Carlos Eduardo Rogacheski

**A Dinâmica Sedimentar e a Caracterização de Zonas de
Erosão Acentuada (ZEA) ao Longo do Arco Praial de
Massaguaçu, SP**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico
da Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Mestre em
Ciências, área de Oceanografia Geológica.

Orientador:

Prof. Dr. Moisés Gonzalez Tessler

São Paulo

2010

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

**A Dinâmica Sedimentar e a Caracterização de Zonas de
Erosão Acentuada (ZEA) ao Longo do Arco Praial de
Massaguaçu, SP**

Carlos Eduardo Rogacheski

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia
Geológica.

Julgada em ____/____/____

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xi
1. Introdução.....	1
1.1. Principais contribuições científicas ou tecnológicas relacionados ao Estado da Arte	14
2. Objetivos.....	16
2.1. Geral	16
2.2. Específicos	16
3. Descrição da área de estudo	17
3.1. Comportamentos da área emersa do arco praial de Massaguaçu ao longo dos últimos anos	20
3.2. Observações em campo e valores da praia de Massaguaçu ..	25
4. Material e Métodos	29
4.1. Coletas de dados	29
4.2. Processamentos dos dados	34
4.2.1. Batimetria da área.....	34
4.2.2. Sonografia.....	36
4.2.3. Análise granulométrica.....	37
4.2.4. Clima de ondas	37
4.2.5. Marés	40
4.3. Modelagem numérica.....	41
4.3.1. Modelo SWAN	42
4.3.2. Modelo MOPLA (SMC)	45
4.4. Definição dos casos de onda para a propagação com os modelos numéricos: SWAN e OLUCA	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54

5.1. Caracterização granulométrica e teor de CaCO_3 dos sedimentos da área submersa do arco praial de Massaguaçu	54
5.2. Mapeamento sonográfico e caracterização das feições de fundo da área submersa do arco praial de Massaguaçu	56
5.3. Cima de ondas	65
5.3.1. Análises descritivas do clima marítimo em águas profundas através dos dados de previsões de altura significativa de ondas, período de pico de ondas e direção do modelo WW3	65
5.3.2. Definição dos casos de propagação de ondas com o modelo SWAN	67
5.3.3. Análises descritivas do clima marítimo de altura significativa de ondas (H_s), período de pico (T_p) e direção no Ponto P3 para os casos de ondas propagados (saída do modelo SWAN - entrada do modelo OLUCA)	70
5.4. Modelagem numérica.....	72
5.4.1. Modelagem de ondas com o modelo SWAN	72
5.4.2. Modelagem com o modelo MOPLA: módulo de onda (OLUCA) e módulo de corrente (COPLA) e módulo de transporte (EROS)	72
5.4.3. Módulo de onda (OLUCA) e módulo de corrente (COPLA)	74
5.4.4. Módulo de transporte (EROS).....	84
5.5. Análises descritivas do clima marítimo em águas rasas obtidas através da técnica do Hipercubo.....	90
6. DISCUSSÃO.....	93
7. CONCLUSÕES.....	109
8. REFERÊNCIAS	113
ANEXOS 1	120
ANEXOS 2.....	121
ANEXOS 3.....	122
ANEXOS 4 - Modelagem com o SWAN.....	129
ANEXOS 5 – Modelagem com o modelo MOPLA (SMC)	132
ANEXOS 6 – Carta Síntese ¹	168

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Moysés Gonzalez Tessler pela oportunidade, atenção e fundamental contribuição na orientação da minha dissertação, além dos ensinamentos e pela amizade durante este período, muito obrigado!

Ao Prof. Antonio Henrique da Fontoura Klein por mostrar os caminhos e abrir a oportunidade para a realização desta pós-graduação, pela sua amizade e apoio, pelos seus ensinamentos e dedicação.

Ao Prof. Eduardo Siegle pela grande ajuda e esclarecimentos das dúvidas, pela sua amizade e ensinamentos ao longo desta jornada.

Ao Prof. Valdenir Veronese Furtado e Michel M. de Mahiques pelas contribuições e colaborações.

As fundamentais contribuições dos técnicos da GEO para o desenvolvimento deste trabalho, Edilson de Oliveira Farias, Marcelo Rodrigues (Marcelão), Samara Cazzoli y Goya e Clodoaldo Vieira Tolentino, por todos os ensinamentos, pelas colaborações e onerosos esforços nas atividades em campo, pela amizade e bate-papos.

A todo o pessoal do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIO) pelo fundamental suporte durante as campanhas em campo, Wilson Natal, Chico, Luizão, Fred e Luis Nonato.

A Maria de Lourdes Bastianello Júnior pela enorme dedicação, pelas aulas de calibragem, companheirismo e bate-papos.

Ao Luis Antônio Pereira de Souza (LAPS) e aos técnicos do IPT, pelo excelente levantamento batimétrico e sonográfico, que permitiu um grande ganho de qualidade na minha dissertação. A Mariucha pela atenção e dúvidas esclarecidas para o tratamento dos dados.

Ao amigo e colega Lucas Ferreira da Silveira, pela ajuda e dúvidas esclarecidas, e por ter disponibilizado toda a metodologia usada no emprego das ferramentas numéricas utilizadas neste trabalho, contribuindo de maneira fundamental para o desenvolvimento da minha dissertação.

Ao mestre e a tripulação da embarcação Velliger II: Osiel, Manoel e Darico, e ao pessoal da base de Ubatuba por sempre me receber muito bem.

Ao Rodolfo Jasão & equipe, e ao Clodoaldo por todo empenho para recuperação do equipamento soterrado.

Ao Edilson por toda a análise granulométrica realizada, e sua constante participação neste trabalho.

A Mariana Corá, a Samara, e ao Daniel pela ajuda no momento mais difícil, durante a finalização da minha dissertação, revisando os textos e auxiliando na formatação, muito obrigado!

Ao apoio financeiro concedido pela Coordenadoria de Apoio a Pesquisa e Ensino (CAPES) e ao Instituto Oceanográfico da USP.

Ao apoio financeiro concedido pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) para a realização do projeto desenvolvido na praia de Massaguaçu, o qual meu projeto de pesquisa estava vinculado.

Ao *Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C)*, do Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria (UC), Espanha.

A todas as pessoas do quadro administrativo e de serviço do IO, as secretárias do DOF e de pós-graduação, aos funcionários da biblioteca.

Aos amigos e companheiros de pós-graduação e do IOUSP, Ana Cláudia, Tom, Ana Cecília, Adriana, Bia, Cíntia, Eduardo Nuber, Daniel, Janaína, Mari Corá, Sayuri, e Renata, Piero, Cássia, Mariana, Ana Amélia, Gabi, Paulo, Mario, Fabrício, Juliano, Priscila, Jasão, Pitu, Giba, muito obrigado pela parceria, amizade, descontração.

Aos meus grandes amigos e companheiros de morada Márcio e Vinícius.

Aos meus pais, Enio e Marly, pelo seu amor e por tudo que representam, e pelo apoio que sempre me dedicaram permitindo que eu chegasse até aqui. Obrigado também pela grande ajuda na revisão do texto.

Aos meus irmãos André, Daniel e Mariana e aos agregados Lê, Tati, Ivan, Fani, Tere, Luizinho, Bob e Royce.

A todos os meus familiares, ao meu avô Luiz Rogacheski, e aos avôs já ausentes Isolina Matozzo, Mario Camargo e Mercedes Alberton.

A turma da Seli e do Lucca e seus familiares.

A Paula que é muito especial na minha vida e que têm sido minha grande companheira em todos os momentos.

Resumo

Nas últimas décadas, a praia de Massaguaçu vem sofrendo processos erosivos intensos, cujos segmentos possuem taxas de recuo acentuadas, denominadas Zonas de Erosão Acentuada (ZEAs). Partindo deste problema este trabalho se propôs a entender a dinâmica sedimentar do arco praial de Massaguaçu e das possíveis causas de formação e manutenção das ZEAs. A coleta de dados se baseou no levantamento batimétrico e do clima de ondas, bem como no levantamento sonográfico de varredura lateral e na coleta de amostras de sedimento de superfície da antepraia de Massaguaçu. Para processar os dados se optou pela aplicação da modelagem numérica utilizando o modelo SWAN (propagação de ondas em águas profundas) e o modelo SMC (módulos OLUCA, COPLA e EROS, que trabalham, respectivamente, com propagação de ondas em águas rasas, simulação de correntes e simulação de transporte sedimentar). Para a formulação da discussão foram selecionados os 6 (seis) casos que apresentaram as condições de ondas mais representativas. Tais casos mostraram que a dinâmica sedimentar e os processos costeiros responsáveis pela formação e manutenção das ZEAs são controlados por dois padrões distintos de ondas incidentes. O primeiro padrão está relacionado às ondas vindas de NE - E, que geram correntes longitudinais para o sul. Suas correntes longitudinais e transversais à costa são de baixa intensidade resultando em um transporte sedimentar e em variações da morfologia praial menos intensos, além de formar células de circulação em vórtices. O segundo padrão, por sua vez, está relacionado às ondas oriundas SSE – SE – ESSE, cujas correntes litorâneas longitudinais rumam ao norte. Tais correntes longitudinais e transversais à costa, apresentam uma intensidade maior, portanto o transporte sedimentar e as variações da morfologia ao longo do arco praial são maiores bem como as células de circulação em vórtices. Partindo desses resultados, percebeu-se que as ZEAs em Massaguaçu estão ligadas a um possível aumento na frequência e na intensidade das tempestades ao longo das últimas décadas e até o presente momento, não há mecanismos naturais que revertam esta retração da linha de costa.

Palavras – Chave: Praia de enseada, transporte sedimentar, SWAN, SMC.

Abstract

Over the past decades in Massaguaçu beach has happening a strong erosion process with segments that have higher retreat rates, commonly termed as Erosional Hot Spots (EHSs). This research aims the understanding of the sedimentary dynamics along the Massaguaçu embayment and also the possible causes of the formation and maintenance of the EHSs. The methodology was separately on two steps. At first we collected bathymetry, wave and side-scan sonar data, and samples of the surface sediments from the shoreface of Massaguaçu beach. Later, to analyze majority data, we chose to use numerical modeling based on the SWAN model (propagation of waves in deep water) and SMC model (modules OLUCA, COPLA and EROS, that work respectively with the propagation of waves in shallow water, the simulation of currents and finally the simulation of sediment transport). After modeling, we were able to select the 6 (six) most representative wave conditions cases. Those results show that the control of the sediment dynamics and the coastal processes responsible for the formation and the maintenance of ZEA are based on the characteristics of the incident waves. On trying to explain that process, it was possible to recognize two distinct patterns. The first pattern observed is associated with the NE – E waves, generating longshore currents to the south. In this case, both the longshore and the crossshore currents are less intense, forming cells circulation in vortex, resulting in minor variations in sediment transport and beach morphology. The second pattern is related with the SSE - SE - ESE waves, generating longshore currents to the north. In this case both the longshore and the crossshore currents are more intense, although still with occurrence of forming cells circulation in vortex, resulting in a larger sediment transport and morphological changes along the beach. Finally, what we have seem was that the ZEAs in Massaguaçu are possibly linked to a potential increment on storms frequency and intensity over the past decades and unfortunately, at present, there is still no mechanism to recover this natural retreat of the coastline.

Keywords: Embayment beach, sediment transport, SWAN, SMC.

Lista de Figuras

Figura 1: Representação das escalas espaciais e temporais apropriadas para o estudo da morfodinâmica costeira, com exemplos de alguns sistemas costeiros com suas posições gerais, em termos de escala de tempo e espaço, baseada em Cowell & Thom (1994).	2
Figura 2: Mudanças do sistema costeiro; a) Resposta a perturbações; b) resposta nas mudanças das condições de contorno.....	3
Figura 3: Refração de ondas; a) ondas aproximando-se paralelamente à costa. Convergência de raios indicada onde $b < b_0$ e divergência onde $b > b_0$; b) Ondas aproximando-se obliquamente à costa e a difração ocorrendo tardoz do obstáculo (modificado de Woodroffe, 2002).	6
Figura 4: Esquema da forma em planta de praias de enseadas e o conceito de gradiente de força litorânea (modificado de Woodroffe, 2002).	8
Figura 5: Praia em perfil: perfil de uma praia de micromaré dominada por onda, com generalizadas distribuições de dominâncias através da praia, baseada em Masselink e Turner (1999), (modificado de Woodroffe, 2002).	8
Figura 6: a) Cúspides praias; b) desenvolvimento de uma onda de borda estacionária ao longo da costa; c) relação das correntes de retorno com as ondas de borda; d) correntes longitudinais, quando as ondas se aproximam obliquamente à costa como resultante de ondas de borda; e) correntes longitudinais, quando as ondas se aproximam obliquamente à costa (modificado de Komar, 1997).	11
Figura 7: Formas rítmicas em praias, cúspides e diferentes tipos de barras.	12
Figura 8: Localização da área de estudo: a) Brasil; b) Estado de São Paulo; c) Baía de Caraguatatuba; d) Arco Praial de Massaguaçu.....	18
Figura 9: Variação da posição da linha de costa (m) ao longo do arco praial de Massaguaçu observada entre os anos de 1962 a 2006 (Nuber 2008).	20
Figura 10: Taxa de variação (m/ano) de 1962 a 2006 com valor mínimo, para se definir como uma Zona de Erosão Acentuada (ZEA) (Nuber 2008). ...	21

Figura 11: a) Variação total do volume (m ³ /m) entre os meses de novembro de 2006 e março de 2008; b) Variação total da largura (m) entre os meses de novembro de 2006 e março de 2008 (Nuber 2008).	22
Figura 12: Variações percentuais de volume (%) observadas entre novembro de 2006 e março de 2008 (Nuber 2008).....	23
Figura 13: Variação média do tamanho médio de grão (mm) na face emersa ao longo do arco praial de Massaguaçu (Nuber 2008).....	24
Figura 14: a) Tipos de arrebentação durante eventos de baixa e moderada; b) a alta energia de onda.	25
Figura 15: a) Processos de ascensão da onda (<i>wave run-up</i>); b) Leques de sobrelavagem; ao norte do arco praial (Cocanha).	26
Figura 16: Caracterização das feições rítmicas observadas na face emersa; a) cúspides; b) megacúspides (1), escarpas (2) e bermas (3).	26
Figura 17: Acentuado processo erosivo no segmento centro – norte do arco praial de Massaguaçu; a) Hotel Brisa; b) Rodovia SP-55.....	27
Figura 18: Tentativas realizadas para mitigar os problemas de erosão ao longo dos últimos anos.....	28
Figura 19: a) Restaurante ao norte do arco praial de Massaguaçu na praia de Massaguaçu; b) Praia do Capricórnio ao sul do arco praial de Massaguaçu; propriedades diretamente afetadas pela largura da face emersa da praia.	28
Figura 20: Levantamentos de batimetria de detalhe e de sonar de varredura realizados em duas campanhas: Campo 1 no dia 27/11/2008 e Campo 2 no dia 08/08/2009.	30
Figura 21: Diagrama do fundeio instalado na enseada de Massaguaçu.	31
Figura 22: Instrumento utilizado na coleta de dados de ondas fixado na estrutura do fundeio: a) estrutura de fixação do ondógrafo; b) ondógrafo 730D (<i>Valeport</i>).....	31
Figura 23: Localização do fundeio da estrutura do ondógrafo e do correntômetro.	32
Figura 24: Localização dos pontos de coleta de sedimentos realizada no dia 22 de setembro de 2009.....	33

Figura 25: Malha geral dos dados batimétricos com pontos em área emersa e submersa e exemplo das isóbatas interpoladas para a modelagem com o SWAN.....	34
Figura 26: Mosaico das imagens geradas no levantamento com o sonar de varredura lateral, no arco praial de Massaguaçu.	36
Figura 27: Localização do ponto onde foram extraídos os dados de previsões de ondas do modelo <i>WaveWatch III</i> (WW3).	39
Figura 28: Malha computacional e batimétrica para o modelo MOPLA.	49
Figura 29: Principais parâmetros definidos para a execução dos casos:	49
Figura 30: a) Esquema da interpolação dos resultados para o ponto de análise, com base nos resultados dos nós da malha adjacentes ao ponto; b) Hipercubo de interpolação dos resultados propagados (Silveira, 2009).	52
Figura 31: Mapa da distribuição granulométrica dos sedimentos no arco praial da Massaguaçu.	55
Figura 32: Pontos das imagens escolhidas do levantamento sonográfico ao longo do arco praial de Massaguaçu.....	57
Figura 33: Feições de fundo próximo a Mococa; a) Imagem 1, formas de fundo de maiores dimensões caracterizando fluxo intermediário e a difração de ondas pela ilha do Tamanduá; b) Imagem 3, evidenciam um predomínio de regimes de fluxos intermediários neste setor.	58
Figura 34: Caracterização das feições de fundo próximo as ilhotas da Cocanha, com calhas entre os bancos arenosos e caracterizando a difração de ondas; a) entre as ilhotas na Cocanha; b) e na retaguarda, entre a linha de costa e a ilhota.	59
Figura 35: Caracterização das feições de fundo no setor mais ao sul deste arco junto a laje de Massaguaçu, em frente a praia do Capricórnio.	60
Figura 36: Caracterização das feições de fundo no segmento centro – norte do arco praial de Massaguaçu com a presença de poucos bancos arenosos, esparsos; a) e b) em Massaguaçu (norte); c) em Massaguaçu (centro).....	61

Figura 37: Caracterização das feições de fundo no setor mais ao sul deste arco; a) junto ao costão rochoso; b) junto à foz do rio Massaguaçu na praia do Capricórnio; c) em Massaguaçu (sul). 64

Figura 38: a) Função de distribuição empírica de altura significativa de ondas (Hs); b) Rosa direcional de Hs; c) Função de distribuição empírica de Tp; d) Rosa direcional de Tp; extraídas do modelo de previsão WW3, de 1997 a 2009. 66

Figura 39: Diagrama das combinações de Hs e Tp gerado para a série de dados de 1997 a 2009 do modelo WW3. 68

Figura 40: a) Variação da maré medida; b) Variação da maré obtida pelos dados de previsão da DHN para o porto de São Sebastião; período de 08 a 23 e abril de 2009..... 69

Figura 41: a) Função de distribuição empírica de Hs; b) Rosa direcional de Hs; c) Função de distribuição empírica de Tp; d) Rosa direcional de Tp; extraídas no Ponto P3 de acoplamento do modelo SWAN_OLUCA para os casos propagados. 71

Figura 42: Vetores de direção e magnitude de altura significativa de onda (Hs) para as simulações; a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146. 77

Figura 43: Isolinhas de altura significativa de onda (Hs) e vetores de corrente para as simulações; a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146. 78

Figura 44: Vetores de direção de corrente e magnitude para as simulações; a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146..... 81

Figura 45: Altura de ondas e frentes para as simulações; a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146. 83

Figura 46: Vetores de transporte e magnitude para as simulações; a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146..... 87

Figura 47: Morfologia final e variação final da morfologia após 24 horas para as simulações: a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146..... 89

Figura 48: Localização dos pontos de interesse próximo a praia e os vetores de direção e intensidade do fluxo médio de energia obtido através da técnica do hipercubo.	91
Figura 49: Função de distribuição empírica de Hs; a) P10 ; b) Ondógrafo – dados medidos; Rosa direcional de Hs; c) P10; d) Ondógrafo – dados medidos.....	92
Figura 50: Os efeitos da ilha do Tamanduá condicionando a configuração da isóbatas de profundidades em seu entorno.	102
Figura 51: Regime médio de altura significativa de ondas (Hs), nos Pontos 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9.	122
Figura 52: Regime médio das direções de ondas, nos Pontos 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9.	123

Lista de Tabelas

Tabela 1: Comparativo entre os modelos SWAN e OLUCA (Silveira, 2009).	41
Tabela 2: Condições simuladas nos experimentos com os módulos de corrente (COPLA) e de transporte (EROS) através do modelo MOPLA (SMC).	53
Tabela 3: Parâmetros de ondas e as siglas adotadas para descrevê-los.	65
Tabela 4: Os 12 (doze) casos escolhidos correspondentes aos 210 casos propagados em águas profundas (SWAN) e seus valores equivalentes para propagar com o modelo OLUCA em águas rasas, a partir do Ponto P3..	73
Tabela 5: Localização dos pontos de interesse próximo a praia e a direção de fluxo média obtida através da técnica do hipercubo.	90
Tabela 6: Resultados das análises estatísticas baseados em Folk e Ward (1957) das 81 amostras coletadas em outubro de 2009, com valores em milímetros.....	120
Tabela 7: Os 210 casos de ondas propagados propagados (SWAN_OLUCA).....	121
Tabela 8: Probabilidades dividida para cada direção, com os valores da variável que excedem as probabilidades de 50%, 90%, 99% e 12 horas por ano	

(99,863%), para cada direção, no ponto (PWW3 – águas profundas); a) altura significativa de ondas (Hs); b) período de pico de ondas (Tp). 124

Tabela 9: Diagrama obtido através da distribuição conjunta de Hs-Tp e a probabilidade de ocorrência de cada direção indicada (Ponto WW3). 125

Tabela 10: Diagrama obtido através da distribuição conjunta de Hs-Tp e a probabilidade de ocorrência de cada direção indicada (P1 - Capricórnio). . 126

Tabela 11: Diagrama obtido através da distribuição conjunta de Hs-Tp e a probabilidade de ocorrência de cada direção indicada (P3 – Centro). 126

Tabela 12: Diagrama obtido através da distribuição conjunta de Hs-Tp e a probabilidade de ocorrência de cada direção indicada (P5 – Massaguaçu (norte))..... 127

Tabela 13: Diagrama obtido através da distribuição conjunta de Hs-Tp e a probabilidade de ocorrência de cada direção indicada (P6 – Cocanha). 127

Tabela 14: Diagrama obtido através da distribuição conjunta de Hs-Tp e a probabilidade de ocorrência de cada direção indicada (P7 – Mococa). 128

Tabela 15: Diagrama obtido através da distribuição conjunta de Hs-Tp e a probabilidade de ocorrência de cada direção indicada (P8 – Tabatinga).... 128

1. Introdução

A abordagem adotada neste capítulo procura apresentar uma fundamentação conceitual relativa à mecânica dos processos litorâneos e à dinâmica do movimento dos sedimentos na zona costeira.

