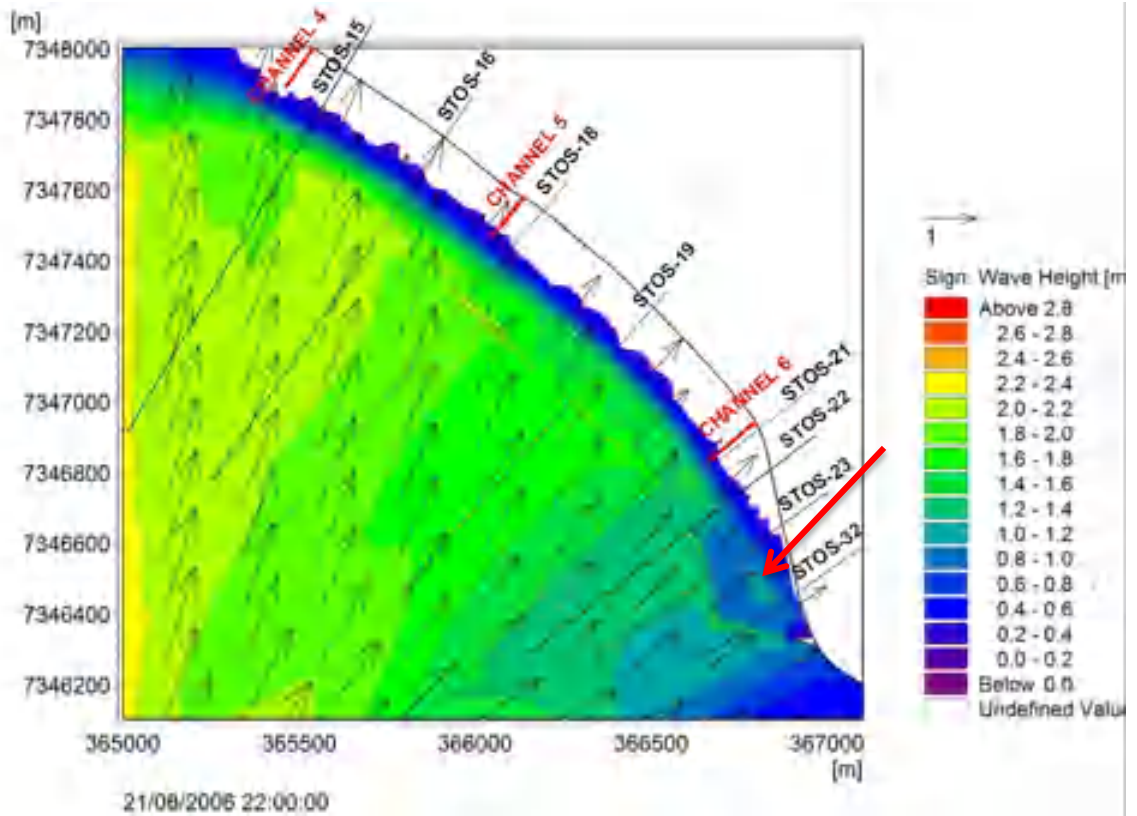


Figura 83. SW: 3ª condição para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.



A comparação da 1ª condição com a 2ª condição traz análises similares às obtidas anteriormente no que diz respeito ao comportamento das ondas. Na 2ª condição (Figura 82) percebem-se menores alturas de onda na zona abrigada pelo projeto-piloto, um comportamento esperado dada a presença de um quebra-mar. Ou seja, as alturas significativas de onda saem do intervalo de 1,0 m a 1,2 m para o intervalo entre 0,8 m e 1,0 m. Já a comparação entre a 2ª condição e a 3ª condição reforça tanto as conclusões dos instantes de maré anteriores quanto as conclusões obtidas a partir da comparação entre a 1ª e a 2ª condição. Além disso, as alturas de onda estão mais discretizadas na região do projeto-piloto. Tem-se ainda, para a 3ª condição (Figura 83) uma concentração de energia de ondas atrás do projeto-piloto devido à refração das ondas provocada pelas duas direções diferentes dos segmentos da obra, o que é característico deste tipo de obra e que acaba induzindo, portanto, a formação de uma cúspide (destacada pela seta vermelha). A cúspide foi observada nos levantamentos batimétricos (maior acúmulo de areia entre as seções STOS-23 e STOS-32, conforme Figura 38 e Figura 39, assim como Tabela 11), porém, foi efetivamente induzida pelas ondas apenas nesta condição de malha. Dessa forma, pode-se observar que a qualidade dos dados interfere diretamente no nível de detalhamento de resposta do modelo.

Além das análises conduzidas até aqui, é importante ressaltar que a densificação das malhas, que agora permitem melhor visualização das características presentes na região estudada, fez com que o tempo de processamento do módulo FM-HD aumentasse em três horas e que o tempo de processamento do módulo SW praticamente dobrasse. Dessa forma, é possível observar que a quantidade de dados não impactou apenas na qualidade dos resultados como também no gasto computacional.

Para a análise de sensibilidade de resposta dos modelos a aberturas em estruturas em locais nos quais não há influência do estuário, foram obtidas saídas dos módulos FM-HD e SW para cada uma das três opções de obras (sumarizadas na Tabela 15) e para os quatro instantes de maré previamente definidos (meia maré enchente, meia hora antes da preamar, meia maré vazante e uma hora antes da baixa-mar).

Tabela 15 – Resumo das opções de obras testadas entre os canais 5 e 6 e suas dimensões.

Nome da opção	Tipo de obra	Tamanho do segmento	Tamanho do vão
<b>Opção-base</b>	sem obras	-	-
<b>Opção 1</b>	3 quebra-mares submersos	230 metros	50 metros
<b>Opção 2</b>	3 quebra-mares submersos	150 metros	130 metros

Fonte: Elaborada pela autora.

Nas figuras 84, 85 e 86 são apresentadas as saídas do módulo hidrodinâmico FM-HD para as três opções de obras no instante de meia maré enchente.

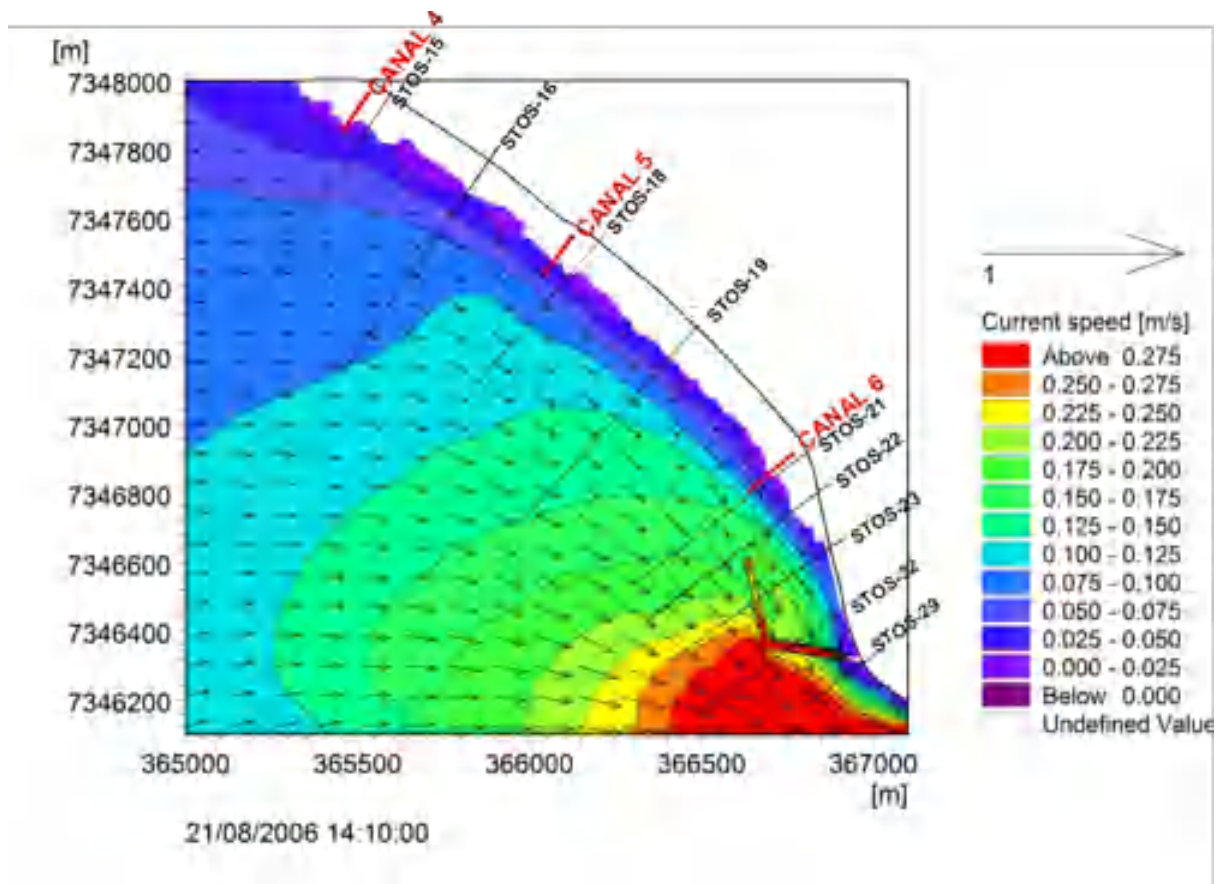


Figura 84. FM-HD: Opção-base para o instante de meia maré enchente.

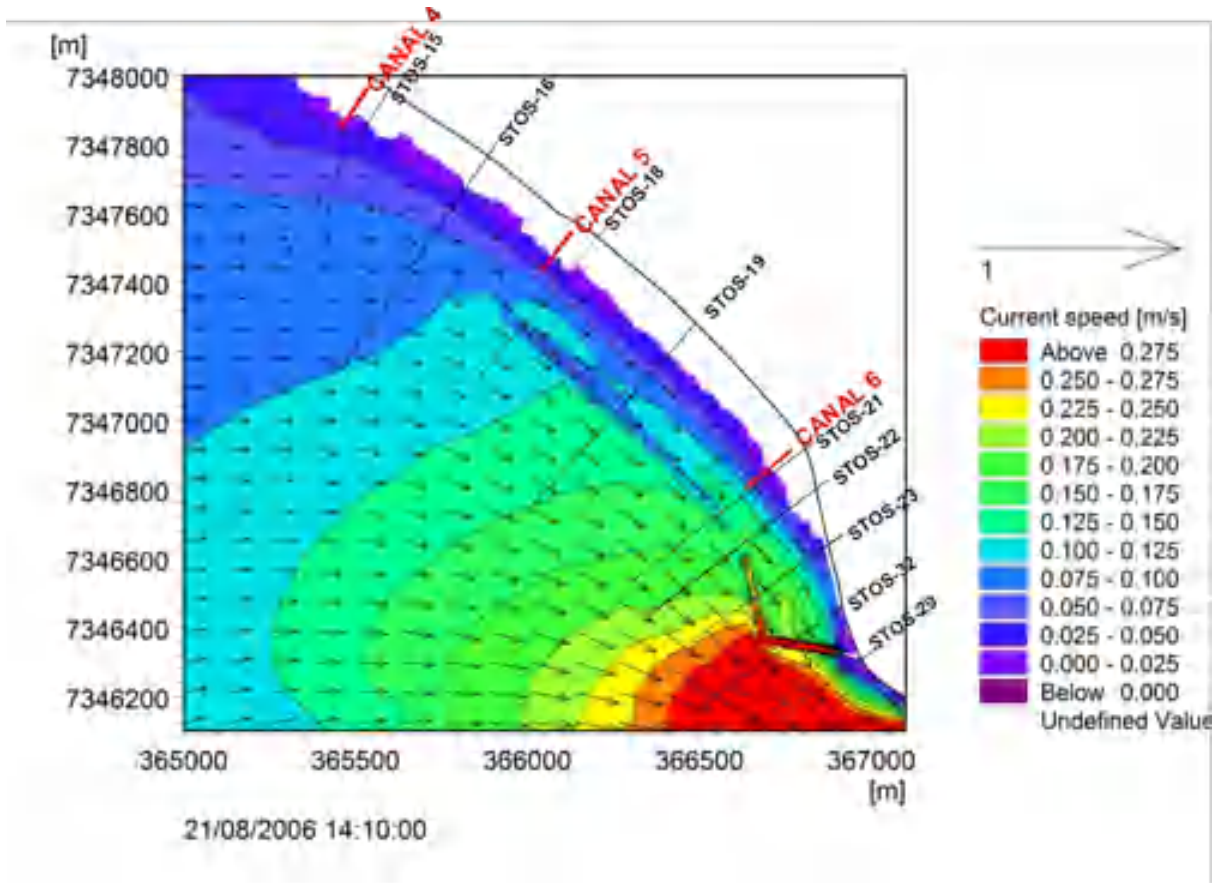


Figura 85. FM-HD: Opção 1 para o instante de meia maré enchente.

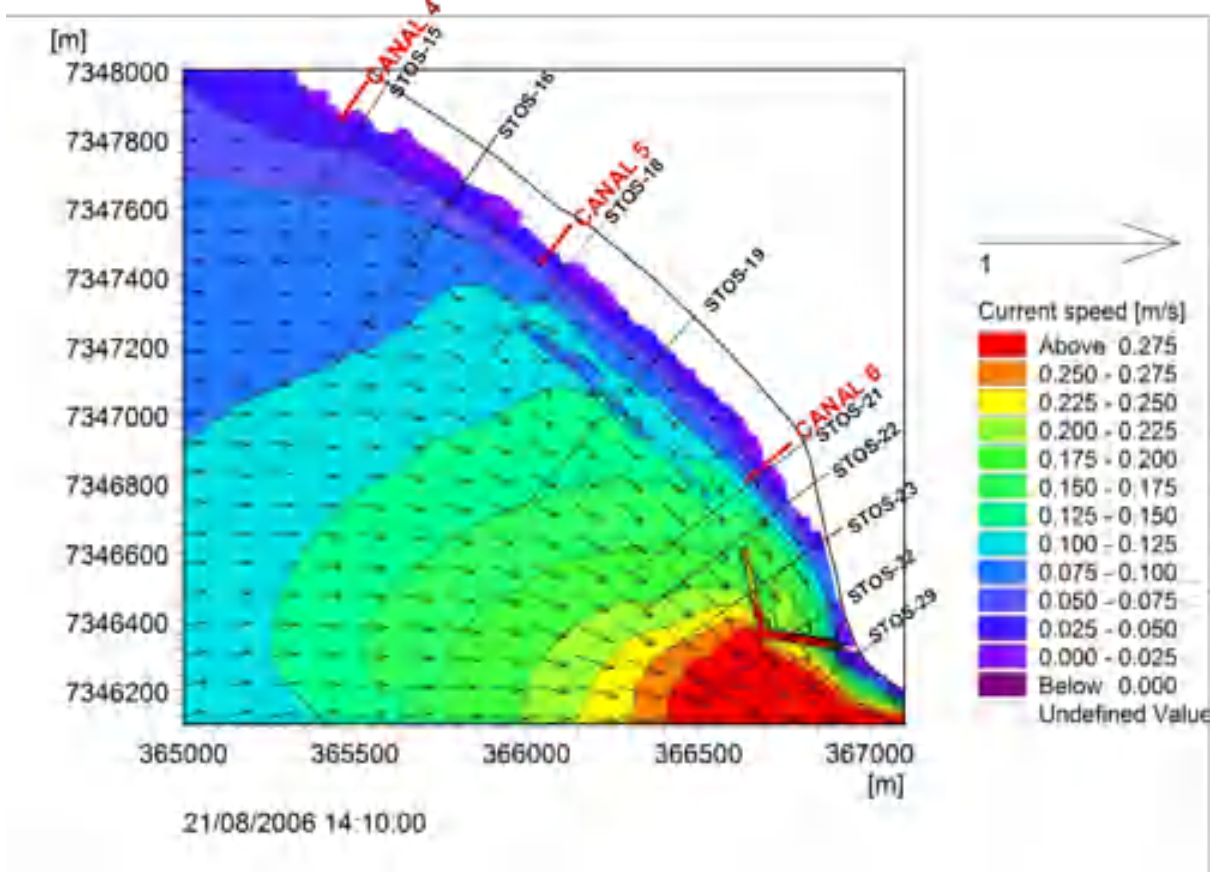


Figura 86. FM-HD: Opção 2 para o instante de meia maré enchente.

A análise do comportamento das correntes em relação à obra da opção 1 (Figura 85) mostra que há uma redução de velocidades (ocorre o aparecimento de mais uma faixa de velocidades entre 0,075 m/s e 0,100 m/s) na zona de sombra dos quebra-mares (entre os canais 5 e 6), porém as aberturas parecem não ser vistas pelo modelo. Isto é, a presença dos vãos não aparenta causar grandes interferências no que diz respeito ao comportamento das correntes. Dessa forma, os quebra-mares atuam como se fossem uma obra contínua. Esse tipo de resposta, no entanto, pode estar relacionado ao fato das correntes estarem paralelas à obra. Nota-se, também, uma pequena interferência nas correntes localizadas na zona de sombra do projeto-piloto (redução da faixa de velocidades entre 0,200 m/s e 0,225 m/s).

Por outro lado, a análise das correntes em relação à obra da opção 2 (Figura 86) mostra que a redução de velocidades é mais localizada, ou seja, estritamente no entorno dos quebra-mares, apresentando um comportamento diferente da opção 1. A abertura da opção 2, por sua vez, é maior e passa a ser enxergada pelo modelo, mudando o comportamento das correntes. Diferentemente do que acontece com a opção 1, a obra não atua como se fosse contínua.

Ao analisar as imagens para os instantes de meia hora antes da preamar e meia maré vazante, traçaram-se conclusões bastante semelhantes às obtidas no instante de meia maré enchente. Dessa maneira, escolheu-se omitir as figuras desses instantes e priorizou-se a apresentação das figuras do instante seguinte. Logo, nas figuras 87, 88 e 89 são apresentadas as saídas do módulo hidrodinâmico FM-HD para as três opções de obras no instante de uma hora antes da baixa-mar.

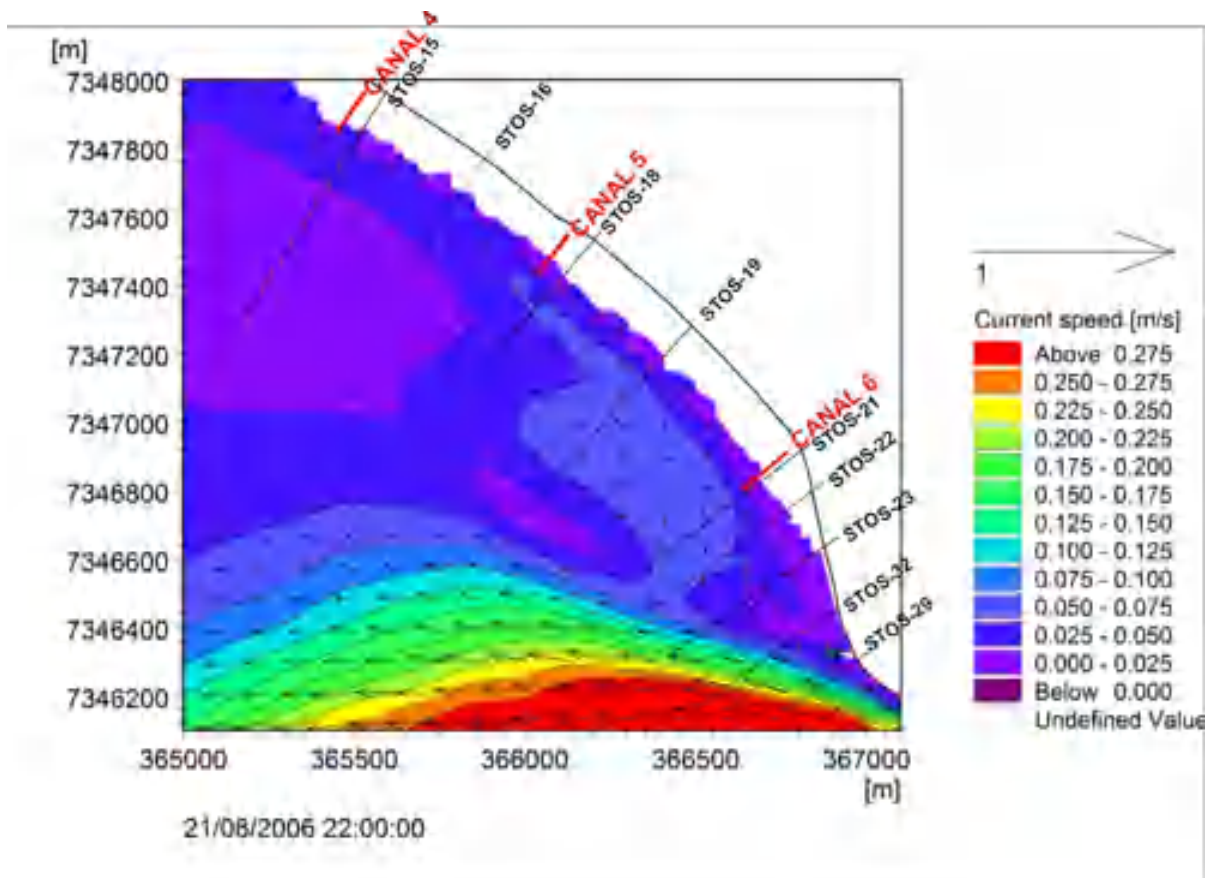


Figura 87. FM-HD: Opção-base para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

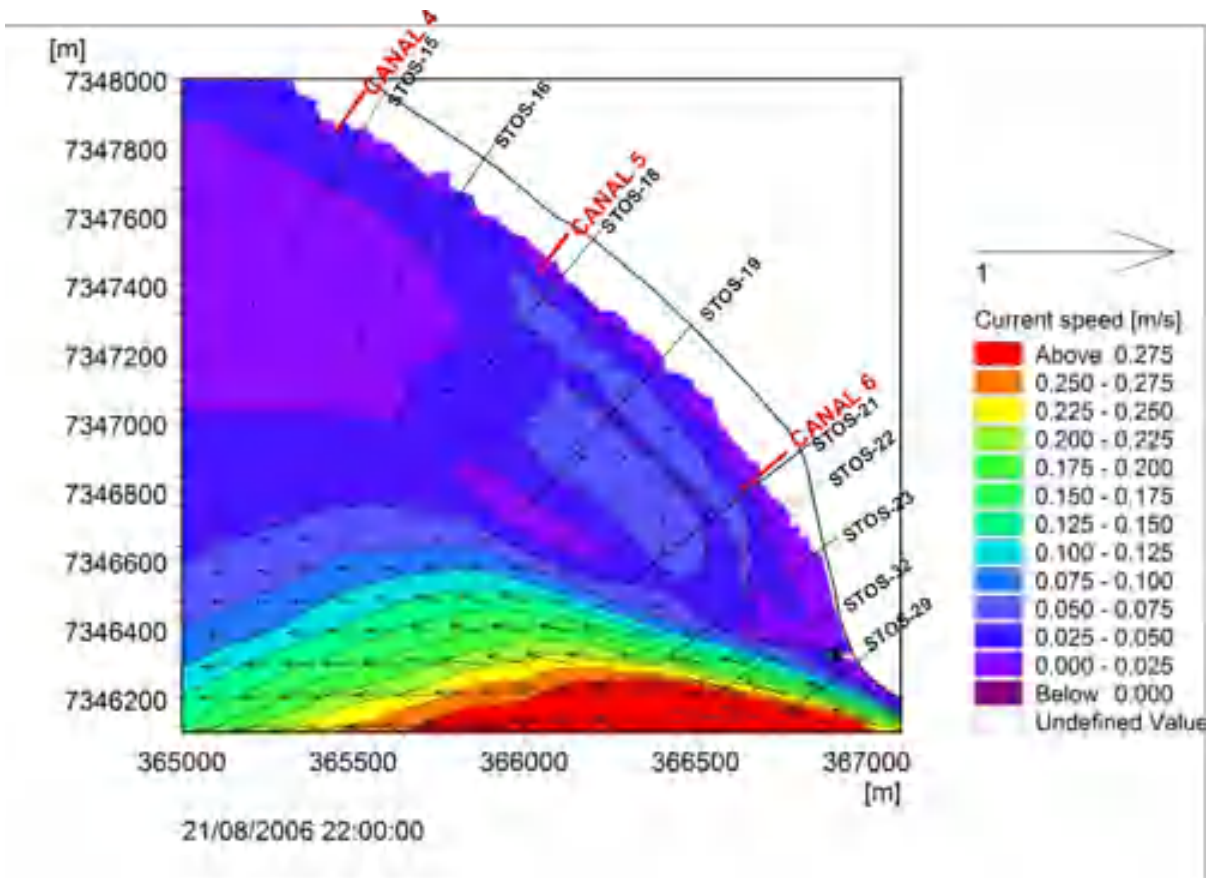


Figura 88. FM-HD: Opção 1 para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

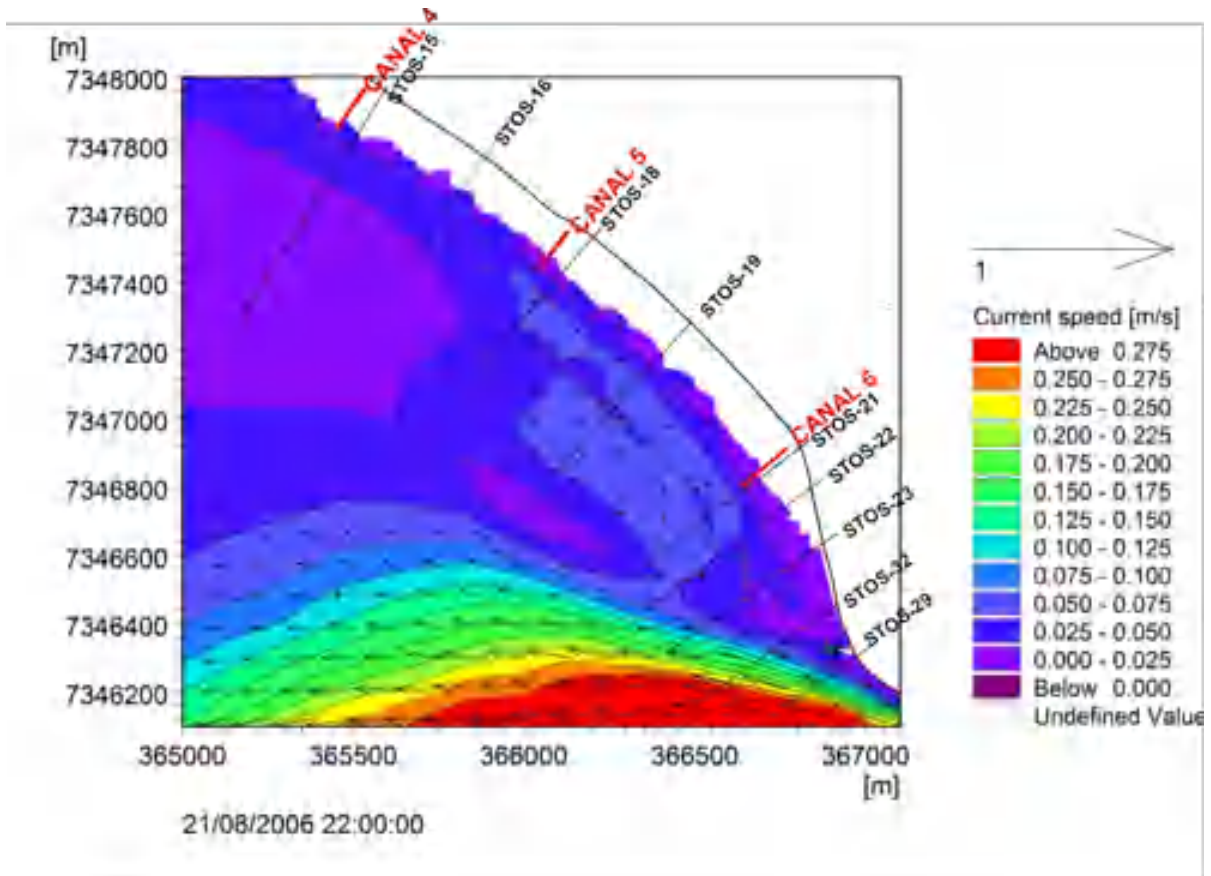


Figura 89. FM-HD: Opção 2 para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

A análise das correntes em relação à obra da opção 1 (Figura 88) não apenas reforça as conclusões obtidas nos instantes anteriores, como evidencia os comportamentos das correntes previamente citados. Na opção 1, por exemplo, constata-se que a obra permanece atuando como se fosse contínua, dividindo a região de recirculação de correntes em duas partes (faixa de velocidades entre 0,050 m/s e 0,075 m/s).

