UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

Gabriela da Silva

**Modelação Computacional da Resposta Sedimentar e Hidrodinâmica com a
Implantação de Quebra-Mares Segmentados Emersos para Defesa do Litoral na
Ponta da Praia, Santos - SP**

São Paulo

2019

GABRIELA DA SILVA

**Modelação Computacional da Resposta Morfológica e Hidrodinâmica com a
Implantação de Quebra-Mares Segmentados Emersos para Defesa do Litoral para a
Ponta da Praia, Santos - SP**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica e
Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Paolo Alfredini

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Silva, Gabriela

Modelação Computacional da Resposta Morfológica e Hidrodinâmica com a Implantação de Quebra-Mares Segmentados para Defesa do Litoral para a Ponta da Praia, Santos - SP / G. Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
98 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1. Engenharia Ambiental 2. Hidrodinâmica Costeira 3. Erosão 4. Obras de Defesa do Litoral 5. Modelo Computacional I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II. t.

Nome: SILVA, Gabriela da

Título: Modelação Computacional da Resposta Morfológica e Hidrodinâmica com a Implantação de Quebra-Mares Segmentados Emersos para Defesa do Litoral para a Ponta da Praia, Santos - SP

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para Exame de Qualificação no Mestrado do Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Professor PhD Paolo Alfredini

Instituição:

Julgamento:

Professor PhD Eduardo Siegle

Instituição:

Julgamento:

Dr Reinaldo Antonio Ferreira de Lima

Instituição:

Julgamento:

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha família e amigos, que estiveram próximos e me deram suporte durante o desenvolvimento deste trabalho. Ao Professor Paolo Alfredini, por aceitar me orientar, pela paciência e conhecimentos a mim dedicados. Ao Professor Eduardo Siegle que acompanhou meu trabalho, auxiliou e fez parte da banca. Ao Almirante Reinaldo, pelas observações, correções, disposição e atenção dedicadas ao meu trabalho. Ao Professor José Carlos Bernardino, pelas correções, colaboração e conselhos. A toda equipe da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, que além de fornecerem os dados, foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, sempre auxiliando e me ensinando com paciência.

RESUMO

Devido ao processo de urbanização sem planejamento adequado, as cidades costeiras sofrem com as inundações e erosão das praias com a elevação do nível do mar e ação de ondas. Entre as estruturas mais utilizadas para proteção de praias destacam-se os quebra-mares segmentados. Para estudar e prever as respostas praias à presença destas estruturas, podem ser empregados modelos numéricos, capazes de calcular os processos complexos deste ambiente. Este trabalho teve como objetivo o estudo da resposta hidrodinâmica e sedimentar de uma praia com a implantação de quebra-mares segmentados. O modelo hidrodinâmico utilizado é o MIKE21FM acoplado ao modelo de ondas SW e sedimentos ST e SM. Primeiramente, foram impostas condições hidrodinâmicas simplificadas e diferentes arranjos de quebra-mares segmentados. As áreas erodidas e acrescidas após a implantação da obra foram comparadas e priorizou-se minimizar a área erodida. Em seguida, foram considerados os cenários de condições hidrodinâmicas variadas com uma das estruturas. Os resultados são apresentados em termos de altura significativa e potência de onda para 18 casos de condições hidrodinâmicas constantes, as quais foram feitas variar em nível e características da onda. Para a condição hidrodinâmica mais crítica, obteve-se uma redução de 0,4m da altura significativa média e 2kW/m da potência média da onda. Através desses resultados é possível aquilatar a proteção da região da praia da ação das ondas após a implantação da estrutura. Além disso, foram feitas duas simulações com 3 a 4 meses de evolução do fundo em condições hidrodinâmicas reais, com o intuito de apresentar qualitativamente as áreas de erosão e acreção do fundo da praia. Resultados mostraram que a deriva litorânea local tem direção sudeste, para a Ponta da Praia. Foi observada sedimentação no tardo dos segmentos e na região de sombra e erosão nas áreas entre segmentos e a frente destes. Com isso, este trabalho colabora com o gerenciamento costeiro na região de Santos, apresentando o início de uma pesquisa para uma possível solução para os problemas de inundação e erosão da região da Ponta da Praia.

Palavras-chave: Engenharia Costeira, modelo numérico, quebra-mares segmentados, hidrodinâmica, sedimentos.

ABSTRACT

Erosion and flooding are common problems faced by coastal cities as a consequence of urbanization process without previous planning, with the sea level rise and the wave action. In order to mitigate these problems, shoreline protection structures are constructed along the coastlines, such as segmented breakwaters. Numerical models are tools frequently used in these studies because of its capacity of calculating the complex processes on a coastal environment. This study aim is to present a study based on the hydrodynamic and sediment transport response of a curved beach to the presence of segmented emerged breakwaters. The numerical model used is the MIKE21FM coupled with wave spectral and sediment transport modules. Firstly, constant boundary conditions were applied for the period of one year in order to understand the response of the beach to five different designs of coastal breakwaters. One of these structures were chosen to continue the study based on the area and length of the beach eroded and accreted. Secondly, eighteen different scenarios of wave and water level were applied to the selected structure and the protection of wave action were compared and analyzed. To the most critical hydrodynamic condition, the structure reduced 0,4 m of the mean significant wave height and 2 kW/m of the mean wave power. Finally, two real hydrodynamic conditions were applied and the sediment transport was qualitatively analyzed. Results show that the littoral drift in the studied area is directed to the southeast end of the beach, straight to the Ponta da Praia, without the spur breakwater, the sediment would end inside the navigation channel. Besides that, it shows the sedimentation and erosion patterns at the beach generated by the presence of the breakwater. The sediment is accumulated at the shadow area and at the lee, whereas the erosion is located at the front of the breakwaters and between the segments, as expected. Therefore, this study collaborates with the management of Santos, by presenting herewith a possible solution for the inundation and erosion problems of this area.

Keywords: Coastal Engineering, numerical model, segmented breakwater, hydrodynamics, sediment transport.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros básicos de uma onda.	22
Figura 2 - Alteração do perfil praial durante um ano climático. Ilustra-se perfil de verão e perfil de inverno com formação de barras.	28
Figura 3 - Transporte resultante de sedimentos longitudinal à praia pela corrente de deriva litorânea. Adaptado de Kamphuis (2000).	29
Figura 4 - Variáveis do dimensionamento de quebra-mares costeiros.	32
Figura 5 - Feições formadas na costa de acordo com os parâmetros de projeto dos quebra mares.	33
Figura 6 – Localização da Área de Estudo.	37
Figura 7 – Detalhamento da Região da Ponta da Praia com destaque da Avenida Almirante Saldanha da Costa e dos Canais de Drenagem 4 a 7.	38
Figura 8 - Fluxograma do Método	40
Figura 9 – Localização dos pontos de extração dos dados de onda e vento e nível dos modelos globais.	54
Figura 10 – Rosa de Ondas da Altura Significativa e Períodos dos dados extraídos do modelo global WW3.	54
Figura 11 – Localização dos pontos de observação utilizados para a Calibração do Modelo.	55
Figura 12 – Densidade da amostra dos dados de nível do ano de 2015.	58
Figura 13 – Nível do Mar para Cenário 3.1.	60
Figura 14 – Nível do Mar para Cenário 3.2.	60
Figura 15 - Malha computacional. Detalhe de Nó e Elemento.	35
Figura 16 - Altura de água total (h), altura de água remanescente (d) e elevação da superfície (η).	43
Figura 17 - Funcionamento do Modelo Morfológico utilizado.	47
Figura 18 - Esquema da atualização do perfil praial a cada passo de tempo morfológico.	48
Figura 19– Informações necessárias para implementar o modelo morfológico 1D.	48
Figura 20 – Exemplo de fluxos de sedimento que atravessam um elemento.	49
Figura 21 - Localização da grade computacional.	50
Figura 22 – Malha Computacional Acoplada.	51
Figura 23 – Detalhe de Refinamento na Ponta da Praia da Malha Computacional Acoplada	51
Figura 24 – Batimetria interpolada para a Baía de Santos.	52
Figura 25 - Calibração do nível no modelo no ponto da Praticagem.	63
Figura 26– Calibração da velocidade no modelo no ponto da Praticagem	63
Figura 27 - Calibração da Onda no modelo no ponto de Palmas.	64
Figura 28 – Localização dos perfis praiais utilizados no ajuste do modelo de sedimentos.	65
Figura 29 - Calibração do modelo de transporte de sedimentos através do ajuste do perfil praial, perfil 21.	66
Figura 30 – Calibração do modelo de transporte de sedimentos através do ajuste do perfil praial, perfil 21.	66
Figura 31 - Morfologia final com Quebra-mar A e Cenário 1. (Quebra-mar A: $Y=550m$, $L_s=300m$ e $L_g=200m$; índices: $L_s/Y=0,60$, $L_s/L_g=1,5$, $ds(m)=5$, $Y/ds=100$)	67
Figura 32 – Morfologia final com Quebra-mar B e Cenário 1. (Quebra-mar B: $Y=300m$, $L_s=300m$ e $L_g=200m$; índices: $L_s/Y=1,00$, $L_s/L_g=1,5$, $ds(m)=4$, $Y/ds=75$)	68
Figura 33 - Morfologia final com Quebra-mar C e Cenário 1. (Quebra-mar C: $Y=300m$, $L_s=150m$ e $L_g=100m$; índices: $L_s/Y=0,5$, $L_s/L_g=1,5$, $ds(m)=4$, $Y/ds=75$)	68

Figura 34- Morfologia final com Quebra-mar D e Cenário 1. (Quebra-mar D: $Y=200m$, $L_s=150m$ e $L_g=100m$; índices: $L_s/Y=0.75$, $L_s/L_g=1,5$, $ds(m)=3$, $Y/ds=67$).....	69
Figura 35 Morfologia final com Quebra-mar E Cenário 1. (Quebra-mar D: $Y=200m$, $L_s=150m$ e $L_g=150m$; índices: $L_s/Y=0.75$, $L_s/L_g=1,0$, $ds(m)=3$, $Y/ds=67$).....	69
Figura 36 – Esquema das medições de áreas e comprimentos acrescidos e erodidos. A linha contínua representa a linha de costa final e a pontilhada representa a linha de costa inicial (CE – comprimento erodido; AE – área erodida; CA – comprimento acrescido; AA – área acrescida).	70
Figura 37 – Enquadramento das estruturas dimensionadas na literatura (USACE, 2000)......	71
Figura 38 – Área de Interesse para Análise dos Resultados do Cenário 2.	72
Figura 39 – Altura Significativa Média das Ondas na Área de Interesse para as 18 Condições Hidrodinâmicas do Cenário 2.....	74
Figura 40 – Potência Média da Onda na Área de Interesse para as 18 Condições Hidrodinâmicas do Cenário 2.	74
Figura 41 – Distribuição Espacial da Altura Significativa da Onda e Potência da Onda em Condições Hidrodinâmica 18, do Cenário 18.	75
Figura 42 – Diferença na altura significativa da onda que atinge a praia para o Cenário 18.	76
Figura 43 – Diferença na potência da onda que atinge a praia para o Cenário 18.	76
Figura 44 – Corrente Residual e Transporte de Sedimentos para Cenário 3.1.....	77
Figura 45 – Corrente Residual e Transporte de Sedimentos para Cenário 3.1.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros Construtivos para formação de saliente com implementação de quebra-mares costeiros. Adaptado de USACE (2002).	34
Tabela 2 – Dados ambientais utilizados na implementação do modelo computacional.	41
Tabela 3 – Características das alternativas de estruturas criadas.	56
Tabela 4 – Frequência de Ocorrência para os dados de onda de 2015 provenientes do Modelo Global WW3.	56
Tabela 5 – Frequência de Ocorrência de alturas e períodos para o rumo sul.	57
Tabela 6 – Simulações 1 a 18 do Cenário 2.	58
Tabela 7 – Componentes Astronômicas utilizadas na restituição da série de maré astronômica.	62
Tabela 8 – Comprimento e área acrescida e erodida para cada estrutura e parâmetros construtivos.	70
Tabela 9 - Resultados de Altura e Potência Médias na Área de Interesse nas situações com e sem estrutura para cada cenário simulado e características de cada cenário.	73

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Energia da onda
θ	Rumo da onda
f	Frequência da onda
ρ	Massa específica da água
g	Aceleração da gravidade
H	Altura da onda
T	Período da onda
$Penergy$	Potência da Onda (Transporte de Energia)
c_g	Velocidade do grupo de ondas escalar
Y	Distância entre o quebra-mar e a costa
ds	Profundidade em relação ao nível médio
Ls	Comprimento da estrutura de quebra-mar
Lg	Comprimento do espaçamento
c_{model}	Velocidade da onda no modelo
c_{onda}	Velocidade da onda real
CFL	Número de Courant Friedlich-Levy
h	Altura da coluna d'água
v	Velocidade em y
u	Velocidade em x
η	Elevação do nível da água
p_a	Pressão atmosférica
d	Profundidade
S	Balanço de energia
τ_s	Tensão cisalhante do vento
τ_b	Tensão cisalhante de fundo
T_{xx}	Tensão viscosa
T_{xy}	Tensão turbulenta
T_{yy}	Tensão
$\vec{v}$	Velocidade de propagação de um grupo de ondas vetorial
N	Densidade de ação da onda
c_x	Velocidade da onda na direção x

c_y	Velocidade da onda na direção y
ρ	Probabilidade de um grão se mover
τ_c	Tensão crítica
θ'	Tensão de cisalhamento adimensional
θ_c	Tensão de cisalhamento crítica
γ_s	Peso específico do sedimento
β	Coefficiente de fricção dinâmica
Φ_b	Transporte de sedimentos de fundo
U_f	Velocidade de fundo
u'_f	Velocidade de cisalhamento de fundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTO	17
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	ÂMBITO E LIMITAÇÕES.....	18
1.4	OBJETIVO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	HIDRODINÂMICA COSTEIRA	21
2.1.1	Ondas	21
2.1.2	Marés.....	25
2.2	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	26
2.2.1	Transporte de Sedimentos em Praias	26
2.2.2	Principais Agentes Modificadores Da Costa	29
2.3	OBRAS MARÍTIMAS	30
2.3.1	Quebra-Mares	31
2.4	MODELAGEM NUMÉRICA	34
3	A ÁREA DE ESTUDO.....	37
3.1	LOCALIZAÇÃO, HISTÓRICO E OCUPAÇÃO	37
3.2	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS	39
4	MÉTODO.....	40
4.1	Dados Ambientais Disponíveis	41
4.2	DESCRIÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	42
4.2.1	O Modelo Hidrodinâmico.....	42
4.2.2	O Modelo de Ondas.....	44
4.2.3	O Modelo de Transporte de Sedimentos	44
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO.....	49
4.3.1	Grade Computacional e Condição de Contorno.....	49
4.3.2	Batimetria	52
4.4	DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS.....	53
4.4.1	Análise dos dados de onda e nível	53
4.4.2	Cenário 1: Seleção da Estrutura.....	55
4.4.3	Cenário 2: Ondas e Nível Constantes	56
4.4.4	Cenário 3: Cenários Reais	59
5	RESULTADOS.....	61

5.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO	61
5.2	CENÁRIO 1: EFEITO MORFOLÓGICO PARA ONDA CONSTANTE	67
5.3	CENÁRIO 2: EFEITO DE PROTEÇÃO CONTRA A AÇÃO DAS ONDAS	72
5.4	CENÁRIO 3: EFEITO DAS CONDIÇÕES REAIS DE NÍVEL E ONDA NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	76
6	LIMITAÇÕES.....	79
7	CONCLUSÕES	81
8	RECOMENDAÇÕES	83
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DE PERFIS PRAIAIS 22.....	89
	APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DE PERFIS PRAIAIS 23	90
	APÊNDICE C – CENÁRIOS 1 A 3	91
	APÊNDICE D – CENÁRIOS 4 A 6	92
	APÊNDICE E – CENÁRIOS 7 A 9.....	93
	APÊNDICE F – CENÁRIOS 10 A 13.....	94
	APÊNDICE G – CENÁRIOS 13 A 15	95
	APÊNDICE H – CENÁRIOS 16 A 18	96

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

As cidades costeiras, atualmente, estão sujeitas às intempéries devido ao processo de urbanização e ocupação da região mais próxima ao mar, sem planejamento. Uma piora neste cenário ocorre devido ao prosseguimento de elevação no nível do mar, seja por mudanças climáticas de origem antrópica ou por padrões naturais. Independentemente da causa, as cidades litorâneas devem preparar-se e adaptar-se a estas condições (WOODROFFE, 2002; CAMPOS; CAMARGO; HARARI, 2010). Os impactos causados nas regiões urbanas afetadas por esses fenômenos são erosão nas regiões de praia, alagamentos, danos às estruturas urbanas além de colocar em risco a vida da população. No caso das regiões costeiras brasileiras a situação agrava-se devido ao seu histórico de ocupação e urbanização desordenada e sem planejamento (ALFREDINI, 2016).