Os processos litorâneos ligados à morfologia costeira resultam da combinação de forças naturais (ligadas a ondas, correntes, ventos e tectônicas) e humanas. Muito frequentemente a costa é formada por material arenoso, que responde muito rapidamente a estas ações, através do transporte de sedimentos.

Por esta razão, a zona costeira torna-se um ambiente altamente dinâmico, onde contínuas mudanças ocorrem devida à interação de energia e massa, principalmente na interface entre o continente e o mar, que é conhecida como a linha de costa. As razões pelas quais a posição da linha de costa se altera de tempos em tempos ganha importância, à medida que, aproximadamente dois terços da população mundial estão vivendo nas zonas costeiras (Komar, 1997).

A evolução dos sistemas litorâneos está ligada à morfodinâmica costeira, que é a retroalimentação mútua entre a topografia e a dinâmica do fluido, que conduzem o transporte de sedimentos e resultam em mudanças morfológicas em diferentes escalas de tempo e espaço na costa. Este transporte fornece o mecanismo dependente do tempo pelo qual este ajuste ocorre (Wright e Thom, 1977).

Muitos sistemas costeiros não respondem linearmente e, assim, exibem mecanismos de retroalimentação positiva ou negativa. Na retroalimentação positiva ocorre o crescimento de instabilidades, conferindo propriedades de auto-organização do sistema, que resulta em novos modelos de operação. Na retroalimentação negativa se mantém um equilíbrio através de autorregulação, em resposta às menores perturbações (Carter e Woodroffe, 1994).

Assim, as formas costeiras tendem para um ajuste ou oscilação em volta de um equilíbrio, que é uma componente importante da morfodinâmica costeira, mas que, na prática, é difícil defini-la.

Normalmente, o equilíbrio das praias é dinâmico, isto é, grandes quantidades de areia encontram-se frequentemente em movimento, mas de tal forma que, em média, o material que entre numa área, em um dado intervalo de tempo, é igual à quantidade que dela sai no mesmo intervalo de tempo. Este equilíbrio dinâmico faz com que a posição da linha média da costa seja relativamente estável por um período de meses ou anos, enquanto a posição instantânea sofre oscilações de curto período.

Por estas razões, é mais realístico ver o equilíbrio como um estado que a morfologia continuamente se esforça para alcançar e que requer um tempo para isto, mas geralmente o equilíbrio é aproximado e nunca completamente alcançado (Wright e Thom, 1977).

Os estudos morfodinâmicos examinam as costas em uma grandeza de escalas temporais e espaciais, como têm sido descritas por Cowell e Thom (1994), (Figura 1).

Figura 1: Representação das escalas espaciais e temporais apropriadas para o estudo da morfodinâmica costeira, com exemplos de alguns sistemas costeiros com suas posições gerais, em termos de escala de tempo e espaço, baseada em Cowell & Thom (1994).

Apesar de convenientes, estas escalas de grandeza podem variar consideravelmente em diferentes tipos de costa e com a expansão das escalas de tempo e espaço e, assim, tornarem-se menos realistas (Wright e Thom, 1977).

Diferentes costas exibem diferentes tempos de respostas a mudanças de condições, incluindo resposta em curto prazo com perturbações (distúrbio), com mudanças nas condições de contorno e com mudanças intrínsecas (inerentes). A resposta da costa para cada evento é uma função do tempo de reação e relaxamento, e a relação entre estas respostas e seu intervalo de recorrência.

Perturbações na costa, como, por exemplo, um evento climático extremo pode provocar respostas variadas entre os sistemas. A resposta em função do tempo de reação pode ser instantânea, ou retardada. Já a resposta em função do tempo de relaxamento (recuperação) do sistema, pode ser descrita como intransitivos, quando as formas costeiras retornam aos seus estados pré-distúrbio, ou transitivos, onde não há retorno ao estado anterior ao distúrbio (Chappell, 1983b), (Figura 2a)

As respostas da costa podem ser retardada ou gradual quando ocorrer mudanças nas condições de contorno. Onde severos fatores forçantes estão envolvidos, as mudanças na costa podem seguir uma trajetória irregular e largamente imprevisível (Figura 2b).

Figura 2: Mudanças do sistema costeiro; a) Resposta a perturbações; b) resposta nas mudanças das condições de contorno.

Considerando que um sistema costeiro pode mudar seu comportamento em resposta a algumas condições de contorno externo para o sistema, as mudanças na forma costeira também podem provocar respostas a forçantes intrínsecas (Chappell, 1983b), que são ajustes de erosão ou deposição como resultado de mudanças acumuladas, sem um específico estímulo externo (Schumm, 1979).

Para entender a problemática costeira é indispensável conhecer, com relativa precisão, o modo e a intensidade com que se processa a movimentação das areias em praias arenosas.

A praia é um ambiente costeiro muito comum e importante por funcionar como um amortecedor natural entre o oceano e o continente, onde as ondas incidentes dissipam suas energias, enquanto a praia modifica sua morfologia para melhor dissipar essas ondas. Portanto, em muitas praias a onda constitui o principal agente modelador da costa, devido à movimentação de sedimentos que induz.

As ondas de gravidade são geradas na interface terra-água pela ação dos ventos e assim se propagam através das águas oceânicas. Durante esta propagação, as ondas são selecionadas através de um processo de dispersão direcional e dissipação de energia, que permite a mudança de um largo espectro de ondas, conhecidas como vagas da área de geração para ondas com estreito espectro, conhecidas como ondulações. Normalmente, as vagas ocorrem na zona de geração das ondas e são muito irregulares pela intensa influência da ação aleatória dos ventos e também pela presença de ondas com diferentes rumos de propagação. As vagas são usualmente compostas por ondas mais esbeltas (maior relação entre a altura e o comprimento da onda), com períodos e comprimentos de ondas mais curtos. Já as ondulações, são mais regulares e podem ser denominadas de ondas longas, caracterizadas por um período dominante de ondas e maiores comprimentos de ondas.

Ao longo do tempo, eventos de moderada energia de onda são mais frequentes e atuam por um prolongado período de tempo, retrabalhando as formas costeiras. Já os eventos extremos de alta energia de ondas, são menos frequentes e causam uma rápida retração da linha de costa, mas, logo após sua passagem, o sistema se reajusta, e taxas prévias de retração são restabelecidas.

Em geral, os fenômenos de ondas de oscilações são complexos e difíceis de serem descritos matematicamente, devido às características de não linearidade, tridimensionalidade e aleatoriedade. Aspectos sobre os tipos de ondas, da teoria de ondas, sua geração e movimento, transformação de processos de quebras, aplicação para as zonas costeiras, estão mais bem

examinados em Komar (1997); Woodroffe (2002). Em águas mais rasas que a área foco deste estudo, as ondas podem sofrer grandes deformações, através dos efeitos do empolamento, da refração, difração e reflexão.

O efeito do empolamento e da refração são deformações das ondas, que ocorrem em costas abertas devido à diminuição da profundidade e às características batimétricas em direção à costa.

O empolamento consiste na alteração da altura, devido somente à redução da profundidade, sendo que, pouco antes da arrebentação, a onda atinge sua altura máxima.

A refração ocorre quando a onda encontra uma variação da profundidade, que não é ortogonal ao seu sentido de propagação, e assim a mesma frente de onda encontra profundidades diferentes. Isto faz com que a onda tenha celeridades diferentes, com a parte da frente de onda em maiores profundidades, movendo-se mais rápido do que a parte da frente de onda que está em menores profundidades. Desta forma, este deslocamento permite que a frente de onda tenha uma tendência de se alinhar paralelamente às curvas batimétricas. Essa mudança de rumo pela refração da onda pode ser assinalada pela curvatura das ortogonais, que são linhas imaginárias perpendiculares às cristas da onda e estendem-se no rumo em que a onda avança.

Além da mudança do rumo de propagação, a refração tem uma grande importância na distribuição da energia ao longo da costa, pois causa variações da altura da onda na mesma frente de onda, concentrando ou divergindo energia, já que a distância entre suas ortogonais varia, enquanto a energia entre elas permanece a mesma.

Isto ocorre com frequência em praias de enseadas, que usualmente devem sua existência à presença de promontórios ou costões em suas extremidades e sua forma depende da orientação da linha de costa em relação à direção das tempestades. Nestas praias as ortogonais tendem a convergir nos promontórios, indicando concentração de energia e, conseqüentemente, maiores alturas de ondas. No embaçamento entre os promontórios ocorre o oposto (Figura 3a).

A difração é o fenômeno tridimensional devido a uma atenuação da agitação com a presença de algum obstáculo. Este obstáculo é responsável por uma propagação radial da onda na zona de sombra gerada pelo obstáculo, com mesmo período e fase da onda incidente. A energia é transferida ao longo das frentes das ondas transversalmente às ortogonais, com celeridade igual à da onda; à medida que se procede ao longo dos arcos das frentes de ondas na zona de sombra, a energia diminui (Figura 3b).

Figura 3: Refração de ondas; a) ondas aproximando-se paralelamente à costa. Convergência de raios indicada onde $b < b_0$ e divergência onde $b > b_0$; b) Ondas aproximando-se obliquamente à costa e a difração ocorrendo tardoz do obstáculo (modificado de Woodroffe, 2002).

Outro fenômeno conhecido que ocorre próximo à costa é a arrebentação da onda, normalmente associada à desagregação da sua estrutura e ao aparecimento muito rápido de uma forte turbulência. Próximo à costa, com a diminuição da profundidade, a onda perde sua estabilidade, quando seu comprimento diminui e, ao mesmo tempo em que a altura aumenta o que leva a uma redução da celeridade e a um aumento da velocidade orbital horizontal, tornando a onda cada vez mais esbelta, até que ela arrebenta (quebra).

A forma como a onda arrebenta varia conforme as diferentes declividades da praia e os diferentes tipos ondas (vagas ou ondulações), podendo a quebra ser do tipo progressiva (deslizante), mergulhante (em voluta), colapsante (sem quebra em voluta), ou simplesmente quando a onda desliza praia acima. As características das ondas próximas à costa e suas interações com a topografia da praia podem controlar a forma da praia, tanto em planta como em perfil.

As praias ao longo de embaiaimentos na costa demonstram uma forma em planta de geometria regular assimétrica, normalmente com formas de meia-lua, ou em gancho, com uma acentuada curvatura na zona de sombra atrás dos promontórios, que diminui no centro do embaimento e é relativamente retilínea costa abaixo (Figura 4). As características de geometria regular das praias de enseadas implicam que exista um equilíbrio da forma em planta nestas praias, e esta forma pode ser aproximada, por exemplo, à curvatura parabólica (Hsu *et al.*, 1989), porém, esta relação geométrica é irrealista na prática.

A forma em planta da linha de costa em larga escala tende a se aproximar do equilíbrio com a direção de aproximação das ondas, que é transformada como resultado da refração. Quando as ondas se aproximam mais paralelas à costa, não movem sedimentos ao longo da costa; já com uma aproximação com um ângulo perto de 45° , causa uma movimentação máxima nas taxas de transporte longitudinal. Quando um embaimento não está em equilíbrio, cria-se um gradiente de força litorânea, que originará a movimentação dos sedimentos e remodelação da linha de costa, até um instante de tempo em que estas mudanças levam a um equilíbrio. A partir do momento em que o embaimento está em equilíbrio, o gradiente longitudinal entre a onda e as taxas de transporte é zero (Figura 4).

Figura 4: Esquema da forma em planta de praias de enseadas e o conceito de gradiente de força litorânea (modificado de Woodroffe, 2002).

Já o sistema de praia em perfil é desenvolvido com as variações das condições das ondas e nível da água, que influenciam no transporte de sedimento através da costa. O perfil inicial da praia altera-se até atingir um estágio de equilíbrio, no qual o perfil fica inalterado, quando constituído de um material não-coesivo. O perfil transversal de um litoral pode ser subdividido num certo número de zonas características, cuja importância está ligada aos efeitos que sobre elas são determinadas pela ação das correntes marítimas e do movimento das ondas (Figura 5).

Figura 5: Praia em perfil: perfil de uma praia de micromaré dominada por onda, com generalizadas distribuições de dominâncias através da praia, baseada em Masselink e Turner (1999), (modificado de Woodroffe, 2002).

Existem alguns conceitos para tentar estabelecer as formas dos perfis em praias, como o conceito proposto por Dean (1991), que envolve um perfil de equilíbrio da praia, influenciado pela energia dissipada das ondas e a característica do sedimento existente ao longo do perfil.

O conceito de perfil de equilíbrio proposto por Dean é baseado no princípio da conservação de massa, que é vastamente adotada para prever as respostas de praias arenosas em função do aumento do nível do mar (Brunn, 1954), entretanto, seu conceito simplificado certas implica limitações.

Embora as praias em planta e perfil pareçam ajustar-se em equilíbrio, em termos de 2 (duas) dimensões (2D) de morfologia da praia, está claro que os ajustes das praias envolvem ambos os processos de transporte de areias, ao longo e através da costa, e o desenvolvimento de topografias rítmicas ao longo da praia é um indicador de significantes movimentos de areia em três dimensões (3D). Os estabelecimentos próximos à costa das correntes de retorno, longitudinais e de fundo, reforçam o conceito da morfologia de praias em três dimensões, (Figura 6). Esta morfologia de praias em três dimensões é típica em praias do tipo intermediárias, que representam o conceito de continuidade existente entre praias dissipativas e refletivas. Alguns índices para definir o tipo de praia, em termos de energia da onda, podem ser usados (Wright e Short, 1984). Os movimentos da massa de água induzidos pelas ondas, combinados com outros físicos e metrológicos, geram padrões de circulação complexos nas zonas litorâneas de pequena profundidade.

A dissipação progressiva da energia das ondas na zona de surfe leva à elevação do nível médio da superfície da água acima do nível de água do mar em repouso (*set-up*). Este fato ocorre devido ao gradiente de pressão ou força que balança as componentes de tensões radiais (excesso de fluxo de momento), em função da presença das ondas, podendo existir no sentido entre a praia e o mar (xx), ao longo da costa (yy) e em direções oblíquas (xy) (Lounquet – Higgins, 1970). Na zona de surfe diminui a tensão de radiação e o nível da água é aumentado (*set-up*) (Woodrofe, 2002).

Em praias arenosas as ondas normalmente induzem à geração das correntes litorâneas, com direções paralelas ou ortogonais à linha de costa e.

desta forma, dois casos podem ser considerados: o ataque frontal e o ataque oblíquo de ondas.

O primeiro caso (ataque frontal) ocorre quando a onda arrebenta e uma massa fluida é injetada na zona de arrebentação, formando uma onda de translação, com determinada energia e quantidade de movimento. Assim, as cristas das ondas paralelas à linha de costa atravessam a zona de arrebentação e tendem a acumular-se junto à costa. Deste modo, cria-se uma carga, que produzirá o retorno da água para o largo, mantendo-se, em média, o equilíbrio entre os volumes que passam num e noutro sentido. O retorno da água pode ocorrer sob forma de correntes de retorno nas zonas de baixas alturas de ondas e menor nível de água do mar (*set-up*), ou sob a forma de um retorno de fundo (imediato), uniformemente distribuído ao longo da linha de arrebentação (Figura 6a, b e c).

O segundo caso é o padrão de circulação gerado em função da quebra da onda com certo ângulo em relação à linha de costa, produzindo correntes longitudinais, em função das tensões de radiação oblíqua (S_{xy}), e um máximo transporte ocorre onde a onda se aproxima com um ângulo próximo a 45° (Carter, 1988). As correntes longitudinais desenvolvem-se paralelamente à costa, limitada na zona de arrebentação, com valores médios de 0.3 m/s, que, embora sejam de baixa velocidade, são importantes para o transporte litorâneo do conjunto de sedimentos mobilizados pela arrebentação das ondas, devido ao seu prolongado período de atuação. Paralelamente à costa, pode ocorrer duas componentes longitudinais, uma adjacente à praia, em que o movimento em dente de serra do fluido produz um significativo transporte resultante em ondas de borda, e as correntes longitudinais particularmente na arrebentação, com grandes quantidades de sedimentos em suspensão (Figura 6d e e).

Figura 6: a) Cúspides praiais; b) desenvolvimento de uma onda de borda estacionária ao longo da costa; c) relação das correntes de retorno com as ondas de borda; d) correntes longitudinais, quando as ondas se aproximam obliquamente à costa como resultante de ondas de borda; e) correntes longitudinais, quando as ondas se aproximam obliquamente à costa (modificado de Komar, 1997).

A questão do movimento dos sedimentos marinhos é resultante de dois processos de movimento do fluido, o induzido pelas ondas que iniciam o movimento sedimentar, e o induzido pelas correntes que transportam o sedimento. Estes dois movimentos sedimentares fundamentais são muito diferentes nas suas características e consequências.

O primeiro é o transporte que se processa transversalmente às batimétricas (mar-costa), responsável pelas alterações em perfil da praia como resultado da ação das ondas em ataque frontal, com o perfil se adaptando às condições climáticas existentes. Apesar de que grandes quantidades de areias possam ser movimentadas, a resultante anual é praticamente nula e a praia oscila entre condições de alta a baixa energia de onda.

O segundo tipo, o deslocamento longitudinal dos sedimentos, paralelamente à costa, é devido fundamentalmente à arrebentação oblíqua das ondas. Este transporte considera duas zonas distintas, uma na zona de arrebentação até a linha de costa, sendo esta corrente longitudinal o principal agente transportador. A outra é na zona de espraimento, onde as partículas fazem um movimento em ziguezague, resultante de uma subida oblíqua na direção de propagação das ondas e uma descida numa linha da maior declividade da praia.

A dinâmica do movimento dos sedimentos costeiros gera complexos mecanismos, que contribuem para a formação de feições costeiras, ao longo de uma praia, como, por exemplo, a formação de cúspides e barras (bancos).

As cúspides praias são feições crescentes rítmicas, formadas basicamente pela ação do espraimento (*swash*) e pela retroalimentação positiva (Figura 6 a e b), mas existe desacordo de como eles se formam através dos diferentes processos (Komar, 1997).

Já as barras correspondem a feições batimétricas rítmicas, devido às variações longitudinais na ocorrência das alturas da onda, associadas com a presença de células de circulação com topografias rítmicas. São formações de grande escala e suas evoluções influenciam, em longo prazo, as áreas costeiras, pois alteram as condições de aproximação das ondas junto à costa. A resposta para variações na topografia da zona de surfe pode formar diferentes formas de barras ao longo da costa, uma barra crescente, uma barra unida à costa ou, em outras situações, barras transversas ou oblíquas à costa (Ruessink *et al.*, 2000), (Figura 7).