Em contrapartida, a análise da opção 2 (Figura 89) mostra que o modelo percebe as maiores aberturas entre os segmentos do quebra-mar, trazendo uma redução de velocidades bastante localizada. Pode-se dizer que o comportamento das correntes em relação à opção 2 é muito mais similar à opção-base do que à opção 1. Isto é, o comportamento das correntes aos quebra-mares submersos mais espaçados equivale ao comportamento das mesmas em uma situação de ausência de estruturas.

Nas figuras 90, 91 e 92 são apresentadas as saídas do módulo de ondas SW para as três opções de obras no instante de meia maré enchente.

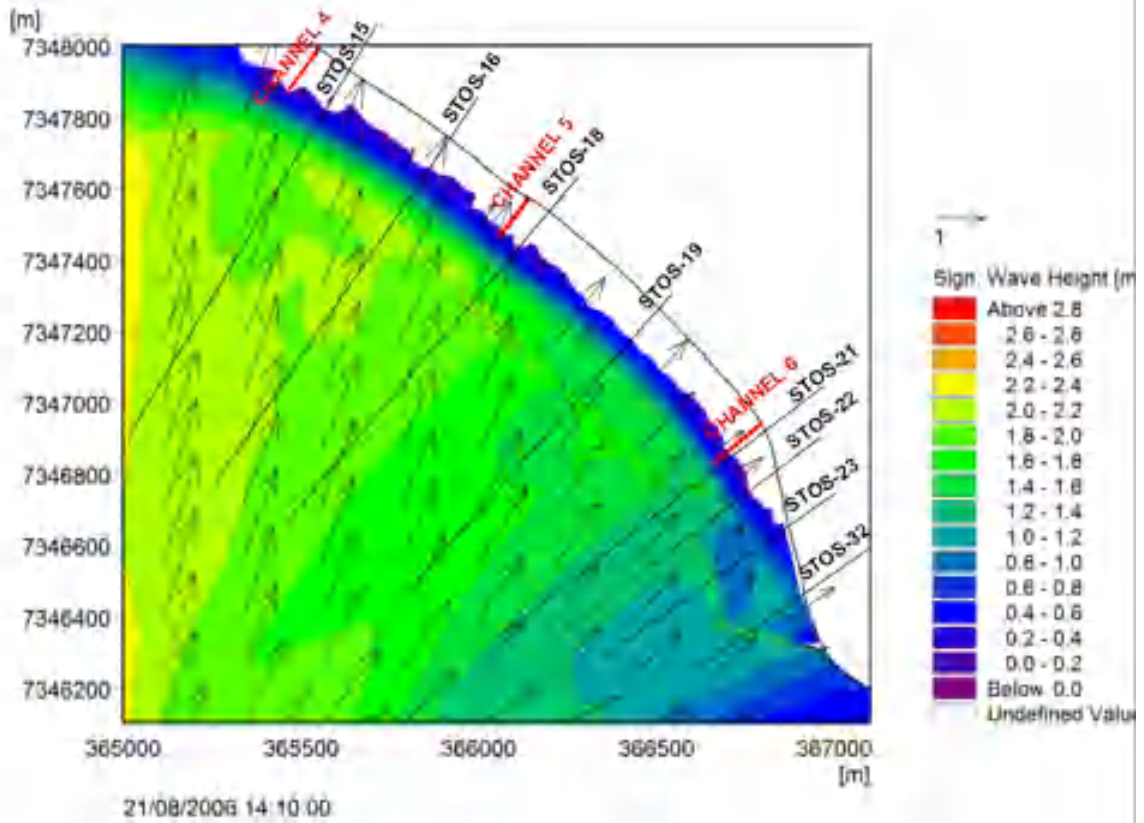


Figura 90. SW: Opção-base para o instante de meia maré enchente.

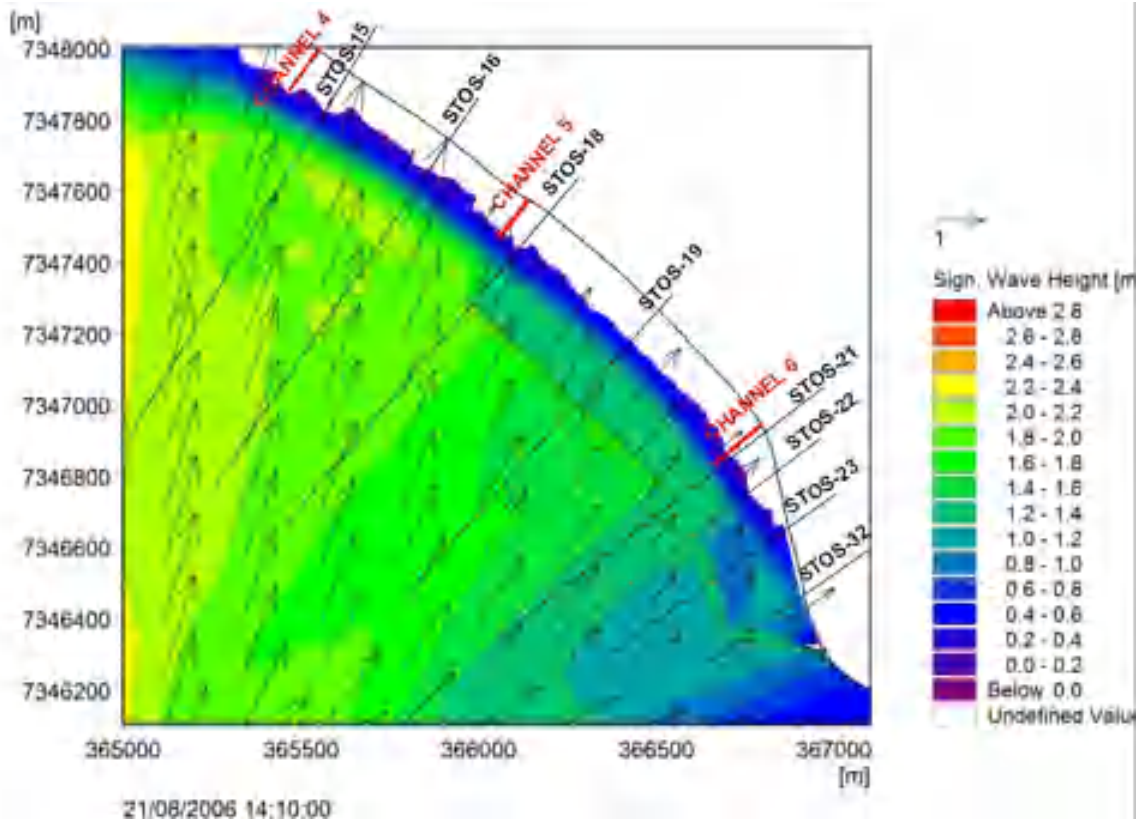


Figura 91. SW: Opção 1 para o instante de meia maré enchente.

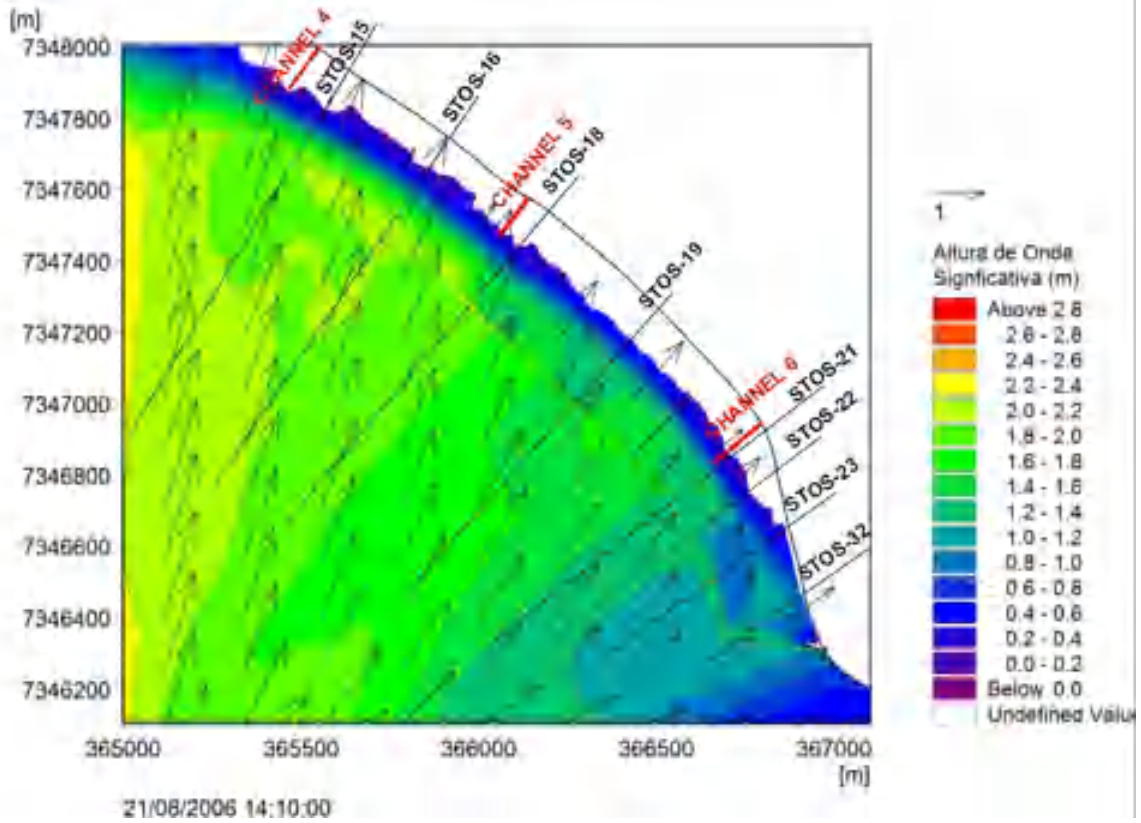


Figura 92. SW: Opção 2 para o instante de meia maré enchente.

Conforme apontado e discutido previamente na análise de sensibilidade do modelo ao refinamento de malha batimétrica, o modelo de ondas SW enxerga a maior discretização de dados mesmo sem a implantação efetiva de uma obra. Dessa forma, na figura com a opção-base (Figura 90), podem-se notar interferências localizadas (“ranhuras”) na distribuição das alturas de onda no trecho entre os canais 5 e 6.

A análise do comportamento das ondas em relação à obra da opção 1 (Figura 91) mostra que há uma visível redução das alturas de onda na zona de sombra da obra (trecho entre os canais 5 e 6), ou seja, as alturas significativas de onda passam do intervalo de 1,4 m a 1,8 m para o intervalo de 1,2 m a 1,4 m. Além disso, as aberturas entre os segmentos não causam interferências relevantes, fazendo com que os quebra-mares atuem praticamente como uma estrutura contínua.

Por outro lado, a análise das ondas em relação à obra da opção 2 (Figura 92) mostra que a redução de alturas de onda acontece apenas imediatamente atrás de cada segmento do quebra-mar e de forma muito sutil. Logo, as aberturas permitem a passagem das ondas, contribuindo pouco para a dissipação de sua energia (há a presença de alturas significativas de onda no intervalo entre 1,4 m e 1,6 m). Além disso, é importante ressaltar que o SW não resolve fenômenos de difração e reflexão, o que pode inviabilizar uma análise mais aprofundada a respeito do comportamento das ondas.



A observação das imagens para os instantes de meia hora antes da preamar e meia maré vazante trouxe conclusões bastante similares às obtidas no instante de meia maré enchente. Por isso, as figuras desses instantes foram omitidas e as figuras do instante seguinte foram expostas. Assim sendo, nas figuras 93, 94 e 95 são apresentadas as saídas do módulo de ondas SW para as três opções de obras no instante de uma hora antes da baixa-mar.

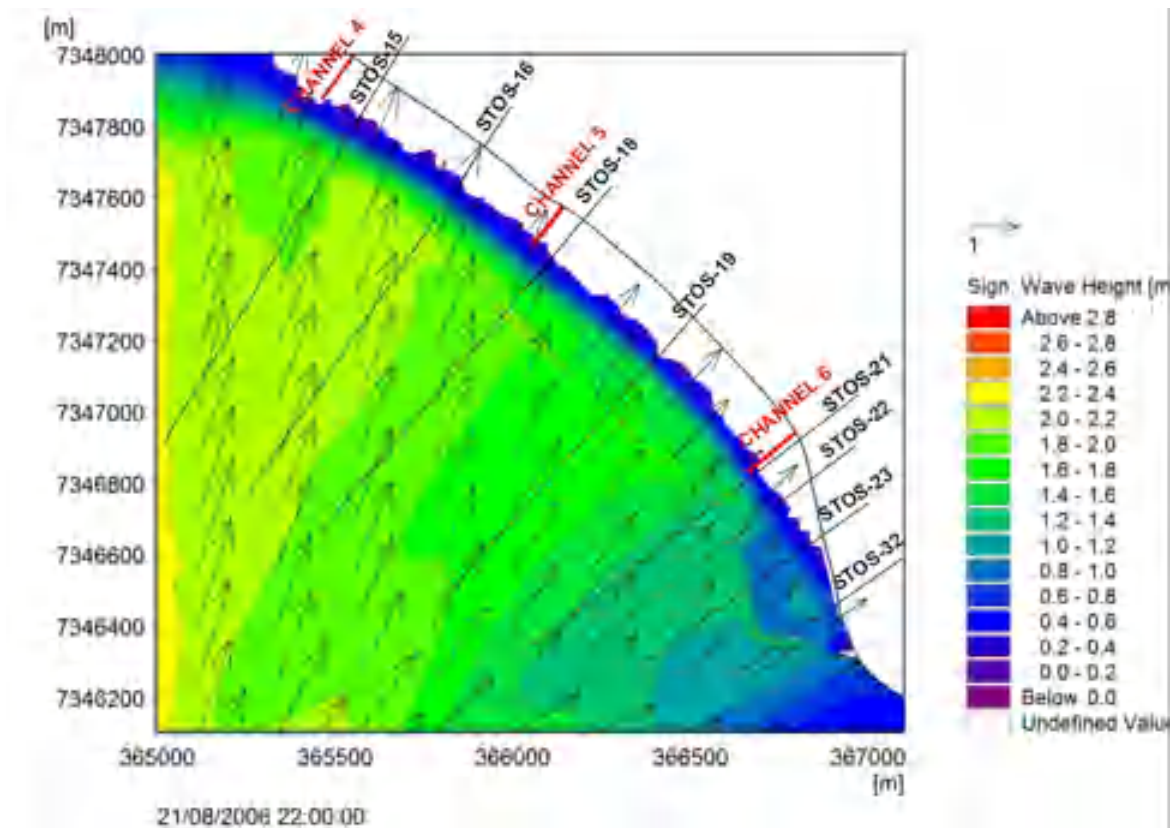


Figura 93. SW: Opção-base para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

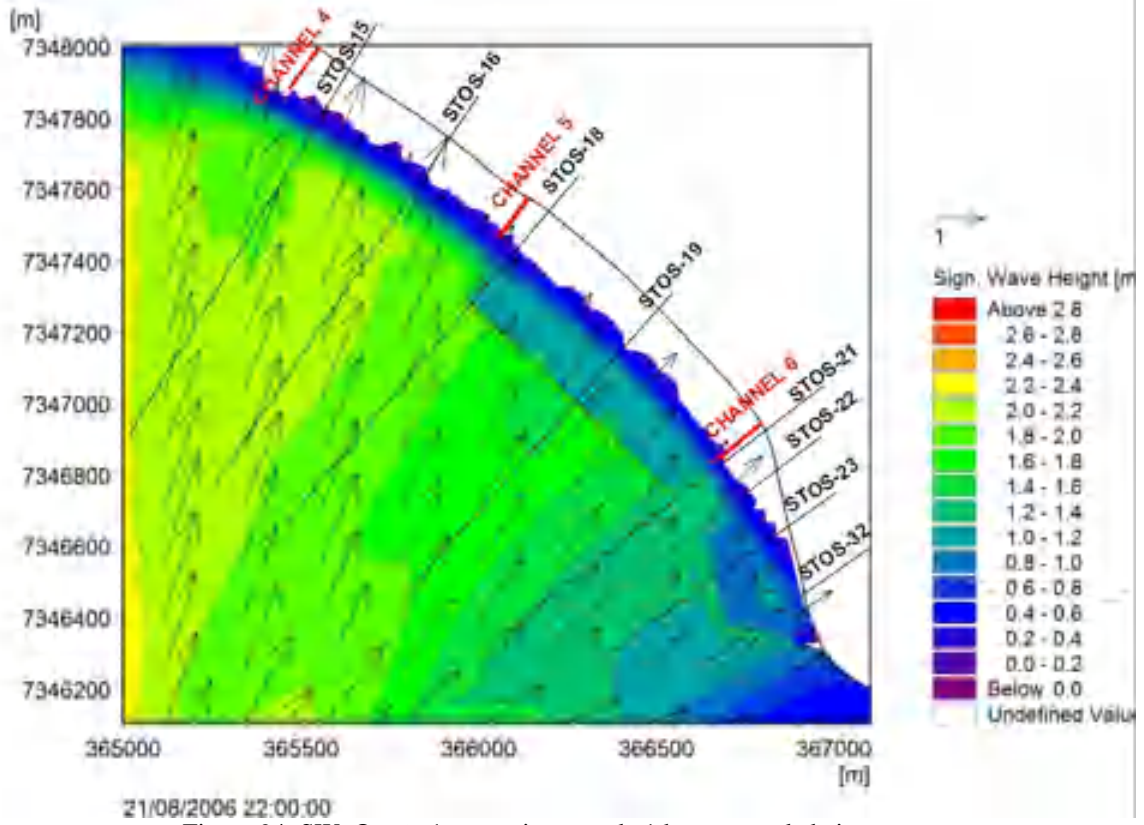


Figura 94. SW: Opção 1 para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

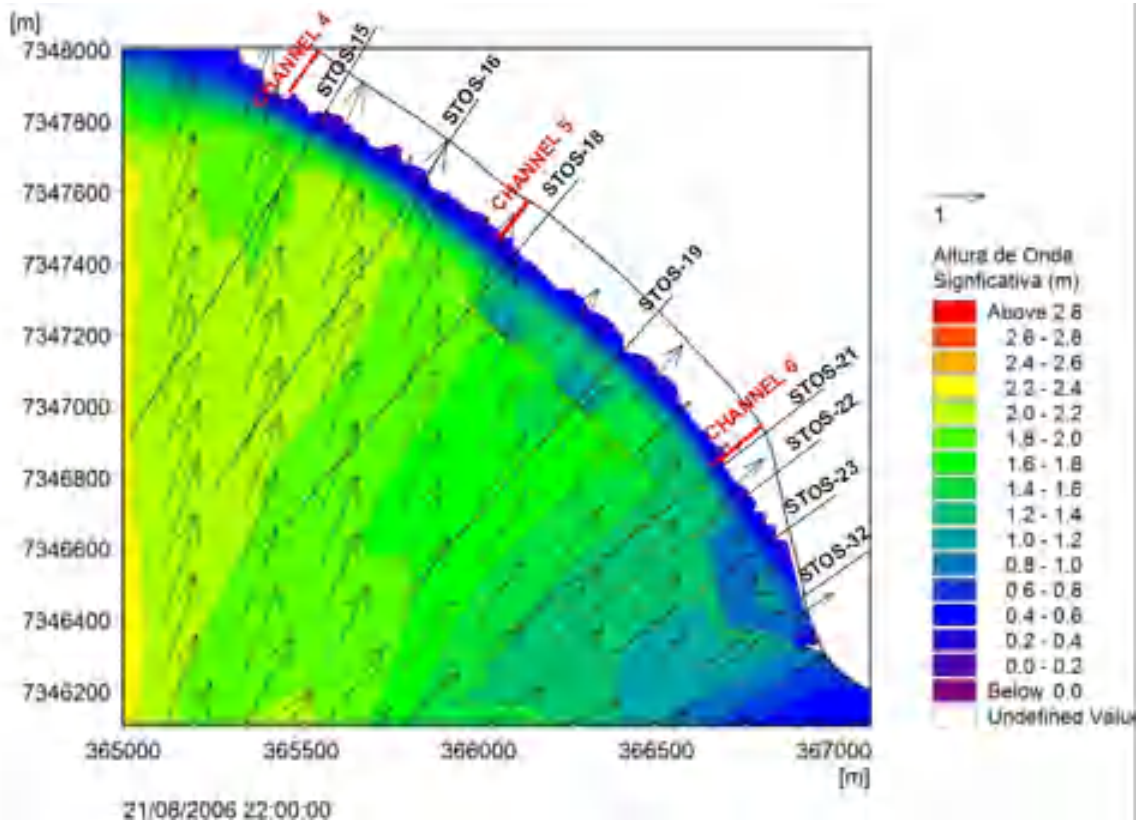


Figura 95. SW: Opção 2 para o instante de 1 hora antes da baixa-mar.

A análise do comportamento das ondas em relação à obra da opção 1 (Figura 94) não só reitera as conclusões obtidas nos instantes de maré anteriores, como evidencia o comportamento das alturas de onda previamente apontado. Na opção 1, por exemplo, nota-se que a obra permanece atuando como se fosse praticamente contínua, reduzindo as alturas de onda de forma intensa, isto é, o intervalo de altura significativa de onda antes de 1,4 m a 1,8 m passa a ser a faixa entre 1,0 m e 1,2 m, com pouca passagem das ondas entre as aberturas. No entanto, há pequenos indícios de difração. Além disso, por se tratar de um instante de maré próximo à baixa-mar, os níveis d'água são menores, fazendo com que a dissipação de energia em cima da obra seja muito mais eficiente, uma vez que ela é do tipo submersa.

Em contrapartida, a análise da opção 2 (Figura 95) mostra que o modelo percebe as maiores aberturas entre os segmentos de quebra-mar, trazendo uma redução muito localizada das alturas de onda (altura significativa de onda varia de 1,0 m a 1,6 m). Devido aos maiores vãos, as ondas passam com mais facilidade, sofrendo uma dissipação de energia muito inferior se comparada à opção 1. Por fim, os indícios de difração nos vãos entre os segmentos são ainda mais evidentes.

## **6.2. Estudo sobre a sensibilidade do modelo à evolução batimétrica local**

As saídas dos módulos FM-HD e SW para os cinco cenários, sumarizados na Tabela 16, foram obtidas para cada um dos instantes de maré previamente definidos (meia maré enchente, meia hora antes da preamar, meia maré vazante e uma hora antes da baixa-mar). Foram extraídas figuras de vista mais ampla, compreendendo o trecho entre a seção STOS-32 e o Canal 4, e figuras de vista mais centralizada na região do projeto-piloto, compreendendo o trecho entre as seções STOS-29 e STOS-22.

Essa diferença de recortes foi adotada para garantir melhor visualização das velocidades de corrente, no caso do HD, e das alturas de onda, no caso do SW. Por isso, as figuras de vista ampla são apresentadas apenas para o instante de meia maré enchente, de forma a auxiliar na localização das regiões. As discussões, por sua vez, foram conduzidas pautadas nas figuras de vista centralizada.

Tabela 16 – Descrição dos dados batimétricos alterados para cada cenário de simulação.

<b>Nome do cenário</b>	<b>Grupo de dados batimétricos utilizados</b>
<b>Novo cenário-base</b>	Dados de campo topográficos de out. 2018. Dados batimétricos: FUNDESPA (2014) e SPA (2020). Canal do porto: batimetria SPA de dez. 2020.
<b>Cenário 1</b>	Novo cenário-base com a seguinte alteração: Inserção da brecha no segmento transversal do projeto-piloto na região do perfil STOS-32.
<b>Cenário 2</b>	Cenário 1 com a seguinte alteração: Acomodação da batimetria devido à brecha no projeto-piloto na região do perfil STOS-32.
<b>Cenário 3</b>	Cenário 1 com as seguintes atualizações de dados: Dados de campo topográficos de jul. 2019. Dados batimétricos da SPA de jul. 2020.
<b>Cenário 4</b>	Cenário 1 com as seguintes atualizações de dados: Dados de campo topográficos de fev. 2020. Dados batimétricos da SPA de dez. 2020. Brecha de 20 m no segmento transversal do projeto-piloto (geotubo desaparecido).

Fonte: Elaborada pela autora.

Logo, nas figuras de 96 a 100 são apresentadas as saídas do módulo hidrodinâmico FM-HD, na vista ampla, para os cinco cenários no instante de meia maré enchente. Já nas figuras de 101 a 105 são apresentadas as saídas do módulo FM-HD, na vista centralizada, para os cinco cenários nesse mesmo instante. E nas figuras de 106 a 113 são apresentadas as imagens resultantes da subtração das velocidades de corrente entre os cenários.

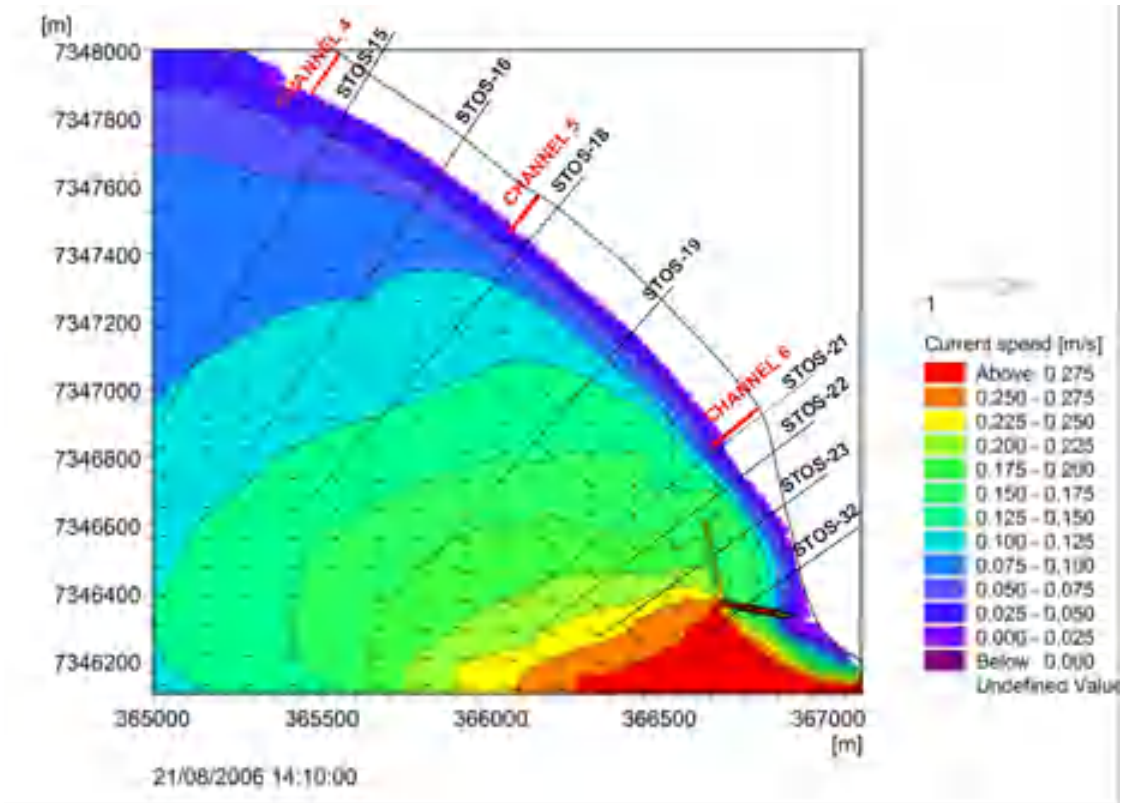


Figura 96. FM-HD: Novo cenário-base para o instante de meia maré enchente.

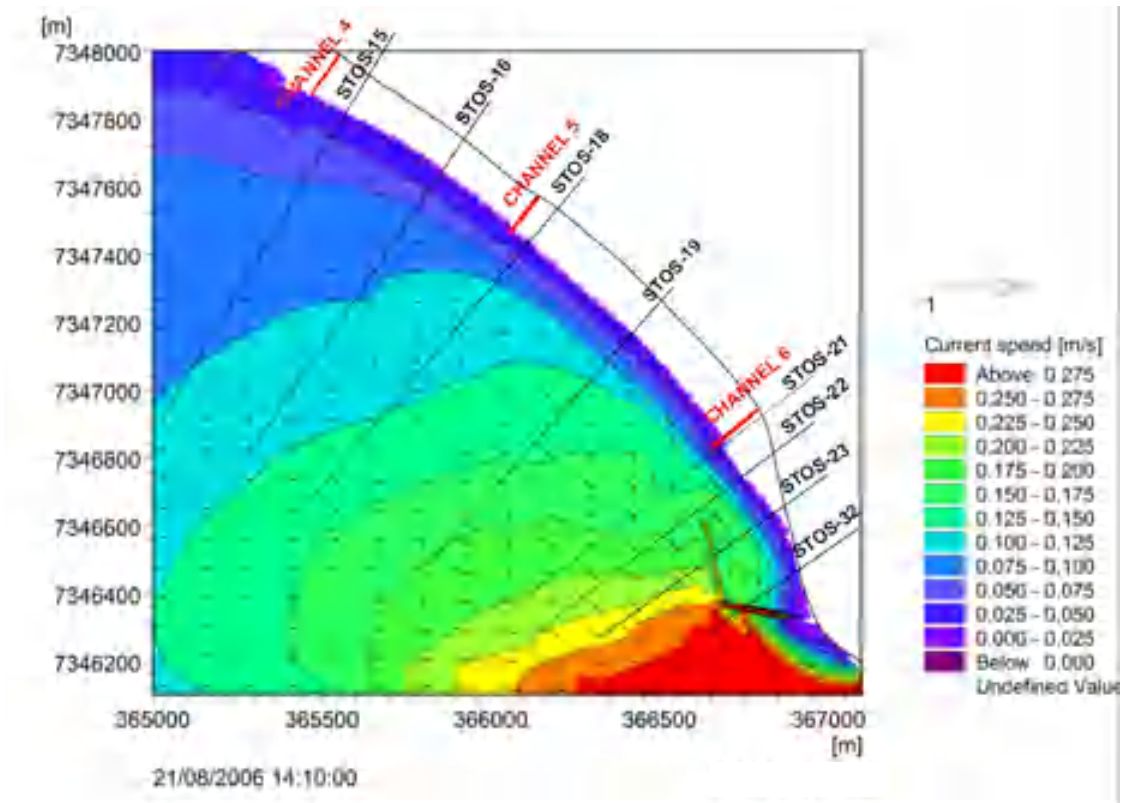


Figura 97. FM-HD: Cenário 1 para o instante de meia maré enchente.