A cidade de Santos é a mais populosa do litoral do Estado de São Paulo, Brasil, com mais de 400 mil habitantes e abriga o maior porto da América Latina, o Porto de Santos; trata-se de um destino turístico e está entre as 20 cidades mais ricas do país (SANTOS, 2018). Ainda assim, a cidade enfrenta problemas com ação de ondas associadas a eventos de maré mais alta, que atingem toda a orla, sendo mais crítica na região da Ponta da Praia. Esta região é complexa, pois engloba área residencial onde se localiza a Avenida Saldanha da Gama, e que geograficamente delimita a linha de costa do canal de acesso à região do Porto de Santos. Ademais, há conflitos de interesses no que diz respeito aos usos dos recursos hídricos locais, em decorrência de fatores como a má gestão das obras de drenagem e saneamento e ao alargamento do canal de navegação do Porto de Santos (ALFREDINI, 2016).

Não obstante, Alfredini et al. (2013) explica o contexto desta cidade frente à elevação do nível do mar e alerta para a necessidade de estruturas para defesa do litoral. Deste modo, aqui se apresenta a resposta desta praia à implantação de uma das possíveis estruturas de proteção do litoral que podem ser empregadas na região da Ponta da Praia. Neste caso, optou-se pelo estudo de estruturas de proteção do litoral denominados de quebra-mares costeiros emersos, com o auxílio das ferramentas de modelagem numérica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os efeitos de mudanças climáticas e variações no nível do mar sobre as cidades costeiras representam um desafio aos projetos de obras costeiras, que tem a finalidade de mitigar impactos e adaptar a região às novas condições ambientais. Justificam-se, portanto, estudos nesta área, pois promovem a especialização de profissionais capazes de atuar nesta área de forma competente, bem como o desenvolvimento desta área na pesquisa, visto que o tema é de grande importância para diversos setores. Para tanto, o emprego de modelos numéricos, físicos e empíricos no auxílio da tomada de decisão tornam-se abordagens de grande relevância, devido à complexidade dos fenômenos costeiros. Além disso, o presente estudo colabora com o desenvolvimento da pesquisa no âmbito das obras costeiras de proteção à costa, e da modelação das respostas das praias a tais obras.

1.3 ÂMBITO E LIMITAÇÕES

Salienta-se que o presente estudo tem objetivos acadêmicos e limita-se à análise da hidrodinâmica local em condições simplificadas, além disso, o modelo morfológico apresenta respostas qualitativas e não quantitativas, pois não foi calibrado. Para implantação de obras de defesa do litoral, são requisitos básicos as análises econômicas de custo-benefício, ambientais, ligadas a questões socioeconômicas, ecológicas e estéticas. Para a definição da obra mais conveniente, exige-se estudo complexo baseado na modelagem numérica e física, caso contrário, as obras podem agravar a erosão nas adjacências. Por isso, destaca-se a importância do levantamento de dados e estudo do complexo de fenômenos que determinam o movimento de sedimentos na área estudada (ALFREDINI; ARASAKI, 2014). No caso específico de quebra-mares costeiros destacam-se os problemas com relação à qualidade da água que pode ser gerado devido a alteração dos padrões de circulação da água. Além disso, a corrente de retorno que se forma no tardo dos quebra-mares pode pôr em um risco a segurança de banhistas. Testes com estruturas de quebra-mares submersos foram feitos e apresentaram gasto extensivo de tempo computacional, portanto foram escolhidos apenas quebra-mares emersos para os estudos aqui desenvolvidos.

Este estudo encaixa-se no âmbito da modelação computacional de respostas de ambientes costeiros para condições simplificadas. Avalia com emprego de modelo

numérico os efeitos de uma estrutura de defesa litorânea de quebra-mares costeiros segmentados, no que diz respeito ao amortecimento da ação de ondas e transporte de sedimentos. Para isso, foram variados aspectos construtivos dos quebra-mares, como a distância até a praia, o comprimento de seus segmentos e comprimento do espaçamento entre eles.

Em uma primeira etapa foi escolhido um arranjo de quebra-mares dentre cinco distintos, baseando-se na resposta morfológica da praia após aplicação de um cenário de onda e nível constantes por um período de um ano. Em seguida, para este arranjo selecionado, foram aplicadas dezoito condições de nível do mar e de onda incidente distintos e característicos do local, em regime permanente, para a qual foi analisada a proteção da ação da onda promovida pela estrutura. Em seguida, foram aplicadas condições hidrodinâmicas reais em que se avaliou qualitativamente as áreas erodidas e acrescidas considerando-se a ação das ondas e das correntes geradas pela corrente de maré.

Os dados ambientais utilizados neste estudo foram cedidos pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) e o modelo computacional utilizado sob licença acadêmica do *Danish Hydraulic Institute* (DHI).

1.4 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar as respostas na hidrodinâmica e sedimentação praial produzidos no âmbito da implantação de um campo de quebra-mares segmentados na região da Ponta da Praia de Santos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HIDRODINÂMICA COSTEIRA

Para compreender os processos costeiros responsáveis pela alteração da morfologia costeira e desencadeadores de problemas de erosão ao longo da costa, é necessário primeiro compreender os processos que os regem. Os principais agentes responsáveis pela circulação em corpos de água são: as ondas, o escoamento superficial e subsuperficial, gradientes de densidade, oscilações no nível do mar, temperatura, radiação e vento (KJERFVE; MAGILL, 1989). Na região costeira esses processos são dominados pelas ondas, marés, correntes e fenômenos climatológicos (WOODROFFE, 2002).

2.1.1 Ondas

As ondas de superfície da interface água-ar transferem energia da fonte que as gerou para alguma estrutura ou linha de costa, que dissipa ou reflete uma parcela significativa dessa energia. Assim, as ondas constituem o principal agente modelador da costa (ALFREDINI; ARASAKI, 2014). Na realidade, o formato real das ondas é complexo na sua geração, por isso empregam-se simplificações para estudá-las. A forma mais simples da onda é senoidal, que é utilizada para definir os parâmetros mais básicos de uma onda, ilustrados na Figura 1.

Figura 1 - Parâmetros básicos de uma onda.

Adaptado de Kamphuis (2000).

Em que L é o comprimento da onda, d é a profundidade, H é a altura da onda, a é a amplitude e c é a celeridade da onda.

As ondas de gravidade podem ser subdivididas em vagas e ondulações, ou marulhos. As primeiras ainda encontram-se sujeitas à ação do vento, têm períodos mais curtos e são mais encurvadas e esbeltas, ou seja, apresentam maior quociente entre altura e comprimento da onda. Já as ondulações, ou marulhos, são ondas com períodos maiores e são mais regulares, acima de 10 s, por não estarem mais sujeitas à ação do vento. As ondas do Oceano Pacífico, por exemplo, tem períodos máximos da ordem de grandeza de 22 s. No entanto, as vagas e marulhos ocorrem simultaneamente nos mares, de forma que representá-las uma a uma torna-se inviável muitas vezes. Para isso, utiliza-se da representação do estado de mar através de um espectro de períodos rumos e alturas de ondas. A descrição mais complexa do estado de mar, identificando as frequências e rumos proeminentes, deve descrever o espectro direcional. Assim, a energia total é obtida através da Equação 1:

$$E = \int_0^{2\pi} \int_1^{nf} E(\theta, f) df d\theta \quad (1)$$

Em que E é a energia da onda, θ é o rumo, e f é a frequência.

Para simplificação, as ondas naturais são frequentemente descritas através da sua altura significativa H_s , que corresponde à altura média do terço maior de ondas de um registro, e período de pico T_p ou período médio T_z (ALFREDINI; ARASAKI, 2014).

2.1.1.1 Teoria de Ondas

As teorias formuladas para descrever analiticamente o mecanismo dessas ondas são fundamentadas em funções matemáticas elementares, que podem fornecer previsões confiáveis para a Engenharia Costeira (ALFREDINI; ARASAKI, 2014). A teoria mais comum de ondas é a teoria de Stokes, que utiliza as equações de quantidade de movimento e continuidade para um fluido ideal aplicadas a condições de bordas apropriadas (KAMPHUIS, 2000). Esta teoria descreve ondas simples e prevê seu comportamento principalmente em lâminas d'água maiores relativamente ao comprimento da onda (ALFREDINI; ARASAKI, 2014). São chamadas de teorias de ordem superior, ou amplitude finita. Outras teorias de ordem superior, que completam a de Stokes são: da onda cnoidal, aplicada para águas rasas, e solitária, para águas muito rasas, quando a onda está próxima da quebra.

Apesar da complexidade do formato e dinâmica das ondas, ao longo dos anos observou-se que para a maior parte dos problemas de Engenharia Costeira, não há necessidade de diferenciar ondas entre vagas e marulhos, ou empregar teorias muito complexas. A teoria linear de ondas foi primeiramente discutida por Airy e constitui a primeira ordem de aproximação da teoria de Stokes, podendo ser aplicada para vagas e marulhos (KAMPHUIS, 2000).

2.1.1.2 Propagação de Ondas em Águas de Menores Profundidades

Ao propagar-se rumo à costa a onda sofre alterações de sua altura e rumo através do contato com o fundo e outros obstáculos. A estas transformações dá-se o nome de empolamento, refração, arrebentação, difração e reflexão.

O empolamento é o processo de aumento da altura da onda gerado pela redução da profundidade, até que atinja sua esbeltez limite. A refração da onda deve-se à variação de profundidade que não é ortogonal ao seu sentido de propagação. A onda que encontra profundidades diferentes terá celeridade também distinta, sendo que ondas em águas mais

profundas apresentam celeridades maiores. Isso faz com que o rumo e altura das ondas sofram variações. O rumo é alterado de tal modo que a frente de onda apresenta uma tendência de atingir a praia paralelamente. A altura da onda varia na mesma frente de onda e é independente do processo de empolamento (ALFREDINI; ARASAKI, 2014).

A arrebentação da onda ocorre devido à desaceleração da onda causada pelo atrito com o fundo e aumento da velocidade da crista da onda. Este processo progride tornando a onda cada vez mais esbelta, até o momento em que ela arrebenta. O limite da arrebentação ocorre aproximadamente com o ângulo 120° formado entre as tangentes da crista (ALFREDINI; ARASAKI, 2014). Pela teoria de onda solitária, no momento em que a altura da onda corresponder a 0,78 da profundidade a onda arrebentará.

A difração ocorre quando a onda atinge um extremo de um obstáculo e propaga-se radialmente na zona de sombra no tardo do obstáculo. A reflexão ocorre quando a onda atinge um obstáculo e produz ondas estacionárias puras ou parciais, conhecidas como seiches e clapotis. A reflexão da onda corresponde a uma reflexão de energia e pode resultar em ressonância em bacias fechadas.

2.1.1.3 Energia das ondas

A energia total de um sistema de ondas é a soma da energia potencial e cinética. De acordo com a teoria linear da onda, as energias potenciais e cinéticas de uma onda são iguais e, portanto, a energia total de uma onda por metro quadrado pode ser calculada através da Equação 2:

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (2)$$

Em que ρ é a massa específica da água e g , a aceleração da gravidade.

O estudo da energia e da força associada à ação das ondas é importante para avaliações de potencial de transporte de sedimentos. Enquanto a energia da onda é função quadrática da altura da mesma, o potencial ou força da onda, é função do quadrado da altura e do período da mesma. Por exemplo, em Silva, Sousa e Siegle (2016) mostra-se como a correlação entre a energia de ondas e o gradiente de transporte potencial de sedimentos pode auxiliar na definição de áreas de erosão, através da modelagem hidrodinâmica de ondas e cálculos de energia da onda e transporte de sedimentos potencial. A força da onda pode ser então estimada a partir da seguinte equação 3:

$$F = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (3)$$

De acordo com DHI (2016), a potência de uma onda, ou seja, transporte de energia promovido por uma onda harmônica pode ter sua magnitude calculada a partir da Equação 4:

$$P_{energy} = \rho g c_g E \quad (4)$$

Em que E é a densidade da energia e c_g é a velocidade de grupo de onda.

2.1.2 Marés

A maré astronômica é uma onda longa, geralmente com período de 12 horas e 25 minutos, forçada pela ação gravitacional da Lua, e em menor magnitude, do Sol. A força centrífuga e a força gravitacional, que atuam nas massas líquidas da Terra devido a estas interações, geram uma oscilação na elevação da superfície terrestre. A força gravitacional é maior no lado em que a Lua está mais próxima da Terra, assim o nível da água se sobrealça; no lado mais distante da Lua, a força centrífuga é maior e o nível da água também se sobrealça. O período dessa variação do nível da água é de 24 horas e 50 minutos, devido ao movimento de rotação da Terra, associado ao de rotação da Lua. Essa periodicidade confere a estas ondas um caráter regular e previsível (ALFREDINI; ARASAKI, 2014; WOODROFFE, 2002).

A maré astronômica no Brasil tende a aumentar de Sul para o Norte ao longo da costa, sendo que as regiões Sul e Sudeste se enquadram no regime classificado como micro-maré ($H < 2$ m). A maré astronômica no Brasil é predominantemente semi-diurna com duas marés altas e duas baixas por dia (Melo, 2017). A previsão da maré astronômica é dada pelas Tábuas de Maré, que apresentam resultados considerados precisos em locais em que as flutuações de nível são dominadas pela maré de origem astronômica.