Figura 7: Formas rítmicas em praias, cúspides e diferentes tipos de barras.

São muitos os fatores que controlam o comportamento dos processos costeiros e a sedimentação em praias de enseada, o que torna difícil uma compreensão simplificada da evolução deste ambiente costeiro. Os estudos já realizados apontam para uma lacuna no entendimento destes processos, e desta forma, quanto menor o entendimento e a capacidade de explicar os processos costeiros, menor será o acerto no prognóstico da evolução deste terreno, que atualmente é realizado apenas de maneira aproximada.

A Praia de Massaguaçu, localizada no Município de Caraguatatuba, litoral norte do Estado de São Paulo, vem ao longo dos últimos anos sofrendo um acentuado processo erosivo, especialmente na sua porção central, e suas causas ainda não estão bem claras. Neste local, a faixa da praia emersa foi bem reduzida e o processo erosivo já atinge o aterro da via expressa (SP 55), que liga o litoral norte paulista e o litoral sul fluminense. Este processo vem aumentando o conflito do homem com a natureza nessa região, gerando prejuízos e aumentando os riscos costeiros.

Segundo Kerwin (1997), os processos erosivos não ocorrem na mesma taxa ao longo da área em que estes processos são observados. McNisch (2004) afirma que tais áreas de erosão anômala, classicamente, apresentam extensão de vários quilômetros e podem permanecer por décadas. As áreas na qual se observavam taxas de erosão superiores ao dobro da taxa regional de erosão da linha de costa podem ser chamadas de “Zonas de Erosão Acentuada” (ZEA), ou em inglês “*Erosional Hot Spots*” (EHS) (Finkl, 1996).

O presente trabalho visa entender a dinâmica sedimentar das zonas de erosão acentuada (ZEAs), ao longo do arco praial de Massaguaçu, através do uso de modelagem numérica, integrada a análises do clima marítimo na região, padrões sedimentológicos e de imagens da superfície de fundo.

1.1. Principais contribuições científicas ou tecnológicas relacionados ao Estado da Arte

Atualmente, na costa brasileira, estudos integrados dos processos litorâneos envolvidos na formação e manutenção das Zonas de Erosão Acentuada (ZEA) são escassos e, por este motivo, o presente trabalho procura avançar no conhecimento existente sobre ZEA na costa de São Paulo. A enseada de Massaguaçu apresenta-se como um excelente laboratório para a compreensão da influência dos fatores, que, isoladamente ou em conjunto, estão ocasionando as ZEAs observadas nesta praia no decorrer da última década.

Para entender a problemática costeira, é indispensável conhecer, com relativa precisão, o modo e a intensidade com que se processa a movimentação das areias responsáveis pela geração e manutenção de zonas de erosão acentuada (ZEA) em praias de enseada. Isto pode ser feito examinando a dinâmica sedimentar resultante dos processos combinados, que operam a hidrodinâmica de ondas e correntes, e transporte de sedimentos em Massaguaçu, e assim identificar:

- Quais são as condições do transporte de sedimentos litorâneos locais?
- Qual a tendência de migração da costa, a curto e médio prazo?
- Qual a distância para o largo em que a areia está sendo ativamente movimentada?

Para levar adiante este estudo, foi necessário definir metodologias e ferramentas numéricas que permitissem desenvolver uma atividade no âmbito costeiro, levando em conta os processos costeiros determinantes nas formações das ZEAs na Praia de Massaguaçu.

A aplicação de modelagem numérica é uma importante ferramenta para complementar os dados medidos, e os resultados modelados ajudam a preencher espacial e temporalmente as lacunas dos dados medidos em campo (Siegle, 2003).

O Sistema de Modelado Costeiro (SMC) usado neste estudo propõe ser um programa de metodologias e ferramentas numéricas, que, em conjunto, ajudam na gestão do litoral, pois permitem examinar com precisão a dinâmica dos sistemas costeiros e desenvolver, com confiabilidade, estratégias de atuações necessárias na costa, a “Regeneração de Praias” (p.ex.: obras de proteção costeira). Este modelo foi desenvolvido na Espanha pelo Grupo de Engenharia Oceanográfica (G.I.O.C.) da Universidade de Cantábria (UC), em conjunto com a Direção Geral de Costas do Ministério do Meio Ambiente (MMA), dentro do projeto de investigação: “Modelo de Ajuda á Gestão do Litoral”.

Os resultados obtidos com este estudo podem ajudar a conhecer quais os processos costeiros, que, em curto e em médio prazo de tempo, operam na formação e manutenção das Zonas de Erosão Acentuada (ZEAs) em praias. Isto permitirá a escolha da solução mais adequada e segura para se evitar ou resolver com maior eficácia os problemas resultantes da ruptura do equilíbrio dinâmico existente anteriormente em algumas praias, além de uma gestão ambiental integrada, através do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro no Brasil, em especial na área de Análise de Riscos Costeiros.

2. Objetivos

2.1. Geral

O objetivo deste trabalho é descrever e entender a dinâmica sedimentar e a evolução morfológica da atual linha de costa, assim como os processos de formação de Zonas de Erosão Acentuada (ZEAs), ao longo do arco praial de Massaguaçu – São Paulo.

2.2 Específicos

- Aplicar o modelo numérico SWAN_SMC com o uso de três módulos (onda, corrente e transporte) na área de interesse.
- Entender as forçantes que controlam a dinâmica sedimentar envolvida nas Zonas de Erosão Acentuada (ZEAs), ao longo do arco praial de Massaguaçu.
- Caracterizar a distribuição dos sedimentos da área submersa e mapear as morfologias de fundo.

3. Descrição da área de estudo

O arco praial de Massaguaçu, em Caraguatatuba, São Paulo (SP) é uma praia de enseada, caracterizada por possuir uma face arenosa com certa curvatura entre os promontórios rochosos existentes em suas extremidades (Figura 8). Apresenta uma extensão de aproximadamente 12 km entre as extremidades do Capricórnio até a Tabatinga, e de 7,5km na praia conhecida como Massaguaçu, entre as praias do Capricórnio e da Cocanha. O arco praial de Massaguaçu está situado em uma pequena planície costeira, localizada ao norte da Baía de Caraguatatuba e da Ilha e do Canal de São Sebastião, no estado de São Paulo, entre as coordenadas: $-45^{\circ}21'28''/-23^{\circ}34'13''$ e $-45^{\circ}17'35''/-23^{\circ}37'22''$, (*Datum* SAD-69). Esta planície costeira possui baixa densidade de drenagem de padrão meandrante e é recoberta por sedimentos holocênicos, flúvio-lagunares e coluviais.

A Figura 8 indica os sete setores assumidos para este trabalho ao longo do sistema costeiro de Massaguaçu conhecidos como, Capricórnio, Massaguaçu (sul), Massaguaçu (centro), Massaguaçu (norte), Cocanha, Mococa e Tabatinga. No segmento centro – norte entre Massaguaçu (centro) e Massaguaçu (norte) é o local aonde vêm sendo observadas as zonas de erosão acentuada (ZEAs).

Entre a Cocanha e a Tabatinga, ocorre a zona de sombra formada pela Ilha do Tamanduá e as Ilhotas da Cocanha, que diminuí a incidência de ondas neste local.

A praia é cortada pelo rio Massaguaçu no Capricórnio e rio Cocanha na Cocanha e ambos apresentam baixa drenagem continental. Segundo Modenesi *et al.*, (1983), na extremidade sul da praia ocorre um esporão arenoso, que fecha a desembocadura do Rio Massaguaçu, podendo este esporão romper-se em curto período de tempo. Ao norte da praia da Cocanha, é suposto que as praias da Mococa e de Tabatinga possam fazer parte deste sistema praial, com troca de sedimentos entre estas praias.

Figura 8: Localização da área de estudo: a) Brasil; b) Estado de São Paulo; c) Baía de Caraguatatuba; d) Arco Praia de Massaguaçu.

A região é caracterizada por uma dinâmica sedimentar coordenada por correntes litorâneas, geradas pela incidência de ondas providas do oceano aberto. De acordo com Martins (2006), a circulação atmosférica e a caracterização meteorológica no Brasil Meridional estão relacionadas com a alternância de duas massas de ar, ambas de origem marítima, sendo uma polar e outra tropical. A alternância sazonal destas massas de ar é controlada pela interação entre o Anticiclone Polar Migratório Atlântico (APM), antecedido pelas frentes frias e que origina ondas provenientes do quadrante SE-S-SW, e

o Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), que gera ventos contínuos para o continente e origina as ondas provenientes do quadrante NE-E.

Estas condições controlam o clima de ondas ao longo do litoral paulista, onde as predominantes e de maior energia são originárias da direção sudeste (SE), seguidas pelas ondas de sul (S) e sudoeste (SW), de maiores energias de onda. As menos frequentes e de menor energia são as ondas da direção este (E) e nordeste (NE) (Tessler, 1988; Martins, 2006).

O arco praial de Massaguaçu é um sistema praial exposto a ondas, voltado para sul-sudeste (S/SE), constituída de sedimentos grossos a finos. A influência das ondas provenientes de (sul) S e sul-sudeste (SSE) dentro da enseada é pequena, devido à difração gerada pela ilha de São Sebastião, localizada ao sul desta enseada. Já as ondas de sudeste (SE) e este (E) incidem diretamente nos setores ao sul e ao centro deste arco praial. Mais ao norte, a praia da Cocanha está situada em uma zona de sombra desta enseada (Souza, 1990).

A morfologia do arco praial de Massaguaçu apresenta características morfológicas distintas entre as porções localizadas ao norte e ao sul desta praia (Souza, 1990). No perfil mais ao norte da área, a largura média da praia medida foi de 32m, ao centro foi de 17m e ao sul, de 20m. A inclinação praial média obtida foi de 7° ao norte, 10° na porção central da praia e 7° na porção ao sul.

A caracterização sedimentológica, ao longo desta praia é constituída predominantemente de areias médias a grossas, moderadamente selecionadas. Junto à desembocadura do rio Massaguaçu, os sedimentos são extremamente grossos e, no perfil norte, embora haja sempre o predomínio da classe areia média (> 50%), a segunda classe mais frequente passa de areia grossa a fina, aparecendo também a classe areia muito fina (Souza 1990).

3.1. Comportamentos da área emersa do arco praial de Massaguaçu ao longo dos últimos anos

Para um melhor entendimento do comportamento dos processos que vêm contribuindo para a erosão acentuada em alguns pontos na praia de Massaguaçu, o presente trabalho, com foco na porção submersa da praia de Massaguaçu, foi complementado com estudos, que caracterizaram a parte emersa deste segmento de praia, realizados por Nuber (2008).

O estudo da variação da posição da linha de costa, ao longo dos anos, do arco praial de Massaguaçu (Figura 9), indica que, em 2006, quase toda a linha de costa ao longo do arco praial de Massaguaçu estava progradada (em direção ao mar), em relação ao ano de 1962. As regiões com os maiores valores de progradação da linha de costa concentram-se nas extremidades desta praia (linhas de controle 1 a 31 e 46 a 72). Já a região que, em 2006, apresentava retração em relação a 1962, encontra-se ao centro da enseada, entre os pontos de controle 32 a 49. Aparentemente, os sedimentos erodidos da região central do arco praial vêm se depositando em direção às extremidades desta praia.

Figura 9: Variação da posição da linha de costa (m) ao longo do arco praial de Massaguaçu observada entre os anos de 1962 a 2006 (Nuber 2008).

A taxa de variação da linha de costa observada para o período de 1962 até 2006 determinou como Zona de Erosão Acentuada (ZEA), os locais com taxas de retração a partir de -2 m/ano. Dessa forma, foram identificadas duas ZEAs, uma entre as linhas de controle 36 e 37, e a outra na linha 41, próximo da porção central-norte do arco praial. As outras linhas de controle nesta região mostraram taxas de retração próximas à média observada para o período. Estas estimativas de identificação dessas ZEAs, na região central do arco praial de Massaguaçu, não são precisas, devido às intervenções ocasionadas pela ação humana na linha de costa (Figura 10).

Figura 10: Taxa de variação (m/ano) de 1962 a 2006 com valor mínimo, para se definir como uma Zona de Erosão Acentuada (ZEA) (Nuber 2008).

A estabilização da linha de costa, através da pavimentação da BR-101, da construção de um enrocamento para defesa da praia e, ainda, construções de casas próximas à costa, podem ter mascarado as taxas de erosão observadas.

Durante o período de novembro de 2006 a março de 2008, foram monitorados 36 perfis bidimensionais, para observação dos valores totais de variação de volume e largura da praia (Figura 11a e b). Praticamente metade dos perfis apresentou perda de volume de sedimentos e diminuição da largura da praia, sendo estas variações mais intensas na região centro-norte do arco praial de Massaguaçu. Na praia do Capricórnio ao sul (perfis 1 a 10) e na praia da Cocanha ao norte (perfis 34 a 36), ocorreram os maiores ganhos de volumes de sedimentos e aumento da largura da praia. As variações totais de largura da praia apresentam comportamento semelhante ao observado nas variações totais de volume, com algumas exceções entre os perfis 10 a 16.

Figura 11: a) Variação total do volume (m^3/m) entre os meses de novembro de 2006 e março de 2008; b) Variação total da largura (m) entre os meses de novembro de 2006 e março de 2008 (Nuber 2008).

De acordo com a definição para ZEA de McNish (2004), foi reconhecida a ocorrência de cinco possíveis ZEAs (Figura 12), sendo que três delas encontram-se nos perfis 19 (ZEA 1), 23 (ZEA 2) e 26 (ZEA 3), concomitantes com a área identificada como uma ZEA, através da análise da linha de costa de diferentes anos. As outras duas ZEAs observadas ao sul da saliência da praia da Cocanha, nos perfis 29 (ZEAT 1) e 33 (ZEAT 2), podem ser definidas como uma Zona de Erosão Acentuada Reversível, gerada por Tempestade (ZEAT), de acordo com as observações de List et al. (2006).

Figura 12: Variações percentuais de volume (%) observadas entre novembro de 2006 e março de 2008 (Nuber 2008).

Estes resultados permitem evidenciar que, durante eventos de tempestade, ocorre o transporte de sedimentos da região central para a praia do Capricórnio e/ou a praia da Cocanha. Assim, os processos erosivos e a retração da linha de costa concentram-se na região central e, ao norte e ao sul, a praia está estável ou em progradação. A grande variabilidade espaço-temporal da morfologia, ao longo do arco praial de Massaguaçu, indica a ocorrência de processos de transporte de sedimentos através e ao longo da costa.

Na caracterização sedimentológica da face emersa ao longo do arco praial de Massaguaçu, pode-se observar variações granulométricas, ocorrendo um ligeiro decréscimo no tamanho dos grãos de sul para norte (Figura 13). Dos pontos de coleta 01 a 15, foi caracterizada por um decréscimo gradual do tamanho médio do grão, passando de valores de 0,70 mm para valores próximos a 0,55 mm. Entre os pontos 15 e 32, foram observados valores médios intercalados de areia média a grossa, e as posições de 33 a 36 foi caracterizada por uma rápida diminuição no tamanho médio dos grãos, com o predomínio de areia média, e aumentam gradativamente as porcentagens das classes areia fina e muito fina.

Os valores de tamanho médio de grãos mostraram clara tendência de diminuição, a partir da praia do Capricórnio ao sul, em direção à praia da Cocanha, ao norte. Isto sugere um gradiente de energia de onda decrescente em direção à praia da Cocanha, onde a areia fina é depositada.

Figura 13: Variação média do tamanho médio de grão (mm) na face emersa ao longo do arco praial de Massaguaçu (Nuber 2008).

Através da análise da variação espaço-temporal na distribuição dos sedimentos superficiais da face da praia, pode-se observar uma variação dos valores de tamanho médio do grão, ao longo do período monitorado de novembro de 2006 a março de 2008, que indicou um aumento do percentual de areia média na porção central do arco praial de Massaguaçu, em alguns meses. Isto pode indicar um fluxo de transporte de sedimento de norte para sul nesta praia.

Cabe ressaltar que este trabalho apresentou limitações a serem consideradas, como a incapacidade de se calcular o erro da análise das variações da posição da linha de costa e a dificuldade encontrada em sua validação. O monitoramento da morfologia praial é limitado, por se tratar apenas do monitoramento da parte emersa da praia, o que dificultou a explicação das variações observadas, normalmente associadas aos processos costeiros de ondas e correntes atuantes na porção submersa da praia.

3.2. Observações em campo e valores da praia de Massaguaçu

O arco praial de Massaguaçu é um sistema praial com características morfodinâmicas de praias refletivas expostas, com predominância de arrebentação ascendente e frontal, porém, em eventos de aumento de energia de onda, a zona de surfe pode adquirir características de praia do tipo intermediário, apresentando tipos de arrebentação frontal, mergulhante e deslizante, sobre os bancos submersos formados (Figura 14a e b).

Ficou claro que as ondas podem quebrar em seções (Figura 14b). Ela mostra a quebra antes e depois ao norte, indicando que os processos de quebra de onda começam atrasados, e isso contribui para os processos de transporte de sedimentos, através e ao longo da costa. Isto mostra as ondas chegando obliquamente à praia, estas ondas não quebram simultaneamente ao longo de toda crista da onda, induzindo correntes e, consequentemente, transportes longitudinais em alguma direção.

Figura 14: a) Tipos de arrebentação durante eventos de baixa e moderada; b) a alta energia de onda.

Durante eventos de tempestades, além de processos de espraiamento (*swash*), ocorrem consideráveis processos de ascenso da onda (*wave run-up*) (Figura 15a) e, em alguns casos, ao norte do arco praial (Cocanha) chegam a ocorrer leques de sobrelavagem (Figura 15b), ao norte sobre a pós-praia, e ao sul, sobre a barra arenosa.

Figura 15: a) Processos de ascenso da onda (*wave run-up*); b) Leques de sobrelavagem; ao norte do arco praial (Cocanha).

As características da quebra de ondas e circulação das correntes formam muitas feições rítmicas ao longo da praia, como cúspides (Figure 16a), megacúspides, escarpas e bermas (Figure 16b).

Figura 16: Caracterização das feições rítmicas observadas na face emersa; a) cúspides; b) megacúspides (1), escarpas (2) e bermas (3).

A partir de 1994, a erosão ficou mais evidente na porção central de Massaguaçu, e algumas obras de retenção foram realizadas, porém seus resultados não foram efetivos no controle da erosão. Atualmente, nesta área a faixa de areia é restrita, especialmente bem ao centro de Massaguaçu próximo ao Hotel Brisa (Figure 17a) e um pouco mais ao norte, onde a SP-55 (Figura 17b) está construída bem próxima à atual linha de costa. Muitos desses processos, ligados a grandes variações da posição da linha de costa ao longo do arco praial de Massaguaçu, são bom exemplo de como a largura da praia pode afetar os valores das propriedades costeiras (casas, hotéis e restaurantes). Se a praia for estreita, ela ficará mais exposta à ação das ondas e altos níveis de água, o que diminui a segurança e, assim, perde seu valor, que antes era alta, devido a sua posição distinta.

Figura 17: Acentuado processo erosivo no segmento centro – norte do arco praial de Massaguaçu; a) Hotel Brisa; b) Rodovia SP-55.

Algumas tentativas de mitigar esses problemas foram realizadas ao longo dos últimos anos, mas não foram suficientes para conter a erosão ao centro de Massaguaçu (Figura 18). Assim, alguma medida mais efetiva, para mitigar o problema atual da erosão da linha de costa em Massaguaçu, deve ser realizada, como, por exemplo, o engordamento da praia, ou mesmo o recuo da BR-101, em direção ao continente.

Figura 18: Tentativas realizadas para mitigar os problemas de erosão ao longo dos últimos anos.

Em Massaguaçu, ocorrem os dois extremos. A intensificação dos processos erosivos, na porção centro-norte do arco praial, vem trazendo riscos e danos às construções feitas junto à orla, como, por exemplo, a SP-55, sendo esta porção da praia a que vem sofrendo os maiores problemas e prejuízos, em decorrência da retração da linha de costa nesta área. Porém, nos extremos na praia do Capricórnio e na praia da Cocanha, onde ocorreu um aumento da praia, os imóveis têm sido valorizados.

Ao norte e ao sul do arco praial de Massaguaçu, a face emersa da praia vem aumentando e, ao invés de prejuízos para os estabelecimentos existentes nestes locais, estes vêm se valorizando, devida à sua posição distinta (Figura 19a e b).