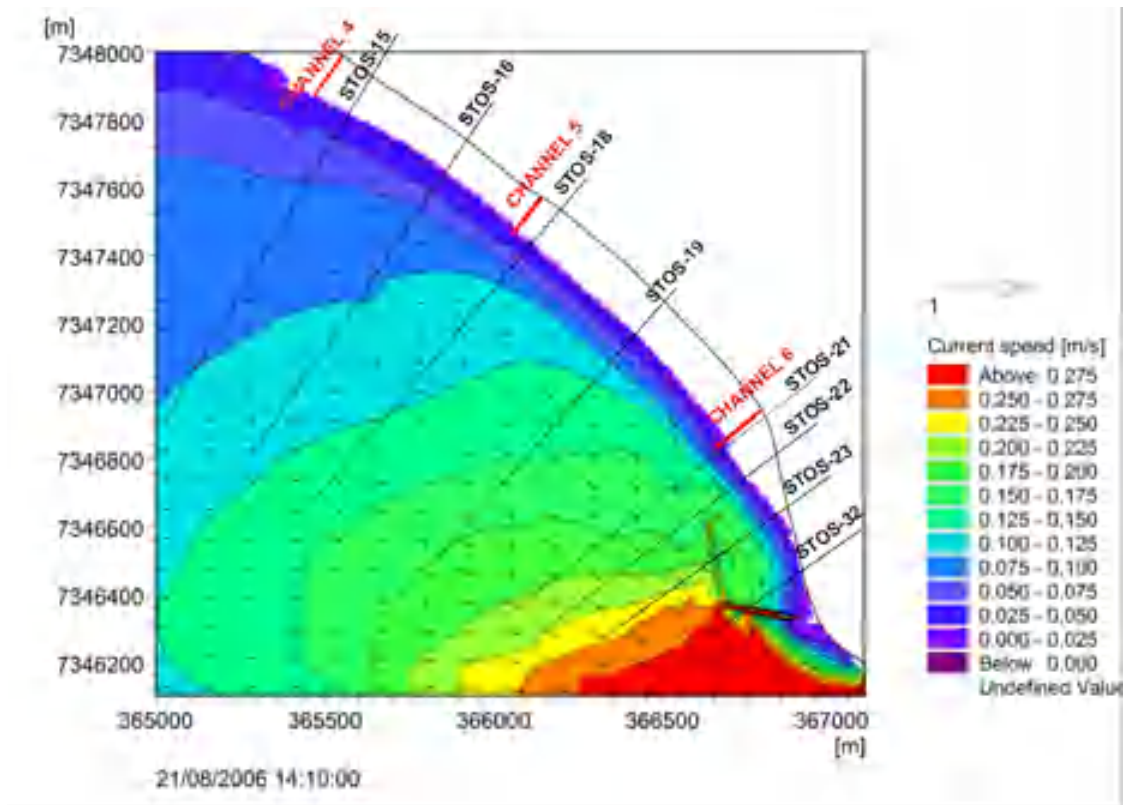


Figura 98. FM-HD: Cenário 2 para o instante de meia maré enchente.

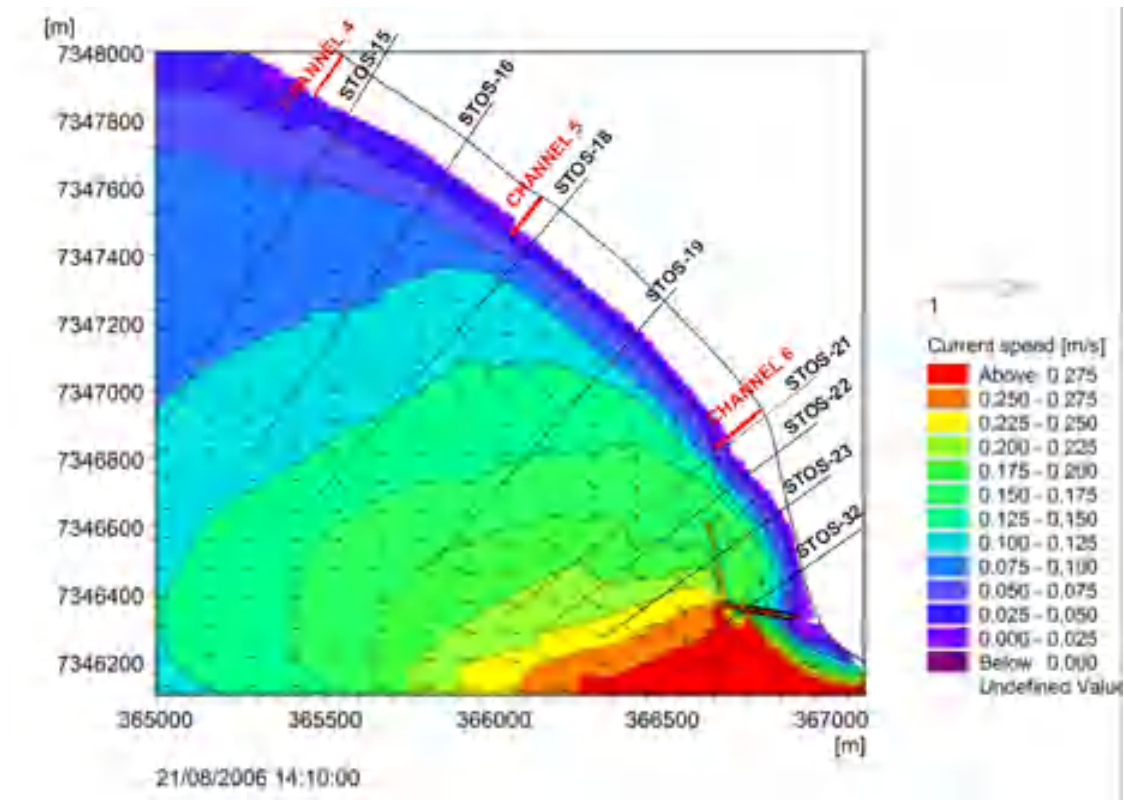


Figura 99. FM-HD: Cenário 3 para o instante de meia maré enchente.

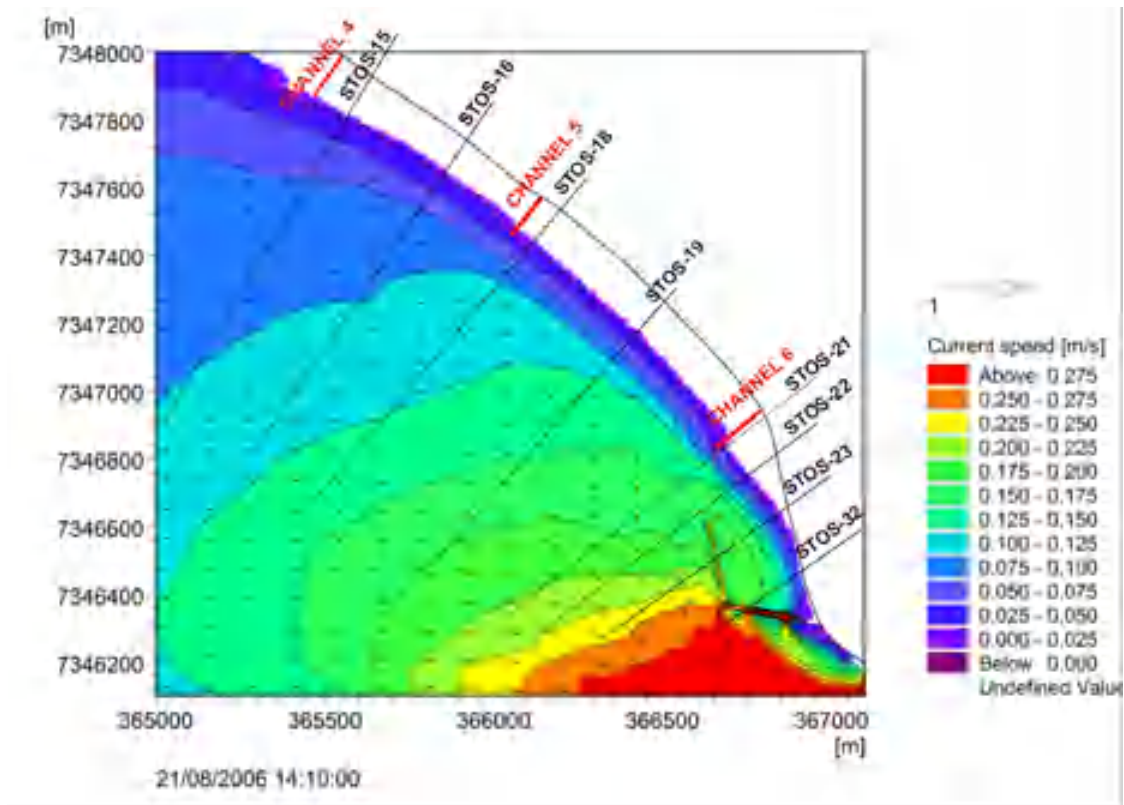


Figura 100. FM-HD: Cenário 4 para o instante de meia maré enchente.

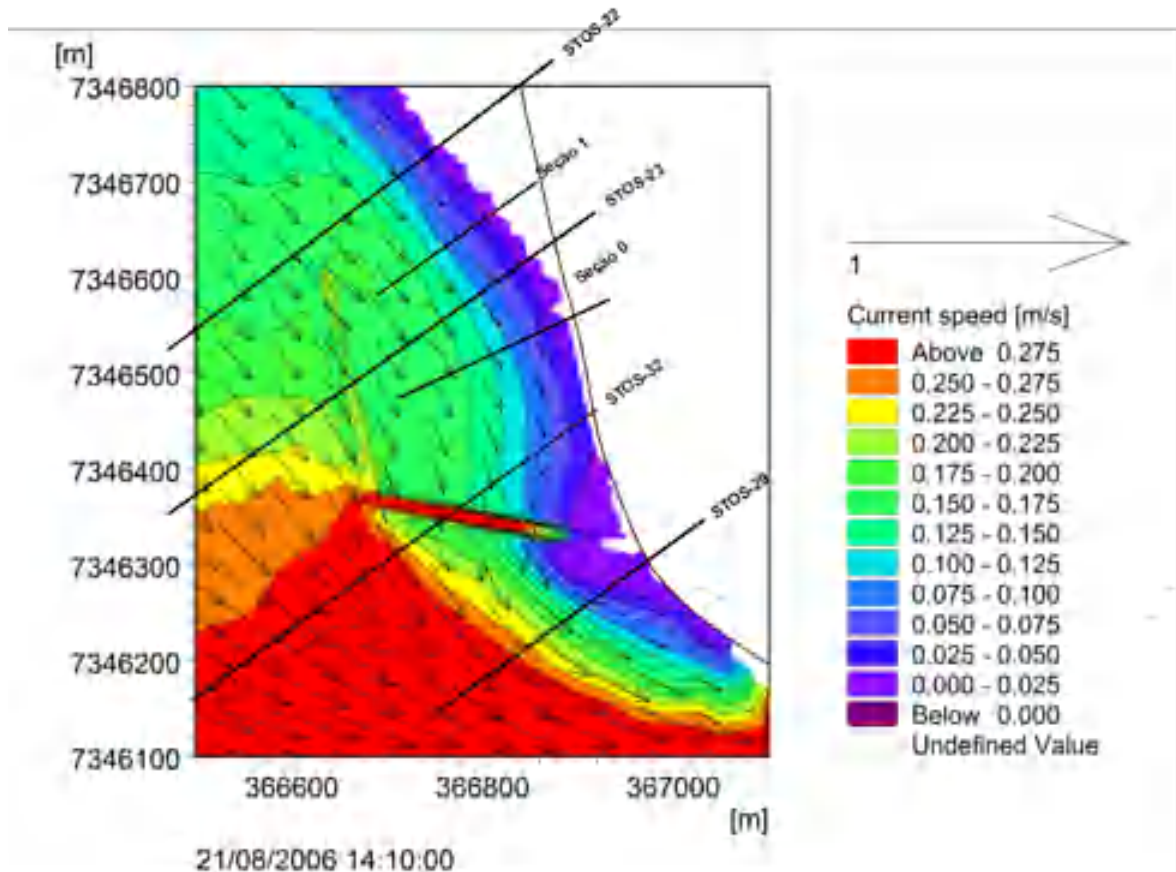


Figura 101. Recorte FM-HD: Novo cenário-base para o instante de meia maré enchente.

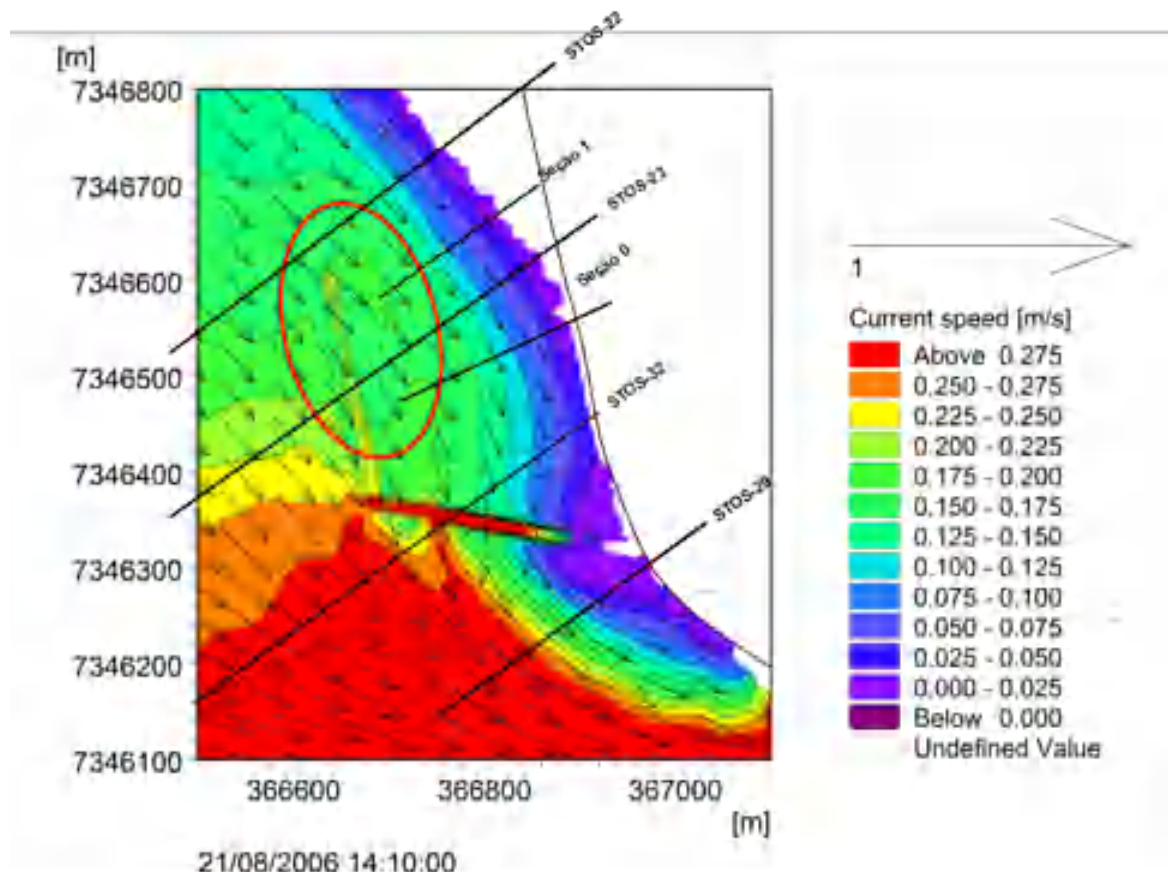


Figura 102. Recorte FM-HD: Cenário 1 para o instante de meia maré enchente.

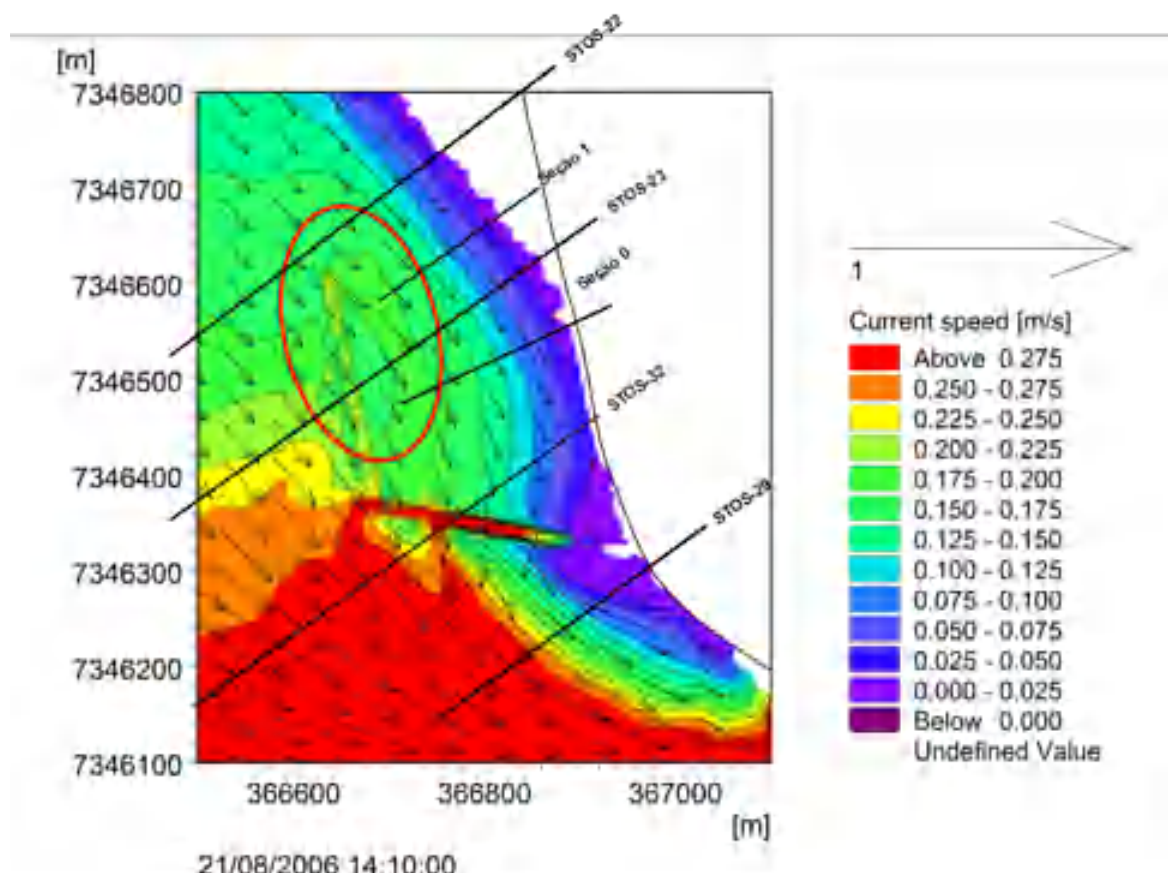


Figura 103. Recorte FM-HD: Cenário 2 para o instante de meia maré enchente.



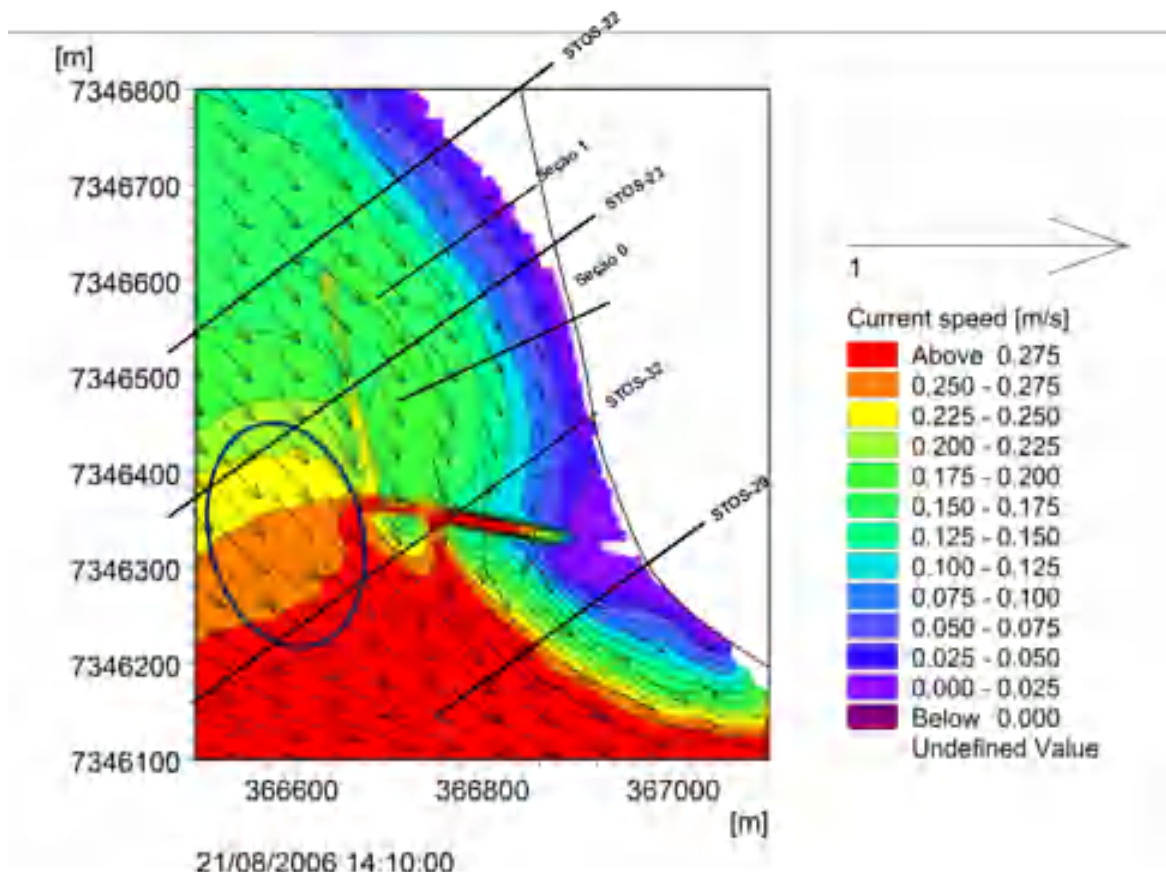


Figura 104. Recorte FM-HD: Cenário 3 para o instante de meia maré enchente.

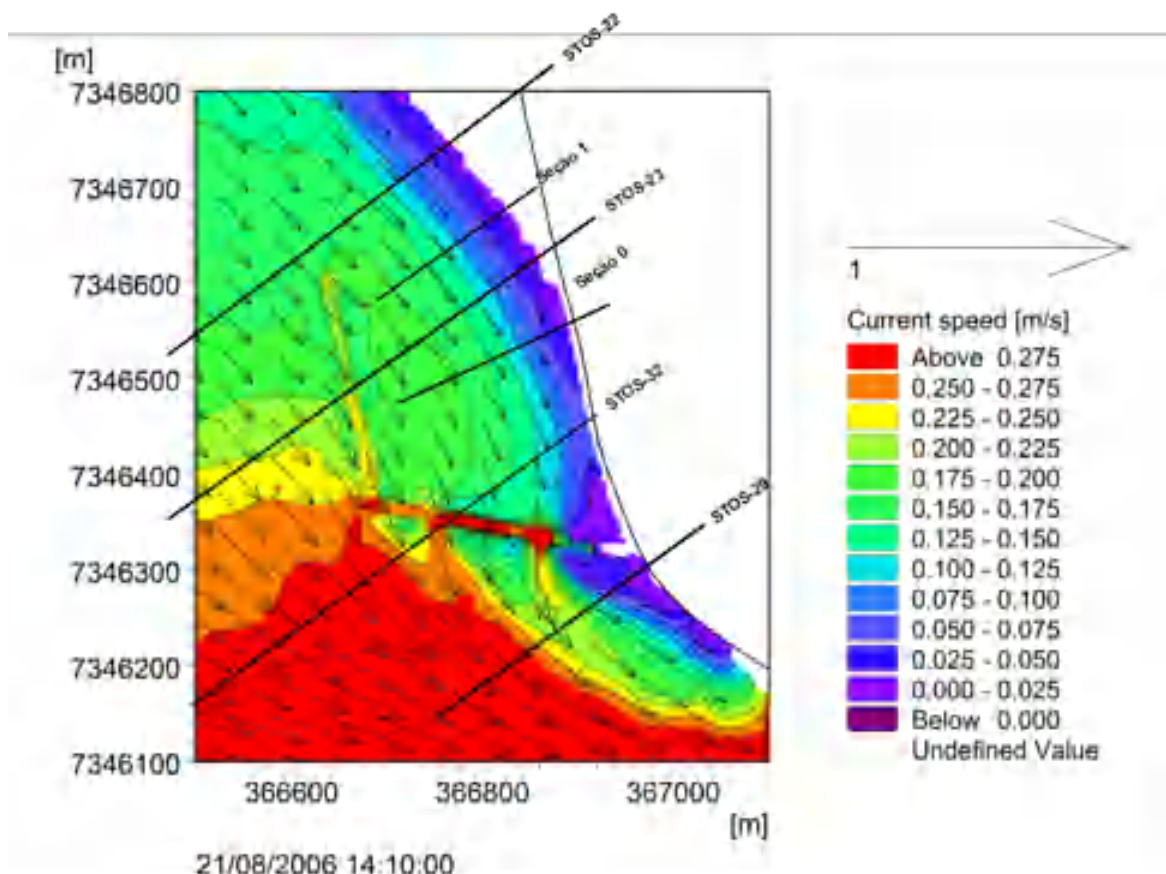


Figura 105. Recorte FM-HD: Cenário 4 para o instante de meia maré enchente.

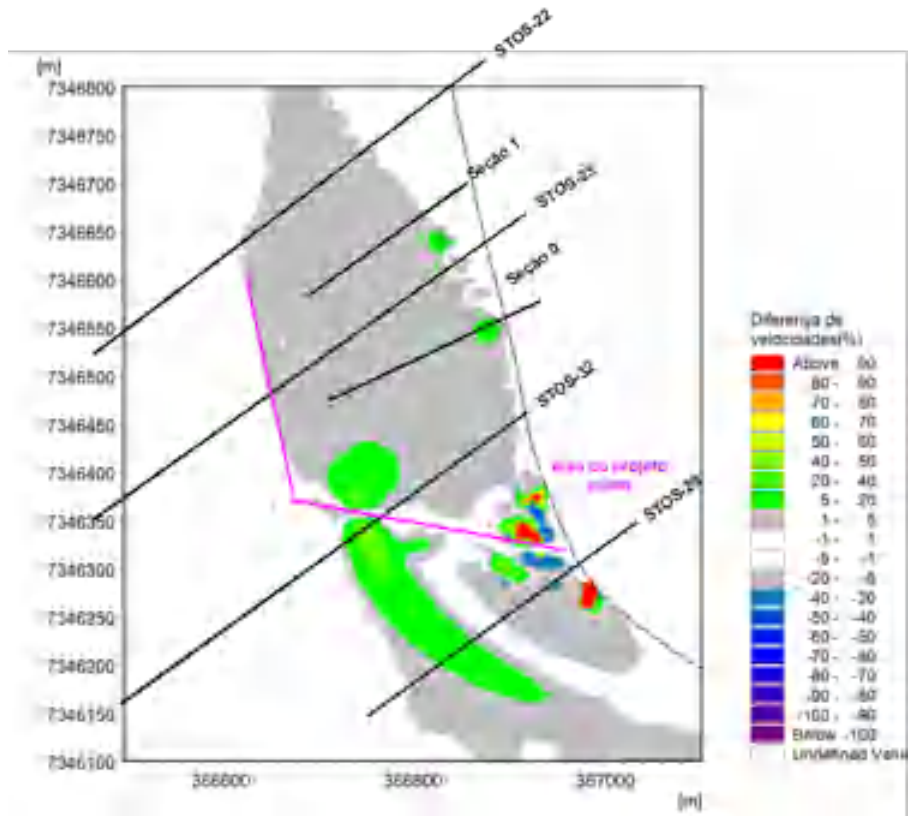


Figura 106. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 1 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região do projeto-piloto.