No entanto, a maré da região Sul e Sudeste do Brasil é afetada por uma flutuação de período mais longo e caráter irregular, a maré não astronômica, definida como a resposta do mar à ação da atmosfera com flutuações em uma determinada escala de tempo. Este fenômeno inclui os eventos de maré meteorológica, gerada pelo vento

paralelo à costa no Hemisfério Sul, e explicada pelo Transporte de Ekman; e maré de tempestade ou *storm surge*, gerada pela ação do vento e variação da pressão atmosférica devido a eventos climatológicos de furacões ou ciclones, porém não se restringe a estes.

Melo (2017) explica ainda que a maré meteorológica no Brasil pode ocorrer sem atuação do vento local e ilustra isso através de um exemplo onde ventos do quadrante Sul, atuando na Ilha de Santa Catarina, geraram uma maré meteorológica, que se propagou na costa rumo ao Norte. Para obter-se a maré não astronômica, basta subtrair a maré astronômica do nível local. A associação deste fenômeno com a passagem de frentes frias sugere que a escala de tempo que este ocorre seja a de sistemas atmosféricos sinóticos, entre alguns dias e poucas semanas.

Assim, a ocorrência de uma preamar de sizígia equinocial somada à variação máxima de maré meteorológica pode atingir cotas elevadas e causar inundações da costa. Da mesma forma, o efeito pode gerar variações negativas de nível do mar que podem prejudicar a navegação local, no entanto estes eventos são mais raros. Isso porque a maré meteorológica que eleva o nível do mar nesta região é gerada pela atuação de ventos do quadrante sul, mais frequente nesses episódios meteorológicos, enquanto que o vento que gera o efeito contrário é mais raro (MELO, 2017; ALFREDINI; ARASAKI, 2014; CAMPOS; CAMARGO; HARARI, 2010).

2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Os processos hidrodinâmicos descritos no item 2.1 são os principais agentes do transporte de sedimentos costeiro. Neste estudo, abordou-se o transporte de sedimentos litorâneo nas praias, e são descritos os principais agentes responsáveis pela modificação da linha de costa.

2.2.1 Transporte de Sedimentos em Praias

O relevo e a linha de costa são moldados através de diversos processos físicos, como a erosão, transporte e deposição de sedimentos. A taxa com que esses processos ocorrem depende das características geológicas, do sedimento local e da dinâmica do fluido atuante. As fontes de energia responsáveis pela movimentação dos sedimentos provêm das ondas, marés, correntes oceânicas e eventos climáticos de grande escala, como El Niño, ou ainda podem ser induzidos pelo vento ou pelo gelo. A desembocadura

de rios pode também influenciar a dinâmica praial através de acréscimos ou decréscimos de aporte de sedimentos, atuando como fontes ou sumidouros de sedimentos (WOODROFFE, 2002). Há ainda atividades antrópicas como dragagens e alimentação de praias que podem alterar o balanço de sedimentos local.

A ação das ondas costuma ser a principal fonte de energia na mobilização de sedimentos em praias, realizado através da combinação de correntes verticais e horizontais. O transporte perpendicular à linha de costa é chamado de transporte transversal ou costa a dentro, costa a fora. O que ocorre paralelamente à costa é chamado de transporte longitudinal ou de corrente de deriva. Apesar destes processos ocorrerem simultaneamente, são frequentemente estudados separadamente (DEAN; DALRYMPLE, 2002). Esta abordagem é interessante para distinguir qual deles é mais significativo na alteração de linha de costa de determinado local, visto que a predominância de um dos processos pode variar de praia para praia, além de variar na escala temporal em que se analisa.

Os estudos de Harley et al. (2011) e Hapke et al. (2016) são exemplos de pesquisas com o objetivo de determinar qual desses processos é predominante na praia e quantificar suas escalas de atuação. De modo geral, pode-se afirmar que os resultados dos transportes longitudinais em praias devem ser avaliados em uma escala sazonal da ordem de um ciclo climático anual. Assim, para variações de longo termo da linha de costa de determinada praia, costuma-se quantificar o transporte longitudinal (ALFREDINI; ARASAKI, 2014).

2.2.1.1 Transporte de Sedimentos Transversal

As correntes que transportam sedimentos perpendicularmente às praias são predominantes quando o ângulo de incidência entre linha de costa e rumo da onda é praticamente ortogonal. São importantes quando a escala temporal e espacial que se analisa é pequena, na ordem de horas, dias ou meses. Durante eventos de ressaca ou tempestades, o sedimento da praia é erodido da praia e depositado na região subaquática. As feições formadas são os canais, por onde passam as correntes de retorno (*rip currents*), e os bancos de areia. A Figura 2 mostra a alteração de um perfil de praia devido à ação de ondas para diferentes períodos, o verão, caracterizado por clima calmo, e o inverno, caracterizado por clima agitado e maior frequência de tempestades mais fortes (KAMPHUIS, 2000).

Figura 2 - Alteração do perfil praiial durante um ano climático. Ilustra-se perfil de verão e perfil de inverno com formação de barras.

Adaptado de Kamphuis (2000).

De acordo com Alfredini e Arasaki (2014), os movimentos de corrente com rumos costa-mar e mar-costa são capazes de mover grande quantidade de sedimento, no entanto a resultante anual tem menor significância, sendo que a praia oscila principalmente entre situações de inverno e verão, como mostra a Figura 2. Em Engenharia Costeira, este movimento é importante principalmente no dimensionamento de fundações das obras costeiras.

2.2.1.2 Transporte de Sedimentos Longitudinal

O transporte longitudinal dos sedimentos é mais relevante quando o ângulo de incidência da onda for mais oblíquo em relação à linha de costa. São dois os principais mecanismos envolvidos neste transporte: o primeiro na região de espraçamento e o segundo na área de arrebentação. No espraçamento, a ação das ondas empurra as partículas de areia no rumo da onda. Quando a água da onda arrebentada reflui, as partículas movem-se perpendicularmente pela ação da gravidade e em seguida são empurradas novamente para a linha de costa por uma arrebentação de nova onda. Na zona de arrebentação, a turbulência gerada pelas ondas carrega material do fundo e em suspensão no rumo resultante da ação das ondas. Isso resulta em transporte de sedimentos que pode se estender por todo comprimento da praia (KAMPHUIS, 2000). Considerando a variação da intensidade e rumo da onda ao longo do tempo, há um transporte resultante,

ou líquido, de sedimentos. Convenciona-se que o transporte para a direita de quem olha para o mar é o transporte longitudinal positivo ($Q+$) e o para a esquerda, transporte longitudinal negativo ($Q-$). A soma em módulo desses dois valores é denominada de transporte global, enquanto que a soma algébrica entre esses é o transporte resultante, ou líquido (Figura 3). O transporte resultante de sedimentos varia ao longo da costa de acordo com a ação das ondas e do suprimento de sedimentos, a diferença entre o transporte resultante de sedimentos entre áreas adjacentes é chamada gradiente de transporte litorâneo.

Figura 3 - Transporte resultante de sedimentos longitudinal à praia pela corrente de deriva litorânea. Adaptado de Kamphuis (2000).

Adaptado de Kamphuis (2000).

A erosão atinge regiões em que o gradiente de transporte de sedimentos é positivo, e torna-se um problema quando atinge áreas de interesse ou densamente ocupadas. As causas da erosão podem ser diversas, tanto de origem antrópica quanto natural.

2.2.2 Principais Agentes Modificadores Da Costa

A alteração do clima de ondas, com diferentes rumos, alturas e períodos influencia diretamente na mudança da linha de costa, através da mudança dos locais submetidos aos processos de erosão e progradação da costa. O estudo da energia das ondas permite

definir áreas de erosão em determinada região da costa, como foi feito em Silva, Sousa e Siegle (2016). Johnson et al. (2015), por sua vez, buscaram relacionar alterações da linha de costa à mudança no clima de ondas e mostraram que há uma alteração nos padrões erosivos no litoral da Carolina do Norte.

O suprimento de sedimentos também é uma variável importante para modificação da costa. Este pode provir de fontes de sedimentos naturais, como rios, estuários, cordões de areia na zona subaquática, ou antrópicas, através de atividades de alimentação de praias. Estudos recentes, como os de Limber, Adams e Murray (2017) mostram que fechamento de canais na região costeira da Carolina do Norte resultou na erosão da linha de costa em até 3 m por ano. O suprimento de sedimentos pode ser ainda de fontes não naturais, como a alimentação de praias feita para mitigar efeitos de erosões na costa. A alimentação de praias em grande volume pode limitar o transporte de sedimentos a sotamar, causando um aumento da erosão em curto espaço de tempo (menor de 25 anos), mas com impacto de longo tempo sendo benéfico, ou pelo menos indiferente, como mostrou Brown et al (2016).

Por fim, as obras litorâneas podem interferir no clima de ondas local e na dinâmica de transporte de sedimentos. Estruturas de proteção à costa, como por exemplo, quebra-mares costeiros, também alteram o rumo da onda incidente próximo à linha de costa e, consequentemente, interferem no transporte de sedimentos na região, resultando em progradações e erosões da linha de costa original. Essas respostas se inserem em um contexto de escalas temporais menores que aquelas geradas pela alteração do clima de ondas ou do suprimento de sedimentos isoladamente. Neste trabalho foi abordado o impacto dessas obras na linha de costa, mais especificamente, quebra-mares costeiros. Diversos estudos mostram o impacto de obras litorâneas na modificação de costas. Para este estudo destaca-se Kristensen et al. (2013), onde os autores realizaram simulações com quebra-mares costeiros, variando parâmetros da estrutura e do clima de ondas para avaliar a resposta da linha de costa, empregando o modelo numérico híbrido utilizado neste estudo.

2.3 OBRAS MARÍTIMAS

O objetivo da implantação de estruturas de proteção da praia é reduzir os danos causados pela inundação costeira e energia das ondas atuando nos litorais (USACE, 2002). Nos casos em que medidas estruturais flexíveis não são suficientes para garantir a

proteção e estabilidade da linha de costa, busca-se por alternativas construtivas de obras chamadas rígidas, das quais se destacam: obras longitudinais aderentes (muros de praia), espigões e quebra-mares costeiros. Para implantação de obras deste tipo, alguns cuidados devem ser tomados para que sejam satisfeitos os requisitos de criar um ambiente mais agradável que o anterior, seguro e esteticamente aceito pela população que usufruirá da estrutura. O arranjo de uma obra rígida deve, portanto, considerar impactos biológicos, físicos e sócio-econômicos, além da estabilidade estrutural (KAMPHUIS, 2000).

2.3.1 Quebra-Mares

Quebra-mares são estruturas utilizadas tanto para proteção contra erosão de praias, os quebra mares costeiros, quanto para proteção da ação de ondas de regiões portuárias. A USACE (2002) define quebra-mares portuários como as estruturas que protegem uma área portuária ou base, criando área de águas calmas para a navegação. Quebra-mares costeiros, por sua vez, além de protegerem a região abrigada do impacto de ondas, também são conhecidos como estruturas estabilizadoras de costa, devido à sua influência no transporte de sedimentos. Segundo USACE (2002), é preferível que estas estruturas sejam projetadas de modo que se formem salientes em seu tardo, para garantir a renovação das águas. A distância entre a estrutura e a linha de costa, o comprimento do quebra-mar e o espaçamento entre segmentos de quebra mares, determinam as feições formadas na linha de costa. A Figura 4 mostra os parâmetros construtivos de uma estrutura de quebra-mar costeiro que devem ser levadas em conta na previsão das respostas de evolução da linha de costa.

Figura 4 - Variáveis do dimensionamento de quebra-mares costeiros.

Adaptado de USACE (2002) e Alfredini e Arasaki (2014).

Em que MHW é o nível médio de preamaras, MSL é o nível médio do mar e MLW nível médio da baixa-mar, Y é a distância da Praia de Projeto ao quebra-mar, ds é a profundidade média da estrutura do quebra-mar abaixo do nível médio do mar, L_g é o comprimento do espaçamento entre quebra-mares, L_s é o comprimento dos quebra-mares e W é a largura média da praia projetada.

As relações entre os parâmetros construtivos são apresentadas em USACE (2002) através de índices, utilizados como ponto de partida para o dimensionamento das estruturas. São eles: a relação entre a distância da costa e a profundidade média do quebra-mar abaixo do nível médio do mar (Y/ds) e entre o comprimento da estrutura de quebra-mares e o comprimento do espaçamento entre eles (L_s/L_g). A Figura 5 mostra a relação entre tais grandezas e as feições morfológicas formadas na linha de costa após a construção dos quebra-mares.

Figura 5 - Feições formadas na costa de acordo com os parâmetros de projeto dos quebra mares.

Adaptado de USACE (2002).

Além disso, é importante determinar a relação entre o tamanho da estrutura e a distância da costa para avaliar as feições morfológicas que devem ser formadas, pois sabe-se que quanto maior o comprimento do quebra-mar e/ou quanto menor a distância até a costa, maiores são as chances de formação de tómbolos. Em USACE (2002) são apresentadas diversas relações entre os parâmetros construtivos L_s e Y , obtidos em diferentes estudos, e a formação de tómbolos ou salientes na costa. Para formação de tómbolos, afirma-se que as relações entre as dimensões dos quebra-mares deve ser $L_s/Y = 1,5$ a 2 para quebra-mares únicos, com exceção de Gourlay (1981) apud USACE (2002), e $L_s/Y = 1,5$ para quebra-mares segmentados. Ao contrário, quanto menores os quebra-mares e maior a distância entre a estrutura e a costa, favorece-se a formação de salientes. De modo geral, a relação para formação de salientes deve ser $L_s/Y < 1$. As relações apresentadas na Tabela 1 representam as condições para formação de salientes obtidas por diversos autores, para ambos, quebra-mares únicos e segmentados, exceto quando especificado.

Tabela 1 - Parâmetros Construtivos para formação de saliente com implementação de quebra-mares costeiros. Adaptado de USACE (2002).

Condições para a formação de um saliente		
$\frac{Ls}{Y} < 1,0$	Sem tômbolos	Shore Protection Manual (1984)
$\frac{Ls}{Y} < 0,4$ a 0,5	Salientes	Gourlay (1984)
$\frac{Ls}{Y} = 0,5$ a 0,67	Salientes	Dally and Pope (1986)
$\frac{Ls}{Y} < 1,0$	Sem tômbolos (quebra-mar único)	Suh and Dalrymple (1987)
$\frac{Ls}{Y} < 1,5$	Salientes bem desenvolvidos	Ahrens and Cox (1990)
$\frac{Ls}{Y} < 0,8$ a 1,5	Saliente submerso	Ahrens and Cox (1990)

2.4 MODELAGEM NUMÉRICA

Modelos são uma tentativa de simplificar processos complexos da natureza. Através deles, representam-se relações entre variáveis, admitindo-se que a resposta a uma variação se relaciona a um processo conhecido. A modelagem matemática é um método comumente aplicado em ecossistemas aquáticos para quantificação de processos, auxiliando nas etapas de análise e tomadas de decisão (ROSMAN, 1989; WOODROFFE, 2002; FRAGOSO, 2009). Modelos hidrodinâmicos, por exemplo, são descritos por um conjunto de equações que representam a conservação das propriedades da água, discretizadas no tempo, sobre uma grade computacional, com o objetivo de analisar a quantidade de movimento da água em um domínio determinado. Devido à dificuldade em resolvê-las analiticamente, métodos computacionais evoluíram contribuindo para melhorar o entendimento dos escoamentos em detalhes (ABBOTT; BASCO, 1989).