Figura 19: a) Restaurante ao norte do arco praial de Massaguaçu na praia de Massaguaçu; b) Praia do Capricórnio ao sul do arco praial de Massaguaçu; propriedades diretamente afetadas pela largura da face emersa da praia.

4. Material e Métodos

4.1. Coletas de dados

Para a coleta dos dados necessários a este estudo, foram realizadas campanhas em campo com diferentes finalidades, além do levantamento de dados de batimetria da área de estudo, por meio de cartas náuticas digitalizadas e folhas de bordo e de dados de previsão do clima de ondas por meio de modelos de retroanálise.

Para o levantamento da batimetria de detalhe e das imagens de sonar de varredura lateral (*side scan sonar*), foram realizadas duas campanhas de investigação da área submersa na enseada de Massaguaçu.

A primeira campanha (Campo 1) foi realizada no dia 27 de novembro de 2008, para o levantamento de dados de batimetria de detalhe próximo à costa e de imagens de sonar de varredura lateral (Figura 20). Para o levantamento batimétrico foi utilizado o ecobatímetro digital da SyQwest, modelo *Oceandata Bathy – 500MF*, operado na frequência de 200 kHz com taxa de aquisição a cada segundo. Para o levantamento de imagens de fundo foi utilizado o sonar varredura lateral modelo *Marine Sonic Technology*, operado com um transdutor de 300 kHz e abertura de feixe de 75 metros. O georreferenciamento foi realizado com um GPS diferencial da *Marine Leica*, modelo *MX 412*.

A segunda campanha (Campo 2) foi realizada no dia 08 de agosto de 2009, para o levantamento de dados de batimetria de detalhe e de imagens de sonar de varredura lateral (Figura 20). Para o levantamento dos dados batimétricos foi utilizado ecobatímetro da *Kongsberg-Simrad*, modelo EA-400 operado em dupla frequência (38-200 kHz) com taxa de aquisição a cada segundo. Para o levantamento de imagens de sonar foi utilizado o sonar modelo *KLEIN-3000* que opera simultaneamente tanto a baixa frequência (100kHz), como a alta frequência (500 kHz). A abertura de feixe utilizada foi de 50 e 75 metros. O georreferenciamento foi realizado com um GPS diferencial da *NovAtel*, modelo GTR-G², com correção diferencial em tempo real pela *Omnistar*.

O programa *Hypack* foi utilizado como software de navegação, enquanto os levantamentos foram feitos com os softwares do próprio fabricante dos equipamentos.

No presente trabalho, os dados de batimetria constituem-se de base para a modelagem numérica, enquanto as imagens de sonar auxiliaram no planejamento da malha amostral da coleta de sedimentos na superfície da área submersa e complementaram a análise da dinâmica marinha no arco praial de Massaguaçu realizada com a modelagem numérica.

Figura 20: Levantamentos de batimetria de detalhe e de sonar de varredura realizados em duas campanhas: Campo 1 no dia 27/11/2008 e Campo 2 no dia 08/08/2009.

No dia 8 de abril de 2009, foi realizada uma campanha em campo para instalação de estrutura de fundeio (Figura 21), com um ondógrafo direcional, modelo *Valeport 730D* (Figura 22), colocado próximo à isóbata de 8 metros, e um correntógrafo (*Aanderaa*), fixado em uma profundidade de coluna da água de 3 a 4 metros.

Figura 21: Diagrama do fundeio instalado na enseada de Massaguaçu.

Figura 22: Instrumento utilizado na coleta de dados de ondas fixado na estrutura do fundeio: a) estrutura de fixação do ondógrafo; b) ondógrafo 730D (Valeport).

A estrutura do fundeio foi instalada bem ao centro da Praia de Massaguaçu, na coordenada de latitude $23^{\circ}36'10''$ S e longitude $45^{\circ}19'49''$ W, ou na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) *datum* SAD69 Y: 7389755 e X: 466344 (Figura 23). Este local foi escolhido depois de um período experimental de quase um mês, quando foram avaliados positivamente o comportamento da estrutura do fundeio e a condição dos instrumentos após esse período. Porém, durante o fundeio definitivo para aquisição de dados do clima de ondas, a estrutura do fundeio foi soterrada, decorrido um período de 16 dias (dia 23 de abril de 2009), após uma grande tempestade (“ressaca”) ter atingido o litoral de São Paulo. Portanto, a série temporal de onda disponível para sustentar os resultados gerados pela simulação computacional foi de apenas 16 dias. Nessa coleta, foram obtidas as medições de dados de ondas,

como a altura significativa, o período médio e a direção, registrados em intervalos de 80 minutos, com taxa de amostragem de 512 segundos de duração, e também medições de marés, registradas em intervalos de 20 minutos, com taxa de amostragem de 20 segundos de duração.

Figura 23: Localização do fundeio da estrutura do ondógrafo e do correntômetro.

No dia 22 de setembro de 2009, foi realizada uma campanha em campo, para a coleta de sedimentos de superfície de fundo na porção submersa do arco praial de Massaguaçu. A malha amostral para a coleta de sedimento de superfície de fundo foi planejada a partir de um levantamento batimétrico e sonográfico. Foram definidos 81 pontos de coleta, entre a linha de arrebenção das ondas (2 a 3 metros) e a profundidade de 8 metros (Figura 24), sendo que, para as coletas, foi utilizado um amostrador do tipo *Van Veen*, modificado, de 3 (três) litros. O interesse desta coleta foi o de caracterizar a distribuição sedimentológica da área submersa, ao longo do arco praial de Massaguaçu, e assim auxiliar no entendimento da dinâmica sedimentar e também identificar os locais com potenciais de empréstimo de sedimentos para o caso de um possível projeto de engordamento da praia de Massaguaçu.

Figura 24: Localização dos pontos de coleta de sedimentos realizada no dia 22 de setembro de 2009.

4.2. Processamentos dos dados

4.2.1. Batimetria da área

A malha de dados batimétricos usados para a modelagem numérica foi obtida através de cartas náuticas e folhas de bordos da DHN georreferenciadas e digitalizadas e por meio das medições em campo. A malha de batimetria digitalizada abrange, desde pontos em águas rasas, até águas profundas, incluindo todas as feições que interferem na propagação das ondas na zona de estudo, e está compreendida entre o litoral sul de São Paulo, a partir de Iguape, até o litoral norte deste estado, próximo a Ubatuba (Figura 25).

Figura 25: Malha geral dos dados batimétricos com pontos em área emersa e submersa e exemplo das isóbatas interpoladas para a modelagem com o SWAN.

Além dos pontos de batimetria extraídos das cartas náuticas, foram obtidos dados batimétricos de detalhe, através de medições realizadas em dois levantamentos em campo (Figura 20). A finalidade desses levantamentos foi o de obter uma batimetria de detalhe da área próximo à praia e, assim, melhorar

as condições de contorno dos modelos de propagação de ondas próximo à área emersa do perfil praial, onde existe uma carência de dados oriundos das cartas náuticas.

Antes da criação do arquivo de batimetria para propagar os casos de ondas, primeiramente foi realizada a correção dos dados batimétricos medidos nas duas campanhas. Nesta correção, foram feitos os seguintes procedimentos:

1. Exclusão dos dados espúrios;
2. Redução dos níveis de maré baseada no banco de dados da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para o porto de São Sebastião de acordo com o dia e a hora das coletas. Os dados foram referenciados a esta base, pois é a mesma das cartas náuticas digitalizadas da DHN utilizadas neste estudo.
3. Os dados corrigidos foram salvos em formato .xyz.
4. Os dados digitalizados da carta náutica de Massaguaçu do ano de 1981 (DHN), na área adjacente à praia foram excluídos. Neste local, optou-se por manter apenas os dados mais recentes medidos em campo.

Na etapa seguinte, foram melhorados os contornos dos elementos geomorfológicos singulares (costões, laje e ilhas), através do programa Global Mapper 11.0, para que a batimetria da interface terra-água fosse representada da forma mais realista possível e não comprometesse os modelos de propagação.

Finalmente, com a batimetria processada, foram realizados alguns ajustes no formato do arquivo de batimetria para aplicação do modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), o qual requer que a informação batimétrica seja inserida na forma de uma matriz. Para isto, foi necessário realizar dois passos, através do programa *Surfer 8*:

1. Interpolar linearmente o arquivo com extensão .xyz com pontos equidistantes de espaçamento de 75 metros;
2. Gerar um arquivo com extensão .dat, com a matriz dos dados batimétricos que foi utilizada como entrada no SWAN.

4.2.2. Sonografia

Com as imagens de sonar de varredura lateral, obtidas na segunda campanha (Campo 2) (Figura 4.1), foi criado um mosaico, que apresenta uma visão geral da malha do levantamento sonográfico próximo à praia e possibilitou mapear as principais estruturas sedimentares do fundo e as áreas de depósito de sedimentos (Figura 26). As imagens obtidas também auxiliaram na definição da malha amostral da coleta de sedimentos (Figura 24).

Posteriormente, as imagens dos pontos de interesse identificados através do mosaico foram visualizadas através do programa SonarPro 11.2, que permitiu analisar com mais detalhes as imagens das estruturas sedimentares obtidas com os registros do sonar.

Figura 26: Mosaico das imagens geradas no levantamento com o sonar de varredura lateral, no arco praial de Massaguaçu.

4.2.3. Análise granulométrica

As amostras de sedimentos coletadas durante a campanha em campo, realizada no dia 22 de setembro de 2009, foram primeiramente descritas visualmente e, depois, encaminhadas para serem analisadas no Laboratório de Sedimentologia Marinha do Instituto Oceanográfico (IO) da USP. A metodologia aplicada para a determinação das características granulométricas seguiu os procedimentos do método de peneiramento mecânico, conforme descrito em Suguio (1973).

Antes do peneiramento foi eliminado o carbonato de cálcio (CaCO_3) utilizando ácido clorídrico diluído a 10%. Após a queima do CaCO_3 , foi realizado o peneiramento mecânico utilizando peneiras com intervalos de $\frac{1}{2}$ fi da escala Wentworth (1922), em milímetros (mm) e de Krumbein (1934) em ϕ . Cada amostra permaneceu no agitador por 15 minutos e o material retido em cada peneira foi pesado e os resultados foram representados por parâmetros estatísticos obtidos utilizando o programa Labse.01, baseado na formulação de Folk e Ward (1957). Esta formulação considera a classificação e a distribuição dos sedimentos, tendo por base as curvas de distribuição simples e acumulada. A classificação dos sedimentos praias, com base na frequência e no tamanho da partícula foi realizada através do diagrama triangular de Shepard (1954).

Para a modelagem os parâmetros da análise estatística das partículas consideradas foram: o tamanho médio do grão (d_{50}) e o tamanho de (d_{90}).

4.2.4. Clima de ondas

A análise do clima marítimo em águas profundas foi realizada através dos dados extraídos do modelo *WaveWatch III*, uma vez que na área não existem dados disponíveis de séries temporais de ondas registradas com ondógrafos em águas profundas.

O modelo *WaveWatch III* foi desenvolvido pelo Centro Nacional para Previsões Ambientais (*National Center for Environmental Prediction - NCEP*) da Administração Nacional dos Oceanos e da Atmosfera (*National Oceanic and Atmospheric – NOAA*) dos Estados Unidos (Tolman, 1999). O modelo resolve a equação do balanço de densidade espectral para o espectro direcional de

onda. Os processos físicos incluídos neste modelo são: a refração e as deformações no campo de ondas, devido a variações temporais e espaciais da profundidade média da água e da corrente, crescimento de onda e decaimento devido à ação do vento, interações não-lineares, dissipação devido ao efeito do vento na quebra de onda (*white-capping*) e à fricção com o fundo. O modelo usa como entrada diferentes campos de ventos retirados do *Global Data Assimilation Scheme* (GDAS). Mais detalhes sobre o modelo *WaveWatch III* podem ser encontrados em (Tolman, 2002).

Então, para realizar a propagação de ondas pela modelagem numérica e assim se obter o clima de ondas na região de Massaguaçu, foram extraídos os dados do modelo *WaveWatch III* (Tolman, 2002), através do site <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves>. A extração dos dados do modelo WW3 foi desenvolvida por Pianca *et al.*, (2010), e os dados dos parâmetros de ondas foram tratados no programa Excel 2007.

Este modelo possui uma resolução espacial de 1° na latitude e 1.25° na longitude, com uma grade de 77° N a 77°S, com profundidade mínima de 25 metros. Foi extraída uma série temporal de dados de 12 anos e 5 meses, desde fevereiro de 1997 a julho de 2009, com intervalo de 3 em 3 horas, nas coordenadas de latitude 26°S e longitude 45°W, ou na Universal Transversa de Mercator (UTM) *datum* SAD69 Y: 7124360 e X: 500039, (Figura 27).

Figura 27: Localização do ponto onde foram extraídos os dados de previsões de ondas do modelo *WaveWatch III* (WW3).

Os dados de ondas extraídos do modelo *WaveWatch III* serviram para a análise do clima marítimo em águas profundas, modelagem da propagação de ondas até águas rasas e posterior análise do clima marítimo próximo à costa. As ondas ao se propagarem em direção a regiões de menor profundidade se transformam ao interagirem com o fundo, sofrendo o efeito da refração, do empinamento até a quebra na zona de arrebentação, e também interação com obstáculos sofrendo o efeito da difração. Esse tipo de estudo é muito importante para o conhecimento da dinâmica costeira, e é fundamental para trabalhos de engenharia costeira.

Para o presente trabalho, não foi possível a calibração dos dados previstos pelo modelo com dados de ondas medidos em águas profundas por bóias ou satélite. Isto foi feito de maneira aproximada, apenas em águas rasas, comparando os dados do fundeio com os dados de saída da propagação de ondas até regiões próximas à costa.

A análise descritiva do clima marítimo e dos regimes médio e extremal foi realizada com o software CAROL (*Caracterización de Regímenes de Oleaje*), desenvolvido pelo IH Cantábria, da Espanha. O programa caracteriza

as variáveis oceanográficas definidas a partir da série temporal extraída ou medida e consta de três módulos, que geram; as informações preliminares das estatísticas descritivas dos dados; a caracterização do regime médio e extremal de determinada variável; para as variáveis direcionais, a rosa de distribuição direcional dessas variáveis e a tabela de probabilidades dividida para cada direção, com os valores da variável que excedem as probabilidades de 50%, 90%, 99% e 12 horas por ano (99,863%), para cada direção.

4.2.5. Marés

Durante o período de fundeio com o ondógrafo, também foram registrados dados de variação da maré, que permitiram obter uma série temporal da maré para representar as suas variações na região. Devido ao problema ocorrido com o fundeio, a série temporal da maré obtida foi de apenas 16 dias, o que levou a uma representação aproximada do regime de maré na região. Estes dados foram primeiramente referenciados ao nível médio do mar da base de dados da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para o porto de São Sebastião, que é de 0.68 metros. Os dados medidos de maré foram referenciados a esta base, pois, é a mesma base de referência dos dados batimétricos utilizados neste estudo.

Na sequência os dados medidos foram comparados visualmente, para o mesmo período, com dados de previsão da maré disponibilizados pela DHN para o porto de São Sebastião (SP), no item 5.3.2 (Figura 40). O porto de São Sebastião está localizado próximo de Massaguaçu, ao sul da enseada de Caraguatatuba. Esta comparação permitiu verificar a qualidade dos registros medidos de maré. Desta forma para determinar os valores de preamar de sizígia e de quadratura usadas na modelagem numérica, foi observadas as variações de amplitude da maré através da série temporal dos dados medidos e de previsão, e também levado em consideração os estudos do regime de marés para o litoral de São Paulo, (Mesquita e Harari, 1983), onde predominam as marés com regimes de micro – marés e componentes semi-diurnas, com as amplitudes que não excedem os 2 metros.

4.3. Modelagem numérica

Neste trabalho a propagação de ondas foi realizada com o acoplamento dos modelos numéricos de modelagem SWAN e OLUCA, que por apresentarem limitações distintas quando são aplicados em conjunto permitem avaliar de forma bastante confiável os efeitos da batimetria na propagação de ondas.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre os dois modelos que permite observar que as principais limitações de um modelo são complementadas pelo outro, fazendo com que o acoplamento entre os dois seja a abordagem mais recomendada quando se têm domínios de cálculo grandes e onde o processo de difração de ondas próximo à costa tem um papel importante.

Tabela 1: Comparativo entre os modelos SWAN e OLUCA (Silveira, 2009).

Característica	SWAN	OLUCA
Domínio de cálculo	Grande	Pequeno
Limitação de ângulos	Não apresenta	+/- 55°
Limitação de pendente	Não apresenta	$\tan\beta \leq 1/3$
Ação de ventos	Sim	Não
Espectro composto	Sim	Não
Contornos onde pode haver entrada de ondas	Todos (entradas iguais ou diferentes)	Apenas um
Malha de detalhe	Interna à malha geral (embebida)	Externa à malha geral (aninhada)
Instabilidade numérica em relação às dimensões relativas das malhas (Dx e Dy)	Não	Sim
Efeitos não-lineares de interação onda-onda e whitecapping	Sim	Não
Saída de resultados espectrais	Sim	Não
Cálculo da difração	Pior	Melhor
Cálculo de correntes resultantes da quebra de ondas	Não	Sim
Reflexão de ondas	Sim	Não
Facilidade de aplicação e manejo	Mais difícil (sem interface gráfica)	Mais fácil (com interface gráfica)
Parâmetros livres que devem ser ajustados pelo usuário	Muitos	Poucos ou nenhum

O modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) foi utilizado para propagar casos de ondas em domínios de cálculo grandes (centenas de quilômetros) até regiões próximas à costa, onde o modelo OLUCA passou a ser utilizado para modelar a propagação de ondas e em águas rasas.

O acoplamento entre os dois modelos é realizado obtendo-se, para cada caso propagado, os resultados de altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção (Dir) calculados pelo SWAN para um nó da malha que seja mais próximo do nó central da malha do OLUCA. Esses resultados são utilizados como os dados de entrada para o modelo OLUCA.

Mais detalhes sobre a aplicação destes modelos podem ser obtidos por Silveira, (2009).

4.3.1. Modelo SWAN

O modelo numérico SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) é um programa de uso livre e foi desenvolvido pela Universidade de Delft (TU Delft), da Holanda. O modelo é utilizado para obtenção de estimativas dos parâmetros de ondas (altura, período e direção) em áreas oceânicas e costeiras.

É um modelo espectral que resolve a equação da conservação da energia das ondas, considerando todas as fontes e sumidouros. Em sua resolução, o modelo SWAN adota uma aproximação Euleriana para calcular a evolução da densidade de energia de cada componente espectral (frequências e direcionais). Essa aproximação permite calcular a energia espectral de forma simultânea em todo o domínio de cálculo, realizando o balanço de energia entre cada ponto desse domínio dentro da célula.

Este modelo de ondas é de terceira geração e resolve adequadamente os processos de refração, empinamento, interação onda-corrente, interação não linear onda-onda, e dissipação devido à quebra de onda induzida pelo fundo (*whitecapping*) sobre batimetrias reais. Contudo, resolve a difração apenas de forma aproximada e não permite o cálculo de correntes geradas por ondas na zona de surfe.

Apesar de o SWAN ser um modelo de terceira geração (GEN3), neste estudo ele será executado como um modelo de geração anterior, o de primeira geração (GEN1), que é mais rápido por considerar menos interações não lineares. Neste estudo foi desativada a interação não linear onda-onda do tipo *quadruplets* (*OFF QUAD*) e a dissipação de energia através de *whitecapping* (*OFF WCAP*). Foi ativada a quebra induzida pela profundidade (*BREA*), a fricção com o fundo (tipo JONSWAP) e a difração.

4.3.1.1. Domínio do modelo SWAN

O modelo SWAN utilizado trabalha com malhas ortogonais e cartesianas com um esquema de diferenças finitas. Para executar o SWAN, é necessário possuir a batimetria sobre a qual se deseja propagar, definir as malhas e os casos de ondas para a propagação. Feito isso podem ser obtidos os resultados de H_s , T_p , Dir , em uma malha. O SWAN permite a aplicação para diferentes malhas embebidas, obtendo sucessivamente mais detalhe na zona de interesse através de um arquivo de execução (.swn) para cada malha, que inclui informações características exportadas da malha maior (grossa) que serve como dados de entrada para a próxima malha menor (detalhe).