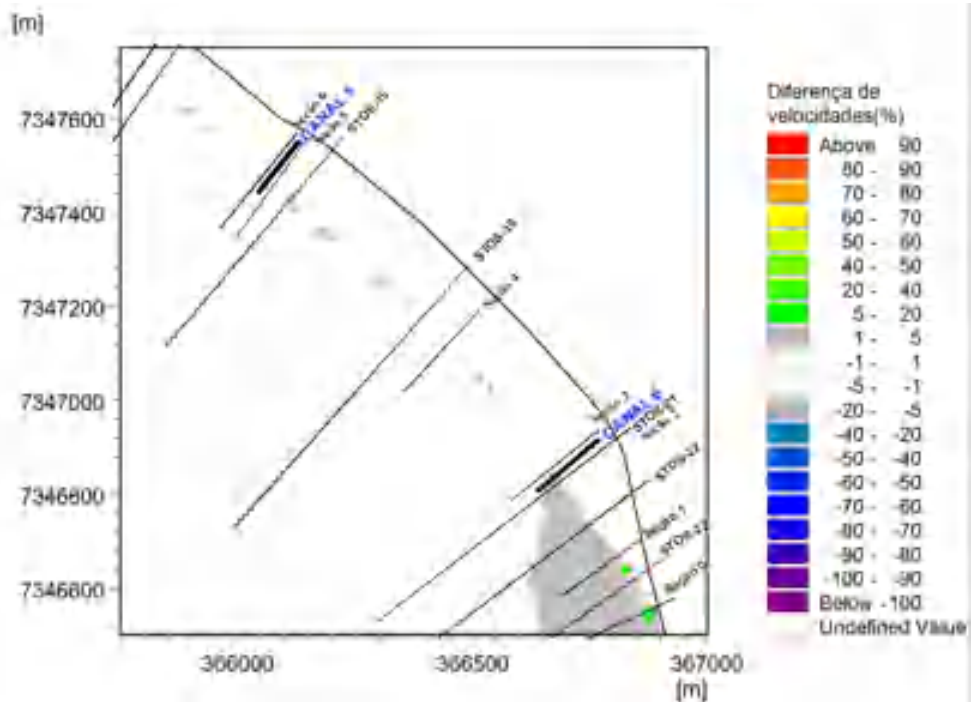


Figura 107. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 1 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região entre os canais 5 e 6.

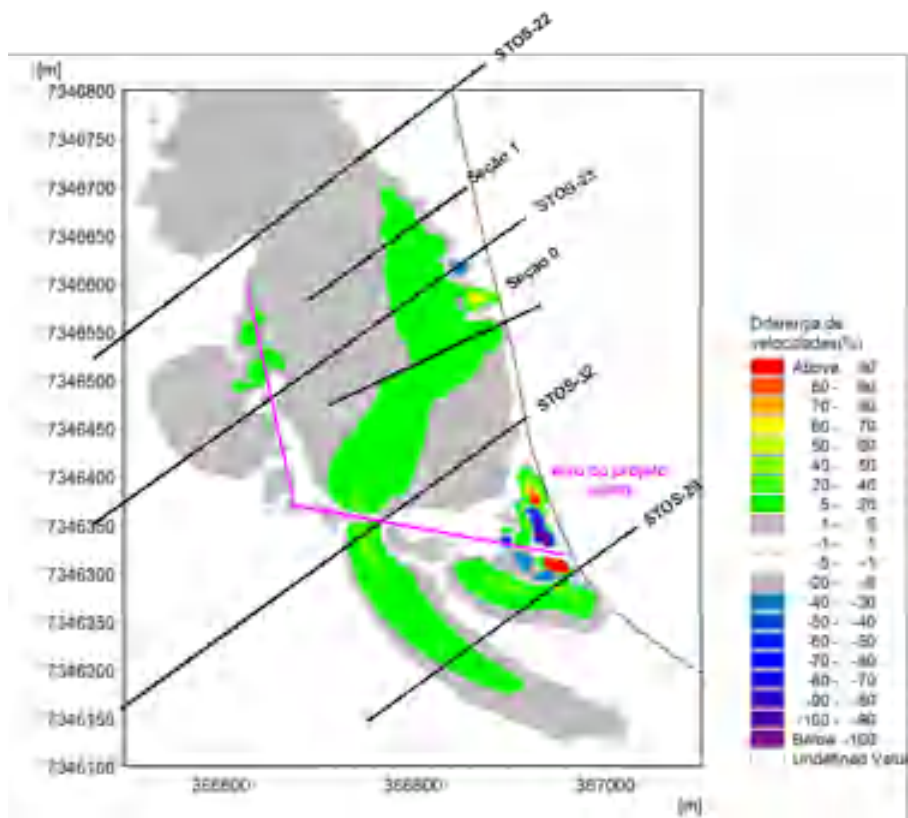


Figura 108. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 2 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região do projeto-piloto.

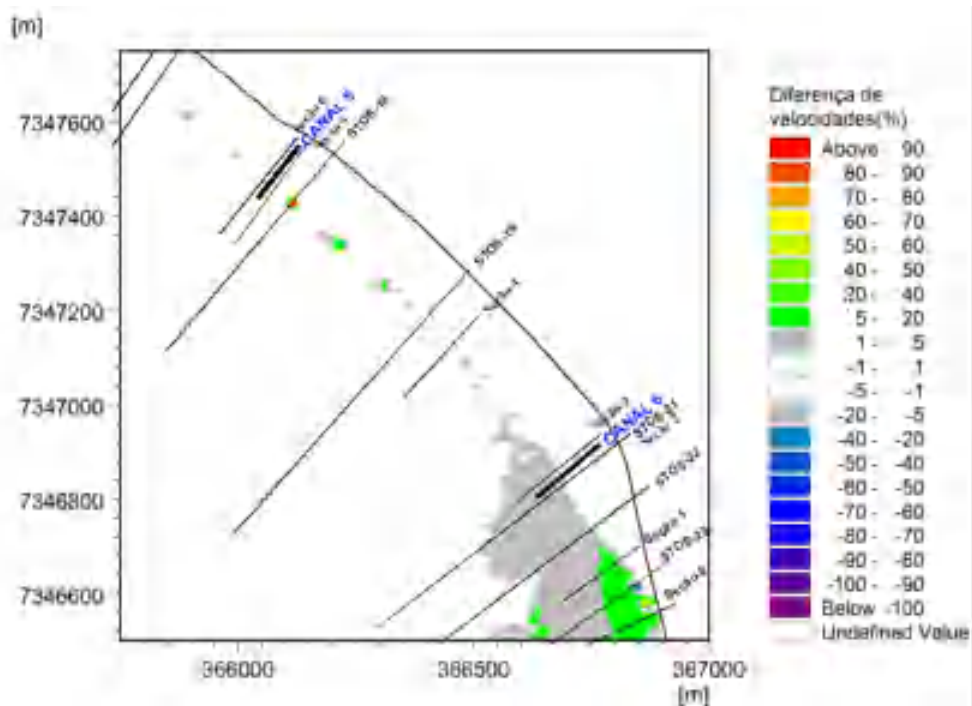


Figura 109. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 2 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região entre os canais 5 e 6.

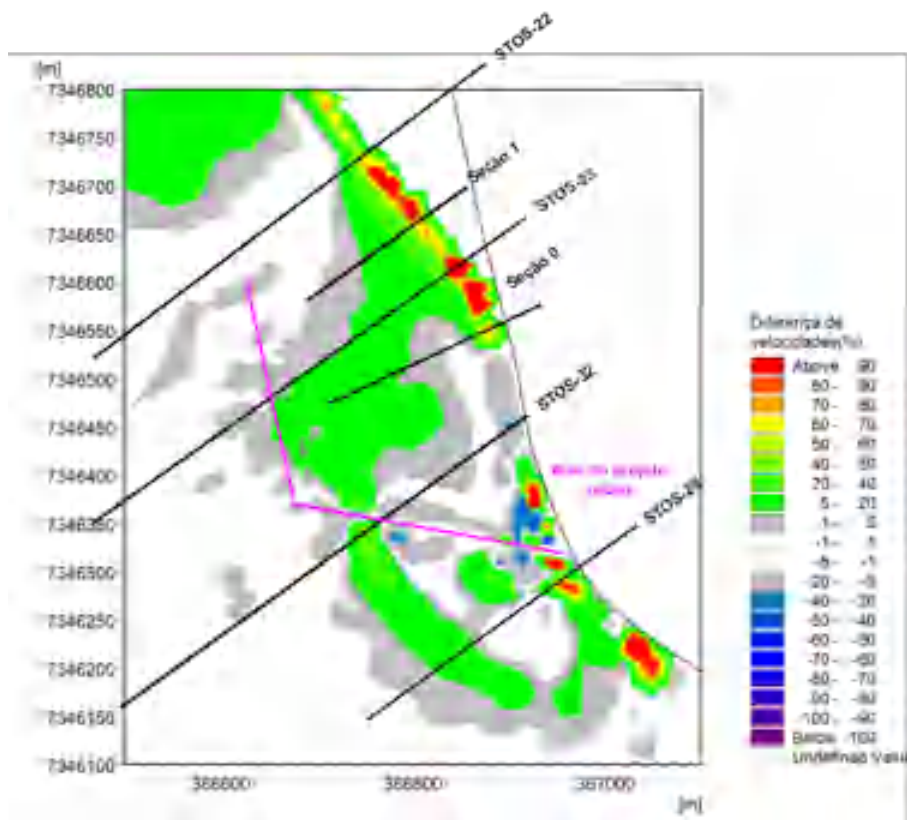


Figura 110. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 3 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região do projeto-piloto.

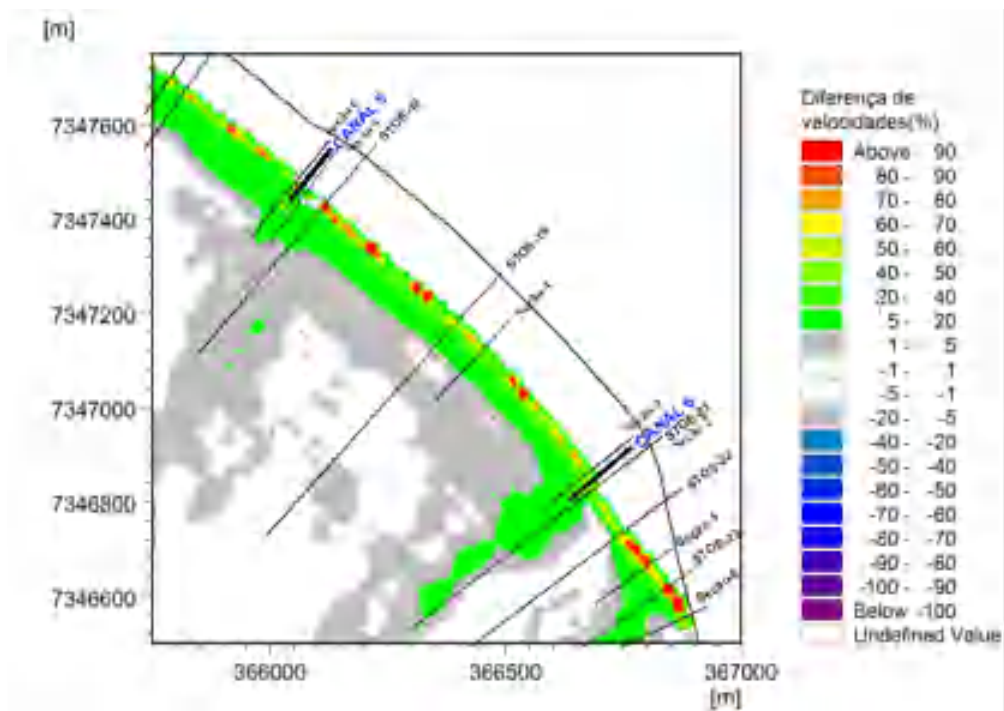


Figura 111. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 3 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região entre os canais 5 e 6.

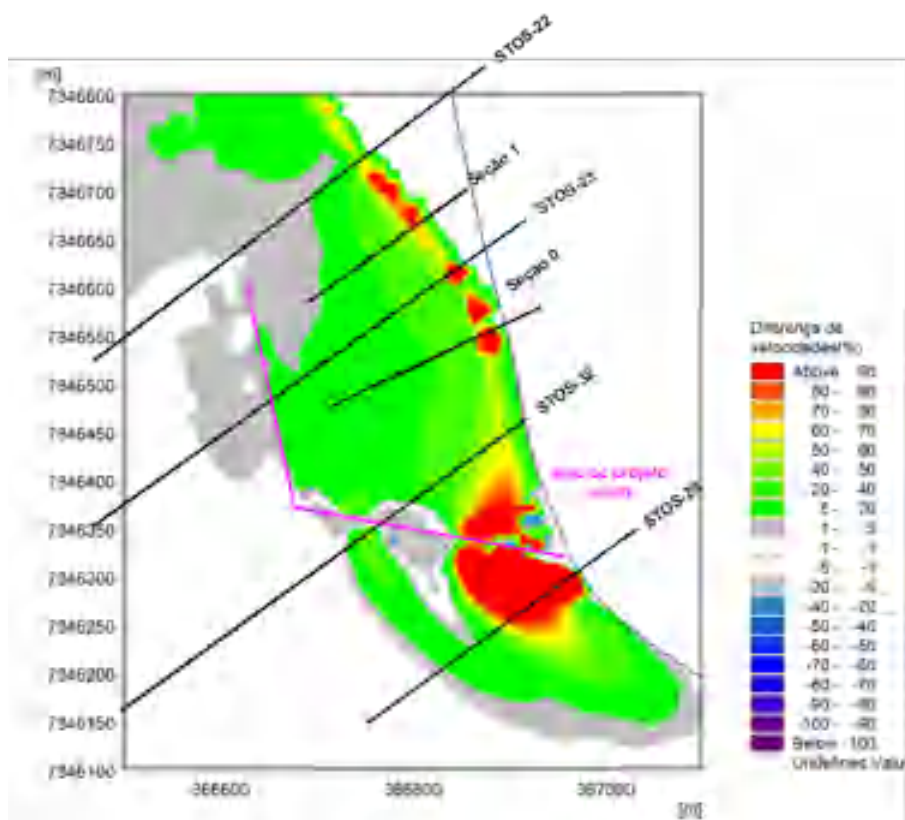


Figura 112. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 4 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região do projeto-piloto.

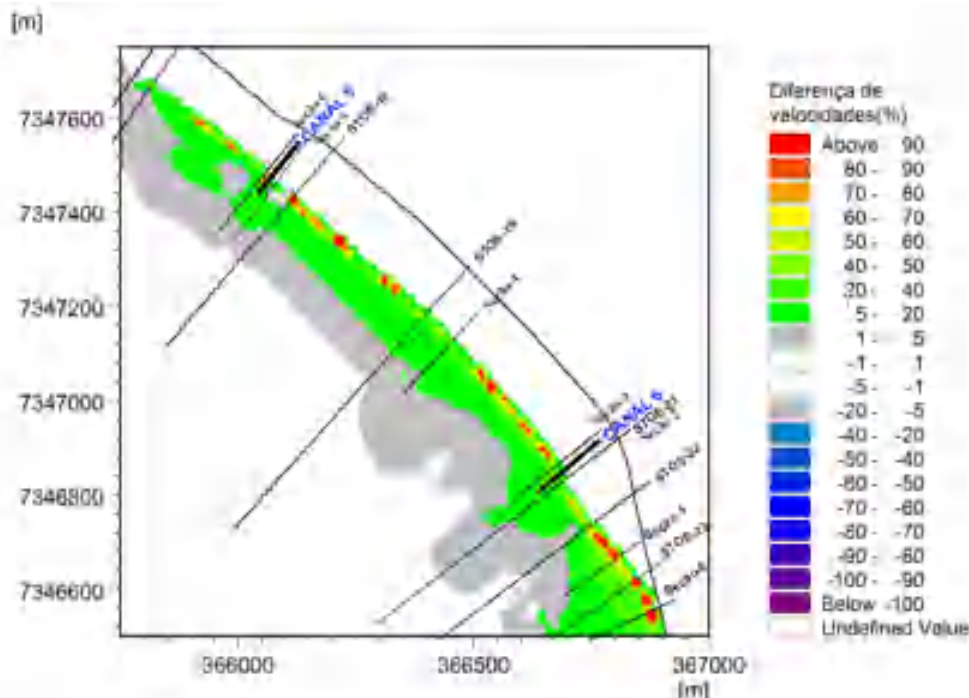


Figura 113. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 4 e o novo cenário-base para o instante de meia maré enchente, região entre os canais 5 e 6.

As figuras de vista ampla evidenciam que as mudanças batimétricas, aplicadas em cada cenário, resultaram apenas em impactos localizados nas adjacências do projeto-piloto.

Dessa forma, a necessidade de se analisar os resultados a partir das figuras de vista centralizada é reforçada.

Ao se comparar o cenário 1 (Figura 102) com o novo cenário-base (Figura 101), percebe-se o início de uma concentração de correntes na primeira brecha (localizada na seção STOS-32), principalmente na parte externa do projeto-piloto. Além disso, nota-se que o efeito dessa abertura é estritamente localizado, conforme corroborado pelas Figura 106 e Figura 107. Entretanto, apesar de ser um impacto localizado, ele ultrapassa a área em que houve alteração batimétrica (Figura 65). Já no cenário 2, no qual houve uma acomodação da batimetria à presença da brecha, observa-se que ocorreu uma unificação do fluxo de correntes que apresenta maiores velocidades (faixa entre 0,175 e 0,200 m/s), conforme destacado pelo círculo vermelho na Figura 103. O espalhamento de correntes com maiores velocidades é evidenciado na Figura 108, já na Figura 109 pode-se notar que o espalhamento de velocidades pouco atinge a região entre os canais 5 e 6.

A análise do cenário 3, por sua vez, além de reforçar as conclusões já obtidas, também traz mudanças em relação ao comportamento das correntes na parte externa ao segmento longitudinal da obra, como destacado pelo círculo azul escuro na Figura 104. Tais mudanças estão relacionadas à alteração da batimetria que reproduz, agora, uma condição de mau tempo (Figura 67). Além disso, como o cenário 3 parte da premissa da condição de mau tempo, é possível observar mais claramente, na Figura 110 e na Figura 111, indícios de que as correntes estão respondendo às mudanças batimétricas, uma vez que tais correntes ficaram mais rápidas.

Já a análise do cenário 4 (Figura 105), que conta com a inserção de uma segunda brecha representando o geotubo desaparecido, traz diversas conclusões complementares a respeito dessa condição específica de dados, que podem ser elencadas da seguinte forma:

- Há a formação de dois canais preferenciais para o escoamento das correntes;
- Há uma maior concentração de correntes na região paralela e próxima ao muro de praia e, conseqüentemente, um aumento das velocidades. Isso explica a maior perda de sedimentos verificada em levantamentos de campo mais recentes (após fevereiro de 2020);
- Cada brecha foi responsável por induzir um vórtice na circulação das correntes, o que resulta em maiores taxas de erosão nas adjacências de cada abertura.

A observação das diferenças percentuais de velocidades entre o cenário 4 e o novo cenário-base (Figura 112 e Figura 113) não só corrobora as conclusões já traçadas, como oferece os apontamentos adicionais listados a seguir:

- Tanto o novo cenário-base quanto o cenário 4 estão em condições de bom tempo. O que difere os dois cenários são os perfis praias mais erodidos do cenário 4 (dados de fevereiro de 2020), o restante da batimetria permanece sem alterações (Figura 68);
- Há uma mudança brusca de velocidade em resposta à segunda brecha. Tem-se um aumento percentual acima de 90%;
- As diferenças de velocidade de corrente devido à primeira brecha se acentuam ainda mais em reflexo à atuação da segunda brecha;
- Observa-se, em comparação aos cenários anteriores, que há um aumento de correntes junto à costa, formando um “caminho preferencial” na praia, o que resultaria em erosão (Figura 113). Com isso, é possível concluir que o modelo responde não só às diferenças batimétricas como também às aberturas, reproduzindo o comportamento das correntes verificado em campo pela equipe durante os levantamentos de outubro de 2021 e fevereiro de 2022 (que estão em fase de processamento).

Por fim, visando incrementar as discussões estabelecidas até aqui, optou-se por realizar uma subtração de velocidades entre o cenário 4 e o cenário 2, apresentada na Figura 114 e na Figura 115.

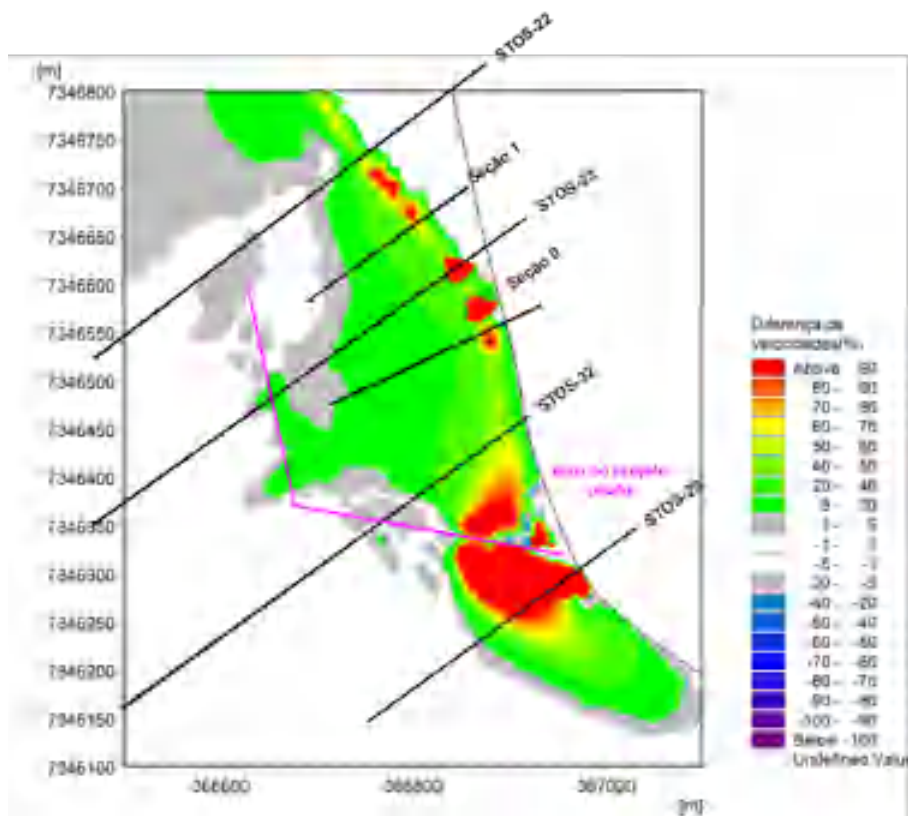


Figura 114. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 4 e o cenário 2 para o instante de meia maré enchente, região do projeto-piloto.

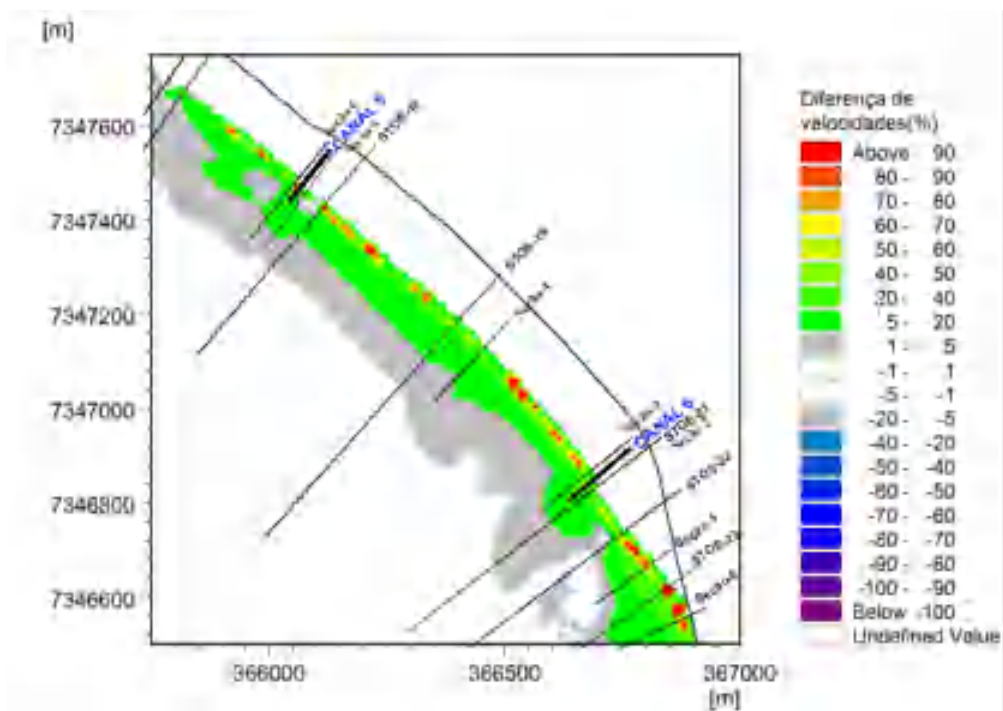


Figura 115. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 4 e o cenário 2 para o instante de meia maré enchente, região entre os canais 5 e 6.

Ao analisar as diferenças percentuais de velocidades de corrente entre os cenários 4 e 2, observa-se que a interferência da segunda brecha, sozinha, é muito mais intensa do que



a da primeira brecha. Além disso, conforme pode ser visto na Figura 116, as modificações batimétricas no cenário 4 foram relativamente pequenas se comparadas ao cenário 2. Portanto, pode-se inferir que as mudanças de velocidades estão associadas, de forma quase exclusiva, à presença das aberturas, em especial da segunda brecha.

No entanto, é importante frisar que a primeira brecha foi executada a partir de uma hipótese simplificadora: ela não foi tratada como uma abertura que aumentou ao longo do tempo, conforme ocorreu em campo devido ao afundamento progressivo de parte de dois geotubos, mas sim como uma abertura única e fixa no decorrer da linha temporal. Tal hipótese se deu pelo fato do modelo não reproduzir a progressão do tamanho da abertura em função do tempo. Sendo assim, a evolução dos fundos que ocorreu de forma lenta e gradual, como pôde ser observado durante vários levantamentos de campo (Figura 38, Figura 39 e Figura 41), foi acompanhada por meio da variação dos dados batimétricos. Já no caso da segunda brecha, é suposto que houve um esvaziamento súbito do geotubo, de forma que a resposta da evolução dos fundos foi muito mais rápida, isto é, notaram-se mudanças significativas entre a batimetria de julho de 2020 e a batimetria de dezembro de 2020, fornecidas pela SPA. Além disso, como explicado no item 4.5.2, há uma lacuna de dados topográficos entre fevereiro de 2020 e outubro de 2021, de maneira que o acompanhamento adequado da evolução dos fundos devido à segunda brecha foi dificultado.