A escolha do modelo a ser utilizado depende da qualidade da análise que se deseja, e, do investimento de tempo e recursos que se dispõe. O modelo numérico utilizado neste estudo é um modelo acoplado, que inclui o cálculo hidrodinâmico, de ondas e transporte de sedimentos bidimensional e atualiza a morfologia em uma dimensão, a cada passo de tempo (KRISTENSEN et al., 2011). Este soluciona as equações governantes com o método de volumes finitos. O domínio espacial é discretizado pela subdivisão do contínuo em elementos não sobrepostos, em que os elementos podem ser polígonos de

formatos arbitrários. São mais comuns os elementos triangulares, como os da Figura 6, retirada de uma das malhas utilizadas neste estudo.

Figura 6 - Malha computacional. Detalhe de Nó e Elemento.

Nesta malha, cada triângulo representa um elemento. Para cada elemento obtém-se um dado de elevação da superfície e velocidade, os nós são os vértices dos triângulos e contém a informação da batimetria.

O contorno do domínio é necessário para que as equações sejam resolvíveis. Existe a possibilidade de imposição de contornos abertos, normalmente representam estuários ou baías, onde se impõe o nível da água. Ainda é possível optar pela condição de contorno com a terra. Neste caso podem ser adicionadas entradas de rios ou canais através da imposição de vazões e velocidades. Não obstante, deve-se definir a condição de fundo através da batimetria e rugosidade, em que se impõe velocidade nula, e, superfície livre, prescrita pela tensão do vento (ROSMAN, 2015).

Para representação da solução da hidrodinâmica de um corpo d'água existem duas alternativas. A primeira, com a aplicação do método Euleriano de discretização, onde a massa d'água é representada de forma contínua na malha computacional. Ou seja, a evolução da propriedade é dada no tempo, em todos os pontos de escoamento relativos a um sistema de coordenadas fixo. E a segunda, com a aplicação do método Lagrangeano, onde a massa no sistema é dividida em um número de partículas com coordenadas especificadas, que são marcadas ao longo do escoamento. Este método representa o transporte das partículas de acordo com o escoamento no sistema, já calculado previamente, ou simultaneamente, adicionando-se a dispersão através da introdução de um termo de aleatoriedade (DHI, 2016).

A circulação em corpos de água pode ser estudada em diversas escalas de tempo e espaço (KJERFVE; MAGILL, 1989). Em pequena escala, a velocidade das moléculas apresenta intensas perturbações, em uma escala maior, a velocidade apresenta caráter mais consistente, com menores variações. Entender o movimento da água em escala molecular não é usual. Na prática costuma-se analisar a circulação na menor escala macroscópica aceitável para a aplicação prevista (ABBOTT; BASCO, 1989).

Quando é possível associar uma velocidade a uma partícula para uma dada escala, diz-se que o movimento é resolvível, também conhecido como movimento advectivo. Os movimentos difusivos são aqueles aos quais não é possível determinar uma taxa de mudança relativa da posição, trata-se de um movimento em escala menor que a mínima de interesse. Pelo Teorema de Nyquist, sabe-se que para um movimento ser resolvível um fenômeno tem que ter dimensões pelo menos duas vezes maior que a menor escala de interesse (ROSMAN, 2015). No caso de modelos hidrodinâmicos, a velocidade com que a informação se propaga no modelo, c_{model} , deve ser pelo menos duas vezes mais rápida que a velocidade com que uma onda se propaga em água rasa, c_{onda} . Sendo c_{model} e c_{onda} o resultado das Equações 5 e 6:

Velocidade no modelo:

$$c_{\text{model}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5)$$

Velocidade da onda:

$$c_{\text{onda}} = \sqrt{gh} \quad (6)$$

Onde Δx e Δt são parcelas infinitesimais de espaço (m) na direção x e tempo (s), respectivamente. Essa condição é rearranjada de maneira a resultar na conhecida condição de estabilidade Courant Friedrich-Lévy (CFL), ou número de Courant. No modelo utilizado neste estudo, este parâmetro é calculado a partir da Equação 7 (DHI, 2016):

$$CFL = (\sqrt{gh} + |u|) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (7)$$

3 A ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO, HISTÓRICO E OCUPAÇÃO

A área de interesse deste estudo é a Ponta da Praia, localizada na extremidade leste da Praia de Santos, Município de Santos, Estado de São Paulo, entre as latitudes $24^{\circ}00'S$ e $23^{\circ}55'S$ e longitudes $46^{\circ}15'O$ e $46^{\circ}20'O$ (Figura 7). A área marítima que compõe esta praia é a Baía de Santos com grande influência da embocadura do Estuário de Santos. O Canal de Bertioga também compõe este Complexo Estuarino, ligando estas águas às da praia de Bertioga. A Baía de Santos é delimitada por linhas de costa formadas predominantemente por costões rochosos, entremeados por pequenas praias. As principais praias são formadas na Ilha de São Vicente, que é limitada pelos Estuários de São Vicente, à oeste, e Santos, à leste. A formação tombolar formada pela influência da Ilha Porchat e o Emissário de Santos separam as praias de São Vicente, a oeste, das de Santos, a leste (ALFREDINI, 2016).

Figura 7 – Localização da Área de Estudo

De acordo com Alfredini (2016), a urbanização e ocupação não planejada da região, assim como o gerenciamento inadequado das obras de drenagem e saneamento, intensificaram o processo erosivo que atualmente ocorre na praia de Santos. A região da Ponta da Praia se situa à barlamar de todas as demais praias de Santos, entre o Canal 6 e a embocadura do Estuário de Santos. Portanto, é a área que mais sofre pela somatória das intervenções urbanísticas realizadas nas praias de Santos. Dentre tais intervenções, destaca-se a construção da Avenida Almirante Saldanha da Gama, implantada no início na década de 1940, e que contorna a Ponta da Praia, acompanhando a entrada do Estuário de Santos, como mostra a Figura 8. Como consequência, a areia foi impermeabilizada e os muros criaram superfícies refletivas às ondas com alto poder erosivo sobre os fundos da região. Alfredini (2016) afirma que, ponderando-se os três conjuntos principais de fatores desencadeadores da erosão, em termos de energia, a proporção atribuída à urbanização é de 84%, às mudanças climáticas de 11% e à ampliação do canal da barra desde 1964, 5%.

Figura 8 – Detalhamento da Região da Ponta da Praia com destaque da Avenida Almirante Saldanha da Costa e dos Canais de Drenagem 4 a 7.

3.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

A hidrodinâmica deste local caracteriza-se pela dinâmica de marés semi-diurna, com cota do nível médio do mar de 0,89 m acima do Nível de Redução da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, sendo que este valor chega a aproximadamente 1,6 m em preamar de sizígia equinocial. Além disso, o nível de elevação da água do mar é fortemente influenciado por variações não astronômicas (climáticas), definidas como variações de maré meteorológica. De acordo com (CAMPOS; CAMARGO; HARARI, 2010) esses distúrbios são mais intensos no inverno e possuem maior efeito em águas rasas. A vegetação formada em torno do estuário caracteriza-se pelos manguezais, que têm grande influência na hidrodinâmica local, assim como o Canal de Bertiooga, que liga as águas estuarinas à praia de Bertiooga (Figura 7).

A hidrografia do Complexo Estuarino de Santos é composta por diversas contribuições provenientes de bacias oriundas da Serra do Mar. As principais vazões afluentes a este complexo estuarino são: Piaçabuçu, Boturoca, Cubatão, Mogi, Quilombo, Jurubatuba, Cabuçu, Itapanhaú, Itatinga, Sertãozinho e a Usina Hidrelétrica Henry Borden (Rosman, Roservi, Harari 2016). Os ventos predominantes nesta região são provenientes dos octantes de sudoeste e nordeste. Ventos persistentes de sudoeste com intensidade acima de 8 m/s geram os casos mais importantes de sobre-elevação do nível do mar, associado com sistemas de baixa pressão e juntamente com o anticiclone de retaguarda posicionado sobre o continente (CAMPOS; CAMARGO; HARARI, 2010). O clima de ondas desta região provém dos setores sul, sudeste e leste, sendo mais frequentes e mais intensas as ondulações de sul. Devido à orientação da Baía de Santos ser para o sul, está exposta à ação de ondas provenientes do octante sul.

O sedimento que compõe a região do Complexo Estuarino de Santos é predominantemente areia e silte. Na região da Ponta da Praia predomina a composição por areias finas, com diâmetros próximos de 125 μm (FUNDESPA, 2016).

4 MÉTODO

O método aplicado neste estudo está sintetizado no fluxograma da Figura 9. A partir dos dados de onda e nível do ano de 2015 foram definidos três cenários com objetivos distintos em que são incluídos duas ou mais simulações, como será detalhado no item 0. O primeiro cenário visa compreender qualitativamente a diferença entre a conformação morfológica de equilíbrio da linha de costa com diferentes estruturas, quando submetida a uma mesma condição hidrodinâmica de onda constante, com duração de um ano. Esse primeiro cenário utilizou o modelo morfológico híbrido de uma linha, partindo-se do princípio que este seria mais rápido para uma simulação mais longa. A partir desses resultados foi escolhida uma estrutura considerada mais adequada para a região baseando-se nas erosões e acreções finais da linha de costa obtidas no Cenário 1.

Figura 9 - Fluxograma do Método

O segundo cenário visa apresentar a resposta hidrodinâmica no que diz respeito à proteção da praia da ação das ondas nesta praia, com a estrutura selecionada anteriormente. Para isso, são testadas 18 condições hidrodinâmicas em que se variam a altura significativa e período da onda e nível do mar, como detalhado no item 4.4.3. O terceiro cenário tem o objetivo de avaliar qualitativamente os efeitos de médio termo, aproximadamente três meses, causados pela presença desta estrutura no transporte de sedimento local em condições mais próximas da real. Por isso, as condições de contorno do modelo utilizam da série de dados reais de nível e onda, obtidas no processo de calibração do modelo (item 5.1). Com isso, avaliam-se os efeitos da estrutura na praia considerando a ação da corrente de maré. Neste caso, optou-se pela utilização do modelo morfológico bidimensional, que mostra o efeito da corrente no perfil praial.

4.1 DADOS AMBIENTAIS DISPONÍVEIS

Os dados ambientais utilizados neste estudo foram disponibilizados pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, em sua maioria, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Dados ambientais utilizados na implementação do modelo computacional.

Dado	Fonte	Origem
Batimetria	Cartas Digitalizadas	1701; 1711; 23100 - Cartas Náuticas da Marinha
	Levantamento Batimétrico	Acervo FCTH: Levantamento batimétrico do canal de navegação enviados pela CODESP (2012 a 2014) Acervo FCTH: Levantamento batimétrico da região da Ponta da Praia, cujos detalhes podem ser encontrados em FUNDESPA (2016).
Onda	ADCPs Fundeados	Acervo FCTH: Dados das proximidades da Ilha das Palmas do ano de 2015, informações de altura significativa e rumo, enviados pela Praticagem.
	Modelo Global	WaveWacthIII
Corrente	ADCPs Fundeados	Acervo FCTH: Dados da Praticagem coletados em 2015 com informações de intensidade e direção a cada 20 min.
Nível do Mar	Marégrafo	Acervo FCTH: Medições na Praticagem entre janeiro de 2015 e janeiro de 2016, com intervalos a cada 5 min.
Sedimento	EIA/RIMA	Acervo FCTH: EIA/RIMA de Dragagem de Aprofundamento do Canal de Navegação e Bacia de Evolução disponibilizado pela Praticagem
	Plano Básico de Dragagem	Acervo FCTH: Plano Básico Ambiental da Dragagem de Aprofundamento do porto de Santos, elaborado pela FUNDESPA (2016) e disponibilizado pela Codesp

Os dados de levantamento batimétricas da praia de Santos foram retirados de FUNDESPA (2016), assim como os dados de sedimentos.

4.2 DESCRIÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

4.2.1 O Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico utiliza as equações que descrevem o movimento de um fluido incompressível, que são as equações de Navier-Stokes, baseadas em evidências físicas e experimentais. Nelas, assume-se que o fluido é newtoniano, ou seja, o fluido apresenta deformação por cisalhamento diretamente proporcional à tensão cisalhante aplicada e que a distribuição é hidrostática. Para solucionar este conjunto de equações utiliza-se da equação da conservação de massa (ABBOTT; BASCO, 1989).

Lagos, águas costeiras, baías e estuários, em sua maioria, podem ser classificados como corpos de águas rasas, ou seja, as escalas horizontais são muito maiores que as verticais, portanto é possível considerar uma coluna de água bem misturada, em que se possa desprezar a estratificação (ROSMAN, 1989). Para estudos de hidrodinâmica de corpos de águas rasas são adotados os modelos hidrodinâmicos bidimensionais horizontais (2DH), que fazem uso das equações 8, 9, e 10 (DHI, 2016). Estas equações são resultado da integração das equações de momento de Navier Stokes e da continuidade na direção z.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (8)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento, na direção x:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = \\ & -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (9)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento, na direção y:

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} =$$

$$-gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (10)$$

A variável h representa a profundidade total de água (m) e é composta por $h = \eta + d$; onde d é a profundidade remanescente de água (m) e η , elevação da superfície (m) (Figura 10). As velocidades nas direções x e y são representadas por $\bar{u}$ e $\bar{v}$ (m/s), respectivamente, e representam valores médios ao longo da coluna d'água, h . A magnitude da descarga devido às fontes pontuais é representada por S ; e u_s e v_s são a velocidade com que a água entra no corpo d'água nas direções x e y , respectivamente.

Figura 10 - Altura de água total (h), altura de água remanescente (d) e elevação da superfície (η).

Adaptado de DHI (2016).

As variáveis τ_{sx} e τ_{sy} representam a tensão de cisalhamento provocada pelo vento, enquanto τ_{bx} e τ_{by} representam a tensão de cisalhamento de fundo. A tensão lateral, ou tangencial, é representada pelos termos T_{xx} , T_{xy} , T_{yy} , inclui a tensão viscosa, tensão turbulenta e advecção diferencial, e é estimada utilizando a formulação de viscosidade turbulenta, com base em gradientes de velocidades médios na coluna de água (DHI, 2016). Neste trabalho, adaptou-se a equação original do DHI (2016) retirando-se algumas parcelas, como o parâmetro f , da equação original, que representa a influência da força de Coriolis.