Para iniciar a modelagem com o SWAN, foi necessário definir as malhas de propagação, através da ferramenta de criação de malhas do *IH-Box* do modelo MOPLA, que é habilitada no modo de batimetria regenerada. Esta ferramenta permite criar as malhas do SWAN e obter as informações necessárias de cada malha para os arquivos de execução (.swn), como sua origem, sua angulação com relação ao eixo X da batimetria (referência angular cartesiana) e suas relações de dimensão, espaçamento entre os nós e número de nós em cada eixo. Para este estudo foram definidas três malhas embebidas, uma geral (M1), uma intermediária (M2) e uma de detalhe (M3) na zona de interesse.

Primeiramente foi definida a área da malha M1 que incluiu toda a região do litoral de São Paulo até uma profundidade de aproximadamente 1000 metros. A dimensão da malha foi de 269 km nos eixos X (meridional) e Y (zonal), com espaçamento entre linhas (x) e colunas (y) de 750 metros e sua orientação de -90° .

Definidos os dados para o arquivo da malha M1, foi iniciada a criação da malha M2, do mesmo modo da malha M1. A malha M2 foi definida incluindo apenas a zona em torno de toda a área de estudo, incluindo todas as feições batimétricas que influenciam a propagação de ondas para a zona de estudo, como por exemplo, a Ilha de São Sebastião que fica em frente da zona de estudo até uma profundidade de aproximadamente 50 metros. A dimensão da malha foi de 100 km nos eixos X (meridional) e Y (zonal), com espaçamento entre linhas (x) e colunas (y) de 250 metros e sua orientação de -90° .

Definidos os dados para o arquivo da malha M2, foi iniciada a criação da malha M3, ou malha de detalhe da praia de Massaguaçu, do mesmo modo adotado para criar a malha M1 e M2. A malha M3 foi definida apenas na zona de interesse do estudo, incluiu todas as feições batimétricas que influenciam na propagação de ondas nessa região, como lajes, costões e ilhas até uma profundidade de aproximadamente 15 metros. A dimensão da malha foi de 10 km nos eixos X (meridional) e Y (zonal), com espaçamento entre linhas (x) e colunas (y) de 25 metros e sua orientação de -90° .

Após definir as malhas de cálculo foram gerados arquivos .swn de execução para as malhas M1, M2 e M3, definidas a batimetria para propagação, as condições de contorno, os fenômenos físicos considerados e os resultados desejados. Nesse caso, para esse estudo os resultados foram Hs, Tp, Tm, Dir para todas as malhas. Como, neste estudo, foi realizada a propagação para muitos casos de ondas com diferentes malhas, foi necessário criar ou gerar os arquivos .swn de execução do SWAN, para todos os casos e todas as malhas desejadas, através do auxílio de programas e arquivos de planilhas (.cfg e .dat), com informações de cada caso (Figura 4.14).

Após criar os arquivos .swn para todos os casos e todas as malhas desejadas foi necessário gerar um arquivo (.bat) para executar todos os casos, através do programa Gerador_BAT_Arquivo_Execucao.m. Ao executar o programa, foi gerado o arquivo ('exec_SWAN.bat') que executou todos os casos de todas as malhas desejadas.

Executando o arquivo, o modelo realiza quatro “varridas” pela malha de cálculo, resolvendo as equações até que 98% dos pontos em água possuam a acurácia necessária para poder gerar os resultados, que são gravados em um arquivo .mat. Depois de executar todos os casos foi utilizado um programa para obter os resultados de todos os casos para um ponto. O programa de Matlab resultados_ptos_control.m permitiu obter os resultados para o ponto desejado (nó da malha), em um arquivo (.dat) com 5 colunas: Hs(caso), Tp(caso), Dir(caso), Hs(pto) e Dir(pto). Os dados de Hs (pto) e Dir (pto) foram utilizados como dados de entrada para o módulo OLUCA que integra o modelo MOPLA.

4.3.2. Modelo MOPLA (SMC)

O Sistema de Modelagem Costeira (SMC) é uma ferramenta computacional que agrega uma série de modelos numéricos, estruturados de acordo com as escalas temporais e espaciais dos processos a modelar e organizado em diferentes módulos fundamentais. Cada um dos modelos apresenta sua estrutura própria, com equações em esquemas numéricos independentes. Mais informações acerca da estrutura do SMC podem ser encontradas em GIOC (2003).

Após realizar a propagação de ondas até as proximidades da zona de estudo utilizando o modelo SWAN, foi realizada a propagação na zona de estudo utilizando o módulo OLUCA, que integra o modelo MOPLA (*Morfodinamica de Playas*) do SMC (*Sistema de Modelado Costeiro*). O SMC foi desenvolvido pelo *Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas* (G.I.O.C) da Universidade de Cantábria (UC), Espanha, sob a orientação deste governo, e por meio do órgão que correspondente ao Ministério do Meio Ambiente no Brasil.

O modelo MOPLA contém os módulos OLUCA (propagação de ondas), COPLA (correntes geradas por ondas) e EROS (transporte de sedimentos e alterações morfológicas), que permitem estudar a morfodinâmica de praias em curta escala temporal (até 72 horas). Esses modelos podem ser executados em sua versão MC (ondulação monocromática) ou SP (ondulação espectral), sendo que a versão SP, diferentemente do SWAN, considera apenas a sobreposição das componentes espectrais na propagação de ondas, não ocorrendo interações entre as componentes (interações não lineares). Como todos os modelos numéricos, os modelos OLUCA, COPLA e EROS apresentam algumas limitações e pressupostos, como: do fluido, de fluxo, da dinâmica e dos contornos e condições iniciais e propagação.

4.3.2.1. Módulo de onda (OLUCA)

O módulo de onda espectral OLUCA-SP (GIOC, 2003a) é parte do Sistema de Modelagem Costeira (SMC), (González *et al.*, 2007). É um modelo debilmente não linear baseado no modelo de refração e difração REF/DIF (Kirby *et al.*, 1994) da Universidade de Delaware (EUA), que resolve a equação

da pendente suave à partir de sua aproximação parabólica. Este modelo pode ser classificado como um modelo não dispersivo em amplitude, que resolve a fase da onda sobre batimetrias complexas.

A aproximação parabólica amplia a validade da teoria dos raios até a costa, permitindo a difusão de energia, com cálculos de ondas propagadas numa certa direção, mas, também, em na direção contrária. A equação da pendente suave do modulo OLUCA não resolve a superfície livre para momentos específicos baseados nas equações de quantidade de movimento de fluxo de massa, e, sim calcula os efeitos combinados dos processos de refração e difração, através de suas equações, sempre que a hipótese da linearidade seja aceitável (Liu e Losada, 2000).

Para o OLUCA resolver a equação da pendente suave através da aproximação parabólica implica em algumas limitações: (1) somente são propagadas ondas cuja direção de propagação esteja entre $\pm 55^\circ$, em relação à orientação da malha (eixo x); (2) aceita uma pendente máxima de $1/3$ ($\tan\beta \leq 1/3$); (3) não há reflexão de ondas e (4) o número de divisões e subdivisões da malha de cálculo é limitado, tornando-o aplicável apenas a domínios pequenos (menores que 10 km).

Assim, o modelo OLUCA é usado para calcular as condições de onda resolvendo bem a difração e a quebra de ondas, além de ser acoplado ao modelo COPLA, que resolve as correntes geradas pela quebra de ondas e está acoplado ao modelo EROS, de transporte de sedimentos.

4.3.2.2. Módulo de correntes (COPLA)

O módulo de correntes integradas na vertical (2D), COPLA-SP (GIOCC, 2003b, 2003c), que também é parte do SMC (González *et al.*, 2007) é aplicado para obter as correntes induzidas por ondas na zona de surfe. Este módulo é baseado nas equações de Navier-Stokes, que é simplificada pela integração vertical em duas dimensões das equações de conservação de massa e momento.

Assumindo estas simplificações, chega-se às equações de continuidade e da quantidade de movimento na direção transversa à praia (x) e na direção longitudinal à praia (y), forçadas pelo gradiente de tensão radial da onda obtida pelo módulo de propagação de ondas espectral, OLUCA-SP.

Liu (1990) integrou os cálculos da equação da pendente suave de forma a resolver os tensores de radiação, possibilitando a análise conjunta de correntes geradas pelas ondas. Assim, as correntes geradas pelas ondas são em função dos tensores de radiação globais calculados com base nos tensores de radiação de cada uma das componentes de energia (função da altura, período, direção e profundidade). Os principais parâmetros que influenciam nas correntes deste modelo são: a rugosidade do fundo que foi definido de acordo com o número de *Nikuradse* (K_{swc}), e a viscosidade turbulenta que foi definida de acordo com o coeficiente de *eddy*, que apresenta um valor constante através de toda a grade do modelo.

4.3.2.3. Módulo de transporte de sedimentos (EROS)

O módulo de transporte de sedimentos EROS (GIOG, 2003d) também faz parte do SMC (González *et al.*, 2007) e determina o transporte de sedimentos com base no campo de ondas e no campo de correntes. Neste módulo, são utilizadas 2 (duas) formulações amplamente citadas na literatura: Bailard 1981 e Soulsby 1997. Ambas as formulações computam o transporte sólido total, como sendo a soma do transporte em suspensão e de fundo. Além das formulações de transporte de sedimentos, foram incorporadas formulações de estabilidade do sedimento descritas em van Rijn (1993): diâmetro equivalente para o transporte de sedimento, módulo de perturbação das ondas por variação do fundo e módulo de perturbação das correntes por variação do fundo.

O módulo EROS calcula o transporte de sedimentos gerado pelas correntes, podendo ser executado no modo de Erosão e Sedimentação Inicial (ESI), que calcula o transporte de sedimentos com as ondas e correntes iniciais, sem evolução da batimetria da praia, ou seja, apenas os resultados da primeira propagação, que foi o modo utilizado neste estudo. Outra opção seria o Modelo de Evolução Morfodinâmica (MEM), com atualização das alterações da batimetria e execução de novas propagações e cálculo de correntes a cada intervalo de tempo morfológico determinado.

4.3.2.4. Domínio do modelo MOPLA

A resolução numérica ocorre sobre uma malha ortogonal e cartesiana, com um esquema de diferenças finitas. São definidas as condições de contorno para o fundo, para a superfície livre, para a linha de costa, para o mar aberto e para as laterais (abertas ou fechadas).

A definição das malhas também foi realizada com o programa IH-Box. Após criar as malhas com o IH-Box, foi visualizado qual nó da malha de detalhe do SWAN é o mais próximo do nó central do eixo Y, de cada malha criada para o MOPLA (ponto de saída SWAN / entrada OLUCA). Assim, foram obtidos os resultados de Hs e Dir de todos os casos propagados com o SWAN neste ponto e que seriam utilizados de entrada para propagar todos os casos com o OLUCA.

Feito isto, foi observado como variaram os valores máximos e mínimos da direção de ondas para todos os casos propagados. Estes valores permitiram definir quantas malhas deveriam ser criadas, tendo em conta a limitação de $\pm 55^\circ$ de variação da direção das ondas, em relação ao eixo X da malha, ou seja, as direções máximas e mínimas observadas das ondas propagadas, acrescidas da dispersão direcional adotada, que não poderiam ultrapassar esta variação limite de $\pm 55^\circ$, em relação ao eixo X da malha.

Foi verificado que a criação de apenas uma malha com orientação de 121° , em relação ao eixo X da malha, permitia satisfazer esta condição para todos os casos, permitindo que todos os valores de direção das ondas propagadas estivessem dentro do intervalo de aplicação de $\pm 55^\circ$.

Após criar as malhas no IH_Box, foi criado um projeto no MOPLA e copiadas todas as informações das malhas do IH-Box para o MOPLA, sobre um arquivo de batimetria .xyz de detalhe da zona de estudo, incluindo todas as feições que afetam a propagação até a zona de estudo; definindo a cota zero da batimetria e o sistema de referência dos dados por coordenadas batimétricas, o método de interpolação do gráfico da batimetria utilizado foi a triangulação com interpolação linear, com precisão do gráfico de 40 metros nos eixos X e Y.

A malha para o MOPLA foi gerada apenas com a presença da linha de costa, com uma dimensão da malha de 9.1 km no eixo X (meridional) e 12 km

no eixo Y (zonal), com espaçamento entre linhas (x) e colunas (y) de 20 metros e sua orientação de 121° , e os contornos sul, norte e leste foram mantidos abertos, onde as condições de contorno foram especificadas (Figura 28).

Figura 28: Malha computacional e batimétrica para o modelo MOPLA.

Depois de definir a malha foram criados os casos para a propagação de ondas. Para isto foi utilizado o programa de Matlab “P1_Base_genera_MOPLA.m”, que adiciona múltiplos casos à lista de casos do MOPLA, e definidos alguns parâmetros antes da execução dos casos (Figura 29), nos editores de ondulação espectral, de correntes e transporte.

Parâmetros definidos	
Ondulação espectral	
Tipo de modelo	composto
Amplitude da maré	conforme cada caso
Tipo de dissipação pelo fundo	camada limite turbulenta
Correntes	
Intervalo de tempo (Δt)	2 segundos
Tempo total de execução	2000 segundos
Rugosidade de Nikuradse (K_{swc})	1
Viscosidade turbulenta	$10.00 \text{ m}^2/\text{s}$
Transporte	
Características do sedimento (D_{50})	0.08 milímetros
Características do sedimento (D_{90})	0.062 milímetros
Características da simulação	erosão e sedimentação inicial (ESI)
Intervalo de tempo da simulação	24 horas
Variação de fundo máxima	0.1 metros
Tipo de modelo	Soulsby
Intervalo de tempo (Δt)	2 segundos
Tempo total de execução	2000 segundos

Figura 29: Principais parâmetros definidos para a execução dos casos:

4.4. Definição dos casos de onda para a propagação com os modelos numéricos: SWAN e OLUCA

Após a análise do clima marítimo em águas profundas, veio a etapa de definição dos casos de propagação de ondas, onde foram escolhidos os números de casos propagados com os modelos SWAN e OLUCA.

A definição dos casos de onda para os experimentos numéricos foi realizada determinando combinações de altura significativa de ondas (H_s), período de pico de ondas (T_p) e direções que representam as condições de onda que ocorrem na série de dados. A maré também foi um fator considerado na análise, sendo realizadas propagações para os diferentes níveis de maré. Esta definição dos casos irá permitir a aplicação da técnica do hipercubo, que será descrita a seguir.

Desta forma, o número de casos de ondas definidos, que irão servir como base para a aplicação do hipercubo, foi o produto entre o número de casos de altura e o período (que é definido a partir do diagrama H_s - T_p), pelo número de direções e pelo número de níveis de maré desejado, conforme indicado abaixo:

$$\text{Número de casos} = \text{Casos } H_s_T_p \times \text{Direções} \times \text{Níveis de Maré}$$

Primeiramente, para definir os casos foram analisados o gráfico da rosa direcional (Figura 38b, item 5.3) e a tabela de probabilidades no Anexo 3 (Tabela 8), onde foi possível constatar que a grande maioria dos casos (95%) ocorre entre as direções de leste – nordeste (ENE) e sul – sudoeste (SSW). Com isso, definiu-se que seriam propagados casos para as 7 (sete) direções neste intervalo (ENE, E, ESE, SE, SSE, S e SSW).

Definido o número de direções a se propagar, o próximo passo foi gerar o diagrama de distribuição conjunta de H_s - T_p para determinar as combinações desses parâmetros, que seriam propagadas. Para gerar o gráfico do diagrama H_s - T_p , foi utilizado o programa de Matlab `Representar_grafico_de_Hs_Tp.m`. Após executar este programa foi gerada uma o diagrama H_s - T_p , (Figura 39, item 5.3).

Com base nas observações do diagrama, foram selecionadas 15 combinações de Hs e Tp para serem propagadas, onde se buscou dar maior resolução à região em que ocorre a maior parte dos dados, mas também selecionando combinações em torno de grande parte dos dados apresentados. Mesmo que alguns desses casos definidos pelo diagrama Hs-Tp não ocorram para todas as 7 direções definidas (95% dos casos), sua propagação é realizada para que, assim, seja possível interpolar os casos que ocorram entre determinadas direções.

O último passo para a definição dos casos que seriam propagados foi definir os níveis de maré. Foram escolhidos dois níveis de maré, preamar de sigízia e de quadratura. Desta forma, o número total de casos escolhidos para a propagação com o modelo SWAN e OLUCA foi de 210.

**Número de Casos = Casos Hs-Tp (15) x Direções (7) x Níveis de Maré (2),
logo: Número de total de Casos = 210**

Depois de definir todos os casos a serem propagados, foi gerada uma planilha no programa *Excel*, com as informações de Hs, Tp, direção, maré, gama e dispersão (sigma) para cada caso. Esse arquivo da planilha do *Excel* serviu como base para a introdução dos casos nos modelos SWAN e OLUCA, (Anexo 2, Tabela 7).

Os valores dos parâmetros Gama e Dispersão (sigma) definem o espectro bidimensional de entrada para cada caso. O parâmetro Gama indica a dispersão de frequência do espectro do tipo *JONSWAP*, que caracteriza de ondulação do tipo *swell* se a energia do espectro está mais agrupada em torno do período de pico, ou ondulação tipo *sea*, se a energia está mais dispersa. Já o parâmetro de dispersão (sigma) define a dispersão direcional (em graus), em torno da direção média (pico do espectro).

Como não existem na literatura informações sobre os valores desses parâmetros, que permitem ajustar um espectro bidimensional (*JONSWAP* x espectro direcional) ao clima marítimo do Atlântico Sul na costa brasileira, foram adotados os valores recomendados pelos pesquisadores do IH Cantábria, Espanha. Para ondulações do tipo *swell*, foram adotados valores de

Gama=8 e valores de Dispersão=15°, enquanto, para ondulações do tipo sea, foram utilizados valores de Gama=3.3 e Dispersão=20°.

A definição em que casos seria propagada como sea ou swell foi definida empiricamente, buscando observar a distribuição de T_p , obtida com CAROL, além de contar com o conhecimento do autor sobre o comportamento do clima marítimo da região. Foi definido o valor de T_p de 8 segundos, para ser utilizado como limiar entre sea e swell, ou seja, ondas com períodos inferiores a 8 segundos foram propagadas como sea e as ondas de períodos de 8 segundos até 14 segundos foram propagadas como swell.

Desta forma, de 15 casos selecionados no espectro $H_s - T_p$, 9 foram definidos como swell e 7 casos definidos como sea, adotando-se, assim, os respectivos valores de gama e sigma para cada caso.

Depois de propagar os 210 casos, utilizando os modelos SWAN e OLUCA acoplados, foi possível reconstruir a série temporal de dados de onda para 7 pontos de interesse próximos à costa, aplicando a técnica do hipercubo. O hipercubo propriamente dito realiza a interpolação linear dos resultados das propagações e calcula, para cada registro da série temporal, quais os valores correspondentes de altura significativa (H_s) e direção (Dir) nos pontos de análise e o fluxo médio de energia, gerando uma figura com os vetores de direção do fluxo médio de energia em cada ponto (Figura 30).

Figura 30: a) Esquema da interpolação dos resultados para o ponto de análise, com base nos resultados dos nós da malha adjacentes ao ponto; b) Hipercubo de interpolação dos resultados propagados (Silveira, 2009).

Ao executar o programa, é salvo o arquivo com os valores de H_s e Dir em todos os casos, para os pontos escolhidos. Com a reconstrução da série temporal obtida através da técnica do hipercubo, foi possível realizar a análise

descritiva do clima marítimo e também o cálculo dos regimes médios e extremos de ondas, para diferentes pontos da área de interesse, utilizando o CAROL.

Para se estudar mais profundamente o comportamento do clima marítimo separado por direções na área rasa, foram realizadas as análises de regimes direcionais de ondulação, utilizado o programa de Matlab *Regimenes_direccionales.m*. Este programa permitiu obter a série temporal referente a cada direção de interesse, assim como a distribuição conjunta de altura significativa de onda (H_s) e período de pico (T_p) e a probabilidade de ocorrência para cada direção.

Para o diagrama H_s - T_p foram definidos os valores dos intervalos. Para T_p variando entre 2 e 16 segundos, com intervalo a cada 1 (um) segundo, e para H_s variando entre 0 e 6 metros, com intervalos a cada 1 (um) metro.

Para este estudo, dos 210 casos de ondas propagados com a modelagem numérica para aplicar a técnica do hipercubo, foram escolhidos 12 casos para realizar a simulação com os módulos COPLA (corrente) e EROS (transporte).