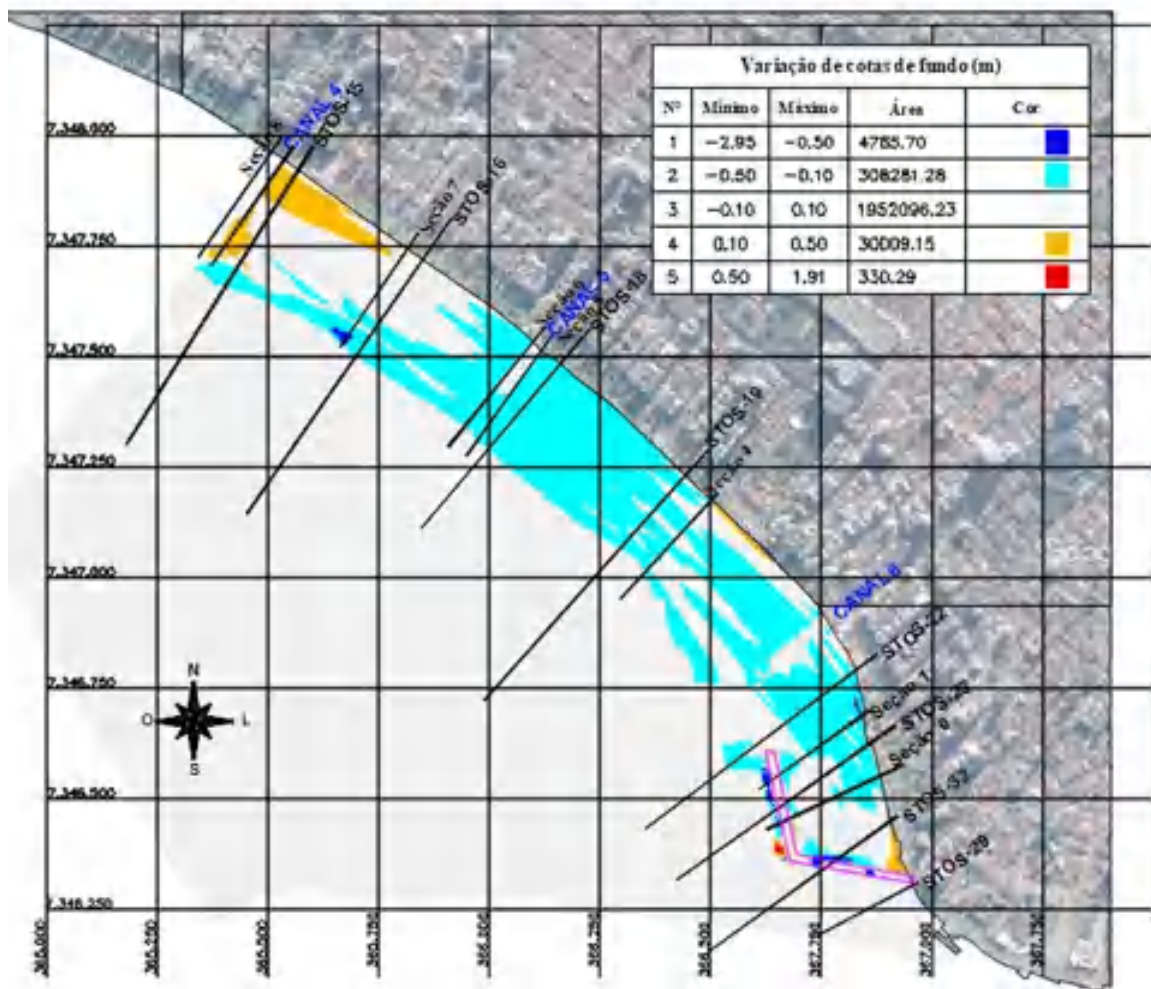


Figura 116. Diferenças de batimetria entre os cenários 4 e 2.

As análises obtidas para o instante de meia hora antes da preamar e meia maré vazante apontam para conclusões similares às traçadas anteriormente. Dessa forma, as figuras desses instantes foram omitidas e optou-se por apresentar as figuras do instante seguinte. Logo, nas figuras de 117 a 121 são apresentadas as saídas do módulo FM-HD, na vista centralizada, para os cinco cenários no instante de uma hora antes da baixa-mar e, na Figura 122, é apresentada a saída do módulo FM-HD, na vista ampla, para o cenário 4 nesse mesmo instante de maré.

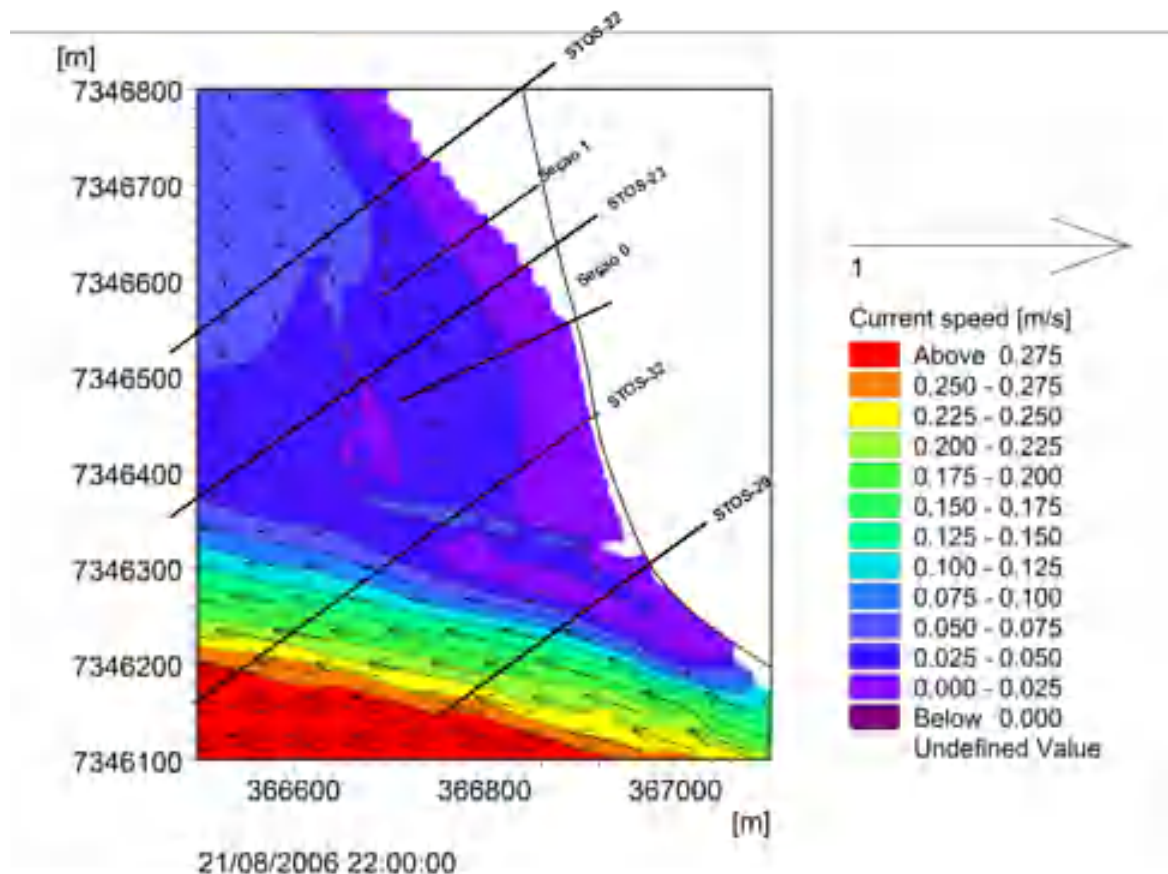


Figura 117. Recorte FM-HD: Novo cenário-base para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

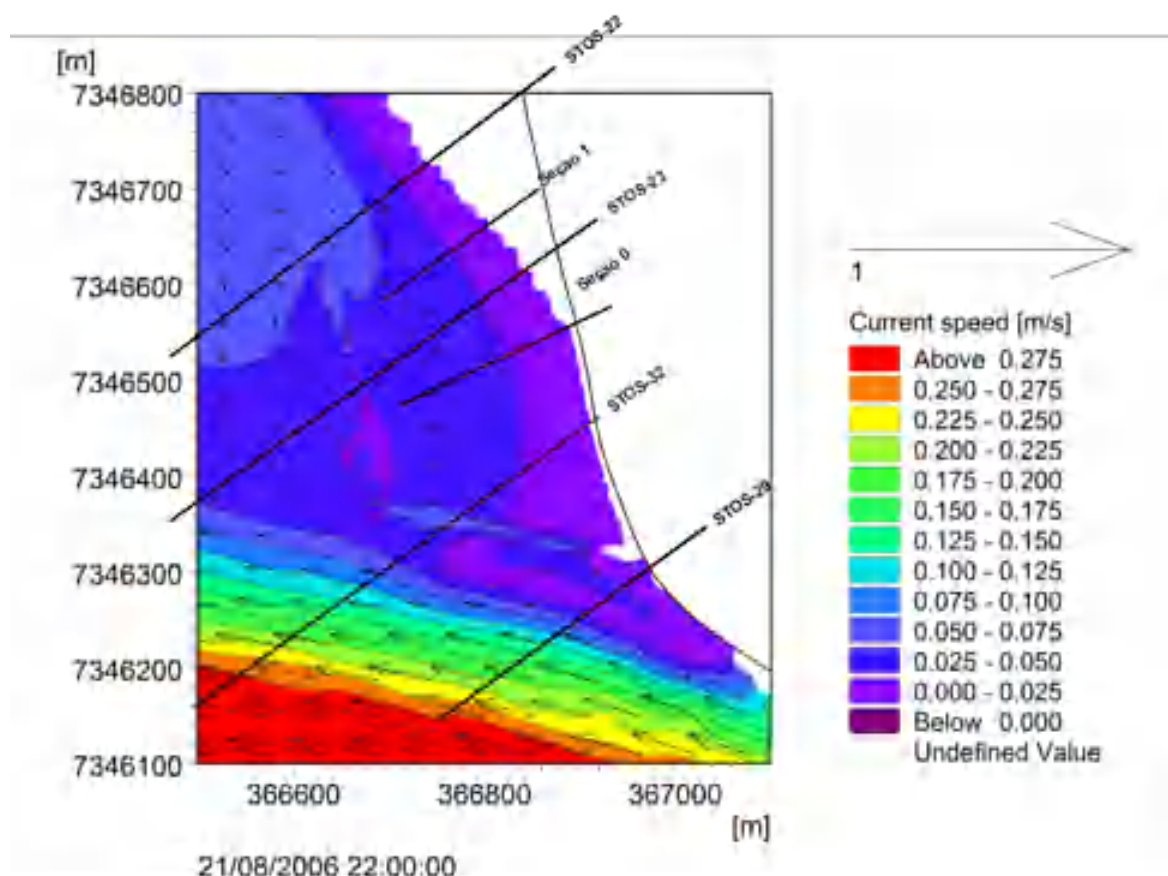


Figura 118. Recorte FM-HD: Cenário 1 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

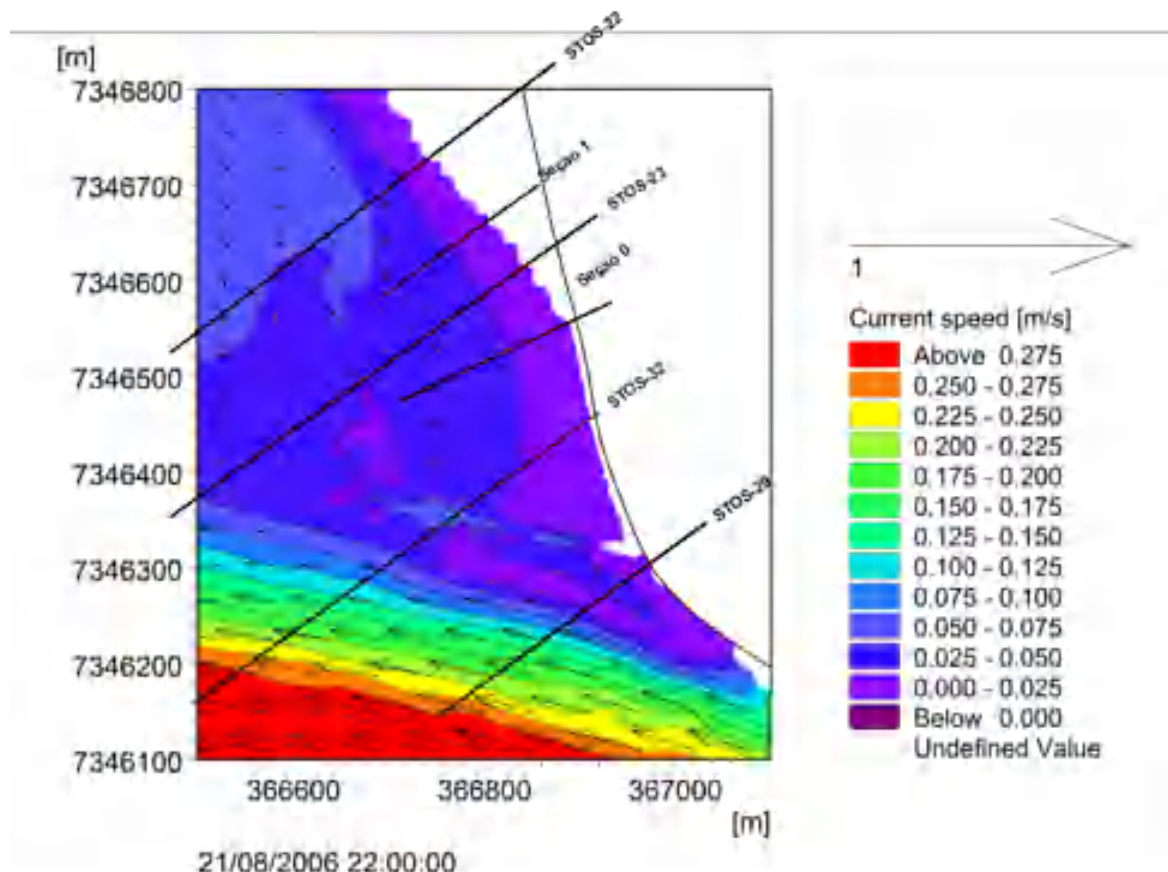


Figura 119. Recorte FM-HD: Cenário 2 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

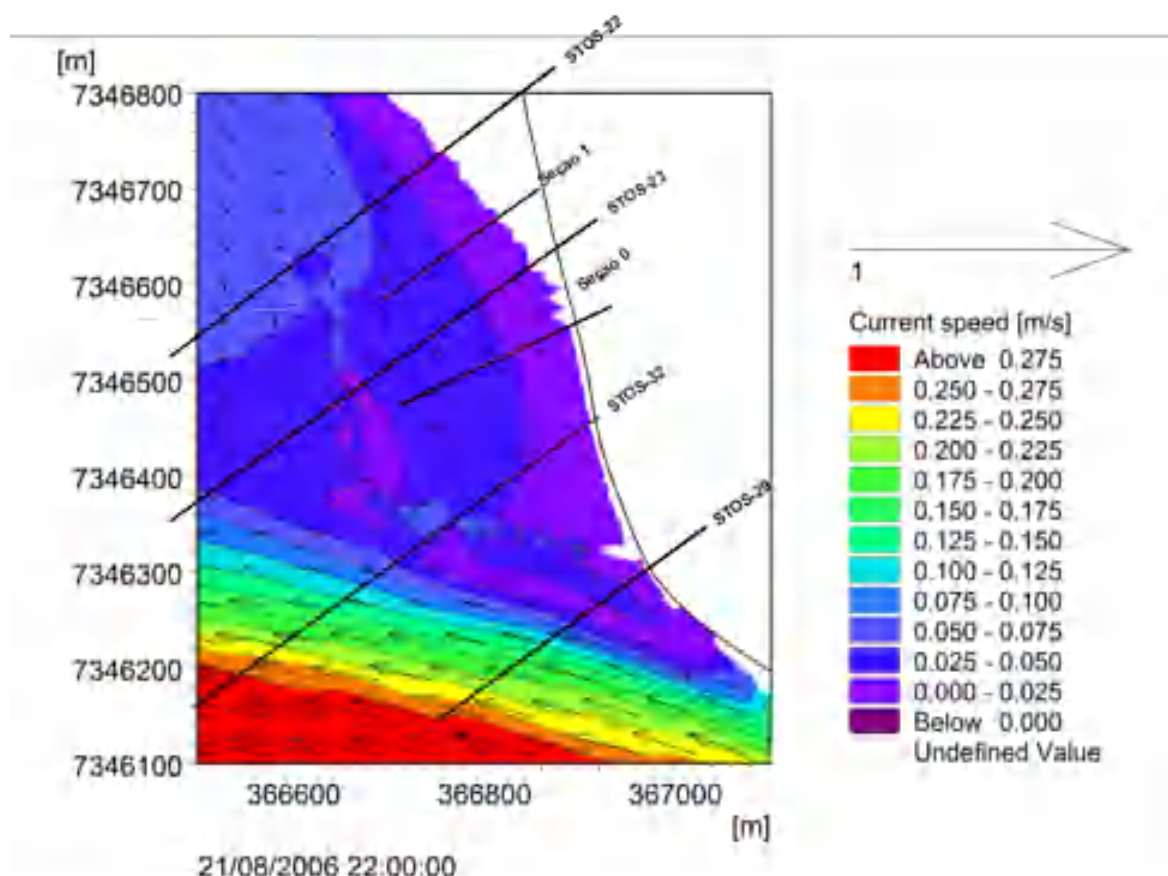


Figura 120. Recorte FM-HD: Cenário 3 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

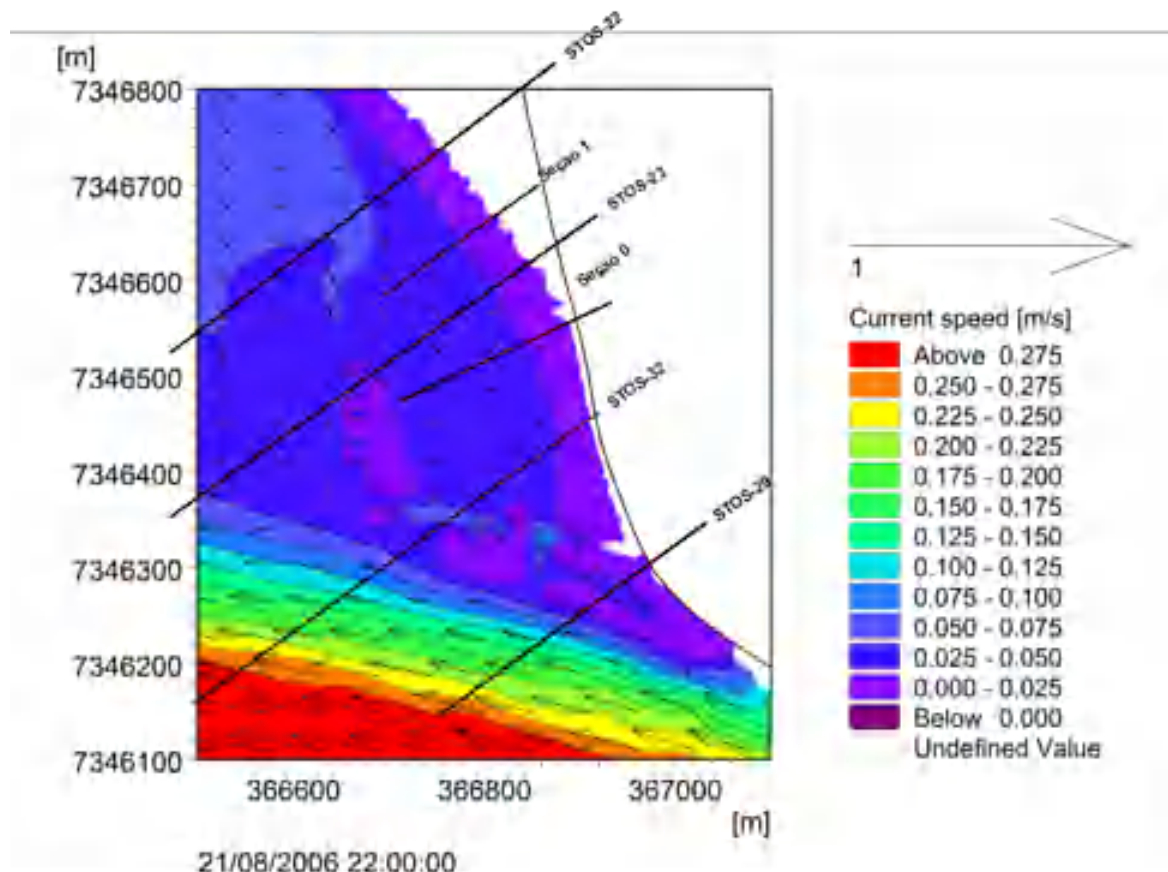


Figura 121. Recorte FM-HD: Cenário 4 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

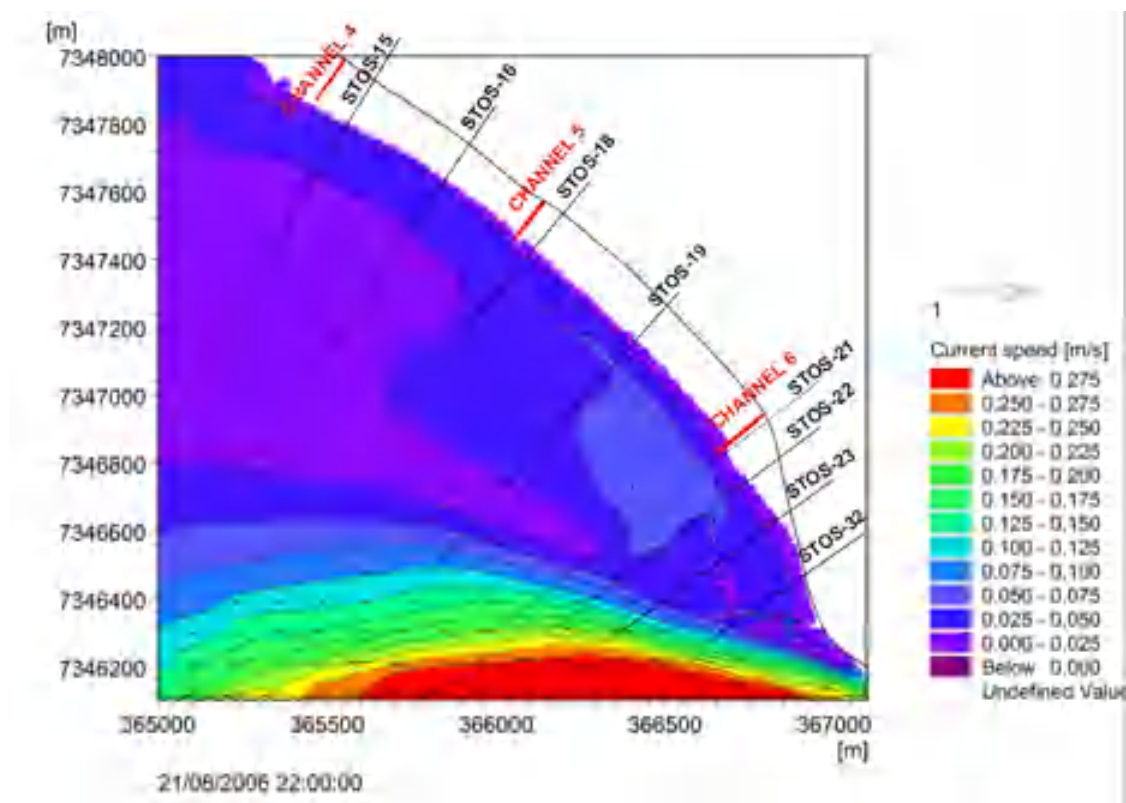


Figura 122. FM-HD: Cenário 4 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

As análises dos cenários 1, 2 e 3 (Figuras 118, 119 e 120, respectivamente) apontam para as mesmas conclusões anteriores, isto é, a presença da primeira brecha interferiu direta e localmente no padrão de circulação das correntes na região do projeto-piloto. Além disso, o modelo responde às modificações de batimetria que simulam outra condição de perfil praial, ou seja, um perfil mais erodido (mau tempo).

Já a análise do cenário 4 (Figura 121), traz que a segunda brecha, mesmo nesse instante próximo à baixa-mar, causou o aumento das velocidades de corrente em relação aos cenários anteriores. Apesar de ser um instante no qual as correntes de maré estão saindo do estuário, sabe-se que há a formação de uma recirculação de correntes no trecho compreendido entre o Canal 5 e a ponta da praia, conforme Figura 122. Desse modo, as correntes presentes na zona abrigada pelo projeto-piloto estão se direcionando para fora da região, através das brechas, e retirando sedimentos de uma área que, teoricamente, tem a maior taxa de acúmulo de areia. Informação esta que é corroborada pelas figuras dos perfis STOS-32, Seção 0 e STOS-23 (Figura 41, Figura 42 e Figura 43, nessa ordem), além da Tabela 10 e da Tabela 11 que apresentam a variação da linha Zero DHN e a evolução de fundo, respectivamente.

Nas figuras de 123 a 127 são apresentadas as saídas do módulo de ondas SW, na vista ampla, para os cinco cenários no instante de meia maré enchente. Já nas figuras de 128 a 132 são apresentadas as saídas do módulo de ondas SW, na vista centralizada, para os cinco cenários nesse mesmo instante.

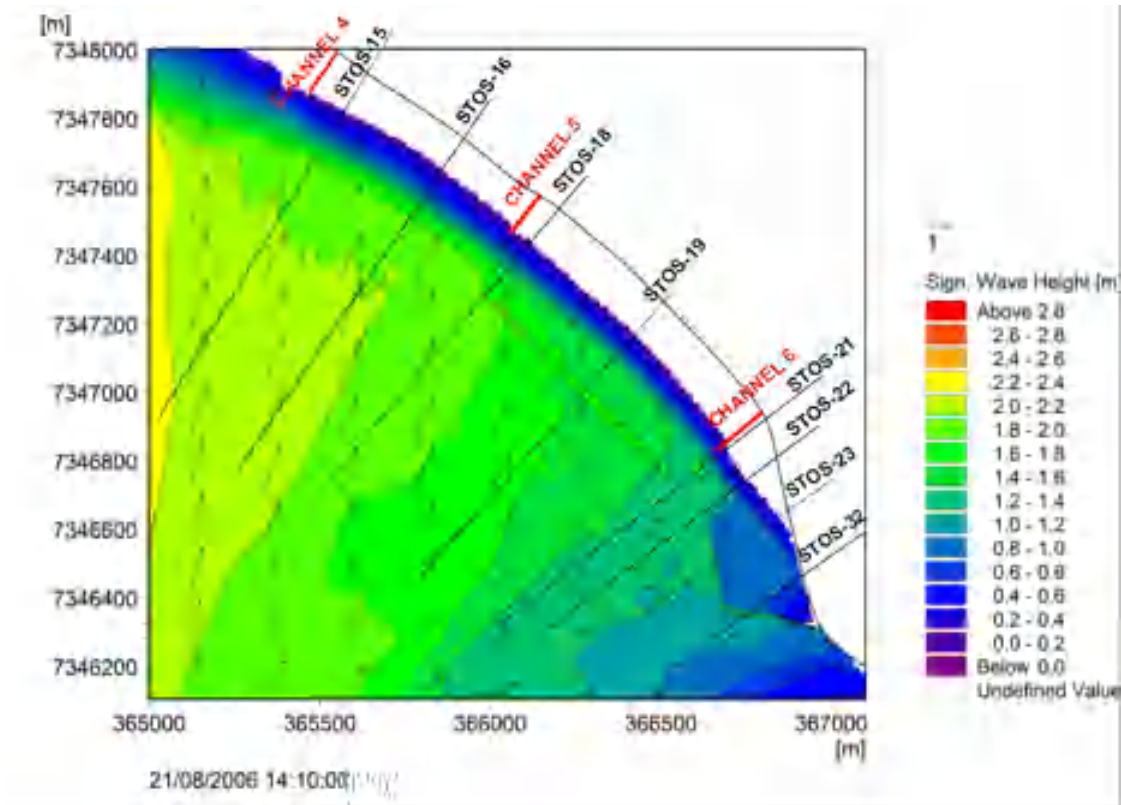


Figura 123. SW: Novo cenário-base para o instante de meia maré enchente.

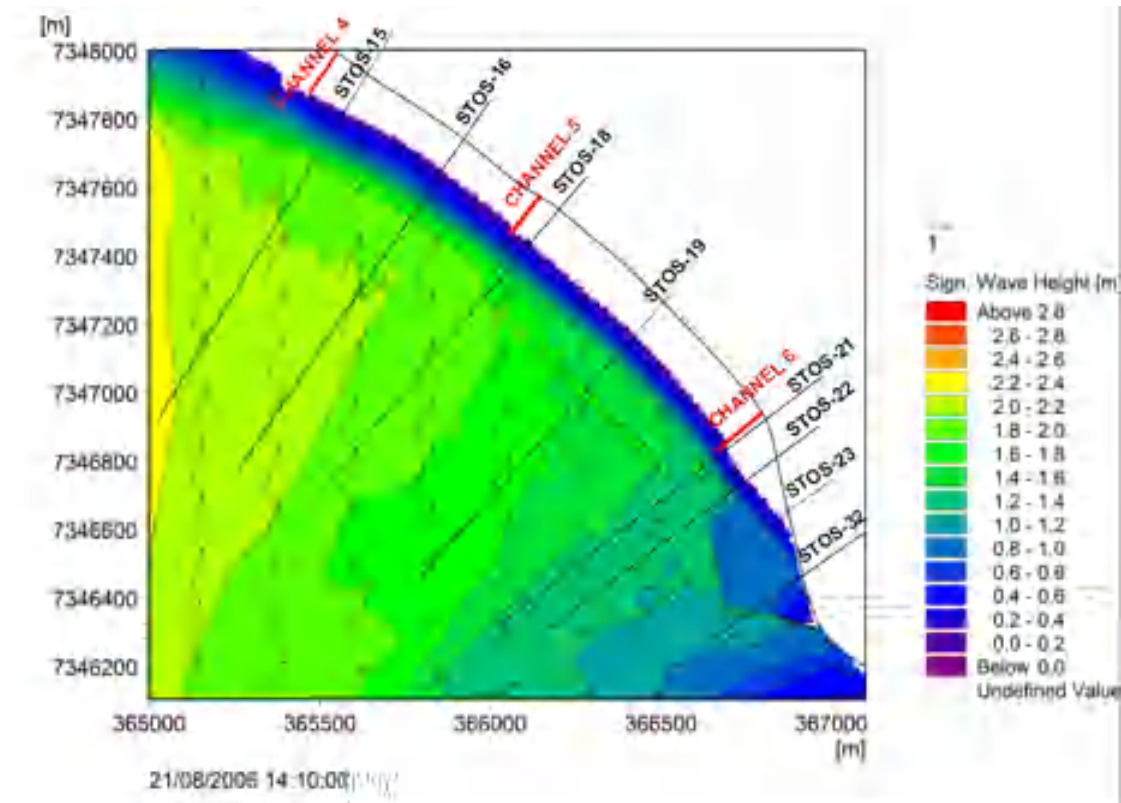


Figura 124. SW: Cenário 1 para o instante de meia maré enchente.