Segundo DHI (2016) as equações hidrodinâmicas empregam a proposta estatística de Reynolds, ou seja, representam o escoamento em termos médios temporais, e a hipótese de Boussinesq, segundo a qual as variações de densidade importantes são as que ocorrem

no termo da força gravitacional (termos em que se multiplica a aceleração da gravidade) (PORTO, 2006; EIGER, 1989; MCDOWELL; O'CONNOR, 1977).

4.2.2 O Modelo de Ondas

O modelo de ondas utilizado neste trabalho inclui os processos de transformação da onda em águas rasas como: crescimento da onda por ação do vento, interações onda-onda não lineares, dissipação devido à quebra da onda e fricção com o fundo, refração e empolamento devido à variação de profundidade e interação onda-corrente.

Para tanto, utiliza como formulação a parametrização da equação de conservação da ação da onda. A dinâmica das ondas de gravidade é descrita pela equação de transporte para ondas através do espectro de densidade de ação da onda, que varia no tempo e no espaço, em função de seu rumo e frequência. De acordo com DHI (2016) a equação de conservação de ação das ondas pode ser escrita como mostra a Equação 11:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (11)$$

Em que $N(\vec{v}, \sigma, \theta, t)$ é a densidade de ação da onda, t é o tempo, $\vec{x} = (x, y)$ é o sistema cartesiano de coordenadas, $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ é a velocidade de propagação de um grupo de ondas nas dimensões $\vec{x}$, σ e θ e S é o termo da fonte do balanço de energia. ∇ é o operador nas quatro dimensões. As quatro velocidades características da propagação são dadas pelas Equações 12 a 14:

$$(c_x, c_y) = \frac{dx}{dt} \quad (12)$$

$$c_\sigma = \frac{dc_\sigma}{dt} \quad (13)$$

$$c_\theta = \frac{dc_\theta}{dt} \quad (14)$$

4.2.3 O Modelo de Transporte de Sedimentos

O modelo de transporte de sedimentos utilizado calcula taxas de transporte de sedimentos não coesivos. Para isso, neste estudo, foi utilizado o módulo que usa das informações de corrente e ondas obtidas nos módulos hidrodinâmico e de ondas combinadas. O transporte de sedimentos é a soma das frações de sedimentos de fundo (q_b) e sedimentos em suspensão (q_s), como mostra a Equação 15:

$$q_t = q_b + q_s \quad (15)$$

O transporte de fundo é calculado pelo modelo de Engelund e Fredsoe (1976). Estes autores apresentam um modelo de transporte de sedimentos para sedimentos aluviais através de uma abordagem estatística, onde a probabilidade de um grão de sedimento se mover pode ser expressa pela Equação 16:

$$p = \left[1 + \left(\frac{\frac{\pi}{6}\beta}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right]^{1/4}, \theta' > \theta_c \quad (16)$$

Em que θ' é a tensão de cisalhamento adimensional da superfície e θ_c é a tensão de cisalhamento crítica.

O transporte de sedimentos de fundo é calculado por uma abordagem determinística (Eq. 17):

$$\phi_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0,7\sqrt{\theta_c}) \quad (17)$$

Como descrito por Engelund e Hansen (1967), a mobilidade de um grão de areia no fundo de um corpo d'água é dependente das forças de arrasto, peso e empuxo. O parâmetro θ representa a razão entre as forças desestabilizadoras do grão, arraste e empuxo, e a força estabilizadora, o peso. Trata-se da forma adimensional da tensão de cisalhamento, descrito pela Equação 18:

$$\theta = \frac{U_f^2}{(s - 1)gd} \quad (18)$$

Em que d é o diâmetro do grão, s é a densidade relativa dos grãos, e U_f é a velocidade de fundo.

A velocidade de cisalhamento é calculada assumindo-se perfil logarítmico pela Equação 19:

$$u'_f = \frac{V}{6 + 2,5 \ln \left(\frac{h}{2,5 d_{50}} \right)} \quad (19)$$

Em que d_{50} representa o diâmetro do grão para o qual 50% da amostra é inferior.

A tensão crítica é aquela necessária para o grão entrar em movimento e é expressa pela Equação 20:

$$\tau_c = \theta_c (\gamma_s - \gamma) \quad (20)$$

O experimento de Shields mostrou que para valores altos de Reynolds, a tensão crítica é aproximadamente 0,06. Por isso, este parâmetro também é conhecido como parâmetro de Shields.

A variação vertical de concentração de sedimentos, por sua vez, é calculada de acordo com Fredsoe et al. (1985). O transporte de sedimentos em suspensão é calculado como produto da variação instantânea da velocidade de escoamento e a concentração de sedimentos instantânea (Eq. 21):

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D (uc) dz dt \quad (21)$$

Em que u é a velocidade do escoamento e c é a concentração de sedimentos na coluna d'água.

4.2.3.1 O Modelo De Atualização Morfológica Unidimensional

O modelo morfológico utilizado neste estudo foi desenvolvido com o intuito de otimizar o tempo gasto com simulações de médio e longo termo, e pode ser utilizado para praias com curvaturas expressivas. Para isso, o módulo morfodinâmico atualiza a batimetria utilizando os resultados bidimensionais obtidos no módulo de transporte de

sedimentos, calculado através das correntes obtidas da interação entre correntes e ondas. A Figura 11 mostra um esquema de como a batimetria é atualizada neste modelo e como interage com os demais módulos do programa.

Figura 11 - Funcionamento do Modelo Morfológico utilizado.

Adaptado de Kristensen e Fredsoe (2012).

Este modelo resolve uma equação de uma linha modificada para linha de costa (Eq. 22):

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = - \frac{vol}{dA_z} \quad (22)$$

Em que Δy é a distancia em que a linha de costa é movida perpendicularmente à orientação da costa, Δt é o passo de tempo, vol é o volume de sedimentos depositado e A_z é a área deste segmento de costa, como ilustrado na Figura 18 .

Figura 12 - Esquema da atualização do perfil praial a cada passo de tempo morfológico.

A área de interesse é separada em perfis que são atualizados a cada passo de tempo morfológico. Esta proposta de modelo morfológica é mais rápida que o tradicional 2D pois os perfis determinados possuem uma área maior que os elementos que são utilizados para os cálculos bidimensionais. Além disso, isto implica na economia de tempo computacional, pois reduz erros gerados pela degeneração do perfil, frequente em simulações de médio a longo termo (KRISTENSEN et al., 2013).

Para ajustar esse modelo morfológico é necessário informar alguns parâmetros de forma para que a atualização do modelo seja possível. São eles: a *baseline*, que indica ao modelo qual o rumo em que o perfil irá se mover a *coastline*, mostra ao modelo onde se localiza a linha de costa inicial, e o *profile* que pode ser único ou variado, e indica a forma do perfil que será atualizada a cada passo de tempo, como mostra a Figura 13.

Figura 13– Informações necessárias para implementar o modelo morfológico 1D.

Estudos como os de Kristensen (2013) e Kristensen (2016) validaram o modelo e mostraram a sua eficiência em computar as alterações da linha de costa mais rapidamente se comparado ao modelo bidimensional.

4.2.3.2 O Modelo de Atualização Morfológica Bidimensional

No módulo morfológico bidimensional, a morfologia é atualizada para cada passo de tempo hidrodinâmico, baseando-se nas estimativas de taxas de mudança de fundo. Assim, a concentração do sedimento em suspensão é calculada todo passo de tempo. A contribuição feita pelo transporte de fundo é calculada pela soma de todos os fluxos atravessando a face dos elementos (DHI, 2016), como ilustra a Figura 14.

Figura 14 – Exemplo de fluxos de sedimento que atravessam um elemento.

Fonte: DHI (2016)

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

4.3.1 Grade Computacional e Condição de Contorno

Para o ajuste do módulo hidrodinâmico foi necessária a criação de duas grades hidrodinâmicas: a primeira, e mais abrangente, inclui a Baía de Santos, o mangue e estuários de Santos e São Vicente, a segunda incluiu apenas a região de maior interesse, a Baía de Santos e região das praias, excluindo-se os estuários e região de mangue. Esta abordagem foi seguida com objetivo de diminuir o tempo computacional gasto com as simulações. Devido à grande área de mangue e aos detalhes dos canais estuarinos, a grade mais abrangente é composta por um número elevado de elementos, tornando sua computação mais lenta. Portanto, a grade maior foi utilizada apenas para a calibração do modelo hidrodinâmico e foram extraídos os dados de vazão, elevação da superfície e

velocidade de seções dos estuários de Santos e São Vicente. Assim, a grade menor (acoplada) utilizou os dados das seções estuarinas, provenientes da grade maior (hidrodinâmica). A malha computacional utilizada é não estruturada e apresenta 20.899 elementos para a malha maior, hidrodinâmica, e 14.400 elementos para a malha menor, acoplada, sendo todos os elementos triangulares. Os dados de entrada das condições de contorno de onda, vento e elevação da superfície devido à maré meteorológica, foram obtidos a partir de dados de modelos globais.

Figura 15 - Localização da grade computacional.

Figura 16 – Malha Computacional Acoplada

Figura 17 – Detalhe de Refinamento na Ponta da Praia da Malha Computacional Acoplada

4.3.2 Batimetria

A batimetria utilizada como borda de fundo para este modelo foi obtida da digitalização de cartas náuticas da região, sendo que para região próxima à Ponta da Praia e o canal também foram utilizados dados de batimetria disponibilizados pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), pela Codesp e disponíveis nas Cartas Náuticas da Marinha do Brasil (2017), como indicado na Tabela 2.

A Figura 18 mostra a batimetria final interpolada para o modelo numérico acoplado. O modelo hidrodinâmico utilizou a mesma batimetria, no entanto com informações para o canal de Santos e incluindo as áreas de mangue, às quais foram atribuídas profundidades, ajustando-as durante o processo de calibração da velocidade.

Figura 18 – Batimetria interpolada para a Baía de Santos.

4.4 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

4.4.1 Análise dos dados de onda e nível

Os dados de onda e nível foram utilizados para definição dos cenários a serem simulados e no processo de calibração do modelo. Para a definição das simulações foram utilizados tanto os dados de campo do ano de 2015 quanto os dados do modelo global. Os modelos globais consultados como fonte desses dados são WAVEWATCH III (WW3) para ondas e National Centers for Environmental Prediction (NCEP) para vento e elevação da maré.

O modelo WW3 é um modelo de terceira geração de ondas, desenvolvido pela NOAA/NCEP. Este modelo resolve a equação de balanço do espectro de ação da onda, inclui parametrização dos processos de crescimento da onda e decaimento devido à ação do vento, interações não lineares, dissipação e cisalhamento com o fundo. Trata-se de um modelo para águas profundas e com escala espacial grande, maior que 1 a 10 km. O vento obtido através do modelo NCEP é calculado por um modelo climático global. A localização dos pontos dos quais essas informações foram extraídas estão apresentados na Figura 19. O período de dados é de 1979 a 2016, para ambas as séries. A Figura 20 A mostra a rosa direcional de altura significativa (metros) das ondas do modelo global WW3. Observa-se que a ondulação incidente de maior altura significativa é proveniente de Sul, além de serem as de maior ocorrência com 36% dos resultados. As magnitudes foram mais frequentes entre 1,0 e 1,5 m. A Figura 20 B mostra a rosa direcional de período de pico das ondas do WW3. As ondas de sul, sendo as de maior ocorrência, foram também as que apresentaram o maior período de pico, com valor de 20,4 segundos. A classe de períodos de maior frequência ficou entre 6 e 12 segundos.

Figura 19 – Localização dos pontos de extração dos dados de onda e vento e nível dos modelos globais.

Figura 20 – Rosa de Ondas da Altura Significativa e Períodos dos dados extraídos do modelo global WW3.

Os dados de campo utilizados neste estudo foram disponibilizados para fins acadêmicos e compõem o banco de dados da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. O período de dados de nível e corrente disponíveis são do ano de 2015. A Figura 21 mostra a localização dos pontos de observação para os dados de onda, chamado de Palmas, e de nível de água e corrente, chamado de Praticagem.

Figura 21 – Localização dos pontos de observação utilizados para a Calibração do Modelo

4.4.2 Cenário 1: Seleção da Estrutura

Com o intuito de comparar a resposta morfológica da praia à presença dos cinco diferentes arranjos de quebra-mares segmentados, foi aplicada uma condição ambiental simplificada e constante. O cenário consiste na ação de onda constante de 2 m de altura significativa na borda, atingindo o ponto de Palmas com 1,5 m, e com 10 s de período e oriunda do sul (180° NV), com base na rosa de onda apresentadas na Figura 20.

4.4.2.1 DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS

Os cinco arranjos alternativos de quebra-mares segmentados criados estão apresentados na Tabela 3, em que se apresentam as suas dimensões e parâmetros

construtivos. As dimensões dos quebra-mares foram escolhidas de acordo com os resultados obtidos na simulação anterior, sendo que estas iniciaram-se pelo quebra-mar A, dimensionado de acordo com o Manual de Engenharia Costeira, USACE (2002).

Tabela 3 – Características das alternativas de estruturas criadas.

	Yi (m)	Ls (m)	Ls/Y	Lg (m)	Ls/Lg	ds(m)	Y/ds
Quebra-mar A	500	300	0,60	200	1,5	5	100
Quebra-mar B	300	300	1,00	200	1,5	4	75
Quebra-mar C	300	150	0,50	100	1,5	4	75
Quebra-mar D	200	150	0,75	100	1,5	3	67
Quebra-mar E	200	150	0,75	150	1,0	3	67

4.4.3 Cenário 2: Ondas e Nível Constantes

No cenário 2, tem-se o intuito de analisar a resposta da hidrodinâmica da praia para condições comuns de onda e nível. Por isso, foram selecionadas 18 combinações de onda e nível frequentes na região, formando cenários hidrodinâmicos constantes. Os dados de onda do modelo global foram analisados para definição de cenários simplificados de onda, levando em conta seu potencial impacto na Ponta da Praia.

O ano de 2015 foi escolhido uma vez que os dados de campo disponíveis são deste período e, portanto, o modelo foi calibrado para este mesmo período. Para isso, a frequência de ocorrência foi calculada para cada direção, dividindo-se o número de ocorrência de ondas dos setores apresentados, pelo número total de ondas registradas. O resultado obtido é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Frequência de Ocorrência para os dados de onda de 2015 provenientes do Modelo Global WW3.

Direção	(°)	nº ocorrência	Oc. (%)
N	0 (337,5 – 22,5)	0	0,00
NE	45 (22,5 – 67,5)	0	0,00
E	90 (67,5 – 112,5)	1016	34,79
SE	135 (112,5 – 157,5)	517	17,71
S	180 (157,5 – 202,5)	1374	47,06
SW	225 (202,5 – 247,5)	12	0,41
W	270 (247,5 – 292,5)	1	0,03
NW	315 (292,5 – 337,5)	0	0,00

Com esta informação, apenas as ondas provenientes do octante sul foram selecionadas para as simulações deste cenário, pois tratam-se das ondas mais frequentes (47%) e atingem a região de interesse. Em seguida, foi feita a análise de frequência de ocorrência para alturas significativas de ondas e período de pico das ondas do octante sul. O resultado está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Frequência de Ocorrência de alturas e períodos para o rumo sul.