Estes 12 casos escolhidos para aplicar o modelo MOPLA propriamente dito, módulo OLUCA, COPLA e EROS, incluem diferentes condições de contorno em águas profundas para tornar possível identificar e caracterizar os principais processos costeiros envolvidos na dinâmica litorânea no arco praial de Massaguaçu (Tabela 2).

Tabela 2: Condições simuladas nos experimentos com os módulos de corrente (COPLA) e de transporte (EROS) através do modelo MOPLA (SMC).

Condições simuladas (COPLA e EROS)	H_s (metros)	T_p (segundos)	Direções azimute a norte (graus)	Marés - preamares (metros)
Baixa dinâmica de ondas (calmas)	1.50	6.00	ENE, E, ESE, SE, SSE, S	0.50 (quadratura)
Alta dinâmica de ondas (tempestades)	3.50	12.00	ENE, E, ESE, SE, SSE, S	1.00 (sizígia)
<i>H_s</i> altura significativa de ondas - em metros (m)				
<i>T_p</i> período de pico de ondas - em segundos (s)				
ENE	leste - nordeste	SE	sudeste	
E	leste	SSE	sul - sudeste	
ESE	leste - sudeste	S	sul - sudeste	

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização granulométrica e teor de CaCO_3 dos sedimentos da área submersa do arco praial de Massaguaçu

Os parâmetros estatísticos obtidos através da utilização do programa Labse, (descrito no item 4.2.3.), estão representados no Anexo 1 (Tabela 6). A distribuição sedimentar de fundo do arco praial é constituída predominantemente de sedimentos clásticos arenosos com tamanho médio de grãos de finos a muito finos 3.0ϕ a 4ϕ (ϕ), com ou sem a contribuição significativa de bioclastos. O tamanho médio de grãos das amostras variou de areia grossa 1ϕ (ϕ) a silte fino 6.5ϕ (ϕ).

As amostras 17, 21, 54, 55, 58 e 59 que apresentaram um tamanho médio do grão entre silte grosso a silte fino 4ϕ a 5ϕ (ϕ) estão localizadas em regiões de menor dinâmica sedimentar, as amostras 17 e 21 estão localizadas costa afora, em maiores profundidades, e as amostras 54, 55, 58 e 59 estão localizadas nas zonas de sombra das ilhotas da Cocanha (tardoz das ilhotas), em locais mais protegidos a incidências de ondas.

As amostras 5, 64, 67 e 82 em que o tamanho médio do grão foi classificado como areia grossa 1ϕ e areia média 1.5ϕ (ϕ) foram devido a estas amostras estarem, muito provavelmente em pontos de convergência de ondas atrás da ilha do Tamanduá, amostra 5 e 82, e atrás da ilhota da Cocanha, amostras 64, 67.

A distribuição das amostras classificada e acordo com Shepard (1954) mostrou o predomínio da classe das areias, nas amostras coletadas na região submersa.

A Figura 31 mostra a distribuição dos sedimentos na área de estudo.

A Área A está localizada numa área relativamente mais abrigada ao embate de ondas no arco praial de Massaguaçu que fica entre a Cocanha e a Tabatinga. Foram observados em suas amostras sedimentos clásticos com predomínio de areia equivalente a 93.44%. A porcentagem média de lama foi de 6.56% e de carbonato de cálcio (CaCO_3) de 6.28%.

A Área B está localizada entre a linha de costa e a batimétrica de 7 metros na região mais exposta ao embate de ondas no arco praial de Massaguaçu que fica entre o Capricórnio e a Cocanha. Foram observados em suas amostras sedimentos clásticos com predomínio de areia equivalente a 95.54%. A porcentagem média de lama foi de 4.46% e de carbonato de cálcio (CaCO_3) de 3.88%.

A Área C está localizada na mesma região que a Área B, porém, entre as batimétricas de 7 e 12 metros. Foram observados em suas amostras sedimentos clásticos com predomínio de areia equivalente a 88.00%. A porcentagem média de lama foi de 12.00% e de carbonato de cálcio (CaCO_3) de 5.92%.

A Área D e E estão localizadas na região adjacente as ilhotas em frente a Cocanha. Foram observados em suas amostras sedimentos bioclásticos com predomínio de areia equivalente a 62.70% (Área D e E). A porcentagem média de lama foi de 37.30% (Área D e E), sendo que estas duas áreas apresentaram diferenças no valor de carbonato de cálcio (CaCO_3) que foi de 16.30% (Área D) e 27.70% (Área E).

Figura 31: Mapa da distribuição granulométrica dos sedimentos no arco praial da Massaguaçu.

5.2. Mapeamento sonográfico e caracterização das feições de fundo da área submersa do arco praial de Massaguaçu

De acordo com Souza (2006), a interpretação dos dados oriundos do sonar de varredura lateral está baseada na análise dos contrastes texturais apresentados pelas imagens obtidas, sejam digitais ou analógicas.

“A forte correlação existente entre os contrastes texturais observados nas imagens e as características dos materiais que compõem a superfície de fundo constitui-se também em importante premissa para a interpretação das imagens obtidas com o sonar de varredura lateral” (Souza, 2006).

A análise visual da imagem acústica contínua gerada pelo sonar permite reconhecer as principais características da superfície de fundo (contatos entre diferentes materiais, relevo etc.), tendo como base os padrões texturais observados nas imagens, a geometria das feições identificadas e a refletividade acústica da superfície.

As sombras acústicas projetadas no registro, decorrência da incidência inclinada do sinal, permitem determinar a altura das feições identificadas na superfície de fundo. Nos registros obtidos neste estudo, a sombra escura representa maior reflexão acústica, ou seja, maior altura das feições, já a sombra clara representa uma menor reflexão acústica, ou menor altura das feições.

“Texturas rugosas são comumente interpretadas como afloramentos rochosos, recifes de corais, arenitos de praia ou sedimentos grossos (cascalhos). Texturas lisas e homogêneas são interpretadas como sedimentos finos” (Souza, 2006).

Os resultados dos levantamentos sonográficos executados no arco praial de Massaguaçu evidenciaram a presença de padrões de imagens representativas de texturas rugosas, lisas e homogêneas, correlacionadas diretamente com a distribuição sedimentar de fundo do arco praial, constituída predominantemente de sedimentos clásticos arenosos finos a muito finos, com ou sem a contribuição significativa de bioclastos. Os pontos das imagens mais representativas do levantamento sonográfico são apresentados na Figura 32.

Figura 32: Pontos das imagens escolhidas do levantamento sonográfico ao longo do arco praial de Massaguaçu.

A área mais a nordeste do arco praial de Massaguaçu, em frente à Mococa, apresenta um padrão sonográfico constituído por formas de fundo de maiores dimensões, na ordem métrica para os comprimentos e centimétrica para as alturas das deformações da superfície do fundo (ondulas). As dimensões das formas de fundo deste setor no arco praial de Massaguaçu evidenciam um predomínio de regimes de fluxos intermediários, na imagem 1 (Figura 33a) e na imagem 3 (Figura 33b).

A imagem 1 (Figura 33a) indica uma forte influência da ilha Tamanduá na distribuição sedimentar do fundo desta área, onde a difração das ondas provenientes, principalmente as originárias do quadrante a leste (ENE, E e ESE), posicionam os bancos arenosos na mesma direção da maior dimensão da ilha (NE/SW), com alongamento destes bancos para NE, correspondente a existência de um campo vetorial de correntes residuais de fundo com velocidades superiores a velocidade crítica de transporte para sedimentos arenosos finos a muito finos.

Figura 33: Feições de fundo próximo a Mococa; a) Imagem 1, formas de fundo de maiores dimensões caracterizando fluxo intermediário e a difração de ondas pela ilha do Tamanduá; b) Imagem 3, evidenciam um predomínio de regimes de fluxos intermediários neste setor.

Padrão sonográfico semelhante pode ser observado na região situada entre as ilhotas na Cocanha na imagem 8 (Figura 34a), e retaguada, entre a linha de costa e as ilhotas, na imagem 104 (Figura 34b), onde as calhas entre os bancos arenosos estão alinhadas aproximadamente paralelamente. Nestes locais, estão constituídas as maiores concentrações de sedimentos bioclásticos no arco praiar de Massaguaçu. Internamente a estes bancos de maiores dimensões observam-se ondulações de menores dimensões, ondulas de pequena altura e comprimento, caracterizando também a influência da difração de ondas principalmente do quadrante a leste, ENE, E e ESE, sobre os sedimentos de fundo desta área a retaguada da ilhota da Cocanha.

Figura 34: Caracterização das feições de fundo próximo as ilhotas da Cocanha, com calhas entre os bancos arenosos e caracterizando a difração de ondas; a) entre as ilhotas na Cocanha; b) e na retaguarda, entre a linha de costa e a ilha.

Na antepraia do arco praiar de Massaguaçu, no segmento entre Massaguaçu (norte) e o Capricórnio puderam ser observados diferentes padrões sonográficos.

As imagens que recobrem os setores mais externos da antepraia do arco praiar de Massaguaçu, ou seja, em maiores profundidades em direção ao mar, não apresentam bancos arenosos bem estruturados, apenas um padrão mais homogêneo de textura de fundo, denotando serem as feições em banco diretamente associadas aos mecanismos de transporte transversal e longitudinal gerados pelos sistemas de ondas incidentes sobre este setor do arco praiar.

Apenas o registro sonográfico da imagem 51 (Figura 35), obtido próximo ao ponto de coleta de sedimentos 33 e 35 (Figura 24), ressalta a presença de uma estrutura de fundo rochoso (laje), que apresenta evidências de atuar como um atenuador de trens de ondas (difração e refração) que também pode estar facilitando o acúmulo de material granular arenoso (fino a médio), no setor mais ao sul do arco praial de Massaguaçu.

Figura 35: Caracterização das feições de fundo no setor mais ao sul deste arco junto a laje de Massaguaçu, em frente a praia do Capricórnio.

No segmento centro – norte do arco praial nas imagens 86, 89 e 94 (Figura 36), entre Massaguaçu (centro) e Massaguaçu (norte) pode ser observada a presença de poucos bancos arenosos, esparsos, distanciados entre si de no máximo uma dezena de metros, com uma progressiva estruturação interna em direção a Massaguaçu (centro) na imagem 94 (Figura 36c). Na imagem 94 (Figura 36c) as ondulas estão dispostas perpendicularmente a direção de deslocamento dos bancos, evidenciando um importante componente dinâmica de o transporte sedimentar de orientação perpendicularmente a atual linha de costa (“*onshore/offshore*”).

Nestas situações observadas, como na ausência de bancos na imagem 86 (Figura 36a) e na imagem 89 (Figura 36b) e com a presença de poucos bancos transversais a linha de costa na imagem 94 (Figura 36c) podem ser um indicativo de que a linha de costa neste setor está em retração.

Figura 36: Caracterização das feições de fundo no segmento centro – norte do arco praial de Massaguaçu com a presença de poucos bancos arenosos, esparsos; a) e b) em Massaguaçu (norte); c) em Massaguaçu (centro).

Em direção a sul do arco praial, no segmento centro – sul, os bancos estão presentes em maior número, e mais claramente estruturados internamente, com ondulas da ordem (altura e comprimento) de dezenas de centímetros. Isto pode ser observado, no setor mais ao sul do arco praial, nas proximidades do costão rochoso que liga este arco praial com a praia adjacente de Martin de Sá em Caraguatatuba, na imagem 58 (Figura 36a), junto à foz do rio Massaguaçu na praia do Capricórnio na imagem 60 (Figura 36b), e no setor em Massaguaçu (sul) em direção ao centro do arco praial, na imagem 71 (Figura 36c).

Em particular os sonogramas obtidos bem junto à foz na imagem 60 (Figura 36b), evidenciam a presença de grandes bancos, muito bem estruturados internamente, com as ondulas de dezenas de centímetros paralelas a orientação do arco praial, correspondendo a um transporte sedimentar orientado a sul, mas com uma importante e efetiva componente de transporte de direção perpendicular à costa em direção a praia e em direção ao mar (“*onshore/offshore*”).

Especificamente na imagem 60 (Figura 36b), ainda é possível identificar uma imagem do fundo arenoso, de textura homogênea, recobrendo perpendicularmente uma porção do banco mais a sul, correspondendo provavelmente ao conjunto de sedimentos depositados como uma feição de canal, com a presença de uma feição do tipo leque em sua porção mais distal, associado ao regime de ruptura a que periodicamente se estabelece na barreira arenosa (areia média a grossa), que interrompe o fluxo aquoso contínuo do rio Capricórnio.

Ao sul e ao norte do grande banco observado através da imagem 60 (Figura 37b), novamente se observam bancos rítmicos, contínuos e bem estruturados, ao sul através da imagem 58 (Figura 37a), e ao norte pela imagem 71 (Figura 37c). Estes bancos estão condicionados por um contínuo processo de transporte longitudinal e um paralelismo pronunciado das formas rítmicas internas do banco, característicos de um importante processo de transporte transversal em direção ao mar e em direção a praia (“*costa adentro/costa afora*”).

Ainda em particular na imagem 71 (Figura 37c), no setor de Massaguaçu (sul), estes bancos rítmicos bem desenvolvidos e com tendência de se unir com a linha de costa são indicativos de a linha de costa estar em ligeira acresçam. A reposta para variações na morfologia da zona de surfe podem formar diferentes formas de barras ao longo da costa, como neste caso em que uma barra crescente tende a se unir a costa.

Este segmento centro – sul do arco praial de Massaguaçu (Capricórnio), juntamente com o setor oposto (Cocanha) se constituem nos setores praias de maior progradação do perfil emersos, ao longo dos últimos anos (Nuber, 2008).

Figura 37: Caracterização das feições de fundo no setor mais ao sul deste arco; a) junto ao costão rochoso; b) junto à foz do rio Massaguaçu na praia do Capricórnio; c) em Massaguaçu (sul).

5.3. Cima de ondas

O clima de ondas neste estudo foi obtido para águas profundas e para águas rasas através da metodologia, descrita no item 4.2.4. Para facilitar a descrição dos resultados dos parâmetros de ondas, obtidos pela análise do clima marítimo e pela modelagem numérica realizada a partir dos dados de ondas (condições de contorno) foi adotado um sistemas siglas (Tabela 3).

Tabela 3: Parâmetros de ondas e as siglas adotadas para descrevê-los.

Parâmetros de ondas	Siglas	Direções*	Siglas
altura significativa de ondas - em metros (m)	Hs	leste - nordeste	ENE
período de pico de ondas - em segundos (s)	Tp	leste	E
período de médio de ondas - em segundos (s)	Tz	leste - sudeste	ESE
direções de ondas - em graus (°)	Dir	sudeste	SE
		sul - sudeste	SSE
		sul - sudeste	S
		sul - sudoeste	SSW

**relativas ao azimuth de norte*

5.3.1. Análises descritivas do clima marítimo em águas profundas através dos dados de previsões de altura significativa de ondas, período de pico de ondas e direção do modelo WW3

O clima de ondas em águas profundas foi obtido através do modelo *WAVEWATCH III* da NOAA, para um período de doze anos e cinco meses de dados, retirados do ponto do modelo como mostrado na Figura 27.

A distribuição empírica dos dados de Hs e de Tp do modelo WW3 (Figura 38a e c) apresenta o quartil de 25% ocorrendo para ondas com Hs entre 0 a 1.47 metros e Tp entre 0 e 6.83 segundos. O quartil de 50% ocorre para ondas com Hs entre 1.47 e 1.87 metros e Tp entre 6.83 e 7.97 segundos. O quartil de 75% ocorre para ondas com Hs entre 1.87 e 2.38 metros e Tp entre 7.97 e 9.90 segundos, e o ultimo quartil de 99% ocorre para ondas Hs acima de 2.38 metros e Tp acima de 9.90 segundos.

A distribuição direcional de Hs e de Tp indica que aproximadamente 95% das direções de ondas do modelo WW3 foram de ENE até SSW (Figura 38b e d), no Anexo 3 (Tabela 8a e b).

A direção de ENE teve a maior ocorrência próxima a 21%, ocorrendo Hs e TP para todos os quartis. A direção de S teve a segunda maior ocorrência com aproximadamente 19% com predomínio de ondas com Hs acima de 1.47 metros (quartis de 50% a 99%) e Tp acima de 7.97 segundos (quartis de 75% e 99%). A direção SWW foi a terceira maior ocorrência próxima a 16% com predomínio de ondas com Hs acima de 1.87 metros (quartis de 75% e 99%) e Tp acima de 7.97 segundos (quartis de 75% e 99%), e a quarta maior ocorrência está indicada para a direção E com aproximadamente 13%, ocorrendo Hs e Tp para todos os quartis. As direções ESE a SSE ocorreram com menor freqüência (aproximadamente 8%).

Figura 38: a) Função de distribuição empírica de altura significativa de ondas (Hs); b) Rosa direcional de Hs; c) Função de distribuição empírica de Tp; d) Rosa direcional de Tp; extraídas do modelo de previsão WW3, de 1997 a 2009.

As direções de ondas que apresentaram frequência acima de 15% correspondem as ondas de direção S e SSW e possuem os maiores valores de Hs e Tp que excedem as probabilidades de 50%, 90%, 99% e 12 horas por ano (99,86%), se comparados com as ondas de direção ENE e E., no Anexo 3 (Tabela 8a e b)

O diagrama do comportamento do clima marítimo separado por direções no ponto do modelo WW3, obtido através da distribuição conjunta de Hs-Tp e a probabilidade de ocorrência de cada direção indicada, para os intervalos de Tp e HS definidos pode ser observado no Anexo 3 (Tabela 9).

Foi observado que o clima de ondas, para as direções entre ENE e E apresenta ondas com Hs entre 0 e 4 metros e Tp entre 2 e 10 segundos, com as maiores ocorrências, acima de 4%, para as ondas com Hs de 1 a 2 metros e Tp de 4 a 7 segundos. Para as ondas de direções entre ESE e SSE, Hs variou entre 0 e 5 metros e Tp entre 2 e 15 segundos, com as maiores ocorrências acima de 5%, para as ondas com Hs de 1 a 2 metros e Tp de 6 a 9 segundos. Para as ondas de direções de S e SSW, Hs variou entre 0 e 6 metros e Tp entre 2 e 16 segundos, com as maiores ocorrências acima de 5%, para as ondas com Hs de 1 a 2 metros e Tp de 6 a 11 segundos.

5.3.2. Definição dos casos de propagação de ondas com o modelo SWAN

Depois de realizar a análise do clima marítimo em águas profundas, veio a etapa de definição dos casos de propagação de ondas, (descrito no item 4.4.), sendo que esta definição foi realizada a fim de que não se comprometesse a qualidade dos resultados, e também levando em conta o tempo para a realização do processo de propagação.

Para definir os casos, inicialmente, foram analisados os resultados apresentados nas Figuras 38a e b, e no Anexo 3 (Tabela 8), onde foi observado que a grande maioria das ondas (95%) é originárias de ENE a SSW. Com isso, definiu-se que deveriam ser propagados casos de ondas para 7 (sete) direções (ENE, E, ESE, SE, SSE, S e SSW).

Com base no diagrama Hs-Tp (Figura 39), foi possível observar que a maior parte dos dados ocorre entre valores de Hs de 1 a 2,5 metros e entre valores de Tp de 6 a 10 segundos, mas que também foram obtidos dados entre o intervalo de Hs de 0,5 a 5 metros e entre Tp de 3 a 15 segundos. Dessa forma, foram selecionadas combinações de Hs e Tp, buscando dar maior resolução à região onde se concentra a maior parte dos dados. Porém, para a interpolação dos dados pela técnica do hipercubo foram escolhidos valores de Hs entre 1 a 5 metros e de Tp entre 6 a 14 segundos. Os dados que ocorrem

fora da área interpolada, mostrada pela Figura 39, são desprezados pela metodologia do hipercubo, não afetando o clima marítimo e o cálculo do fluxo médio de energia.

Figura 39: Diagrama das combinações de Hs e Tp gerado para a série de dados de 1997 a 2009 do modelo WW3.

Por ultimo, foram definidos os níveis de maré (descrito no item 4.2.5.). Para o período de dados medidos com o ondógrafo, entre os dias 09 a 23 de abril de 2009, foi possível observar que durante o período de maré sizígia (lua cheia), entre os dias 09 a 16 de abril de 2009, a variação da maré teve uma amplitude média de cerca de 1.0 metro, enquanto que no período em maré de quadratura (lua minguante), a partir do dia 17 de abril de 2009, a variação da maré teve uma amplitude média em torno de 0.5 metro (Figura 40a). Uma variação similar da amplitude média da maré pode ser observada para o porto de São Sebastião (SP), (Figura 40b), que está localizado ao sul da enseada de Caraguatatuba próximo a área de estudo. Estes valores foram obtidos através dos dados de previsão fornecidos pela DHN.