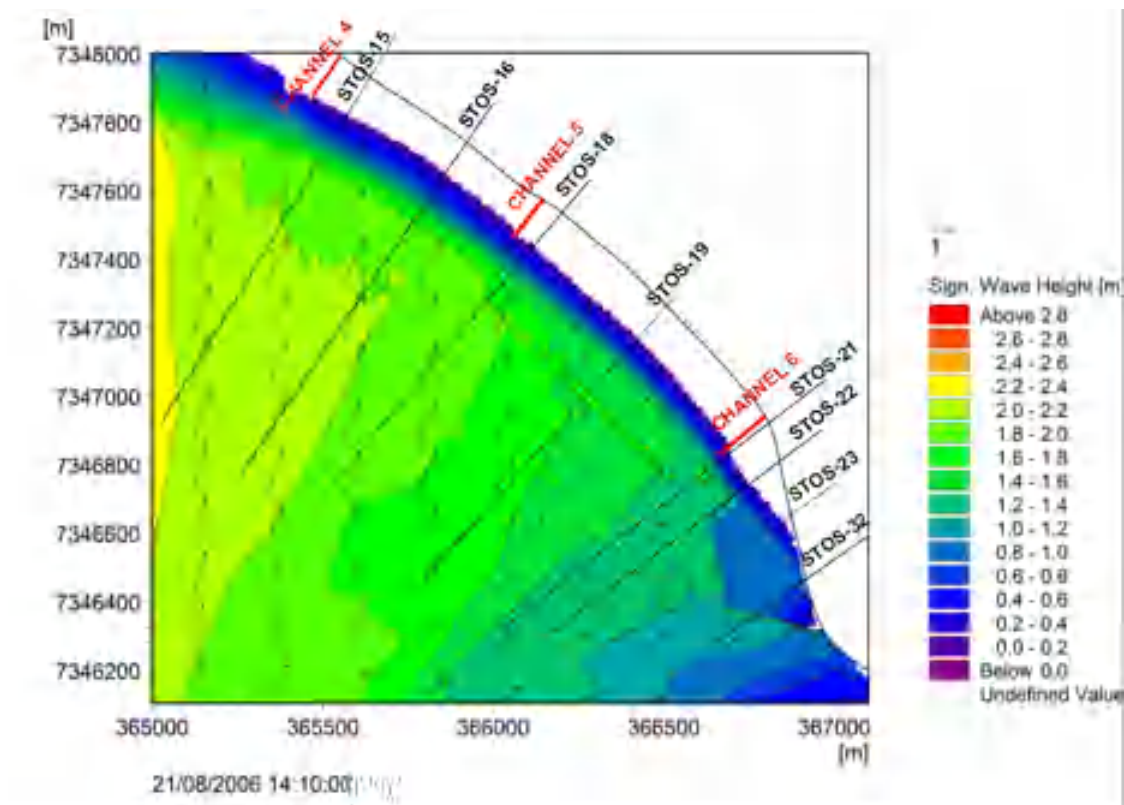


Figura 125. SW: Cenário 2 para o instante de meia maré enchente.

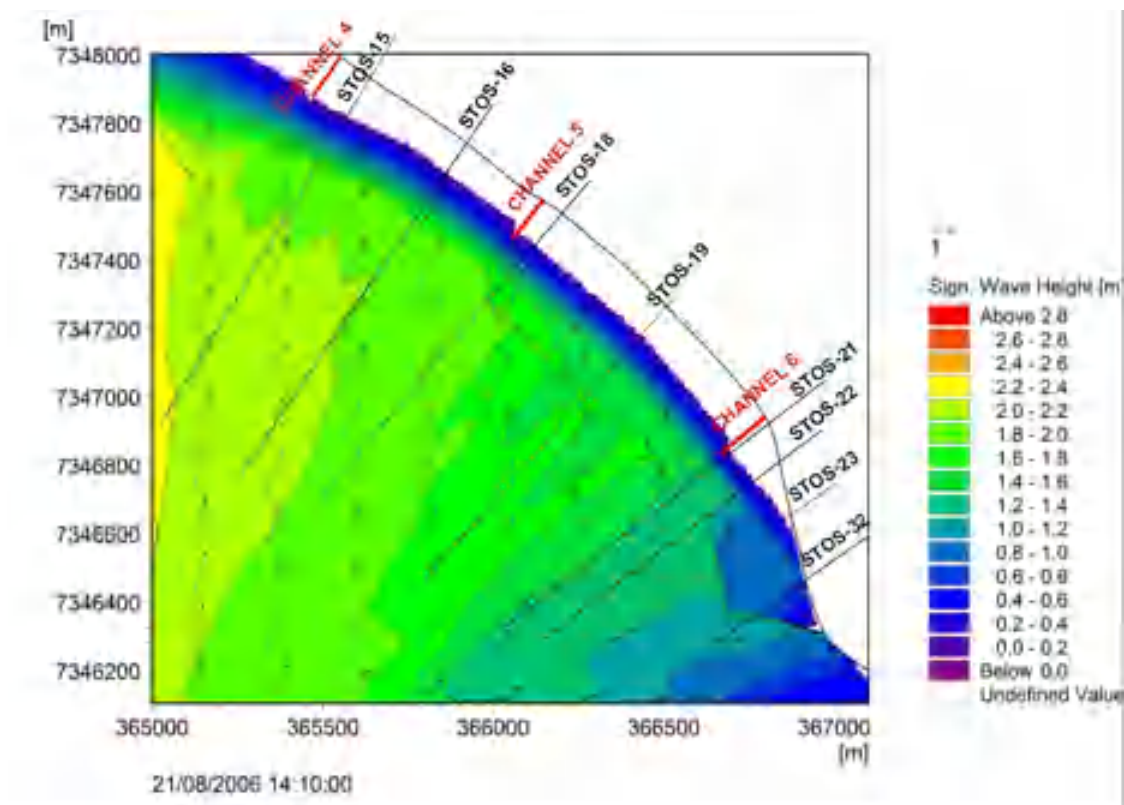


Figura 126. SW: Cenário 3 para o instante de meia maré enchente.



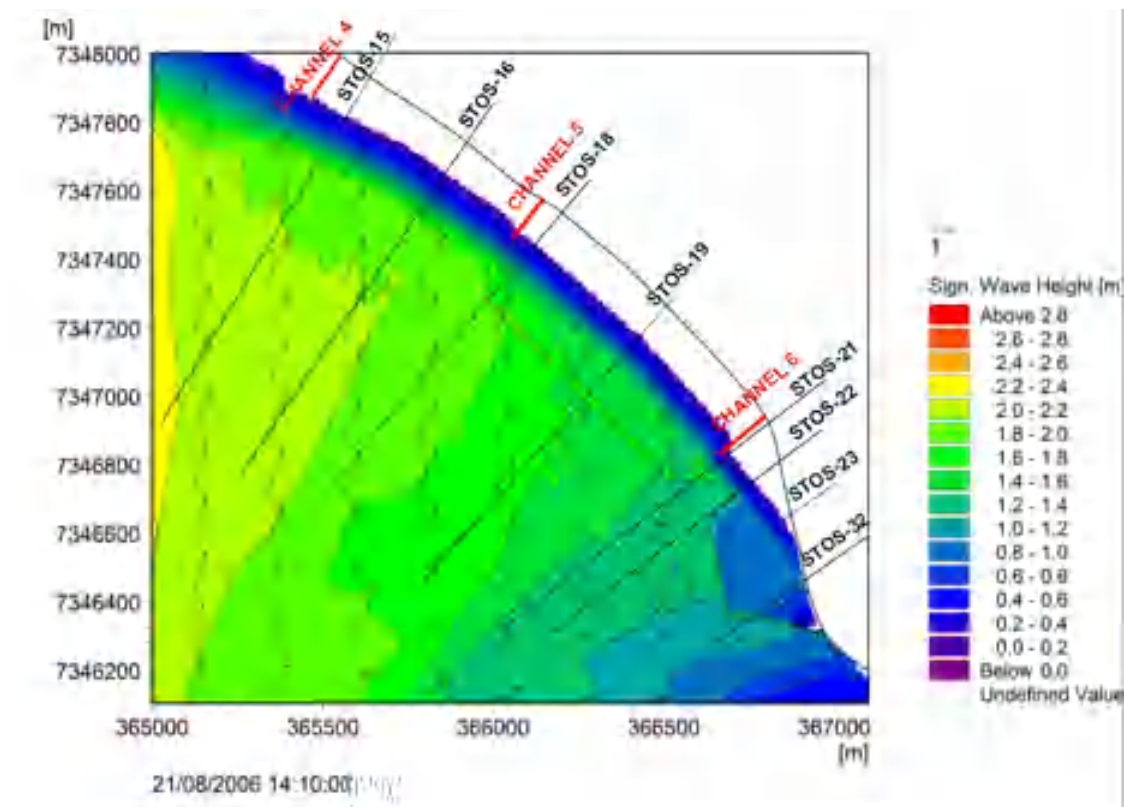


Figura 127. SW: Cenário 4 para o instante de meia maré enchente.

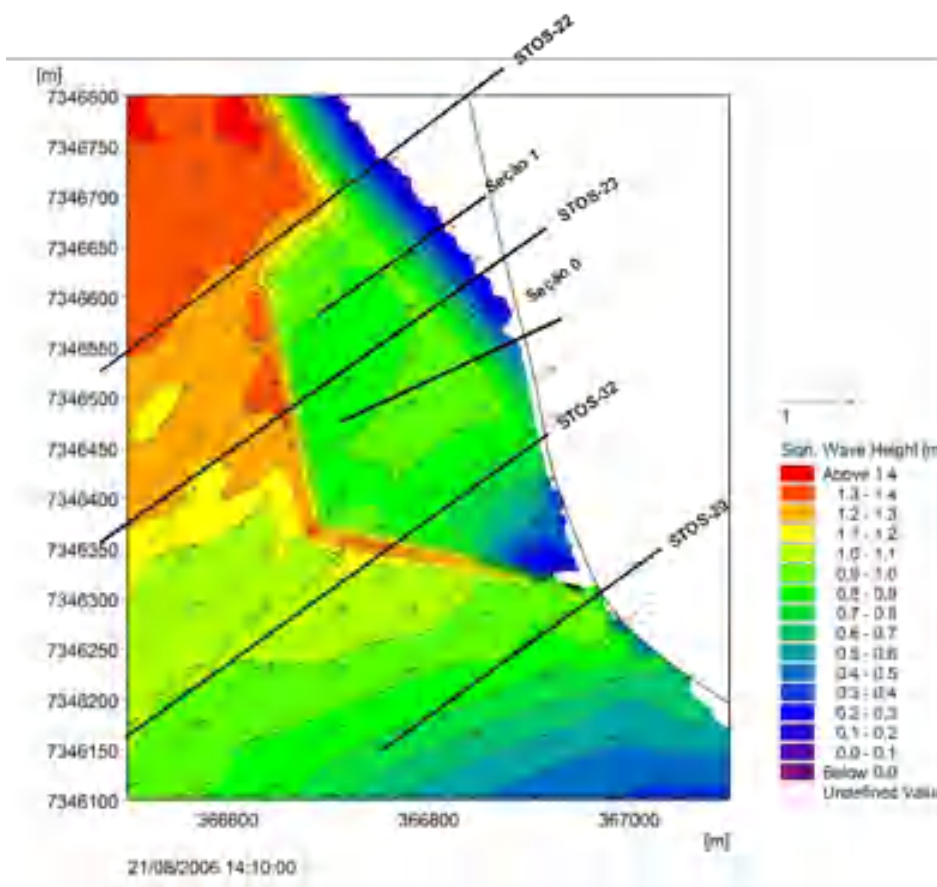


Figura 128. Recorte SW: Novo cenário-base para o instante de meia maré enchente.

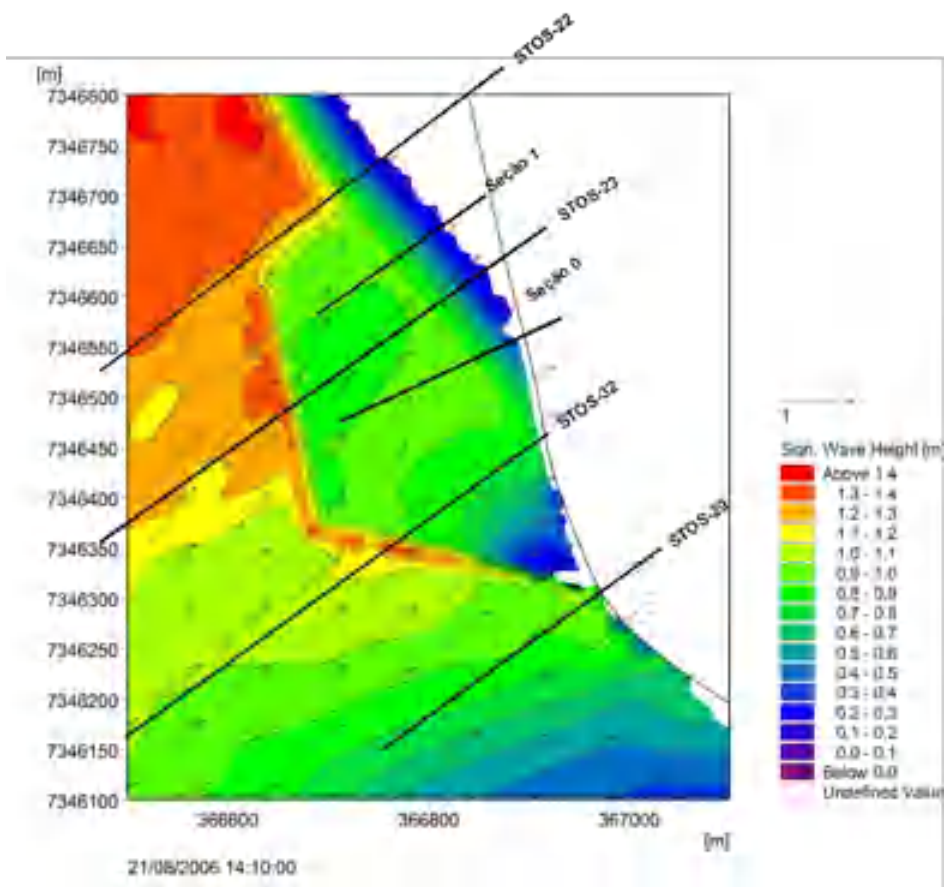


Figura 129. Recorte SW: Cenário 1 para o instante de meia maré enchente.

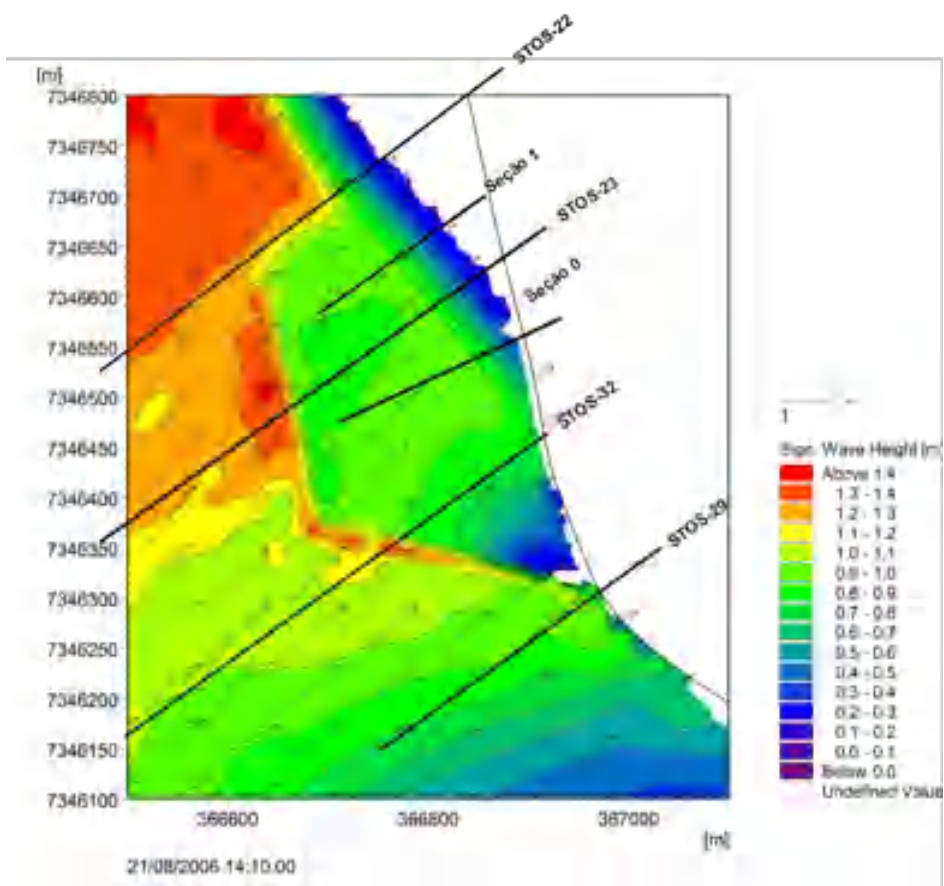


Figura 130. Recorte SW: Cenário 2 para o instante de meia maré enchente.

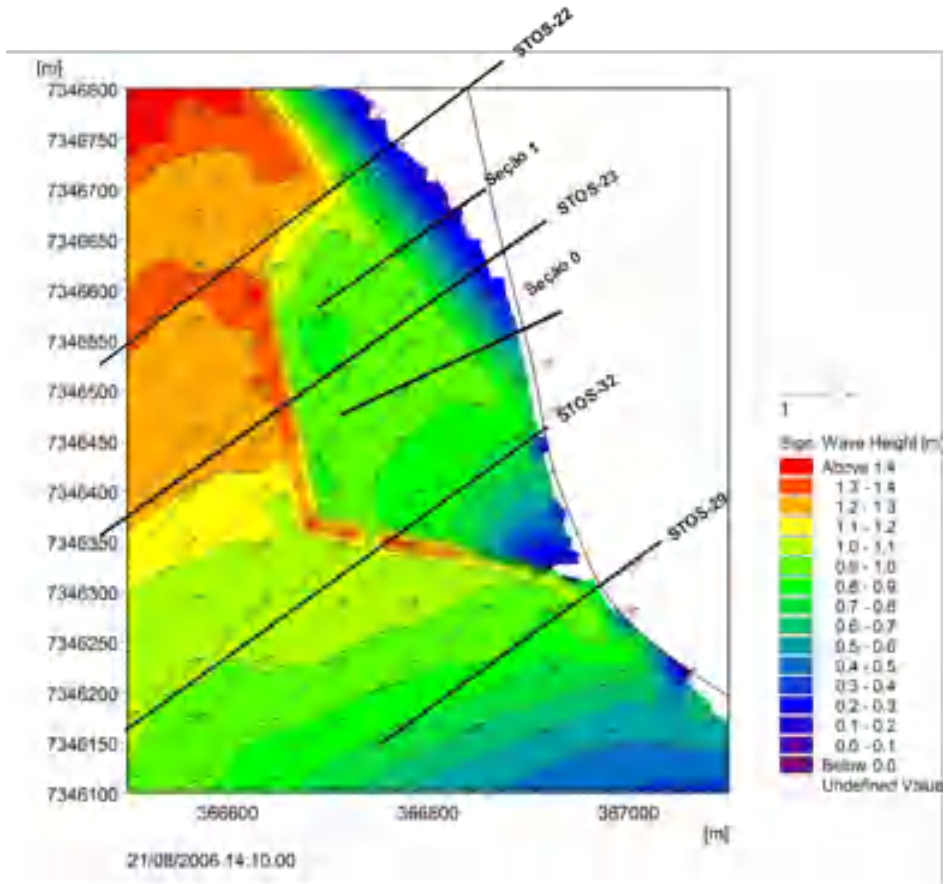


Figura 131. Recorte SW: Cenário 3 para o instante de meia maré enchente.

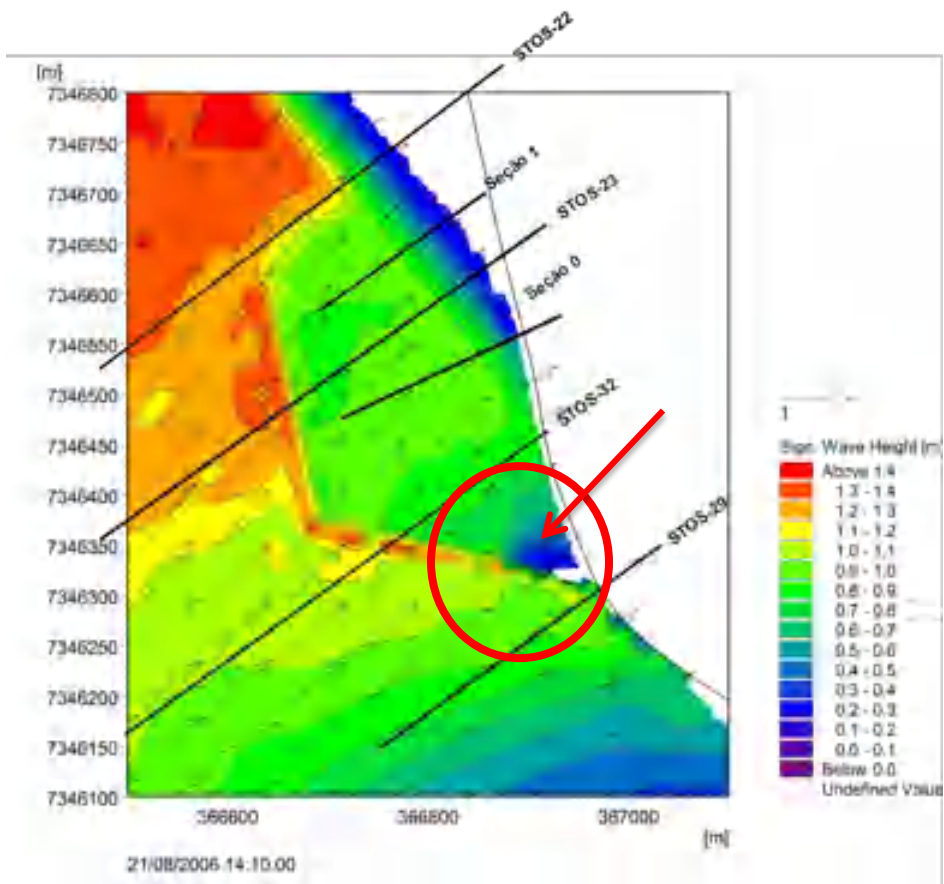


Figura 132. Recorte SW: Cenário 4 para o instante de meia maré enchente.

Ao comparar o comportamento das ondas no cenário 1 (Figura 129) com o comportamento das ondas no novo cenário-base (Figura 128), percebe-se que houve um aumento de entrada de ondas como resposta à primeira brecha (localizada na seção STOS-32). Já no cenário 2 (Figura 130), no qual houve uma acomodação da batimetria à presença da brecha, observa-se que ondas maiores estão ainda mais espalhadas na região abrigada pelo projeto-piloto, ou seja, a brecha fez com que a obra perdesse parte da eficácia na dissipação de energia das ondas.

A análise do cenário 3 (Figura 131), por sua vez, além de reiterar as conclusões já obtidas, também mostra que o modelo está respondendo às mudanças batimétricas, conforme pode ser observado na região do Canal 6 (acima da seção STOS-22).

Por fim, a análise do cenário 4 (Figura 132), que conta com a inserção de uma segunda brecha representando o geotubo desaparecido, permite conclusões complementares a respeito dessa condição específica de dados que podem ser enumeradas da seguinte forma:

- A presença da segunda brecha resultou numa diminuição na área de influência da zona de sombra do segmento transversal da obra. Tal interferência levou à mesma observação, realizada em campo pela equipe durante os levantamentos de outubro de 2021 e fevereiro de 2022 (que estão em fase de processamento). Isto é, essa região não possui mais a capacidade prévia de acumular sedimentos;
- A área de influência da zona de sombra do segmento transversal do projeto-piloto está limitada, agora, apenas ao enraizamento da obra, ou seja, ao trecho emerso, conforme pode ser visto no círculo vermelho da Figura 132;
- Há uma mudança na direção da onda na região da segunda brecha, deixando-a praticamente paralela à obra (indicada pela seta vermelha na Figura 132).

As conclusões obtidas a partir das análises dos instantes de meia hora antes da preamar e meia maré vazante foram bastante similares às elaboradas anteriormente. Dessa forma, optou-se por omitir as figuras desses instantes e por apresentar as figuras do instante seguinte. Assim, nas figuras de 133 a 137 são apresentadas as saídas do módulo de ondas SW, na vista centralizada, para os cinco cenários no instante de uma hora antes da baixa-mar.