Octante Sul 47,06%						
Período (s)			0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20
			2,5	7,5	12,5	17,5
Altura Sign (m)			0,44%	38,57%	58,52%	2,47%
0 – 1	0,5	5,17%	0,07%	3,28%	1,46%	0,36%
1 – 2	1,5	70,52%	0,36%	28,09%	40,98%	0,36%
2 – 3	2,5	22,49%	0,00%	6,40%	15,07%	1,02%
3 – 4	3,5	1,82%	0,00%	0,80%	1,02%	0,00%

Considerando-se a premissa de que as ondas com alturas menores de 1 metro terão pouco impacto na área de interesse, porque irão perder energia até atingir a região de interesse, e que as ondas maiores que 4 m apresentam frequência de ocorrência baixa, foram selecionadas as faixas de ondas de 1 a 2 m e 2 a 3 m e 3 a 4 m, para os quais as ondas médias são 1,5, 2,5 e 3,5 metros. Além disso, a faixa de períodos de onda analisados considerados mais significativos devido a sua frequência de ocorrência foram de 5 a 10 s, com períodos médios de 7,5 s e 10 a 15 s, com período médio de 12,5 s.

Sendo assim, os cenários que foram selecionados para avaliar a redução da ação da onda e efeito no transporte de sedimentos na região tem ondas com as seguintes características para alturas significativas (H) e períodos de pico (T):

- $H_1 = 1,5$ m; $H_2 = 2,5$ m e $H_3 = 3,5$ m.
- $T_1 = 7,5$ s; $T_2 = 12,5$ s.
- Direção oriunda do sul (180NV).

Para a escolha dos níveis do mar foram analisados dois conjuntos de dados: o primeiro, proveniente da série de nível reconstituída para entrada do modelo

computacional; o segundo, para os dados de campo do ponto da Praticagem, para os quais o modelo foi calibrado, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Densidade da amostra dos dados de nível do ano de 2015.

A partir desses dados observa-se que o nível com maior densidade é o nível médio local 0,90 m. Os níveis 0,3 e 1,5 m correspondem a aproximadamente 0,30 de densidade da amostra. Assim, os níveis escolhidos para simulações são: $N1 = 0,3$ m, $N2 = 0,9$ m, $N3 = 1,5$ m. A tabela 6 mostra as condições hidrodinâmicas aplicadas para cada umas das 18 simulações do Cenário 2.

Tabela 6 – Simulações 1 a 18 do Cenário 2.

Simulações	Altura da onda (m)	Período da onda (s)	Nível do mar (m)
1	1,5	7,5	0,3
2			0,9
3			1,5
4		12,5	0,3
5			0,9
6			1,5
7	2,5	7,5	0,3
8			0,9
9			1,5

10		12,5	0,3
11			0,9
12			1,5
13	3,5	7,5	0,3
14			0,9
15			1,5
16		12,5	0,3
17			0,9
18			1,5

4.4.4 Cenário 3: Cenários Reais

Para este cenário optou-se por impor séries reais de condições de contorno, com o objetivo de compreender o efeito da corrente de maré estuarina associada à ação das ondas. Para isso, as condições de contorno impostas são séries reais de onda, nível e velocidade da corrente nos casos das bordas dos estuários de São Vicente e Santos. Ambos os cenários são do ano de 2015, já que os dados de campo disponíveis são deste período e, portanto, o modelo numérico foi calibrado para este período. Foram escolhidos dois períodos de 2015 com aproximadamente três meses, Cenários 3.1 e 3.2, com as seguintes características:

- **Cenário 3.1:**

O período de simulação é do dia 1 de março de 2015 a 23 de junho de 2015. A elevação máxima do nível foi atingida em 6 de abril de 2015 com 1,99 m, assim como na sizígia equinocial do dia 20 de março de 2015 também resultou em valores elevados do nível, no ponto da Praticagem, como mostra a Figura 23. O maior evento de onda deste período deu-se em 5 de julho com aproximadamente 2,2 m próximo à Ilha das Palmas.

Figura 23 – Nível do Mar para Cenário 3.1.

- **Cenário 3.2**

O período de simulação é do dia 23 de junho de 2015 a 1 de outubro de 2015. A elevação máxima do nível foi atingida em 5 de julho de 2015 com 1,95 m. Este cenário inclui o equinócio de primavera, no dia 22 de setembro, que eleva o nível de maré, como mostra a Figura 24. O maior evento de onda deste período deu-se em 5 de julho com aproximadamente 2,68 m próximo à Ilha das Palmas.

Figura 24 – Nível do Mar para Cenário 3.2.

5 RESULTADOS

5.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO

O processo de calibração do modelo consistiu na comparação entre os dados obtidos na modelagem numérica e os dados de campo, visando atingir o coeficiente de erro mais apropriado. Para a calibração dos modelos hidrodinâmicos, foram utilizados os coeficientes RMAE (*Relative Mean Absolute Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*), calculados pelas Equações 21 e 22. Os dois parâmetros são interpretados como índices de similaridade, e quanto mais próximos a zero seus resultados forem, maior será a concordância entre os resultados do modelo e as observações de campo.

$$RMAE = \frac{\langle |M - C| \rangle}{\langle |C| \rangle} \quad (21)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (M_j - C_j)^2} \quad (22)$$

Em que, M é o valor modelado e C é o valor medido em campo.

Parâmetros do Módulo Hidrodinâmico

O processo de calibração iniciou-se com o ajuste dos parâmetros e formulações do módulo hidrodinâmico. A formulação utilizada para o cálculo no modelo hidrodinâmico é de equações quase estacionárias, resolvidas por integração e discretização de baixa ordem. A rugosidade aplicada foi de número de Chezy de 120 m^{1/2}/s, valor para o qual a componente *u* e *v*, e magnitude da velocidade atingiram valores mais próximos aos de campo. Foram realizados testes com variação da viscosidade turbulenta (*e*), no entanto, não se obteve significativa variação na intensidade da corrente. O melhor resultado foi obtido ajustando a grade computacional na área de manguezal, e diminuindo a rugosidade do estuário.

A série de dados de nível do mar, utilizada como condição de contorno do modelo, é resultado da soma da reconstituição das componentes astronômicas locais com a elevação do nível do mar causada pela maré meteorológica. Para reconstituir a condição de maré da Baía de Santos e da Borda de Maré do Canal de Bertioiga foi necessário o ajuste das constantes astronômicas de acordo com as características locais, apresentadas

na Tabela 7, para isso foi utilizada a ferramenta de reconstituição de marés do modelo *MIKE21 Toolbox*.

Tabela 7 – Componentes Astronômicas utilizadas na restituição da série de maré astronômica.

Componentes	Amplitudes	Fase	Componentes	Amplitudes	Fase
M2	0,3489	75,93	Q1	0,0682	79,19
S2	0,238	81,18	MSF	0,0096	157,08
O1	0,0992	91,22	SSA	0,0328	138,81
K1	0,0818	149,59	P1	0,0303	151,97
N2	0,0631	76,07	T2	0,0129	80,85
K2	0,0581	81,73	S1	0,0119	329,63
SA	0,0464	28,98	NU2	0,0117	74,86

Os dados de elevação do mar devido a ação da maré meteorológica podem ser obtidos através de modelos globais ou de dados de campo. Sabe-se que há dados de elevação de superfície disponibilizados no site do *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2)*. Esses dados foram consultados, mas neste estudo optou-se pela informação proveniente dos dados de campo disponíveis.

Os dados de elevação do nível do mar foram submetidos a um filtro passa-baixa no domínio do tempo, com frequência de corte de 28 horas. Assim, elimina-se a influência das forçantes astronômicas, uma vez que as principais componentes possuem períodos em torno de 8 e 24 horas (HARARI; CAMARGO, 1994). Portanto, a entrada de maré nas condições de contorno do modelo é composta pela soma do nível astronômico com o nível de elevação da superfície, gerado por eventos de maré meteorológica (Eq.24)

$$N_{final} = N_{astronômico} + N_{elevação\ da\ superfície} \quad (24)$$

Após a reconstituição da série de maré astronômica, os dados de maré meteorológica foram adicionados à série de dados de entrada nas bordas do modelo. A Figura 25 mostra a série de dados de nível do mar no ponto da Praticagem e o nível da maré meteorológica que foi adicionada à série astronômica.

Figura 25 - Calibração do nível no modelo no ponto da Praticagem.

A Figura 26 mostra a série de dados da magnitude da corrente e suas componentes u e v . De acordo com Van Rijn (2003) coeficientes de erro RMAE entre 0,3 a 0,5 são classificados como índices razoáveis. Sendo assim, os resultados obtidos estão dentro desta classificação exceto para a componente v da corrente estuarina que, por ter valores absolutos baixos, elevam o índice normalizado RMAE.

Figura 26— Calibração da velocidade no modelo no ponto da Praticagem

Parâmetros do Módulo Ondas

Após a calibração do módulo hidrodinâmico, iniciou-se com o ajuste dos parâmetros e formulações do módulo de ondas. A formulação utilizada para o cálculo foi a quase estacionária, a difração não foi incluída, pois o modelo apresentou problemas de instabilidade com esta opção. A corrente e nível foram incluídos nos cálculos. A série de dados da borda tem informações de altura significativa da onda, período, rumo para os quais foram utilizadas a série do modelo global, e coeficiente de espalhamento ao qual foi atribuído o valor 4. Neste modelo, dissipação por cisalhamento com o fundo é calculada utilizando-se a teoria linear da onda, e depende da hidrodinâmica e sedimentos. A tensão com o fundo pode ser especificada através de um coeficiente de fricção c_w , um fator de fricção f_w , rugosidade de Nikuradse k_N ou pelo diâmetro d_{50} do grão. Neste caso, o valor utilizado foi 0,04 m, que é padrão do modelo de ondas. A Figura 27 mostra a série de dados da altura significativa da onda.

Figura 27 - Calibração da Onda no modelo no ponto de Palmas.

Parâmetros do Módulo Sedimentos e Morfológico

O cálculo realizado no modelo de transporte de sedimentos incluiu as forçantes de onda e corrente acopladas, o diâmetro do grão de areia de 50% da amostra (d_{50}) utilizado foi de 0,125 mm, baseando-se no banco de dados disponibilizado pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH). O modelo de transporte de sedimentos não coesivo utiliza de informações de taxas de sedimentos calculadas previamente através de uma tabela criada antes da simulação, esta abordagem acelera os cálculos computacionais. Para criação desta tabela, utilizaram-se os valores padrão para os parâmetros gerais e a teoria de Stokes para ondas. No modelo morfológico foram inseridas as informações de

baseline, *coastline*, *edgemap* e *profiles*, sendo este último variado ao longo da costa e distribuído a cada 100 m.

No entanto, entende-se que há limitações neste processo de calibração, destacando-se dois fatos: a ausência de calibração das correntes litorâneas de arrebentação e a não calibração do modelo morfológico, pela ausência de dados de variação da linha de costa, na região de interesse.

A Figura 28 mostra a localização dos perfis utilizados para o ajuste e verificação dos resultados do modelo de transporte de sedimentos. As Figuras 29 e 30 são os resultados obtidos para o campo e modelo, respectivamente, para a simulação do mês de maio a junho do ano de 2015. Os dados são provenientes dos dados de FUNDESPA (2016), onde apresentam-se mais perfis ao longo da praia de Santos. Os resultados dos perfis 22 e 23 estão apresentados nos apêndices A e B. Os demais perfis localizam-se em regiões de menor interesse e com células maiores, por isso não serão apresentadas neste estudo.

Figura 28 – Localização dos perfis praias utilizados no ajuste do modelo de sedimentos.

Figura 29 - Calibração do modelo de transporte de sedimentos através do ajuste do perfil
praial, perfil 21.

Figura 30 – Calibração do modelo de transporte de sedimentos através do ajuste do perfil
praial, perfil 21.

5.2 CENÁRIO 1: EFEITO MORFOLÓGICO PARA ONDA CONSTANTE

Com o objetivo de compreender a diferença nas respostas da praia à presença dos diferentes arranjos de quebra-mares segmentados, optou-se por aplicar-se uma condição hidrodinâmica constante e simplificada, no entanto, longa o bastante para que possam ser observadas mudanças na linha de costa. Optou-se também pela utilização do modelo morfológico híbrido por utilizar um cálculo mais simples, diminuindo assim o tempo computacional gasto nas simulações e assumindo-se as limitações nas respostas deste modelo de acordo com o que foi apresentado em 4.2.3.1.

A condição hidrodinâmica escolhida baseou-se nos dados de onda de campo descritos no item 4.4.1, e é forçada na borda da Baía de Santos com 2 m de altura significativa, período de 10 s e rumo proveniente de sul. As Figuras 31 a 35 apresentam a morfologia praial final para cada uma das cinco estruturas dimensionadas (item 4.4.2.1). Para facilitar a interpretação dos resultados, a imagem foi rotacionada em -155° em relação ao norte verdadeiro.

Figura 31 - Morfologia final com Quebra-mar A e Cenário 1. (Quebra-mar A: $Y=500\text{m}$, $L_s=300\text{m}$ e $L_g=200\text{m}$; índices: $L_s/Y=0,60$, $L_s/L_g=1,5$, $d_s(\text{m})=5$, $Y/d_s=100$)

Figura 32 – Morfologia final com Quebra-mar B e Cenário 1. (Quebra-mar B: $Y=300\text{m}$, $L_s=300\text{m}$ e $L_g=200\text{m}$; índices: $L_s/Y=1,00$, $L_s/L_g=1,5$, $ds(\text{m})=4$, $Y/ds=75$)

Figura 33 - Morfologia final com Quebra-mar C e Cenário 1. (Quebra-mar C: $Y=300\text{m}$, $L_s=150\text{m}$ e $L_g=100\text{m}$; índices: $L_s/Y=0,5$, $L_s/L_g=1,5$, $ds(\text{m})=4$, $Y/ds=75$)

Figura 34- Morfologia final com Quebra-mar D e Cenário 1. (Quebra-mar D: $Y=200\text{m}$, $L_s=150\text{m}$ e $L_g=100\text{m}$; índices: $L_s/Y=0.75$, $L_s/L_g=1,5$, $ds(\text{m})=3$, $Y/ds=67$)

Figura 35 Morfologia final com Quebra-mar E Cenário 1. (Quebra-mar D: $Y=200\text{m}$, $L_s=150\text{m}$ e $L_g=150\text{m}$; índices: $L_s/Y=0.75$, $L_s/L_g=1,0$, $ds(\text{m})=3$, $Y/ds=67$)

Com o objetivo de comparar qualitativamente os resultados obtidos optou-se por quantificar a erosão e progradação da linha de costa para as situações acima expostas, foram feitas algumas medidas. Inicialmente, foi identificada a linha de costa inicial em que ocorreu erosão e progradação para a situação final. Em seguida, foi calculada a área que foi acrescida ou erodida na situação final, em comparação com a linha de costa

inicial. Para ilustrar tais medições, apresenta-se a Figura 36. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos com esta análise.