Através da observação destes resultados, que são limitados devido ao curto período de análise, e de acordo com as características de regimes de micro-marés para o litoral de São Paulo, onde a amplitude de maré não excede

os 2 metros, foram adotados dois valores de variação da maré, referentes a maré de sizígia e de quadratura para a definição dos casos a serem propagados. Para maré de sizígia foi adotado o valor de preamar de 1.00 metro e para maré de quadratura o valor preamar de 0.50 metro.

Figura 40: a) Variação da maré medida; b) Variação da maré obtida pelos dados de previsão da DHN para o porto de São Sebastião; período de 08 a 23 e abril de 2009.

Desta forma, ficou estabelecido um total de 210 casos de ondas para serem propagados com os modelos numéricos, como descrito no item 4.4.

5.3.3. Análises descritivas do clima marítimo de altura significativa de ondas (Hs), período de pico (Tp) e direção no Ponto P3 para os casos de ondas propagados (saída do modelo SWAN - entrada do modelo OLUCA)

O clima marítimo de altura significativa de ondas (Hs), período de pico (Tp) e direção no Ponto P3 foi obtido através da propagação dos casos de ondas com o SWAN até o Ponto P3 onde foram extraídos os dados modelados e realizada o acoplamento dos modelos SWAN_OLUCA.

A distribuição empírica dos dados de Hs e Tp no Ponto P3 (Figura 41a e c) apresentou o quartil de 25% para ondas com Hs entre 0 a 0.63 metros e Tp entre 6.00 e 7.60 segundos. O quartil de 50% ocorre para ondas com Hs entre 0.63 e 1.02 metros e Tp entre 7.60 e 10.17 segundos. O quartil de 75% ocorre para ondas com Hs entre 1.02 e 1.54 metros e Tp entre 10.17 e 12.34 segundos, e o último quartil de 99% ocorre para ondas com Hs acima de 1.54 metros e Tp acima de 12.34 segundos.

Através da distribuição direcional de Hs e Tp (Figura 41b e d) foi possível observar que aproximadamente 95% das direções de ondas no Ponto P3 foram de E até SSE.

A direção de E teve uma ocorrência próxima a 19% não ocorrendo ondas com Hs menores que 0.63 metros (quartil 25%) e com predomínio de Tp menor que 8.00 segundos (quartil 25%). A direção de ESE teve uma ocorrência próxima a 24% com predomínio de ondas com Hs acima de 1.02 metros (quartil 75% e 99%) e Tp entre 6.00 até maiores que 12.00 segundos (quartil 25% a 99%).

A direção SE e SSE teve as maiores ocorrências próximo a 29%. Para as ondas de SE ocorreu um predomínio de ondas com Hs acima de 0.63 metros (quartil 50% a 99%) e Tp predominante menor que 8.00 segundos (quartil 25%) e menor que 12.00 segundos (quartil 75%). Para as ondas de SSE ocorreu um predomínio de ondas com Hs abaixo de 0.63 metros (quartil 25%) e Tp predominante menor que 6.00 segundos (quartil 25%) e menor que 12.00 segundos (quartil 75%).

As outras direções de ENE, S e SSW presentes em águas profundas sofrem efeitos de refração e difração e já não ocorrem no Ponto P3.

Figura 41: a) Função de distribuição empírica de Hs; b) Rosa direcional de Hs; c) Função de distribuição empírica de Tp; d) Rosa direcional de Tp; extraídas no Ponto P3 de acoplamento do modelo SWAN_OLUCA para os casos propagados.

5.4. Modelagem numérica

5.4.1. Modelagem de ondas com o modelo SWAN

A propagação de ondas realizada com o modelo SWAN até águas rasas para servir como entrada para os casos de ondas propagados com o modelo MOPLA (item 5.4.2). Do total de 210 casos propagados com o SWAN (Tabela 7, Anexo 2), será demonstrado os casos (**Caso 26, 56, 65, 86, 116 e 146**) dos resultados obtidos de altura significativa de ondas (H_s) e direção, para as malhas M1(externa), M2 (intermediária) e M3 (detalhe), (Anexo 4).

5.4.2. Modelagem com o modelo MOPLA: módulo de onda (OLUCA) e módulo de corrente (COPLA) e módulo de transporte (EROS)

Do total de 210 casos de ondas propagadas com o modelo SWAN_OLUCA (Tabela 7, Anexo 2) foram escolhidos 12 casos para representar o comportamento da dinâmica sedimentar da região do arco praial de Massaguaçu através dos módulos COPLA (corrente) e EROS (transporte e variações morfológicas), como descrito no item 4.4. A Tabela 4 apresenta os 12 (doze) casos escolhidos correspondentes aos 210 casos propagados com os modelos SWAN_OLUCA, com o número de identificação dos casos e os valores dos parâmetros utilizados em cada caso, tanto em águas profundas (SWAN) como em águas rasas (OLUCA) no Ponto P3.

Tabela 4: Os 12 (doze) casos escolhidos correspondentes aos 210 casos propagados em águas profundas (SWAN) e seus valores equivalentes para propagar com o modelo OLUCA em águas rasas, a partir do Ponto P3.

Casos (1)	Hs	Tp	Direção	Marés	Gama	Dispersão	Casos (2)	Hs	Tp	Direção (1)	Direção (2)	Marés	Gama	Dispersão
5	1.50	6.00	67.5	0.50	3.3	20	5	0.84	6.00	88.6	32.4	0.50	3.3	20
26	3.50	12.00	67.5	1.00	8	15	26	1.75	12.00	99.4	21.6	1.00	8	15
35	1.50	6.00	90	0.50	3.3	20	35	1.15	6.00	97.2	23.8	0.50	3.3	20
56	3.50	12.00	90	1.00	8	15	56	2.16	12.00	104.9	16.1	1.00	8	15
65	1.50	6.00	112.5	0.50	3.3	20	65	1.19	6.00	111.1	9.9	0.50	3.3	20
86	3.50	12.00	112.5	1.00	8	15	86	2.23	12.00	119.2	1.8	1.00	8	15
95	1.50	6.00	135	0.50	3.3	20	95	1.06	6.00	128.8	-7.8	0.50	3.3	20
116	3.50	12.00	135	1.00	8	15	116	2.21	12.00	130.3	-9.3	1.00	8	15
125	1.50	6.00	157.5	0.50	3.3	20	125	0.83	6.00	143.7	-22.7	0.50	3.3	20
146	3.50	12.00	157.5	1.00	8	15	146	1.68	12.00	143.6	-22.6	1.00	8	15
155	1.50	6.00	180	0.50	3.3	20	155	0.51	5.69	152.1	-31.1	0.50	3.3	20
176	3.50	12.00	180	1.00	8	15	176	1.02	12.34	149.8	-28.8	1.00	8	15

*

Casos (1) - propagação com o SWAN

Casos (2) - saída SWAN/entrada OLUCA (ponto P3)

Direção (1) - direção correspondente ao ao norte geográfico no ponto P3

Direção (2) - direção referenciada ao eixo X da malha do OLUCA no ponto P3

Hs - altura significativa (metros)

Tp - período de pico (segundos)

Marés - preamar de quadratura quadratuta (0.50 m) e preamar de sizígia (1.00 m)

Dos 12 (doze) casos foram escolhidos 6 (seis) casos mais representativos para apresentar neste estudo e que possibilitam identificar e caracterizar os principais processos costeiros envolvidos na dinâmica litorânea no arco praial de Massaguaçu. Os 6 (seis) casos escolhidos são: **Caso 26, Caso 56, Caso 65, Caso 86, Caso 116, Caso 146**.

Optou-se pela escolha de apenas um caso de condições de baixa dinâmica e ondas (calmas), **Caso 65**, para demonstrar a pouca influência destas condições de ondas na dinâmica sedimentar no arco praial de Massaguaçu. Os outros 5 (cinco) casos, **Caso 26, Caso 56, Caso 86, Caso 116, Caso 146** são para condições de alta dinâmica de ondas (tempestades) e apresentam diferentes de influências nos padrões da dinâmica sedimentar do arco praial, conforme a direção originaria da onda.

As ondas de calmas propagadas em águas profundas com Hs de 1.50 metros e Tp de 6 segundos para todas as direções, com preamar de quadratura (0.50 metro), incidem no arco praial de Massaguaçu com Hs menor que 1.00 metro, não gerando correntes de deriva suficientemente capazes para transportar as areias, e por conseqüência não causam variações morfológicas ao longo deste arco praial. Para facilitar o corpo de texto desta dissertação as figuras foram diminuídas, no Anexo 5 estão todos os 6 (seis) casos em tamanho original, gerado pela MOPLA.

5.4.3. Módulo de onda (OLUCA) e módulo de corrente (COPLA)

Através das Figuras 42, 43 e 44, observam-se diferentes influências da dinâmica de ondas e das correntes conforme as diferentes direções de ondas propagadas em águas profundas. Foram propostos limites de abrangência para cada Segmento (1, 2 e 3) que variaram conforme a região de maior influência para cada caso.

É possível observar que as ondas de direções de ENE e E incidem mais diretamente na região ao sul (Segmento 1) do arco praial de Massaguaçu, e a dinâmica de ondas e correntes vai diminuindo de intensidade em direção ao norte deste arco praial (Segmento 2 e 3). A região de sombra que ocorre ao norte do arco praial, no Segmento 3, é maior para as ondas de direções ENE e E do que em comparação com as ondas de direções de ESE, SE e SSE, (Figuras 42, 43 e 44).

As ondas de ESE, E e SSE tem grande influência ao longo de quase todo o arco praial, com exceção ao Segmento 3 onde a dinâmica de ondas e correntes diminuí de intensidade devido a zona de sombra neste setor do arco praial. As ondas de ESE e SE são as que apresentaram as maiores alturas de ondas e velocidades de correntes ao longo do arco praial, e deste modo são as direções de ondas que exerce maior influencia na dinâmica litorânea neste arco praial, (Figuras 42, 43 e 44).

Para o **Caso 26** (Figura 42a e Figura 43a), observa-se que uma onda propagada em águas profundas Hs de 3.50 metros, Tp de 12s e de direção ENE (67.5°), com preamar de sizígia (1.00m), chega à no arco praial de Massaguaçu com Hs de 1.75 metros e com direção entre E e ESE de 99.4°. Nos Segmentos 1 e 2, entre a região do Capricórnio até Massaguaçu (norte) predomina Hs de 1.50 metros, diminuindo para 1.00 metros até a Cocanha. No Segmento 3 as ondas são bem difratadas e de menor altura significativa, com Hs de até 0.50 metro, com exceção ao sul da Mococa onde Hs foi de 1.00 metros. Poucas correntes são geradas ao longo do arco do praial.

Para o **Caso 56** (Figura 42b e Figura 43b), observa-se que uma onda propagada em águas profundas altura significativa de 3.50 metros, Tp de 12s E de direção de E (90.0°), com preamar de sizígia (1.00m), chega ao arco praial de Massaguaçu com Hs de 2.16 metros e com direção entre E e ESE de

104.9°. No Segmento 1 e 2, entre a região do Capricórnio até quase Massaguaçu (norte) Hs foi de 2.00 metros, diminuindo para Hs de 1.00 metros até a Cocanha. No Segmento 3 foi observado ondas bem difratadas e de menor altura significativa, com Hs de 1.00 metro ao norte da Cocanha e ao sul da Mococa e nos outros locais Hs foi de 0.50. Poucas correntes são geradas ao longo do arco do praial.

Para o **Caso 65** (Figura 42c e Figura 43c), observa-se que uma onda propagada em águas profundas com Hs de 1.50 metros, Tp de 6 segundos e de direção ESE (112.5°), com preamar de quadratura (0.50m), chega ao arco praial de Massaguaçu com Hs de 1.19 metros e direção entre E e ESE de 111.1°. No Segmento 1 e 2 foi de 1.00 metro entre a região do Capricórnio até quase Massaguaçu (norte), diminuindo para 0.50 metros até a Cocanha. No Segmento 3 as ondas são bem difratadas e de menor altura significativa, com Hs de até 0.50 metro. A geração de correntes é pouco pronunciada ao longo do arco praial.

Para o **Caso 86** (Figura 42d e Figura 43d), observa-se que uma onda propagada em águas profundas com altura significativa de 3.50 metros, Tp de 12 segundos e de direção ESE (112.5°), com preamar de sizígia (1.00m), chega ao arco praial de Massaguaçu com Hs de 2.23 metros e com direção entre ESE e SE de 119.2°. No Segmento 1 e 2 do Capricórnio até Massaguaçu (norte) Hs é de 2.00 metros diminuindo para 1.50 metros até a Cocanha. No Segmento 3, as ondas são bem difratadas e de menor altura significativa, com Hs de 1.00 metro ao norte da Cocanha e na Mococa e nos outros locais Hs foi de até 0.50 metro. A geração de correntes é bem pronunciada ao longo do arco praial, em comparação com os **Casos 26, 56 e 65**.

Para o **Caso 116** (Figura 42e e Figura 43e), observa-se que uma onda propagada em águas profundas com altura significativa de 3.50 metros, Tp de 12 segundos e de direção SE (135.0°), com preamar de sizígia (1.00m), chega ao arco praial de Massaguaçu com Hs de 2.21 metros e com direção entre ESE e SE de 130.3°. No Segmento 1 e 2 do Capricórnio até quase a Cocanha Hs é de 2.00 metros onde diminui para 1.50 metros, com exceção ao setor adiante de Massaguaçu (sul) em que Hs é de 1.50 metros. No Segmento 3 as ondas são bem difratadas de menor altura significativa, com Hs de 1.00 metro na

Cocanha e na Mococa, e Hs de 0.50 metro na Tabatinga. A geração de correntes é bem pronunciada ao longo do arco praial, em comparação com os **Casos 26, 56 e 65**.

Para o **Caso 146** (Figura 42f e Figura 43f), observa-se que uma onda propagada em águas profundas com altura significativa de 3.50 metros, Tp de 12 segundos e de direção SSE (157.5 °) com preamar de sizígia (1.00m), chega ao arco praial de Massaguaçu com Hs de 1.68 metros e com direção entre SE e SSE de 143.6°. No Segmento 1 e 2 do Capricórnio até o início da Cocanha Hs é de 1.50 metros, com exceção ao segmento adiante de Massaguaçu (sul) em que Hs é de 1.00 metro. No Segmento 3 as ondas são bem difratadas e de menor altura significativa, com Hs de 1.00 metro na Cocanha e na Mococa e até 0.50 metro na Tabatinga. A geração de correntes é pronunciada ao longo do arco praial, em comparação com os **Casos 26, 56 e 65**.

Figura 42: Vetores de direção e magnitude de altura significativa de onda (H_s) para as simulações; a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146.

Figura 43: Isolinhas de altura significativa de onda (H_s) e vetores de corrente para as simulações; a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146.

Para o **Caso 26** (Figura 44a), observa-se que no Segmento 1 ocorre a presença de corrente longitudinal a costa em ambos os sentidos e a presença de pequenas correntes de transversais a costa, dentro de pequenas células de circulação em vórtice. No Segmento 2, ocorre a presença de corrente longitudinal a costa para sul e também pequenas correntes de transversais a costa dentro de células de circulação em vórtice que neste Segmento 2 são menos desenvolvidas. As correntes observadas nos Segmentos 1 e 2 são de baixas magnitudes chegando a valores em torno de 0.15 e 0.10 m/s. Entre Massaguaçu (norte) até a Cocanha não são geradas correntes significativas. No Segmento 3, na Mococa ocorre correntes longitudinais e correntes de transversais dentro de células de circulação em vórtice, com valores de fluxo máximos próximo a 0.25 m/s.

Para o **Caso 56** (Figura 44b), observa-se que no Segmento 1 ocorre a presença de corrente longitudinal a costa para norte e a presença de corrente transversal a costa restrito a células de circulação em vórtices. As correntes apresentaram magnitudes em torno de 0.15 a 0.20 m/s. No Segmento 2, ocorre corrente longitudinal a costa em ambos os sentidos e a presença de corrente transversal a costa também restrita a pequenas células de circulação em vórtices pouco desenvolvidas. As velocidades das correntes são de menores magnitudes em torno de 0.15 a 0.10 m/s. No Segmento 3, na Mococa ocorre correntes longitudinais a costa em ambos os sentidos e correntes de transversais dentro de células de circulação em vórtice, com valores máximo de fluxo em torno de 0.25 m/s.

Para o **Caso 65** (Figura 44c), observa-se que ao longo do todo o arco praial (Segmentos 1, 2 e 3) as correntes geradas são de baixa competência, com predomínio de fluxo com velocidades menores que 0.10 m/s. (**Caso 65**),

Para o **Caso 86** (Figura 44d), o **Caso 116** (Figura 44e) e **Caso 146** (Figura 44f), observam-se padrões similares das correntes geradas ao longo do arco praial de Massaguaçu, com pequenas diferenças de intensidade de fluxo e dos limites de atuação das correntes, ou seja, diferentes setores com maior influencia de correntes para cada caso nos Segmentos 1, 2 e 3. No geral, as maiores velocidades de corrente foram observadas para os **Casos 86 e 116**, e a tendência é que os respectivos setores com maior influencia de correntes

(maior intensidade) dentro dos Segmentos 1 e 2 propostos para cada caso, migre mais em direção ao norte (Cocanha), a partir do **Caso 86** ao **Caso 146**.

O padrão de correntes observado mostra um predomínio de corrente longitudinal a costa para norte nos Segmentos 1 e 2, ocorrendo ainda a presença de correntes transversais a costa dentro de células de circulação em vórtices que são mais desenvolvidas e persistentes no espaço (ocorrem nos mesmos locais) no Segmento 1 que no Segmento 2.

No Segmento 1, a velocidade de corrente varia entre 0.20 e 0.30 m/s, chegando a 0.40 m/s para o **Caso 86** (Figura 44d) e o **Caso 116** (Figura 44e), e as correntes transversais dentro das células de circulação em vórtices são mais proeminentes que no Segmento 2 e ocorrem em 3 (três) locais bem definidos para todos estes casos. No Segmento 2, a velocidade de corrente é menor em torno de 0.10 a 0.20 m/s, chegando próximo a 0.30 m/s para os **Casos 86 e 116**. Os setores de maior influência das correntes variam no Segmento 2, com as correntes mais intensa, no **Casos 86** entre Massaguaçu (centro) e Massaguaçu (norte), no **Casos 116** no setor mais próximo de Massaguaçu (norte), e no **Casos 146** (Figura 44f), entre Massaguaçu (norte) e a Cocanha. Entre os Segmentos 1 e 2, no setor próximo a Massaguaçu (centro), a corrente longitudinal para norte perde intensidade, (Figura 44d, Figura 44e e Figura 44f).

No Segmento 3, na Mococa ocorre correntes longitudinais a costa em ambos os sentidos e correntes de transversais a costa dentro de células de circulação em vórtice, com velocidades médias de 0.10 a 0.20 m/s, chegando a 0.30 m/s para o **Caso 86** (Figura 44d) e o **Caso 116** (Figura 44e). Na Cocanha se observa corrente longitudinal a costa para norte e a presença de corrente de retorno transversal a costa mais evidente para os **Casos 86 e 116**, com velocidades de fluxo entre 0.10 e 0.15 m/s, (Figura 44d, Figura 44e e Figura 44f).

Figura 44: Vetores de direção de corrente e magnitude para as simulações; a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146.

Através da Figuras 45, observa-se o efeito da difração de ondas ocasionada pela ilha do Tamanduá, redistribuindo lateralmente a energia das frentes de ondas devido à diferença de altura de onda, além de mudar as orientações das frentes das ondas. Ao modificar os padrões de propagação de ondas pode-se observar a convergência de ondas em determinados pontos do arco praial, gerando zonas de foco de ondas que apresentam as maiores alturas de ondas ao longo do arco praial de Massaguaçu. A difração de ondas pela ilha do Tamanduá exerce influência, redistribuindo lateralmente a energia das frentes de ondas, aproximadamente até o ponto pouco ao sul de Massaguaçu (centro), no setor onde foi observado que as correntes longitudinais perdem intensidade (Figura 43 e Figura 44).