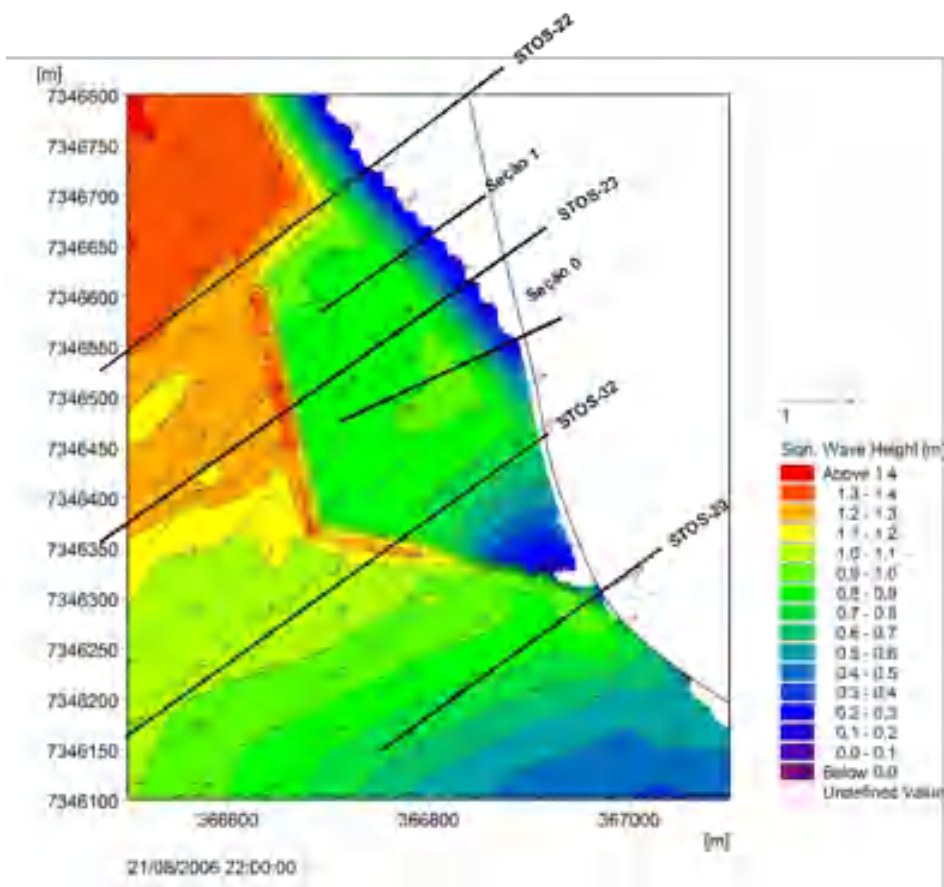


Figura 133. Recorte SW: Novo cenário-base para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

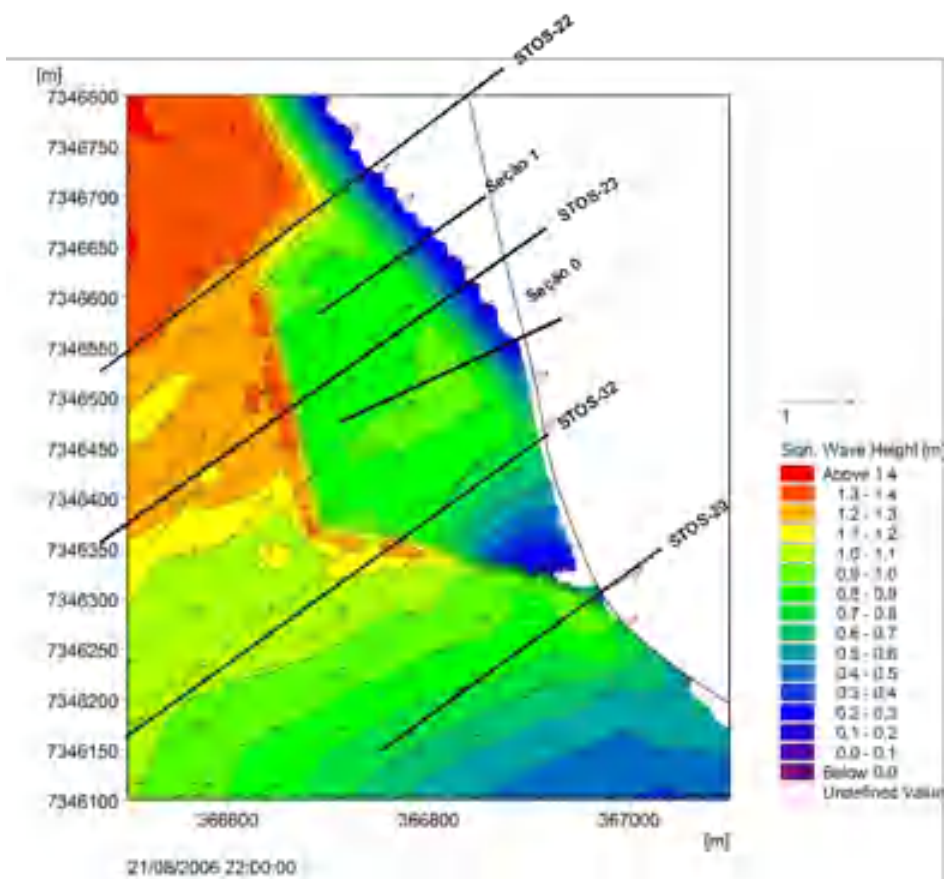


Figura 134. Recorte SW: Cenário 1 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

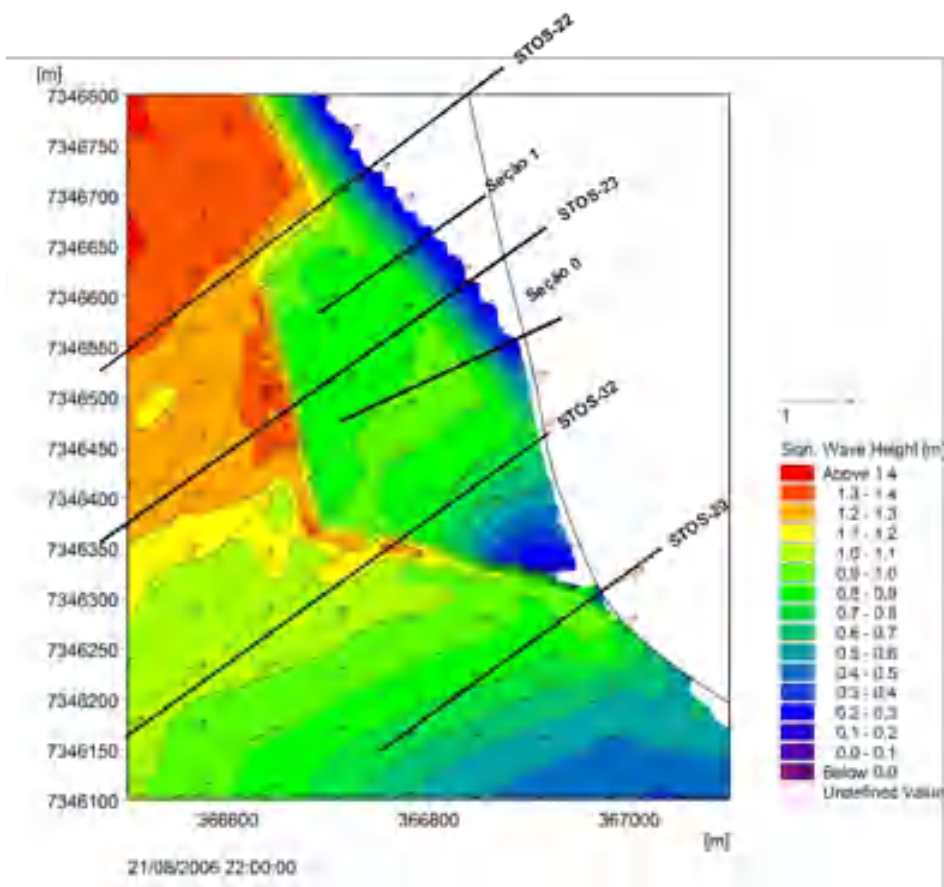


Figura 135. Recorte SW: Cenário 2 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

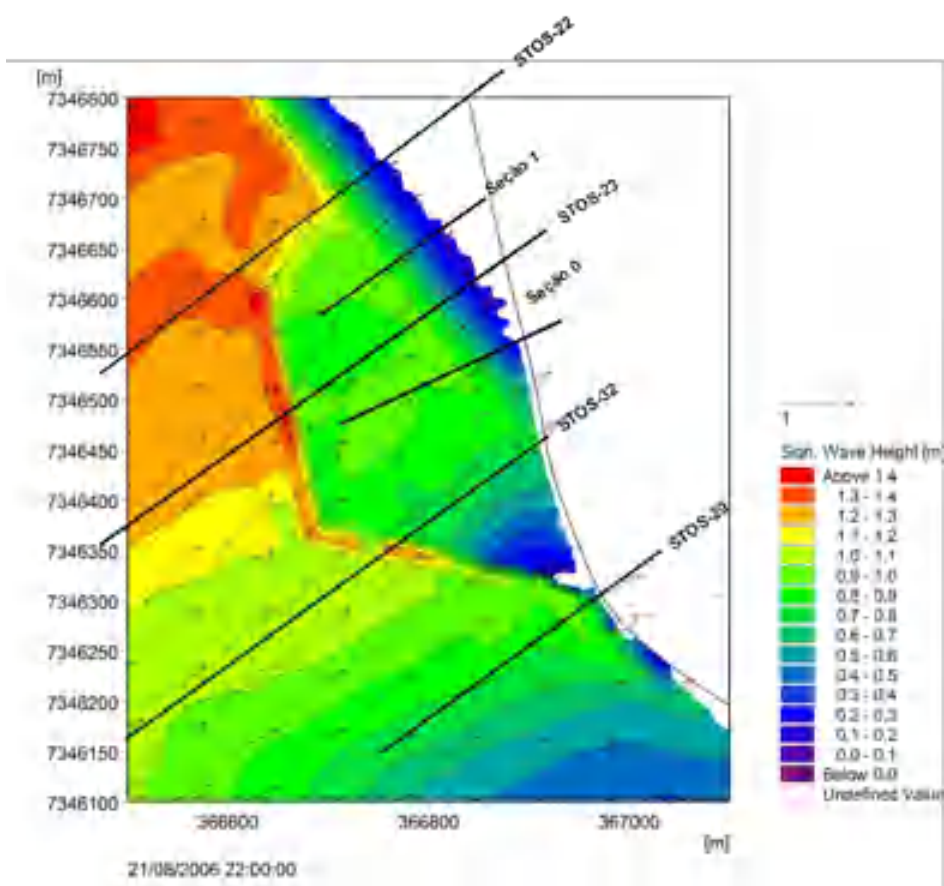


Figura 136. Recorte SW: Cenário 3 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

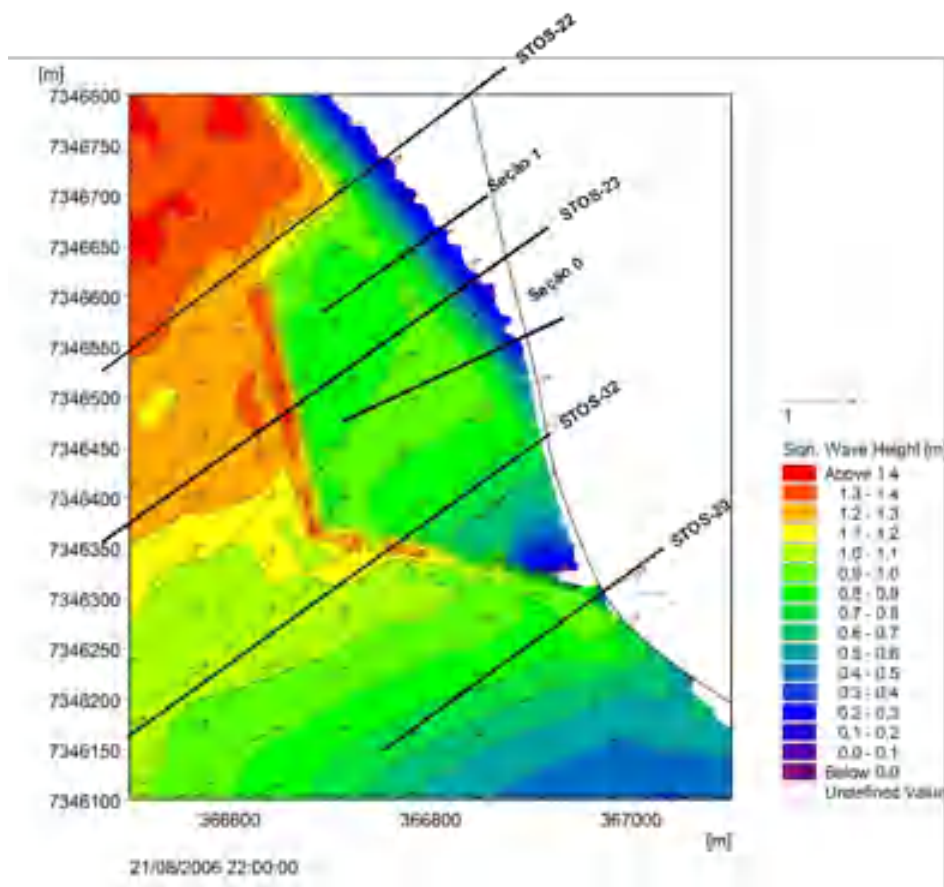


Figura 137. Recorte SW: Cenário 4 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

Ao analisar os cenários 1, 2 e 3 (Figuras 134, 135 e 136, respectivamente), foi possível observar as mesmas conclusões anteriores, isto é, a presença da primeira brecha facilitou a entrada de ondas maiores na área do projeto-piloto. Além disso, o modelo está respondendo às alterações de batimetria que simulam outra condição de perfil praial, ou seja, um perfil de mau tempo (mais erodido). Já a análise do cenário 4 (Figura 137) traz que a segunda brecha causou a diminuição da área de influência da zona de sombra do segmento transversal da obra em relação aos cenários anteriores.

Para o desenvolvimento de um raciocínio ainda mais completo, combinaram-se as análises, para o cenário 4, do comportamento das correntes e do comportamento das alturas de ondas. Ademais, na Figura 138 é apresentada a subtração de velocidades de corrente entre o cenário 4 e o cenário 2 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

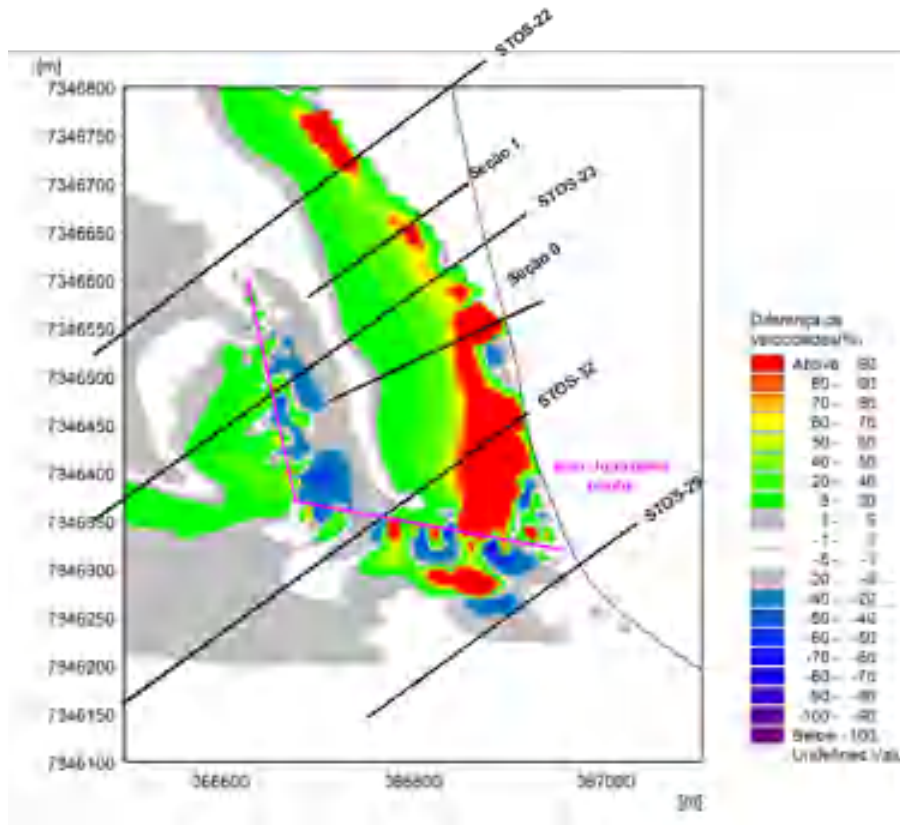


Figura 138. Diferenças percentuais de velocidade de corrente entre o cenário 4 e o cenário 2 para o instante de uma hora antes da baixa-mar.

Em vista disso, ao analisar as diferenças percentuais de velocidades de corrente entre os cenários 4 e 2 (Figura 138) observa-se que as correntes estão 90% mais rápidas e que seu caminho preferencial de escoamento se estabeleceu na região da praia onde mais acumulava sedimentos (área vermelha alongada da figura). No entanto, conforme apresentado na Figura 116, as variações batimétricas entre a seção STOS-32 e o Canal 6 foram relativamente pequenas, ou seja, o abatimento vertical foi de, em média, 20 cm dos perfis de praia do cenário 2 para o cenário 4.

Atentando-se ao comportamento das correntes na segunda brecha (cenário 4), têm-se velocidades com valores superiores a 0,275 m/s para o instante de meia maré enchente (Figura 105), e velocidades entre 0,075 e 0,100 m/s para o instante de uma hora antes da baixa-mar (Figura 121). Já o comportamento das correntes em relação apenas à primeira brecha (cenário 2), apresenta velocidades de corrente com valores superiores a 0,275 m/s para o instante de meia maré enchente (Figura 103), e velocidades entre 0,050 e 0,075 m/s para o instante de uma hora antes da baixa-mar (Figura 119).

Por outro lado, a curva de Sundborg-Hjulström (Figura 139) traz que a velocidade crítica para deposição (considerando um  $d_{50} = 0,11$  mm, valor para a área de estudo, conforme



descrito no item 4.1) é de  $v_d = 0,008$  m/s, enquanto que a velocidade crítica para erosão é de  $v_e = 0,2$  m/s.

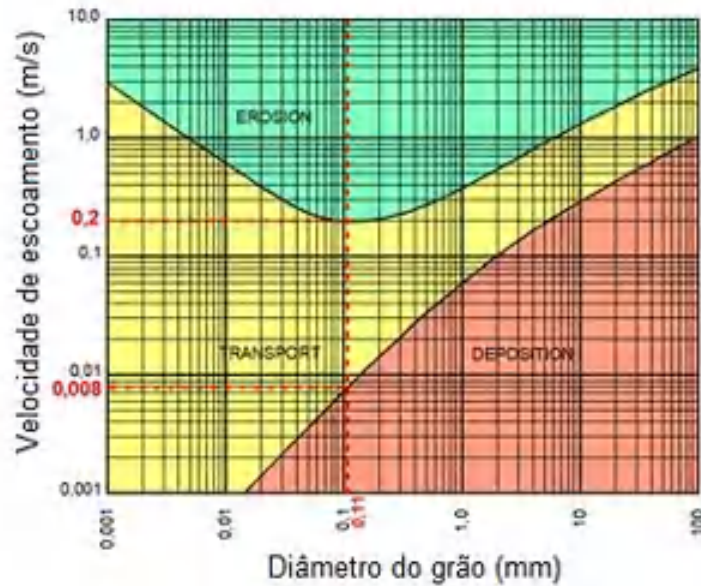


Figura 139. Curva de Sundborg-Hjulström com valores de velocidade crítica para deposição e erosão de acordo com o diâmetro do grão. Fonte: Adaptado de Gireli et al., 2018.

Ao combinar as análises e todas as informações apresentadas anteriormente, observa-se que correntes com velocidades superiores a 0,008 m/s são capazes de movimentar os sedimentos, condição que ocorre para os cenários 2 e 4 no instante de uma hora antes da baixa-mar (Figura 119 e Figura 121). Já correntes com velocidades superiores a 0,2 m/s resultam em erosão, condição que pode ser observada para os cenários 2 e 4 no instante de meia maré enchente (Figura 103 e Figura 105). Além disso, a batimetria externa ao trecho transversal do projeto-piloto é praticamente a mesma para os cenários 2 e 4, e ambos os cenários contam com a presença da primeira brecha (Figura 116). Dessa forma, ao analisar a diferença percentual de velocidades entre os cenários 2 e 4 (Figura 138), a influência da segunda brecha é notada de modo praticamente isolado.

Entretanto, ao avaliar separadamente o comportamento das correntes nos cenários 2 e 4, tanto para o instante de meia maré enchente quanto para o instante de uma hora antes da baixa-mar, verifica-se que as áreas de influência das correntes nas adjacências das aberturas aumentaram do cenário 2 para o cenário 4. Isto é, as correntes que atuam nas brechas além de estarem mais rápidas, também atuam numa área maior, conforme ilustra a Figura 140.

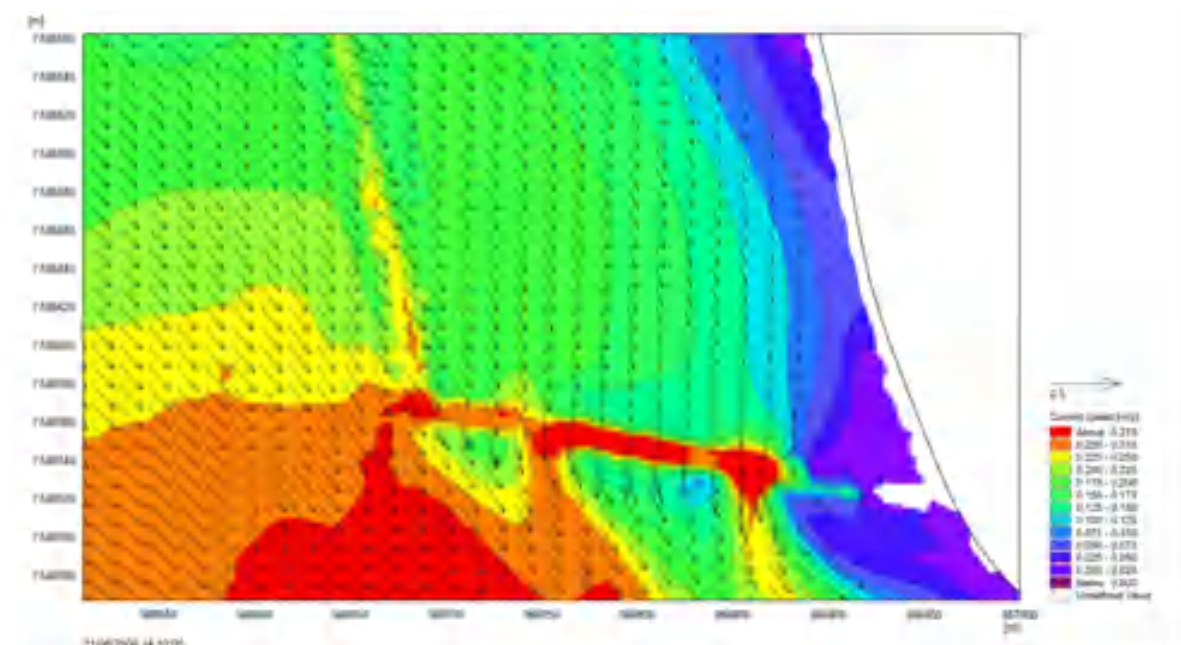


Figura 140. FM-HD: Detalhe das brechas no cenário 4 para o instante de meia maré enchente.

Logo, infere-se que a incidência de ondas maiores causa a suspensão dos sedimentos. Isto, somado às maiores velocidades de corrente, faz com que os sedimentos sejam carreados, através das aberturas, em direção ao canal do porto, resultando em erosão, conforme corroborado pelas observações realizadas pela equipe, em campo, durante as campanhas de outubro de 2021 e fevereiro de 2022 (ainda em fase de processamento). Ademais, reforça-se a observação de que o impacto da segunda brecha é muito maior que o da primeira.

A combinação das análises conduzidas até aqui reforça o fato de que o modelo está consistente, de forma que a nova malha gerada é capaz não só de enxergar os detalhes das obras (como as brechas), mas também de reproduzir e responder às sensíveis variações de batimetrias entre os cenários. Ademais, pode-se que o modelo bidimensional (2D) foi suficiente para a condução do presente estudo, uma vez que reproduziu efeitos de campo próximo na região do projeto-piloto. Isto é, a aceleração de fluxo que ocorre em cima da estrutura (vetores maiores podem ser vistos na Figura 140) foi reproduzida devido à redução da lâmina d'água, um comportamento hidráulicamente esperado.

Além disso, ao resgatar as análises das saídas obtidas pelo FM-HD e pelo SW em resposta à implantação de quebra-mares com pequenos vãos entre os segmentos (Opção 1), em uma região onde a corrente atua de forma paralela às estruturas, concebem-se algumas análises complementares:

- O modelo hidrodinâmico FM-HD traz poucas contribuições a respeito do tamanho da abertura e dimensionamento da obra, uma vez que há pouco impacto no comportamento das correntes (Figura 85 e Figura 88);
- O modelo de ondas SW mostra que pequenas aberturas não são vistas, o que impacta diretamente no comportamento das ondas (Figura 91 e Figura 94). Ou seja, a estrutura atua como se fosse praticamente contínua, trazendo considerações relevantes a respeito dos parâmetros de projeto.

Em contrapartida, em uma região de alta complexidade hidrodinâmica, como a Ponta da Praia, nota-se que as respostas obtidas pelo modelo hidrodinâmico FM-HD foram mais relevantes e trouxeram mais contribuições para a discussão do que o modelo de ondas SW. Isto é, mesmo com aberturas menores (20 m) do que as adotadas na obra da Opção 1 (50 m, Figura 58), o modelo FM-HD se mostrou muito mais sensível às mudanças batimétricas do que o modelo SW, sendo capaz de reproduzir o comportamento das correntes em resposta às evoluções de fundo.

Por fim, essas observações validam o projeto de quebra-mar submerso desenvolvido por Garcia e Gireli (2019), dito projeto-piloto, que conta com um segmento transversal que é essencial para diminuir a interferência das correntes e complementar a atuação do segmento longitudinal. Dessa forma, tem-se uma geometria inovadora em relação às estruturas submersas propostas e apresentadas pela literatura.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos de obras costeiras submersas, presentes na literatura, não apresentam um padrão convergente de análises em relação aos seus impactos nas áreas estudadas, como a resposta da linha de costa, por exemplo. Dessa forma, o desenvolvimento de modelos computacionais para a reprodução desse tipo de estrutura é dificultado, afinal não há uma literatura consolidada com parâmetros e metodologia adequada. Tal dificuldade se reflete não só na composição do grupo de dados a ser utilizado como também na escolha do modelo a ser adotado e seu nível de detalhamento. A isso se soma o fato de que o Brasil, a despeito de sua extensa linha de costa, tem uma grande carência no registro sistematizado dos dados de onda, entre outras informações.

Regiões com atuação de estuários, como é o caso de Santos, contam com uma hidrodinâmica ainda mais complexa, o que impossibilita uma análise isolada dos diversos fenômenos e fatores que ocorrem simultaneamente. Ademais, a presença de um complexo portuário faz com que a prioridade dos estudos seja a otimização do funcionamento do porto, e não de suas áreas adjacentes, como as praias.

No entanto, em abril do ano de 2018 foi finalizada a implantação de uma obra que visava a recuperação e proteção da região da Ponta da Praia, dito projeto-piloto. O monitoramento contínuo dessa obra, por meio de levantamentos de campo, trouxe uma grande quantidade de dados batimétricos que possibilitaram melhor configuração do modelo hidrodinâmico bidimensional e do modelo espectral de ondas. O monitoramento possibilitou também melhor entendimento dos processos que atuam na região, assim como sua hidrodinâmica.

Sendo assim, o aprimoramento dos modelos numéricos adotados se deu, conseqüentemente, por meio da aplicação dos dados batimétricos coletados *in loco*. Tais dados, por sua vez, foram utilizados no refinamento da malha do domínio do estudo. A partir disso, os modelos se tornaram capazes não só de reproduzir os comportamentos verdadeiros de correntes e ondas, ficando condizentes com a realidade vista e medida em campo, como também de perceber, com mais detalhes, a área de interesse simulada.

O uso de malhas de alta definição, apesar de exigir um gasto computacional ligeiramente maior, tornou os modelos mais sensíveis a variações batimétricas localizadas e eventuais implantações de novas obras. Malhas mais discretizadas permitiram análises de resposta a quebra-mares submersos de diferentes tamanhos, tanto do ponto de vista da circulação das correntes quanto do ponto de vista da variação das alturas significativas de

onda. Além disso, o uso combinado de dados de campo e modelos computacionais viabilizou o estudo da inserção de novas obras submersas e também permitiu a avaliação de outros parâmetros, como vãos entre segmentos, aberturas e possíveis falhas na estrutura.

A associação entre o modelo hidrodinâmico bidimensional, o modelo espectral de ondas e os dados batimétricos provenientes de monitoramento se mostrou uma ferramenta capaz de reproduzir premissas variadas, por meio do uso de cenários com características pré-estabelecidas. Foi possível traçar análises em regiões com domínio de ação das ondas e menores velocidades de corrente, como o trecho entre o Canal 5 e o Canal 6, assim como investigar os impactos das brechas identificadas no projeto-piloto, local sob influência da embocadura estuarina.

O modelo de ondas SW se mostrou tão sensível ao refinamento da malha batimétrica que apresentou interferências no comportamento das ondas, até mesmo em condições nas quais não havia a inserção de novas obras (1ª condição). Portanto, o SW respondeu a áreas mais discretizadas como se fossem um obstáculo, embora tais regiões estivessem apenas com a malha mais detalhada e sem obras. Dessa forma, sugere-se discretizar a malha apenas se houver a colocação de obras; caso contrário, a melhor estratégia é manter um detalhamento uniforme ao longo de toda a área de interesse. Ademais, o modelo foi capaz de reproduzir a mudança de direção de onda que ocorre devido à abertura ocasionada pela segunda brecha no projeto-piloto (cenário 4) conforme observado durante os levantamentos de campo.

O modelo hidrodinâmico FM-HD, por sua vez, apresentou-se sensível a variações batimétricas em regiões rasas e a pequenas aberturas na estrutura do projeto-piloto, reproduzindo, de forma bastante fidedigna, o comportamento das correntes e sua área de atuação. Com base nessas respostas, foi possível analisar o impacto que as falhas localizadas no segmento transversal da estrutura podem acarretar à integridade da obra e à capacidade de acúmulo de sedimentos nessa região. Observou-se que a segunda brecha foi responsável por estabelecer um caminho preferencial de circulação das correntes na região das praias, acelerando a saída de sedimentos da área abrigada pelo projeto-piloto (cenário 4), uma vez que eles são carregados pelas correntes de recirculação que atuam no local.

Considerando as análises obtidas pela associação das saídas dos dois modelos, observa-se que a ferramenta aqui desenvolvida poderá ser útil para a previsão e prognóstico de outros possíveis cenários, como: i) falhas na estrutura; ii) evolução das falhas ao longo do tempo caso não sejam corrigidas; iii) comportamento de ondas e correntes a outras

intervenções associadas à estrutura submersa, como a alimentação artificial de praia; entre outros.

A análise combinada das saídas do FM-HD com as saídas do SW permitiu, portanto, conclusões mais completas a respeito de parâmetros de projeto de quebra-mares submersos, como o tamanho dos vãos entre segmentos da obra. Tais análises se diferenciam das encontradas na literatura, uma vez que os estudos de obras costeiras geralmente analisam apenas os impactos da incidência de ondas e do transporte de sedimentos, não avaliando possíveis influências resultantes da atuação de correntes. Ademais, não foram localizados na literatura estudos que considerem a atuação simultânea de ondas e correntes de maré em ambientes costeiros de hidrodinâmica complexa para esse tipo de obra (quebra-mares submersos). Os trabalhos que envolvem área estuarina, de modo geral, enfocam apenas o estuário, e não suas adjacências.