Figura 36 – Esquema das medições de áreas e comprimentos acrescidos e erodidos. A linha contínua representa a linha de costa final e a pontilhada representa a linha de costa inicial (CE – comprimento erodido; AE – área erodida; CA – comprimento acrescido; AA – área acrescida).

Tabela 8 – Comprimento e área acrescida e erodida para cada estrutura e parâmetros construtivos.

	CE(m)	AE(m ²)	CA(m)	AA(m ²)	Ls/Y	Ls/Lg	ds(m)	Y/ds
Quebra-mar A	2.130	68.788	427	550	0,60	1,5	5	100
Quebra-mar B	2.168	69.154	465	512	1,00	1,5	4	75
Quebra-mar C	2.615	131.380	12	12	0,50	1,5	4	75
Quebra-mar D	418	3.569	2.214	2.262	0,75	1,5	3	67
Quebra-mar E	398	5.412	2.231	2.282	0,75	1,0	3	67

Para os casos dos quebra-mares A e B observou-se a formação de salientes pouco desenvolvidos em A e, salientes mais proeminentes em B. Esses resultados estão de acordo com estudos pretéritos (Figura 37). Segundo USACE (2002), há formação de salientes para Ls/Y de 0,6 a 1,0. Kristensen et al. (2013) também mostra através da modelação numérica que haveria maior desenvolvimento do saliente na linha de costa, quanto maior for o Ls/Y .

Figura 37 – Enquadramento das estruturas dimensionadas na literatura (USACE, 2000).

Condições para a formação de um saliente	
$\frac{L_s}{Y} < 1,0$	Sem tômbolos
$\frac{L_s}{Y} < 0,4$ a $0,5$	Salientes
$\frac{L_s}{Y} = 0,5$ a $0,67$	Salientes
$\frac{L_s}{Y} < 1,0$	Sem tômbolos (quebra-mar único)
$\frac{L_s}{Y} < 2$ b/ L_s	Sem tômbolos (quebra-mares múltiplos)
$\frac{L_s}{Y} < 1,5$	Salientes bem desenvolvidos
$\frac{L_s}{Y} < 0,8$ a $1,5$	Saliente submerso

No entanto, nota-se que a variação na distância da linha de costa até os quebra-mares (Y) A e B não apresentaram alterações na ordem de grandeza das áreas e comprimentos apresentados na Tabela 8, na qual se observam comprimentos e áreas erodidas e acrescidas muito próximas. Portanto, a variação de L_s/Y de 0,6 para 1,0, neste caso, não apresentou alterações relevantes nas grandezas analisadas.

O quebra-mar C é uma transição entre os arranjos de A a E, pois, apresenta a mesma distância da linha de costa (Y) que A e B, no entanto, suas dimensões L_s e L_g estão mais próximas de D e E. Os resultados para o quebra-mar segmentado C mostra domínio de erosão em toda a linha de costa, como ilustra a

Figura 31. Este quebra-mar apresenta a menor relação L_s/Y , o que justifica maior erosão da costa em comparação aos demais quebra-mares.

Os quebra-mares D e E apresentaram diferenças significativas nos comprimentos e áreas apresentados na Tabela 7 em comparação aos demais arranjos de quebra-mares. Houve uma redução de até 2.200 m de comprimento de praia erodidos comparando-se ao pior cenário (quebra-mar C). Além disso, a área erodida é reduzida da ordem de 70.000 m² para 5.000 m² e há um aumento na área acrescida da ordem de 2.000 m². Esses resultados mostraram que para este caso em particular, as estruturas D e E são mais eficientes na proteção da praia.

Para avaliar a proteção contra a ação das ondas (Cenário 2) e o efeito de erosão e acreção na praia incluindo-se a dinâmica de marés estuarinas (Cenário 3), optou-se por utilizar apenas uma das estruturas de quebra-mares. O quebra-mar segmentado E foi selecionado pois além de mostrar maior proteção da praia, tem dimensão L_g maior que o arranjo D, o que garante maior circulação e renovação das águas neste local.

5.3 CENÁRIO 2: EFEITO DE PROTEÇÃO CONTRA A AÇÃO DAS ONDAS

Com o objetivo de comparar a resposta hidrodinâmica da praia, no que se refere à ação das ondas com e sem a presença de uma estrutura de proteção, foram selecionados 18 diferentes casos de onda e nível característicos dessa região. As simulações com estrutura de proteção da costa foram feitas com um quebra-mar segmentado com as dimensões do arranjo E, do item anterior. Para isso, foi criada uma área chamada área de interesse, delimitada pela linha dos quebra-mares segmentados e a costa, ilustrada na Figura 38.

Figura 38 – Área de Interesse para Análise dos Resultados do Cenário 2.

Para os valores da grade computacional contidos na área de interesse nas simulações de 1 a 18, com e sem estrutura, foram calculadas as médias de altura da onda e potência da onda. Os valores médios foram calculados proporcionalmente à área de cada elemento da grade dos quais foram retirados os valores de altura significativa e potência da onda médios, como mostra a Equação 2:

$$\overline{H_s} = \frac{\sum h_{s,elemento} \times A_{elemento}}{\text{Área total}} \quad (2)$$

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos nesta etapa e apresenta as 18 condições de nível e onda forçadas no mesmo. As Figura 39 e 40 sintetizam estes resultados em forma de gráfico. A condição hidrodinâmica considerada menos crítica é a 1 pois

apresenta menor nível, período de onda e altura significativa da onda, enquanto que a mais crítica é a condição 18 por apresentar estes parâmetros maiores.

Tabela 9 - Resultados de Altura e Potência Médias na Área de Interesse nas situações com e sem estrutura para cada cenário simulado e características de cada cenário.

Condição	Altura Sign. da onda (m)	Período da onda (s)	Nível do mar (m)	COM ESTRUTURA		SEM ESTRUTURA	
				Altura Sign. Média (m)	Potência Média da Onda (kW/m)	Altura Sign. Média (m)	Potência Média da Onda (kW/m)
1	1,5	7,5	0,3	0,34	0,25	0,51	0,48
2			0,9	0,46	0,39	0,67	0,74
3			1,5	0,57	0,54	0,81	1,00
4		12,5	0,3	0,36	0,30	0,55	0,62
5			0,9	0,48	0,46	0,71	0,90
6			1,5	0,59	0,63	0,89	1,29
7	2,5	7,5	0,3	0,53	0,62	0,74	1,10
8			0,9	0,72	0,99	1,02	1,80
9			1,5	0,86	1,30	1,25	2,46
10		12,5	0,3	0,55	0,72	0,76	1,26
11			0,9	0,72	1,06	0,99	1,91
12			1,5	0,86	1,40	1,24	2,71
13	3,5	7,5	0,3	0,62	0,83	0,88	1,51
14			0,9	0,87	1,42	1,17	2,42
15			1,5	1,07	2,01	1,47	3,61
16		12,5	0,3	0,66	1,08	0,93	1,97
17			0,9	0,90	1,73	1,31	3,36
18			1,5	1,15	2,56	1,58	4,55

Figura 39 – Altura Significativa Média das Ondas na Área de Interesse para as 18 Condições Hidrodinâmicas do Cenário 2.

Figura 40 – Potência Média da Onda na Área de Interesse para as 18 Condições Hidrodinâmicas do Cenário 2.

A Figura 39 mostra que, com a presença deste quebra-mar segmentado, as alturas das ondas são reduzidas de 16 cm na condição menos crítica a 43 cm na condição mais crítica. Observa-se que há uma diferença significativa na altura da onda que atinge a praia para cada um dos níveis de mar e que neste caso o período da onda não altera substancialmente os valores de altura significativa. Já no caso da potência das ondas,

observa-se que há um aumento da potência nas condições em que o período da onda é mais elevado (Figura 37). Assim, a potência da onda que atinge a praia é reduzida até 2 kW/m² na condição hidrodinâmica mais crítica, cenário 18.

No entanto, a diferença nas alturas significativas e potência das ondas não se distribuem uniformemente na área analisada. A Figura 41 mostra o efeito da estrutura na propagação da onda, alterando seu rumo e altura, para o caso mais crítico, a condição hidrodinâmica 18. As demais condições hidrodinâmicas estão ilustradas nos Apêndices de C a H.

Figura 41 – Distribuição Espacial da Altura Significativa da Onda e Potência da Onda em Condições Hidrodinâmica 18, do Cenário 18.

Para entender melhor este resultado, a Figura 42 representa a diferença espacial dos resultados de altura significativa, com e sem quebra-mares na área de interesse. Com isso, identificam-se mais claramente as regiões protegidas pelos quebra-mares. Para o Cenário 18, houve uma redução máxima de 1,5 m de onda na região abrigada e um aumento de 0,15 m na região não abrigada devido à interação das ondas difratadas, enquanto a diferença entre os resultados obtidos para a potência da onda nesta região chega a 7kW/m (Figura 43).

Figura 42 – Diferença na altura significativa da onda que atinge a praia para o Cenário 18.

Figura 43 – Diferença na potência da onda que atinge a praia para o Cenário 18.

5.4 CENÁRIO 3: EFEITO DAS CONDIÇÕES REAIS DE NÍVEL E ONDA NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A resposta da praia obtida para as simulações com condições hidrodinâmicas reais buscou representar o efeito da estrutura na circulação e no transporte de sedimentos local incluindo as correntes de maré estuarinas. Enfatiza-se que os resultados têm aspecto qualitativo e apesar das imagens mostrarem uma escala de sedimentação, os resultados são interpretados em termos de áreas de sedimentação e erosão.

A Figura 44 mostra a corrente residual para o período de simulação do Cenário 3.1 e o resultado para o transporte de sedimentos na região, e a Figura 42, para o período do Cenário 3.2.

Figura 44 – Corrente Residual e Transporte de Sedimentos para Cenário 3.1.

Figura 45 – Corrente Residual e Transporte de Sedimentos para Cenário 3.1.

A corrente residual representa uma média do escoamento no período analisado. Em ambos os cenários os resultados indicam que o sentido do transporte de sedimentos residual tem direção para a esquerda, olhando para o mar (SE com o Norte Verdadeiro). Ou seja, o sedimento move-se para a Ponta da Praia, e, durante este trajeto, se deposita ou é transportado, dependendo da velocidade da corrente na região.

As Figura 44 e Figura 45 mostram a deposição de sedimentos no tardo de das estruturas de proteção da praia, geradas pela interferência da estrutura na corrente. Observa-se uma maior área de sedimentação no tardo de dos quebra-mares a barlar e maior erosão entre os segmentos de quebra-mares a sotamar. Isto ocorre pois há mais sedimento disponível à barlar da estrutura, enquanto a erosão ocorre à sotamar. Por isso, recomenda-se que a construção de obras de defesa com arranjos de campos, espigões ou quebra-mares, seja iniciada com os segmentos de sotamar à barlar (Alfredini, 2014).

A deposição dá-se tanto na face da praia (estirâncio), região de sombra e protegida contra o ataque das ondas, quanto no tardo de da estrutura, devido a diminuição brusca da velocidade da corrente nessa região. Esse resultado indica que pode haver a formação de tómbolos, caso a sedimentação no tardo de da estrutura encontre o saliente formado na costa. A sedimentação na região de tardo de pode ser observada apenas em modelos morfológicos que representam o transporte de sedimentos costa-dentro, costa-fora, como mostrou Kristensen et al (2013). A formação de tómbolos deve ser evitada em um projeto de obras de defesa do litoral pois reduz a capacidade de renovação das águas, e pode resultar em piora da qualidade da água (ALFREDINI; ARASAKI, 2014). Portanto, esse resultado também mostra a importância da utilização de modelos bidimensionais e tridimensionais em projetos obras costeiras. Para o Cenário 3.2, observa-se a formação de um giro em frente aos segmentos de quebra-mares, o que resultou em uma maior deposição de sedimentos em frente aos segmentos de quebra-mares.

Destaca-se também a erosão entre os segmentos de quebra-mares e em frente ao molhe unido à costa. As áreas entre segmentos de quebra-mares apresentam maior velocidade da corrente durante a vazante e enchente, devido ao estrangulamento do fluxo, e por isso o sedimento não se deposita nessa região, e é erodido. Da mesma forma, a velocidade da corrente em frente ao quebra-mar ligado à costa deve-se a corrente de maré, que aumenta suavemente.

6 LIMITAÇÕES

O desenvolvimento deste trabalho, bem como seus resultados apresentam limitações que devem ser esclarecidas para a melhor interpretação de suas conclusões. As limitações referem-se tanto ao âmbito, como explicado no item 1, quanto às incertezas associadas aos resultados obtidos nos cenários acima apresentados. No cenário 1, as principais limitações dizem respeito às premissas assumidas ao escolher-se trabalhar com o módulo de sedimentos e morfológico híbrido, o *Shoreline Model*. Este módulo calcula o transporte de sedimentos através da corrente bidimensional do módulo hidrodinâmico, no entanto, a morfologia da praia é alterada apenas na direção costa-dentro, costa-fora mantendo o perfil inicial. Isso significa que os resultados não consideram o efeito da alteração do perfil da praia no transporte de sedimentos. Por isso, esse modelo apresenta melhores resultados quando utilizados em obras localizadas mais distantes da costa. Neste caso, com cenário hidrodinâmico constante, o objetivo era observar o efeito na variação do design do quebra-mar segmentado, e deve ser interpretado de forma comparativa.

No cenário 2, as respostas hidrodinâmicas limitam-se no que diz respeito a calibração dos dados de onda. Em primeiro lugar pois os índices enquadram-se na faixa de ruim de acordo com a interpretação de Van Rijn (2003) e porque não há dados de campo com informações de direção da onda. Além disso, os resultados apresentados são simulações de condições hidrodinâmicas constantes, em regime permanente, o que não ocorre na natureza. Por isso, esses resultados devem ser interpretados de forma comparativa, da condição hidrodinâmica menos crítica à mais crítica, isto é, dos cenários 1 ao 18, e de condições com e sem a presença do quebra-mar segmentado.

No cenário 3, os resultados limitam-se no que diz respeito aos resultados do módulo de transporte de sedimento. Primeiramente, devido à ausência de dados de sedimento em suspensão para calibração, em segundo lugar, pois a comparação com os três perfis localizados na Ponta da Praia mostra um resultado satisfatório, enquanto que os dois demais resultados subestimam a erosão nessa área. Por isso, os resultados deste cenário devem ser interpretados de forma qualitativa, ou seja, identificando-se as áreas onde há erosão e onde há sedimentação. No entanto, os valores de volume de sedimentos não devem ser utilizados para interpretação quantitativa dos resultados.

A representação do pós-praia e da corrente de maré pode ter sido afetada por limitações relacionadas aos dados batimétricos. Os dados de batimetria fazem parte do

banco de dados da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, incluem informações batimétricas do canal e da região da praia. No entanto, os dados batimétricos tanto do pós-praia quanto dos manguezais e seus afluentes foram ajustados de acordo com informações de pouca resolução e de acordo com os resultados obtidos nas próprias simulações de calibração. Além disso, os canais de drenagem, que podem interferir na dinâmica de sedimentos local, não foram incluídos nestas simulações.

Os designs testados neste estudo não englobam todas as possibilidades de obras de defesa do litoral que podem ser aplicadas nesta região. Por exemplo, as obras podem ser mistas, englobar alimentação de praia e quebra-mares, quebra-mares em T, quebra-mares submersos, alguns designs de molhe-guia corrente, entre outros. Destacam-se aqui as desvantagens dos quebra-mares emersos segmentados apresentam que são pouco aceitos pela população devido a sua aparência estética desagradável. Em caso de formação de tómbolos, os quebra-mares podem afetar a capacidade de renovação de águas da praia, afetando negativamente a qualidade de sua água.

7 CONCLUSÕES

Neste estudo foi analisada a resposta hidrodinâmica e de transporte de sedimentos de uma praia submetida a presença de quebra-mares costeiros segmentados. O local de estudo foi a Praia de Santos, mais especificamente a região da Ponta da Praia. Este local sofre com inundações e danos na infraestrutura da cidade devido a ação de ondas quando o nível do mar está elevado. Por isso, foram estudadas algumas situações com diferentes estruturas e condições hidrodinâmicas para compreender a resposta desta praia.

Para realizar o estudo foi utilizada a modelação numérica computacional com o modelo hidrodinâmico Mike21, acoplando-se o módulo hidrodinâmico ao de ondas e sedimentos. A calibração do modelo foi feita com dados de campo disponibilizados pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica do ano de 2015. De acordo com Van Rijn (2003), os resultados hidrodinâmicos de nível e velocidade da corrente apresentaram índices de incerteza considerados razoáveis. Os coeficientes de erro obtidos para altura significativa da onda apresentam-se entre 0,37 RMAE e 0,27 RMSE, esse resultado foi considerado satisfatório pelos autores, visto que os dados de entrada são provenientes de modelos globais, o que limita atingir-se valores mais favoráveis na calibração. Os módulos de sedimento e morfológico não foram calibrados, portanto, os resultados aqui apresentados têm caráter qualitativo, e não quantitativo.

A análise foi feita em três etapas, para se compreender a resposta a diferentes arranjos de quebra-mares e condições hidrodinâmicas. Primeiramente, a praia foi submetida a um cenário hidrodinâmico constante, por um período de um ano. Variou-se, neste caso, as dimensões dos quebra-mares: o comprimento do segmento (L_s), o comprimento do espaçamento (L_g) e a distância até a costa (Y). As respostas foram analisadas em termos de área e comprimento de praia erodido, de forma comparativa e qualitativa. Os resultados mostraram que quanto maior a relação Y/L_s e L_g/L_s , maior a erosão na praia, o que está de acordo com outros autores (KRISTENSEN et al 2013, USACE, 2002). O arranjo de estrutura de quebra-mar escolhido para ser utilizado nos cenários sucessivos foi o quebra-mar E, pois, apresentou menor comprimento de praia erodido.

O segundo cenário teve o objetivo de estudar a resposta da praia no que diz respeito à proteção contra a ação da onda. Para o arranjo escolhido anteriormente, foram aplicadas dezoito condições distintas de nível do mar e de onda incidente característicos do local, em regime permanente. Ou seja, selecionaram-se condições hidrodinâmicas constantes,

variando-se o nível do mar de 0,3 m, 0,9 m e 1,5 m; a altura significativa da onda de 1,5 m, 2,5 m e 3,5 m e o período da onda de 7,5 s e 12,5 s, mantendo-se o rumo sul. Ao comparar os resultados obtidos nas simulações com e sem estrutura, para uma mesma condição hidrodinâmica, observou-se uma redução de 16 cm até 43 cm de altura significativa média da onda, da condição menos para a mais crítica, respectivamente. Da mesma forma, a potência média da onda apresentou uma redução de até 0,23 a 2,00 kW/m². Além disso, foi possível verificar que a variação do período da onda de 7,5 para 12,5 s, não apresentou diferença de resultado significativo na altura da onda incidente na praia. Por outro lado, ao considerar-se os resultados de potência da onda, essa variação do período da onda mostrou-se importante. Para uma mesma altura significativa e nível do mar, obteve-se uma variação de até 0,9 kW/m² na potência média da onda ao variar o período de 7,5 s para 12,5 s. Observando-se a variação espacial dos valores de altura significativa da onda na região de interesse, houve redução espacial máxima de 1,5 m, enquanto que para a potência da onda, a redução foi de 7 kW/m².

Em seguida, foram aplicadas condições de contorno hidrodinâmicas reais, com o objetivo de compreender a resposta da praia quando se considera as correntes de maré e utilizando-se o modelo morfológico bidimensional. Foram simulados dois períodos do ano de 2015, com aproximadamente 4 e 3 meses de duração, e que incluem os fenômenos de maiores marés como os equinócios de primavera e outono. A simulação chamada de 3.1 inicia no dia 1 de março de 2015 a 23 de junho de 2015. As simulações do terceiro cenário apresentaram respostas semelhantes. Em ambas a corrente residual na região de interesse tem direção sudeste, para a Ponta da Praia, onde localiza-se o quebra-mar ligado a costa. Observou-se a deposição de sedimentos na região de sombra dos segmentos de quebra-mares e a erosão entre os segmentos de quebra-mares, como já era esperado de acordo com outros autores (USACE, 2002). Da mesma forma, observou-se maior sedimentação nos segmentos mais à barlavento do campo de quebra-mares. Por outro lado, a sedimentação no tardo dos segmentos indica que pode haver a formação de tômbolos. A formação de tômbolos deve ser evitada em um projeto de obras de defesa do litoral pois reduz a capacidade de renovação das águas, e pode resultar em piora da qualidade da água (ALFREDINI; ARASAKI, 2014). Destaca-se também a erosão entre os segmentos de quebra-mares e em frente ao segmento de quebra-mar unido à costa.

Ressalta-se que este estudo tem objetivo exclusivamente acadêmico e não deve ser considerado para outros fins, dadas as limitações do estudo que serão descritas no item a seguir.

8 RECOMENDAÇÕES

Para o avanço de pesquisas na região ficou evidente a necessidade de campanhas de campo para obtenção de dados ambientais. Para o caso específico de estudos de erosão da Ponta da Praia, destaca-se a necessidade de dados de onda, incluindo-se o rumo da onda na Baía e, dados de corrente praial na região da Ponta da Praia, e não apenas no Estuário de Santos. Além disso, dados de batimetria do pós-praia com intervalos de levantamento de dados de dias, meses e que se estendam ao longo dos anos, mantendo-se a periodicidade. Esses dados são fundamentais para a calibração de modelos de transporte de sedimentos para curto, médio e longo períodos, além dos dados de sedimentos em suspensão. A importância do entendimento da variação dos perfis nas várias escalas de tempo é essencial para a correta estimativa de transporte longitudinal por modelos numéricos de perfis praias. A calibração de perfis está sendo utilizada para estimativa de transporte longitudinal em praias, mas as incertezas associadas a escalas de tempo são desconhecidas (VAN RIJN, 2003).

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOT, M B; BASCO, D R. **Computational Fluid Dynamics: An introduction for Engineers**. Singapore: Longman Group, 1989.

ALFREDINI, P., ARASAKI, E., PEZZOLI, A., FOURNIER C. P. (2013). Impact of climate changes on Santos Harbor, São Paulo State (Brazil). **In A. Weintrit & T. Neumann (Org.), The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation TransNav** vol. 7(4). London: CRC Press/Balkema.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Obras e Gestão de Portos e Costas**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 776 p

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Engenharia Portuária**. São Paulo: Edgard Blucher, 2014. 1291 p

ALFREDINI, P. A erosão da Ponta da Praia na Baía de Santos e seus desencadeadores e respectivas quantificações conceituais no balanço sedimentar no período de 1895 a 2016. São Paulo: 2016. 147 p.

ALFREDINI, P; ARASAKI, E; BERNARDINO, J; PUIA, H; SILVA, G; PRATS, R. (2017). Hydrodynamic Study of Nautical and Shore Protection Structures in Santos Bay, Brazil: **Marine Navigation and Safety of Sea Transportation**. 47-53. 10.1201/9781315099088-8.

BIRD, E. C. F.. **Coastal Geomorphology: An Introduction**. Wiley, Chichester, 2000.

BROWN, J M. et al. The effectiveness of beach mega-nourishment, assessed over three management epochs. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 184, p.400-408, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.090>.

CAMPOS, R M; CAMARGO, R; HARARI, J. Caracterização De Eventos Extremos Do Nível Do Mar Em Santos E Sua Correspondência Com As Reanálises Do Modelo NCEP

No Sudeste Do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 25, n. 2, p.175-184, set. 2009.

DEAN, R. G; A DALRYMPLE, R.. **Coastal Processes with Engineering Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

DHI. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM. 2016. Disponível em: <http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2016/Coast_and_Sea/MIKE_321_FM_Scientific_Doc.pdf>. Accessed in: 23 feb. 2018

ENGELUND, F.; FREDSE, J. (1976). A sediment transport model for straight alluvial channels. **Hydrology Research**, 7(5), 293-306.

FRAGOSO, C. R.. **Modelagem Tridimensional Da Estrutura Trófica Em Ecossistemas Aquáticos Continentais Rasos**. 2009. 309 f. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009 a.

FUNDESPA. **Monitoramento do Perfil Praia**. São Paulo: 2016.

HAPKE, Cheryl J. et al. Decoupling processes and scales of shoreline morphodynamics. **Marine Geology**, [s.l.], v. 381, p.42-53, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2016.08.008>.

HARLEY, M. D., I. L. TURNER, A. D. Short, and R. RANASINGHE (2011), A reevaluation of coastal embayment rotation: The dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy-Narrabeen Beach, southeast Australia, **J. Geophys. Res.**, 116, F04033, doi:10.1029/2011JF001989.

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

JOHNSON, J. M. et al. Recent shifts in coastline change and shoreline stabilization linked to storm climate change. **Earth Surface Processes And Landforms**, [s.l.], v. 40, n. 5, p.569-585, 22 out. 2014. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3650>.

KAEGAARD, K; FREDSOE, F., 2013. A numerical model for shoreline with large curvature. **Coastal Engineering**, vol. 74, pp. 19-32.

KAMPHUIS, J. W. **Introduction to Coastal Engineering and Management**. Canada: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2000.

KOMAR P.D., ALLAN J.C. 2008. Increasing hurricane-generated wave heights along the U.S. East Coast and their climate controls. **Journal of Coastal Research** 24(2): 479–488. DOI: 10.2112/07-0894.1

KRISTENSEN, S.e. et al. Impact of groyne fields on the littoral drift: A hybrid morphological modelling study. **Coastal Engineering**, [s.l.], v. 111, p.13-22, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.009>.

KRISTENSEN, S. E., DEIGAARD, R., TAANING, M. A., FREDSE, J., DRØNEN, N., JENSEN, J. H. (2011). Long term morphological modelling. **Coastal Engineering Proceedings**, 1(32), 64.

KRISTENSEN, S. E., DEIGAARD, R., DRØNEN, N., FREDSOE, J., & LUGER, S. (2012). Morphological modelling of the response to a shipwreck-A case study at Cape Town. **Coastal Engineering Proceedings**, 1(33), 86.

KRISTENSEN, S. E., DRØNEN, N., DEIGAARD, R., & FREDSOE, J. (2013). Hybrid morphological modelling of shoreline response to a detached breakwater. **Coastal Engineering**, 71, 13-27.

LIMBER, Patrick W.; ADAMS, Peter N.; MURRAY, A. Brad. Modeling large-scale shoreline change caused by complex bathymetry in low-angle wave climates. **Marine Geology**, Florida, p.55-64, 18 nov. 2016.

MARINHA DO BRASIL. **Cartas Raster**. (2017). Disponível em <<https://www.marinha.mil.br/chm/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>>. Acesso em: 01 abr. de 2017

MCDOWELL, D. M.; O'CONNOR, B. A.. **Hydraulic Behaviour of Estuaries**. Manchester: The Macmillan Press Ltd, 1977.

MELO FILHO, Eloi. **Maré Meteorológica Na Costa Brasileira**. 2017. 328 f. Tese (Concurso de Professor Titular) - Curso de Engenharia Civil Costeira e Portuária, Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2017.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. de; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

NCEP (2018). **Research Data Archive**. (2017) Disponível em : <(https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.1/index.html#!cgi-bin/datasets/getSubset?dsnum=094.1&action=customize&_da=y)> Acesso em: 01 fev. 2017.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. São Paulo: EESC-USP, 2006.

RANASINGHE, R.; TURNER, I., L. Shoreline response to submerged structures: a review. **Coastal Engineering**, v. 53, n. 1, p. 65-79, 2006.

ROSMAN, P. C. Modelos de Circulação em Corpos de Água Rasos. In: WROBEL, Luis Carlos. **Métodos numéricos em recursos hídricos**. Rio de Janeiro: ABRH, 1989. p. 156-221.

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J.. Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, [s.l.], v. 11, n. 3, p.566-574, 23 jun. 2016. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1770>.

RUGGIERO, P. et al. Modeling the effects of wave climate and sediment supply variability on large-scale shoreline change. **Marine Geology**, [s.l.], v. 273, n. 1-4, p.127-140, ago. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2010.02.008>.

SANTOS, Prefeitura de. Conheça Santos. 2018. Disponível em: <<http://www.santos.sp.gov.br/?q=hotsite/conheca-santos>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

SILVA, F. G.; SOUSA, P. H. G. O; SIEGLE, E. Longshore transport gradients and erosion processes along the Ilha Comprida (Brazil) beach system. **Ocean Dynamics**, [s.l.], v. 66, n. 6-7, p.853-865, 3 maio 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-016-0956-9>.

SZMYTKIEWICZ, Marek et al. Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data. **Coastal Engineering**, Gdansk, n. 40, p.119-139, jan. 2000.

THOMAS, R C; FREY, A. **Shoreline Change Modeling Using One-Line Model Comparison and Literature Review**. Us Army Corps Of Engineers, 2013.

US ARMY CORPS OF ENGINEER, **Shore Protection Projects**. In: Coastal Engineering Manual 2002. Cap. 3. p. 2-4.

VLIJM, R. J. **Process-based modelling of morphological response to submerged breakwaters**. Dissertação – Engenharia Costeira, Delft University, Delft, 2011.

VAN RIJN, L.C.; WALSTRA, D.J.R.; GRASMEIJER, B.; SUTHERLAND, J. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. **Coastal Engineering**, v. 47, n. 1, p. 65-79, 2003.

WOODROFFE, Colin D. **Coasts**. New York: Cambridge, 2002.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DE PERFIS PRAIAIS 22**P22 - Campo** **P22 - Modelo**

APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DE PERFIS PRAIAIS 23**P23 - Campo** **P23 - Modelo**

APÊNDICE C – CENÁRIOS 1 A 3

APÊNDICE D – CENÁRIOS 4 A 6

APÊNDICE E – CENÁRIOS 7 A 9

APÊNDICE F – CENÁRIOS 10 A 13

APÊNDICE G – CENÁRIOS 13 A 15

APÊNDICE H – CENÁRIOS 16 A 18