Por fim, a ferramenta desenvolvida neste trabalho (uso combinado de dados de campo com modelos computacionais) se mostrou capaz de reproduzir os efeitos gerados pelas modificações localizadas de batimetria em regiões da alta complexidade hidrodinâmica. Tais efeitos, refletidos no comportamento das ondas e correntes, poderão dar diretrizes para a elaboração de novas soluções de proteção costeira ou soluções complementares, uma vez que o presente modelo exige menor diversidade de tipo de dados e menor gasto computacional se comparado a modelos morfodinâmicos ou modelos completos de onda.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 13.133*: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E.; BERNARDINO, J. C. M.; SILVA, G. da. Alternative study for the nautical and shore protection structures in the estuary of Santos, Brazil. *TransNav*, Gdynia, v. 12, n. 2, p. 375-380, June 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.12716/1001.12.02.19>. Acesso em: 19 out. 2020.

ALVAREZ, E.; RUBIO, R.; RICALDE, H. Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico. *Geotextiles and Geomembranes*, Amsterdam, v. 25, n. 4-5, p. 233-241, Aug.-Oct. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.02.005>. Acesso em: 05 out. 2020.

ALVAREZ, F.; PAN, S.; COELHO, C.; BAPTISTA, P. Modeling shoreline changes in Northwest Portugal using a process-based numerical model: COAST2D. *Journal of Waterway, Port., Coastal, and Ocean Engineering*, Reston, v. 146, n. 4, 2020.

ANTUNES DO CARMO, J.; NEVES, M. G.; VOORDE, M. ten. Designing a multifunctional artificial reef: studies on the influence of parameters with most influence in the vertical plane. *Journal of Coastal Conservation*, Leiden, v. 15, n. 1, p. 99-112, Mar. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11852-010-0124-1>. Acesso em: 17 mar. 2020.

ANTUNES DO CARMO, J.; SCHRECK, C.; FREITAS, H. Novos conceitos de proteção e valorização da zona costeira. In: SEMINÁRIO PORTUGUÊS SOBRE GEOSSINTÉTICOS, 3., 2009, Coimbra. *Anais [...]*. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2009.

ARNOUIL, D. *Shoreline Response for a Reef Ball™ Submerged Breakwater System Offshore of Grand Cayman Island*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Costeira) – Florida Institute of Technology, Melbourne, 2008. Disponível em: <https://www.reefinnovations.com/wp-content/uploads/2015/05/Arnouil-D.-2006-Shoreline->

Response-for-a-Reef-Ball-TM-Submerged-Breakwater-System.pdf. Acesso em: 20 abr. 2020.

BAPTISTELLI, S. C. *Análise crítica da utilização de modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves no litoral da Baixada Santista (Estado de São Paulo)*. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BRASIL. Comissão Interministerial para Recursos do Mar. Grupo de Integração do Gerenciamento Costeiro. *Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira*. Brasília: CIRM/GI-GERCO, 2018. Disponível em: [https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Final\\_Guia-de-Diretrizes\\_09112018.pdf](https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Final_Guia-de-Diretrizes_09112018.pdf). Acesso em: 06 ago. 2020.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis. *Campanha de medições na Baía de Santos*. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias, 1974.

BRUUN, P. *Coast erosion and the development of beach profiles*. Washington: US Army Corps of Engineers, 1954. (Technical Memorandum n. 44).

CHADWICK, A.; MORFETT, J.; BORTHWICK, M. *Hydraulics in civil and environmental engineering*. 4. ed. Nova York: Spon, 2004.

CHADWICK, A.; MORFETT, J.; BORTHWICK, M. *Hidráulica para engenharia civil e ambiental*. Tradução Tibério Júlio Couto Novais. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

CHARLIER, R. H.; CHAINEUX, M. C. P.; MORCOS, S. Panorama of the History of Coastal Protection. *Journal of Coastal Research*, Lawrence, v. 2005, n. 201, p. 79-111, Jan. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.2112/03561.1>. Acesso em: 20 abr. 2020.

CHAU, K. W. *Modelling for Coastal Hydraulics and Engineering*. Londres: Taylor and Francis, 2010.



CODESP. Companhia de Docas do Estado de São Paulo. *Análise do movimento físico do Porto de Santos*: dezembro 2017. Santos: DIREM/SUPPO/GETAE, jan. 2018. Disponível em: [http://intranet.portodesantos.com.br/docs\\_codesp/doc\\_codesp\\_pdf\\_site.asp?id=123331](http://intranet.portodesantos.com.br/docs_codesp/doc_codesp_pdf_site.asp?id=123331). Acesso em: 30 jul. 2019.

COOKE, B. C.; JONES, A. R.; GOODWIN, I. D.; BISHOP, M. J. Nourishment practices on Australian sandy beaches: A review. *Journal of Environmental Management*, Amsterdam, v. 113, p. 319-327, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.09.025>. Acesso em: 20 out. 2020.

COOPER, J. A. G.; MCKENNA, J. Working with natural processes: the challenge for coastal protection strategies. *The Geographical Journal*, London, v. 174, n. 4, p. 315-331, Dec. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2008.00302.x>. Acesso em: 17 mar. 2020.

CORRÊA, T. B.; COSTA, J. H. O.; GIRELI, T. Z.; GARCIA, P. D. Evaluation of proposed jetties for Port of Santos navigation channel depth maintenance. *In: PIANC WORLD CONGRESS, 34., 2018, Panama City. Proceedings [...]. Panama City: PIANC, 2018.* Disponível em: [https://coms.events/pianc-panama/data/abstracts/en/abstract\\_0300.html](https://coms.events/pianc-panama/data/abstracts/en/abstract_0300.html). Acesso em: 30 jul. 2019.

CORRÊA, T. B.; SOUZA, C. M. M. A. de; GIRELI, T. Z. The Influence of Tidal Prism on Port of Santos Dredging. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES (PIANC COPEDEC), 9., 2016, Rio de Janeiro. Proceedings [...]. Rio de Janeiro: ANTAQ/PIANC, 2016.*

DHI. Danish Hydraulic Institute. *Mike 21 Flow Model FM – Hydrodynamic Module User Guide*. Hørsholm: Software Support Center, 2016a.

DHI. Danish Hydraulic Institute. *Mike 21 SW – Spectral Wave FM Module User Guide*. Hørsholm: Software Support Center, 2016b.

- DHI. Danish Hydraulic Institute. *Mike 21/3*. Hørsholm, [2017a?]. Disponível em: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-3>. Acesso em: 15 abr. 2022.
- DHI. Danish Hydraulic Institute. *Mike 21 Wave Modelling: Mike 21 Boussinesq Wave Module: Short Description*. Hørsholm: DHI, 2017b. Disponível em: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/waves/boussinesq-waves>. Acesso em: 3 fev. 2021.
- DHI. Danish Hydraulic Institute. *Mike 21 Wave Modelling: Mike 21 Spectral Waves FM: Short Description*. Hørsholm: DHI, 2017c. Disponível em: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/waves/spectral-waves>. Acesso em: 3 fev. 2021.
- DEAN, R. G. *Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts*. Newark: University of Delaware, 1977. (Ocean Engineering Report n. 12).
- DELTARES. *Delf3D Suite (structured)*. Delft, [2018?]. Disponível em: <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-4-suite/>. Acesso em: 4 maio 2022.
- EIDAM, E. F.; SUTHERLAND, D. A.; RALSTON, D. K.; DYE, B.; CONROY, T.; SCHMITT, J.; RUGGIERO, P.; WOOD, J. Impacts of 150 years of shoreline and bathymetric change in the Coos Estuary, Oregon, USA. *Estuaries and Coasts*, Seattle, Mar. 2020. Special Issue: Shallow Water Mapping.
- FCTH. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. *Estudo e pesquisa de obras para a otimização morfológica, náutica e logística do canal de acesso do Porto de Santos*. Relatório Técnico n. 1 RT 01-1157-16. São Paulo: Codesp/FCTH, 2017.
- FECFAU. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. *Monitoramento do projeto-piloto – Santos (SP): Relatório parcial n. 8*. Campinas: FECFAU, 2021.

- FRANCO, L. History of coastal engineering in Italy. In: KRAUS, N. (org.). *History and Heritage of Coastal Engineering*. Nova York: American Society of Civil Engineers, 1996. p. 275-335.
- FROSTICK, L. E.; MCLELLAND, S. J.; MERCER, T.G. (org.). *Users guide to physical modelling and experimentation: experience of the HYDRALAB network*. Boca Raton: CRC, 2011.
- FUNDESPA. Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas. *Anexo 3 RDC – 120612: Análise Histórica dos Registros de Ressacas ocorridos na região da Baía e Estuário de Santos* (jul. 2013). Santos: Codesp/Fundespa, 2013a.
- FUNDESPA. Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas. *Plano Básico Ambiental da Dragagem de Aprofundamento do Porto de Santos*. Relatório Técnico Semestral RTS 140611 (jul.-nov. 2010). Santos: Codesp/Fundespa, 2011.
- FUNDESPA. Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas. *Plano Básico Ambiental da Dragagem de Aprofundamento do Porto de Santos*. Relatório do Monitoramento dos Sedimentos da Superfície de Fundo e Caracterização do Transporte Sedimentar Residual no Setor Nordeste da Baía de Santos (amostragem 2013). Santos: Codesp/Fundespa, 2014.
- FUNDESPA. Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas. *Programa de Monitoramento do Perfil Praial*. Parecer técnico. Santos: Codesp/Fundespa, jan.-maio 2010.
- FUNDESPA. Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas. *Programa de Monitoramento do Perfil Praial*. Parecer técnico. Santos: Codesp/Fundespa, jul.-dez. 2013b.
- GARCIA, P. D.; GIRELI, T. Z. Um projeto piloto de recuperação de uma praia utilizando um quebra-mar submerso – Ponta da Praia, Santos, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, Lisboa, v. 19, n. 1, p. 43-57, mar. 2019.
- GARCIA, P. D.; GIRELI, T. Z.; VENANCIO, K. K. Projeto piloto para monitoramento e contenção da erosão da Ponta da Praia – Santos (SP). In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 28., 2018, Buenos Aires. *Anais [...]*. Buenos

Aires: IARH/AIIH, 2018. p. 2487-2497. Disponível em:

[https://www.ina.gob.ar/congreso\\_hidraulica/Congreso\\_libro/TC\\_TEMA\\_4.pdf](https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/Congreso_libro/TC_TEMA_4.pdf). Acesso em: 29 out. 2020.

GARCIA, P. D.; ARAÚJO, R. N.; SILVA, G. D. C.; BAPTISTELLI, S. C.; ALFREDINI, P. Preparo de bases batimétricas, de agitação e circulação para o litoral do estado de São Paulo. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP BT/PMI*, São Paulo, v. 1, n. 105, p. 1-56, 2002.

GARCIA, P. D.; VENANCIO, K. K.; GUNNEWIEK, A. F. K.; GIRELI, T. Z. Monitoring of a pilot project for the recovery and protection of Ponta da Praia – Santos – Brazil. 2022. No prelo.

GIRELI, T. Z.; GARCIA, P. D.; PEREIRA, A. H. D. G. Avaliação da eficiência de molhes guia-corrente curvos na Baía de Santos, São Paulo: modelagem física. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Goiânia, v. 23, n. 6, p. 1185-1198, nov./dez. 2018.

GIRELI, T. Z.; SOUZA, C. M. M. A. de; NOBRE, L. B.; GARCIA, P. D. The efficiency of curved jetties in Bay of Santos – SP: numerical modeling. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 22, n. 5, p. 1-17, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716092>. Acesso em: 28 jun. 2017.

GUNNEWIEK, A. F. K.; GARCIA, P. D.; GIRELI, T. Z.; TRABANCO, J. L. A. Referenciais verticais baseados no nível médio da água do mar e seus impactos nas zonas costeiras brasileiras – estudo de caso: Santos, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, Lisboa, v. 21, p. 11-24, mar. 2021.

HALLERMEIER, R. J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, Amsterdam, v. 4, p. 253-277, 1981.

HALLERMEIER, R. J. Uses for a calculated limit depth to beach erosion. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 16., 1978, Hamburgo. *Proceedings [...]*. Nova York: American Society of Civil Engineers Press, 1978. p. 1493-1512.

HARARI, J.; CAMARGO, R. Numerical simulation of the tidal propagation in the coastal region of Santos (Brazil, 24 S 46 W). *Continental Shelf Research*, Amsterdam, v. 23, n. 16, p. 1597-1613, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(03\)00143-2](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(03)00143-2).

Acesso em: 6 ago. 2019.

HARARI, J.; CAMARGO, R., 1994. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através do modelo numérico hidrodinâmico. *Bol. Inst. Oceanogr.*, São Paulo, v. 42, n. 1-2, p. 35-54, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0373-55241994000100003>. Acesso em: 30 jul. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades: Histórico: Santos*. 2016. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/santos/historico>. Acesso em: 29 out. 2020.

IEPRO. Instituto de Estudos, Pesquisas e Projetos da Universidade Estadual do Ceará. *Dinâmica Costeira do Litoral de Fortaleza e os Impactos da Construção dos Aterros das Praias de Meirelles (Beira Mar) e Iracema sobre o Litoral de Caucaia*. Parecer técnico ambiental. Fortaleza: IEPRO/LAGIZC UECE, outubro de 2018.

IME. Instituto Militar de Engenharia. *Modelagem Hidrodinâmica do Porto de Santos*. Relatório Final. Rio de Janeiro: IME, jan. 2008. Disponível em: [http://licenciamento.ibama.gov.br/Dragagem/Dragagem%20-%20Porto%20de%20Santos/EIA\\_Dragagem\\_Porto\\_Santos2/Anexo%20C%20-%20Modelagem%20Matem%C3%A1tica/Modelagem%20Matem%C3%A1tica%20da%20Hidrodin%C3%A2mica.pdf](http://licenciamento.ibama.gov.br/Dragagem/Dragagem%20-%20Porto%20de%20Santos/EIA_Dragagem_Porto_Santos2/Anexo%20C%20-%20Modelagem%20Matem%C3%A1tica/Modelagem%20Matem%C3%A1tica%20da%20Hidrodin%C3%A2mica.pdf). Acesso em: 01 nov. 2017.

INPH. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. *Projeto geométrico da infraestrutura aquaviária ao Porto de Santos – SP*. Relatório n. 018/2007, anexo XI. Rio de Janeiro: INPH, 2007.

ITEP. Instituto de Tecnologia de Pernambuco. *Relatório de impacto ambiental (RIMA): Recuperação da Orla Marítima – Municípios de Jaboatão dos Guararapes, Recife, Olinda e Paulista (Pernambuco)*. Recife: Instituto de Tecnologia de Pernambuco, 2012. Disponível

em: [http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/rima\\_recuperacao\\_orla\\_maritima.pdf](http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/rima_recuperacao_orla_maritima.pdf). Acesso em: 20 abr. 2020.

JACKSON, L.; CORBETT, B. Review of Existing Multi-Functional Artificial Reefs. *In: AUSTRALASIAN CONFERENCE ON COASTS AND PORTS*, 18., 2007, Melbourne. *Proceedings* [...]. Melbourne: Engineers Australia, 2007.

JACKSON, L.; REICHELDT, R.; RESTALL, S.; CORBETT, B. Marine Ecosystem Enhancement on a Geotextile Coastal Protection Reef – Narrowneck Reef Case Study. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING*, 29., 2004, Lisboa. *Proceedings* [...]. Singapura: World Scientific, 2005. Disponível em: [https://doi.org/10.1142/9789812701916\\_0318](https://doi.org/10.1142/9789812701916_0318). Acesso em: 20 abr. 2020.

JACKSON, L.; TOMILINSON, R.; MCGRATH, J.; TURNER, I. L. Monitoring of a multifunctional submerged geotextile reef breakwater. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING*, 28., 2002, Cardiff. *Proceedings* [...]. Queensland: Griffith University, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1142/9789812791306\\_0162](https://doi.org/10.1142/9789812791306_0162). Acesso em: 17 mar. 2020.

KHANARMUEI, M.; SUARA, K.; SUMIHAR, J.; BROWN, R. J. Hydrodynamic modelling and model sensitivities to bed roughness and bathymetry offset in a micro-tidal estuary. *Journal of Hydroinformatics*, London, v. 22, n. 6, p. 1536-1553, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.102>. Acesso em: 7 abr. 2021.

KIM, K.-H.; SHIN, S.; WIDAYATI, A. Y. M. Mitigation Measures for Beach Erosion and Rip Current. *Journal of Coastal Research*, Lawrence, n. 65, p. 290- 295, Jan. 2013. Special Issue: International Coastal Symposium vol. 1. Disponível em: <https://doi.org/10.2112/SI65-050.1>. Acesso em: 06 ago. 2020.

KOMAR, Paul D. *Beach Processes and Sedimentation*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.

- KRAUS, N. C.; LARSON, M.; WISE, R. A. Depths of closure in beach fill design. *In*: NATIONAL CONFERENCE ON BEACH PRESERVATION TECHNOLOGY, 12., 1999, Saint Petersburg, Florida. *Proceedings* [...]. Tallahassee: Shore and Beach Preservation Association, 1999. p. 271-286.
- LIU, P. L.-F. Models equations for wave propagations from deep to shallow water. *In*: LIU, P. L.-F. (org.). *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. Ithaca: Cornell University, 1995. p. 125-157.
- LOPEZ, R. Beach restoration at Grand Velas Hotel, Riviera Maya, Mexico. *Journal of Coastal Research*, Lawrence, n. 71, p. 86-92, 2014. Special Issue: Coastal Erosion and Management along Developing Coasts.
- LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R.; BAART, F.; DONCHTYS, G.; AARNINKHOF, S. The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, London, n. 8, art. 6641, p. 1-11, 27 Apr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- MAIOLO, M.; MEL, R. A.; SINOPOLI, S. A simplified method for an evaluation of the effect of submerged breakwaters on wave damping: the case study of Calabaia Beach. *Journal of Marine Science and Engineering*, Cham, v. 8, n. 7, 2020.
- MANGOR, K.; DRØNEN, N. K.; KÆRGAARD, K. H.; KRISTENSEN, S. T. *Shoreline Management Guidelines*. 4. ed. Horsholm: DHI Water & Environment, 2017. Disponível em: [https://www.dhigroup.com/upload/campaigns/shoreline/assets/ShorelineManagementGuidelines\\_Feb2017-TOC.pdf](https://www.dhigroup.com/upload/campaigns/shoreline/assets/ShorelineManagementGuidelines_Feb2017-TOC.pdf). Acesso em: 24 maio 2017.
- MARMIL. Centro de Hidrografia da Marinha Brasileira. Carta n. 1701 – Detalhe de São Vicente. *In*: MARMIL. *Cartas Raster*. Niterói: CHM, 2015a. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>. Acesso em: 30 set. 2015.

- MARMIL. Centro de Hidrografia da Marinha Brasileira. Carta n. 1711 – Adjacências do Porto de Santos. In: MARMIL. *Cartas Raster*. Niterói: CHM, 2015b. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>. Acesso em: 30 set. 2015.
- MENTASCHI, L.; VOUSDOKAS, M.; PEKEL, J.-F.; VOUKOUVALAS, E.; FEYEN, L. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, London, n. 8, art. 12876, p. 1-11, 27 Aug. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- MUEHE, D. (org.). *Panorama da erosão costeira no Brasil*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2018.
- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. *Tides and Currents Glossary*. Silver Spring: Center for Operational Oceanographic Products and Services, [201-]. Disponível em: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/glossary.html#M>. Acesso em: 17 ago. 2020.
- OH, Y. I.; SHIN, E. C. Using submerged geotextile tubes in the protection of the E. Korean shore. *Coastal Engineering*, Amsterdam, v. 53, n. 11, p. 879-895, Nov. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.06.005>. Acesso em: 06 ago. 2020.
- OYEGBILE, B. O.; OYEGBILE, B. A. Applications of geosynthetic membranes in soil stabilization and coastal defence structures. *International Journal of Sustainable Built Environment*, Cham, v. 6, n. 2, p. 636-662, Dec. 2007.
- PILARCZYK, K. Design of low-crested (submerged) structures: an overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 6., 2003, Colombo, Sri Lanka. *Proceedings* [...]. Moratuwa: Lanka Hydraulic Institute, 2003.
- PLANT, N. G.; EDWARDS, K. C.; KAIHATU, J. M.; VEERAMONY, J.; HSU, L.; HOLLAND, K. T. The effect of bathymetric filtering on nearshore process model results.



*Coastal Engineering*, Amsterdam, v. 56, n. 4, p. 484-493, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.10.010>. Acesso em: 7 abr. 2021.

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 Organizado de Santos/SP. Disponível em: [http://licenciamento.ibama.gov.br/Dragagem/Dragagem%20-%20Porto%20de%20Santos/EIA\\_Dragagem\\_Porto\\_Santos1/](http://licenciamento.ibama.gov.br/Dragagem/Dragagem%20-%20Porto%20de%20Santos/EIA_Dragagem_Porto_Santos1/). Acesso em: 01 nov. 2017.

PRASETYA, G. Protection from coastal erosion: thematic paper: the role of coastal forests and trees in protecting against coastal erosion. *In: NUMERICAL MODELS FOR SUBMERGED BREAKWATERS REGIONAL TECHNICAL WORKSHOP, 14.*, 2007. *Proceedings* [...]. Khao Lak: Regional Office for Asia and the Pacific/Rap Publication, 2007.

RANASINGHE, R.; TURNER, I. L. Shoreline response to submerged structures: A review. *Coastal Engineering*, Amsterdam, v. 53, n. 1, p. 65-79, Jan. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.08.003>. Acesso em: 20 abr. 2020.

RANASINGHE, R.; TURNER, I. L.; SYMONDS, G. Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: a numerical and physical modelling study. *Coastal Engineering*, Amsterdam, v. 53, n. 7, p. 589-611, May 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.004>. Acesso em: 17 mar. 2020.

RANGEL-BUITRAGO, N. G; ANFUSO, G.; WILLIAMS, A. T. Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, Amsterdam, v. 114, p. 129-144, Sep. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024>. Acesso em: 20 abr. 2020.

REGUERO, B. G.; BECK, M.; AGOSTINI, V. N.; KRAMER, P.; HANCOCK, B. Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach and engineering case study in Grenada. *Journal of Environmental Management*, Amsterdam, v. 210, p. 146-161, 2018.

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J. Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. *Rev. Ambient. Água*, Taubaté, v. 11, n. 3, p. 566-585, 2016a. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1770>. Acesso em: 16 jun. 2022.

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J. Análise das Trajetórias das Águas Continentais Afluentes ao Sistema Estuarino de Santos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 242-250, 2016b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p242-250>. Acesso em: 01 nov. 2017.

SCHELTINGA, P. S. *Mudança no comportamento hidrodinâmico da região costeira com introdução de obras de proteção Santos – SP*. 2020. Relatório final (Projeto de Iniciação Científica PIBIC/Cnpq) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

SCHELTINGA, P. S. *Mudança no comportamento hidrodinâmico da região costeira com introdução de obras de proteção Santos – SP*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2021.

SHARIF AHMADIAN, Amir. *Numerical Models for Submerged Breakwaters*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

SONDOTÉCNICA ENGENHARIA DE SOLOS S.A. *Comportamento hidráulico e sedimentológico do Estuário Santista*. Relatório final e desenhos. São Paulo: Portobrás/INPH, 1977.

SOUZA, C. M. M. A. Comparação de modelos numéricos bidimensional e tridimensional para a avaliação de mudanças ambientais, aplicado à região costeira de Santos. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/322035>. Acesso em: 1 nov. 2021.

- SOUZA, C. R. G. A Erosão nas Praias do Estado São Paulo: Causas, Consequências, Indicadores de Monitoramento e Risco. *In*: BONONI, V. L. R.; SANTOS JUNIOR, N. A. dos. *Memórias do Conselho Científico da Secretaria do Meio Ambiente: A Síntese de um Ano de Conhecimento Acumulado*. São Paulo: SMA, 2009. p. 48-69.
- SOUZA, C. R. G.; SOUZA, A. P.; GARCIA ROSA, E. Avaliação histórica da ocorrência de ressacas na Baixada Santista. *In*: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 14., 2013. *Anais [...]*. Natal: Abequa, 2013.
- SOUZA, C. R. G.; SOUZA, A. P.; HARARI, J. Long Term Analysis of Meteorological-Oceanographic Extreme Events for the Baixada Santista Region. *In*: NUNES, L. H.; GRECO, R.; MARENGO, J. A. (org.). *Climate Change in Santos Brazil: Projections, Impacts and Adaptation Options*. Cham: Springer, 2019. p. 97-134.
- SOUZA, C. R. G.; SOUZA, A. P.; FERREIRA, R. S. Monitoramento praiial antes e durante as obras de dragagem do Porto de Santos, São Paulo (Brasil). *In*: CONGRESO IBERO AMERICANO DE GESTIÓN INTEGRADA DE ÁREAS LITORALES, 1., 2012, Cádiz. *Libro de comunicaciones y resúmenes (versión 1)*. Cádiz: Universidad de Cádiz. p. 802-812.
- SPA. Santos Port Authority. *Programa de monitoramento do perfil praiial, Porto de Santos, Município de Santos (SP)*. Relatório consolidado – jan.-dez 2020 (O20020-MOG-25-C). Santos: SPA, 2021.
- TESSLER, M. G.; CAZZOLI Y GOYA, C.; YOSHIKAWA, P. S.; HURTADO, S. N. São Paulo. *In*: MUEHE, D. (org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. 2. ed. Brasília, DF: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2006. p. 297-346. Disponível em:  
[http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_sigercom/\\_arquivos/sp\\_erosao.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_arquivos/sp_erosao.pdf). Acesso em: 24 out. 2017.
- TOGNATO, A. H. *Modelagem CFD da interação entre hidrodinâmica costeira e quebra-mar submerso: estudo de caso da Ponta da Praia em Santos, SP*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade

Estadual de Campinas, Campinas, 2020. Disponível em:  
<https://hdl.handle.net/20.500.12733/1638695>. Acesso em: 17 mar. 2022.

USACE. United States Army Corps of Engineers. *Galveston's Bulwark against the Sea: history of the Galveston seawall*. Galveston: USACE, 1981. Disponível em:  
<https://www.swg.usace.army.mil/Portals/26/docs/PAO/GalvestonBulwarkAgainsttheSea.pdf>  
. Acesso em: 05 ago. 2020.

VAN RIJN, L. C. Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, Amsterdam, v. 54, n. 12, p. 867-887, Dec. 2011.

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

VENANCIO, K. K.; GIRELI, T. Z.; GARCIA, P. D. Evolução da linha de costa na região da Ponta da Praia em Santos - SP. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 12., 2017, Florianópolis. *Anais [...]*. Florianópolis: ABRH, nov. 2017.

VENANCIO, K. K.; GARCIA, P. D.; GIRELI, T. Z.; CORRÊA, T. B. Hydrodynamic modeling with scenario approach in the evaluation of dredging impacts on coastal erosion in Santos (Brazil). *Ocean and Coastal Management*, Amsterdam, v. 195, 2020.

VENANCIO, K. K.; TRABANCO, J. L. A.; GARCIA, P. D.; GIRELI, T. Z.; GUNNEWIEK, A. F. K. Monografias de marco de apoio – Santos, São Paulo, Brasil. *Repositório de Dados de Pesquisa da Unicamp*, Campinas, 2022. Disponível em:  
<https://doi.org/10.25824/redu/PK7VEY>. Acesso em: 15 abr. 2022.

VIEIRA, B. F. V.; PINHO, J. L. S.; BARROS, J. A. O.; CARMO, J. S. A. Hydrodynamics and morphodynamics performance assessment of three coastal protection structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, Cham, v. 8, n. 3, 2020.

VOORDE, M.; ANTUNES DO CARMO, J. S.; NEVES, M. G. Designing a Preliminary Multifunctional Artificial Reef to Protect the Portuguese Coast. *Journal of Coastal Research*, Amsterdam, v. 25, n. 1, p. 69-79, Jan. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.2112/07-0827.1>. Acesso em: 17 mar. 2020.

VOUSDOUKAS, M.; RANASINGHE, R.; MENTASCHI, L.; PLOMARITIS, T. A.; ATHANASIOU, P.; LUJENDIJK, A.; FEYEN, L. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, London, v. 10, p. 260-263, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>. Acesso em: 20 abr. 2020.

WILLIAMS, A. T.; RANGEL-BUITRAGO, N.; PRANZINI, E.; ANFUSO, G. The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management*, Amsterdam, v. 156, p. 4-20, Apr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.03.022>. Acesso em: 17 mar. 2020.

WRIGHT, L. D.; SHORT, A. D. Morphodynamics of beaches and surf-zones in Australia. In: KOMAR, P. D. (org.). *Handbook of coastal processes and erosion*. Boca Raton: CRC Press, 1983. p. 35-64.