Para o **Caso 26** (Figura 45a) e o **Caso 56** (Figura 45b), observam-se que as frentes de ondas exercem maior influência na região ao sul (Segmento 1), e na região em Massaguaçu (centro) no Segmento 2 do arco praial de Massaguaçu, neste setor, principalmente para as ondas de E (**Caso 56**). Os valores de altura destas frentes foram em torno de 0.12 metros, chegando a 0.18 metros em frente à Massaguaçu (sul) para o **Caso 56**.

Para o **Caso 86** (Figura 45d), **Caso 116** (Figura 45e) e **Caso 146** (Figura 45f) observam-se que as frentes de ondas geradas pelas ondas de ESE, E e SSE, ao contrário das frentes observadas no **Casos 26 e 56**, além de ter grande influência no Segmento 1, também exercem influência no setor centro – norte do arco praial de Massaguaçu (Segmento 2), gerando 2 (duas) zonas de foco de ondas. Ainda, observa-se que as 2 (duas) zonas de focos de ondas variam conforme a direção de onda incidente. Para o **Casos 86**, as 2 (duas) zonas de foco estão posicionadas mais a sul do Segmento 2, mais próximo a Massaguaçu (centro). Para o **Caso 116** as 2 (duas) zonas de foco estão posicionadas mais ao centro do Segmento 2, entre Massaguaçu (centro) e Massaguaçu (norte), e para o **Caso 146** estas zonas estão deslocada mais para o norte deste segmento, em frente a Massaguaçu (norte).

As frentes de ondas de ESE e SE (**Casos 86 e 116**) são as que apresentaram as maiores alturas de frentes de ondas no Segmento 2, com valores próximo a 0.20 metros nas 2 (duas) zonas de foco de ondas

observadas. Para as ondas de SSE (**Caso 146**) as 2 (duas) zonas de foco têm valores de altura mais baixa em torno de 0.08 a 0.12 metros.

Figura 45: Altura de ondas e frentes para as simulações; a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146.

5.4.4. Módulo de transporte (EROS)

Através das Figuras 46 e 47, observam-se diferentes influências na dinâmica de ondas e das correntes gerando o transporte sedimentar de acordo com cada **Caso** propagado. Os limites de abrangência proposto para cada Segmento (1, 2 e 3) que variaram conforme a região de maior influência para cada caso e são semelhantes aos limites propostos para os casos de ondas e correntes (Figura 43, 44 e 45).

Para o **Caso 26** (Figura 46a), observa-se no Segmento 1 a ocorrência de transporte longitudinal a costa em ambas os sentidos ocorrendo também o transporte transversal a costa dentro das pequenas células de circulação em vórtices observadas. No Segmento 2 ocorre a presença de transporte longitudinal a costa para sul e pequeno transporte transversal a costa nos locais onde foram observadas as correntes transversais. A intensidade do transporte nos Segmentos 1 e 2 é de baixa magnitude de aproximadamente 6 a 1 m³/hora/m.l. Entre Massaguaçu (norte) até a Cocanha não ocorre transporte significativo. No Segmento 3, o transporte é praticamente nulo, com exceção a Mococa onde ocorre um transporte longitudinal para norte associado com as células de circulação em vórtices observadas, com valores de transporte de aproximadamente 4 m³/hora/m.l.

Para o **Caso 56** (Figura 46b), observa-se no Segmento 1 a ocorrência de o transporte longitudinal a costa para norte e ocorrendo também o transporte transversal a costa dentro das células de circulação em vórtices observadas, já mais pronunciada que no **Caso 26**. A intensidade do transporte no Segmento 1 é de aproximadamente 15 a 4 m³/hora/m.l. No Segmento 2, ocorre transporte longitudinal a costa em ambos os sentidos, com a presença de transporte transversal a costa dentro das células de circulação em vórtices menos desenvolvidas do que no Segmento 1. Os valores de transporte são de baixa magnitude em torno de 4 a 1 m³/hora/m.l. Entre os Segmentos 1 e 2 o transporte longitudinal diminui de intensidade. No Segmento 3, ocorre transporte longitudinal predominante para norte na Mococa associado com as células de circulação em vórtices observadas neste local, com taxas de transporte de aproximadamente 4 m³/hora/m.l

Através da Figura 46c (**Caso 65**), observa-se que não ocorre transporte efetivo ao longo do arco praial de Massaguaçu.

Para o **Caso 86** (Figura 46d), o **Caso 116** (Figura 46e) e do **Caso 146** (Figura 46f), observam-se padrão similares de transporte ao longo do arco praial, com pequenas diferenças nas taxas de transporte e nos limites dos setores com maior influência do transporte para cada caso nos Segmentos 1, 2 e 3. No geral, os maiores valores de transporte são observados para os **Casos 86 e 116**, e a tendência é que o limite dos Segmentos 1e 2 proposto para cada caso migre mais em direção ao norte (Cocanha), a partir do **Caso 86** até o **Caso 146**, de acordo com o padrão de corrente que foi observado.

O padrão de transporte observado mostra a ocorrência de transporte longitudinal a costa para norte nos Segmentos 1 e 2, mas também ocorrendo transporte transversal a costa associado as células de circulação em vórtices, que como já observadas, são mais desenvolvidas e persistente no espaço no Segmento 1.

No Segmento 1, os valores de transporte tem as maiores magnitudes com valores em torno de 16 e 4 m³/hora/m.l, chegando a valores aproximados de 20 m³/hora/m.l para o **Caso 86** (Figura 46d) e o **Caso 116** (Figura 46e). O transporte transversal associado com as células de circulação em vórtices são mais proeminentes que no Segmento 2 e ocorrem em 3 (três) locais bem definidos para todos estes casos.

Os setores de maior influência das correntes variam no Segmento 2, com as correntes mais intensa, no **Casos 86** (Figura 46d), entre Massaguaçu (centro) e Massaguaçu (norte),, no **Casos 116** (Figura 46e) no setor mais próximo de Massaguaçu (norte), e no **Casos 146** (Figura 46f), entre Massaguaçu (norte) e a Cocanha. Entre os Segmentos 1 e 2, no setor próximo a Massaguaçu (centro), a corrente longitudinal para norte perde intensidade.

No Segmento 2, os valores de transporte tem magnitudes em torno de com magnitude de até 14 e 4 m³/hora/m.l, chegando a valores próximos a 16 m³/hora/m.l para o **Caso 86** (Figura 46d) e o **Caso 116** (Figura 46e). Como já visto com as correntes, os setores de maior influência dos transportes associados a estas correntes variam no Segmento 2. O transporte é mais intenso, no **Casos 86**, entre Massaguaçu (centro) e Massaguaçu (norte), no

Casos 116 no setor mais próximo de Massaguaçu (norte) e no **Casos 146** (Figura 46f), entre Massaguaçu (norte) e a Cocanha. Entre os Segmentos 1 e 2, no setor próximo a Massaguaçu (centro), o transporte longitudinal para norte perde intensidade.

No Segmento 3 na Mococa ocorre transporte longitudinais a costa em ambos os sentidos e o transporte de transversais a costa associados as células de circulação em vórtice, com magnitudes de aproximadamente 4 a 1 m³/hora/m.l, chegando a 6 m³/hora/m.l na Mococa para os **Casos 86 e 116**. Na Cocanha se observa o transporte longitudinal a costa para norte e a presença de transporte transversal a costa em direção ao mar mais evidente para os **Casos 86 e 116**, com magnitudes de aproximadamente 4 a 1 m³/hora/m.l..

Figura 46: Vetores de transporte e magnitude para as simulações; a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146.

Para o **Caso 26** (Figura 47a), a variação final da morfologia é mais pronunciada e continua no Segmento 1 com valores de sedimentação e erosão entre ± 4 a ± 1 metro, enquanto que para o Segmento 2 a variação da morfologia é menos intensa e mais esparsa, com valores de sedimentação e erosão próximos de ± 2 a ± 1 metros. Não ocorrem variações efetivas da morfologia no Segmento 3.

Para o **Caso 56** (Figura 47b) a variação final da morfologia é mais pronunciada e continua no Segmento 1 com valores de sedimentação e erosão entre ± 14 a ± 1 metro, enquanto que no Segmento 2 e ao sul da Mococa a variação final da morfologia é menos pronunciada e esparsa, com valores de sedimentação e erosão entre ± 4 a ± 1 metro. Na Cocanha e na Tabatinga praticamente não ocorre variação da morfologia.

Para **Caso 65** (Figura 47c), observa-se que não ocorrem variações morfológicas ao longo do arco praiar de Massaguaçu.

Para **Caso 86** (Figura 47d), **Caso 116** (Figura 47e) e **Caso 146** (Figura 47f) observa-se que a variação final da morfologia é mais pronunciada e continua no Segmento 1 com valores de sedimentação e erosão que variaram entre ± 14 a ± 4 metros, chegando até ± 20 metros para os **Casos 86 e 116**.

No Segmento 2 a variação final da morfologia é um pouco menos pronunciada que no Segmento 1, mas ao contrário dos **Casos 26 e 56** neste Segmento 2, a variação observada é continua e não esparsa, e apresenta valores de sedimentação e erosão, entre ± 10 a ± 2 metros para o **Caso 86** (Figura 47d) e para o **Caso 116** (Figura 47e), e em torno de ± 8 a ± 1 metro para o **Caso 146** (Figura 47f). No Segmento 3 as variações da morfologia são mais significativas ao sul da Mococa e da Cocanha, com valores de sedimentação e erosão entre ± 4 a ± 1 metro.

Figura 47: Morfologia final e variação final da morfologia após 24 horas para as simulações: a) Caso 26; b) Caso 56; c) Caso 65; d) Caso 86; e) Caso 116; e f) Caso 146.

5.5. Análises descritivas do clima marítimo em águas rasas obtidas através da técnica do Hipercubo

Com os resultados das propagações a partir dos dados do modelo de previsão WW3, foi reconstruída a série temporal de dados de onda para pontos de interesse na praia, através da técnica do hipercubo. Isto permitiu avaliar o clima marítimo em águas rasas e também obter regimes médios de energia nos pontos de interesse.

Foi realizada uma comparação dos dados obtidos pelo ondógrafo com os dados modelados até o ponto onde estava localizado o fundeio (P10 – Ondógrafo). Vale ressaltar que esta comparação é aproximada, pois a série temporal do ondógrafo é de apenas 16 dias, enquanto os valores no Ponto 10 é correspondente a série temporal de aproximadamente 12 anos (modelo WW3) obtidos através da técnica do Hipercubo.

A direção de fluxo média para todos os pontos no Segmento 1 e 2, Ponto 1 a 5 e Ponto 10 foi do quadrante sudeste (SE). No Segmento 3 nos Pontos 6 e 9 a direção de fluxo média foi do quadrante sudeste (SE), enquanto nos Pontos 7 e 8 a direção de fluxo média foi do quadrante sudoeste (SW), (Tabela 5 e da Figura 48). Os vetores de intensidade e da direção do fluxo médio são relativamente similares, nos Segmentos 1 e o Segmento 2, porém os Pontos 1, 2, 4 e o Ponto 10 apresentaram relativamente uma maior intensidade de fluxo que os Pontos 3 e 6. No Segmento 3 o fluxo médio é de menor intensidade e também observa-se a mudança no padrão de direção em relação aos Segmentos 1 e 2, (Figura 48).

Tabela 5: Localização dos pontos de interesse próximo a praia e a direção de fluxo média obtida através da técnica do hipercubo.

Pontos	Localização	(X)m	(Y)m	Profundidade (m)	Direção do fluxo médio (°)
1	Capricórnio	463842.46	7387810.27	2.15	S42.9E
2	Massaguçú sul	464496.44	7389072.59	2.01	S48.2E
3	Massaguçú centro	465043.95	7389954.70	1.76	S45E
4	Massaguçú norte 1	465986.89	7391140.98	2.38	S39.7E
5	Massaguçú norte 2	467340.46	7392236.00	2.20	S24.5E
6	Cocanha	468268.19	7392601.01	1.90	S14.1E
7	Mococa	469378.43	7392889.98	1.94	S2.3W
8	Tabatinga	471051.38	7392509.76	2.19	S24.6W
9	Ilha do Tamanduá	469165.50	7391490.78	3.82	S0.4E
10	Ondógrafo	465773.97	7389468.02	7.52	S39.6E

Figura 48: Localização dos pontos de interesse próximo a praia e os vetores de direção e intensidade do fluxo médio de energia obtido através da técnica do hipercubo.

A série temporal reconstruída do regime médio de onda, com os valores de altura significativa de onda (H_s), direção, nos Pontos 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, pode ser observada no Anexo 3 (Figuras 51 e 52).

O diagrama do comportamento do clima marítimo separado por direções obtido através da distribuição conjunta de H_s -Tp nos Pontos 1, 3, 5, 6, 7, 8 podem ser observados no Anexo 3 (Tabelas 10 a 15).

O clima marítimo de altura significativa de ondas (H_s) e direção no Ponto P10 – Ondógrafo em comparação com o clima marítimo para os dados medidos de altura significativa de ondas (H_s) e direção neste ponto apresentou resultados similares. A distribuição empírica dos dados de H_s no Ponto P10 (Figura 49a) apresentou o quartil de 25% para ondas com H_s de até 0.27 metros, o quartil de 50% para ondas com H_s de até 0.66 metros e para o quartil de 75% para ondas com H_s de até 1.11 metros.

A distribuição empírica dos dados de Hs medidos pelo ondógrafo (Figura 49b), na mesma posição que o Ponto P10, apresentou o quartil de 25% para ondas com Hs de até 0.41 metros, o quartil de 50% para ondas com Hs de até 0.57 metros e para o quartil de 75% para ondas com Hs de até 0.74 metros.

Através da comparação da distribuição direcional de Hs no Ponto P10 (Figura 49c) com a distribuição direcional de Hs medida pelo ondógrafo (Figura 49d), na mesma posição que o ponto P10, foi possível observar que aproximadamente 95% das direções de ondas ocorrem para as ondas de SSE e SE, com predomínio das ondas de SSE de aproximadamente 45% para os dados modelados, e com predomínio de SE com aproximadamente 70% para os dados medidos.

Apesar da limitação em comparar séries temporais com período diferentes, os resultados apresentaram boa similaridade, tanto para os valores de Hs como para as direções observadas, demonstrando que a modelagem reproduziu, em linhas gerais, os processos costeiros de curto prazo ocorrentes nesse arco praial e podem explicar, de maneira satisfatória, a dinâmica sedimentar no arco praial de Massaguaçu

*** Rosa de direções altura significativa de ondas (Hs)
e período de pico de ondas (Tp) em diferentes escalas

Figura 49: Função de distribuição empírica de Hs; a) P10 ; b) Ondógrafo – dados medidos; Rosa direcional de Hs; c) P10; d) Ondógrafo – dados medidos.

6. DISCUSSÃO

Para entender a evolução de praias, é essencial o foco na interação entre a dinâmica e a morfologia. Os sedimentos são transportados pela dinâmica de ondas e correntes, ao mesmo tempo em que os sedimentos formam a praia. Como tal, para entender a dinâmica sedimentar, é requerido o conhecimento e o entendimento dos processos que descrevem o comportamento da morfodinâmica na praia, de acordo com três escalas de processos: de longo termo (equilíbrio dinâmico - anos e décadas), médio termo (sazonal – inverno – verão) e curto termo (condições de tempestades – horas a dias), (González *et al.*, 2009).

Na tentativa de descrever a atual situação morfológica e abordar os problemas erosivos responsáveis pela geração e manutenção de zonas de erosão acentuada (ZEA), ao longo do arco praial de Massaguaçu, foram consideradas nesta discussão algumas hipóteses de trabalho.

Partindo do princípio que o arco praial de Massaguaçu está sofrendo um processo de ajuste de sua curvatura, em função das atuais condições hidrodinâmicas e sedimentares, procurou-se entender como as areias transportadas pelas correntes de deriva litorânea, geradas pela quebra de ondas, influenciam na dinâmica sedimentar costeira nas zonas de erosão acentuada (ZEA), ao longo do arco praial de Massaguaçu.

A dinâmica sedimentar costeira responde pelas variações da linha de costa em um determinado segmento costeiro, que normalmente ocorrem devido ao transporte sedimentar longitudinal à costa que, por consequência, erode o prisma ativo da praia, e também pelo transporte sedimentar transversal à costa, que pode transferir o material arenoso da praia para as porções mais profundas da enseada. Ainda, a ocupação desordenada ao longo do arco praial de Massaguaçu, como a instalação inadequada de obras de engenharia (SP55 e muros de contenção), também pode estar influenciando no desenvolvimento dos processos erosivos, que tem impedido a recuperação do perfil praial.

O arco praial de Massaguaçu pode ser classificado com um sistema dominado por ondas, sendo este o principal agente responsável pela dinâmica sedimentar e modelador da linha de costa. Nuber (2008), considerando os

estudos de Klein e Menezes (2001), classificou o arco praial de Massaguaçu como “Praia Refletiva Semi-Exposta”, uma vez que Massaguaçu apresenta variação ao longo da costa do tamanho de grão e da morfologia, com predominância de arrebentação ascendente e frontal. Contudo, em momentos de energia de onda moderada a alta, sua zona de surfe adquire características de praia intermediária, apresentando dois ou três pontos de arrebentação, indicando a presença de bancos submersos com predomínio de arrebentação do tipo frontal, mergulhante e, por vezes, deslizante (Figura 27).

A região é caracterizada por uma dinâmica sedimentar coordenada por correntes litorâneas geradas pela incidência de ondas provindas do oceano aberto, que são controladas pela circulação atmosférica no Brasil Meridional. De acordo com Martins (2006), a circulação atmosférica e a caracterização meteorológica no Brasil Meridional estão relacionadas com a alternância de duas massas de ar, ambas de origem marítima, sendo uma polar e outra tropical. A alternância sazonal dessas massas de ar é controlada pela interação entre as oscilações de intensidade e posição do Anticiclone Polar Migratório Atlântico (APA) e o Anticiclone Tropical Atlântico (ATA).

O Anticiclone Polar Migratório Atlântico (APA) está associado à passagem dos sistemas de frontais (frentes frias), que afetam grande parte do sul e sudeste do Brasil e originam as ondas mais energéticas provenientes do quadrante SE-S-SW (Orselli, 1986). O Anticiclone Tropical Atlântico (ATA) gera ventos contínuos para o continente e origina as ondas provenientes do quadrante NE-E (Dominguez *et al.*, 2009).

Estas condições controlam o clima de ondas ao longo do litoral paulista (Tessler, 1988; Martins, 2006) e puderam ser constatadas através da análise do clima marítimo em águas profundas. Esta análise mostrou dois padrões predominantes das condições de ondas atuantes no litoral sudeste.

Um padrão é das ondas vindas do quadrante sul, de direções sul (S) e sul – sudoeste (SSW), que são ondas que, no geral, apresentaram as maiores alturas e períodos de onda, enquanto o outro padrão é das ondas de direção de leste – nordeste (ENE), que são ondas relativamente com menores alturas e períodos de ondas. Estes resultados estão de acordo com o trabalho da análise do clima marítimo em águas profundas para a costa brasileira com

base nos dados extraídos do modelo de retroanálise *WavewatchIII* (NCEP/NOAA) realizado por Pianca *et al.*, (2010).

A análise do clima de ondas no ponto P3 (acoplamento SWAN/OLUCA) para os casos de ondas propagados através dos modelos numéricos, de direções ENE a SSW, mostrou que estas ondas sofrem os efeitos da refração e da difração e chegam a este ponto com direções entre leste (E) e sul – sudeste (SSE).

As diferentes condições de ondas e maré propagadas através dos modelos numéricos mostraram que as condições de alta dinâmica de ondas (tempestade) é responsável por criar diferentes cenários de erosão, transporte e sedimentação ao longo do arco praial de Massaguaçu. Já as condições propagadas com características de baixa dinâmica de ondas (calmas), não exerceram nenhuma mudança significativa nos processos sedimentares deste arco praial.

As intensidades dos processos sedimentares litorâneos também variaram conforme a direção de onda propagada, sendo que as ondas de tempestade originárias de ESE, SE e SSE foram as que apresentaram maior influência na dinâmica do transporte sedimentar no arco praial de Massaguaçu. No entanto, para todas as direções de ondas propagadas em condições de tempestade foi possível notar a formação de correntes de deriva e geração de transporte longitudinal e transversal à costa.

As ondas de direções ENE e E são as únicas que apresentaram um transporte longitudinal à costa para sul, principalmente as ondas de ENE, onde este transporte para sul predomina ao longo de todo o arco praial. Já para as ondas de E, o transporte longitudinal para sul ocorre apenas entre Massaguaçu (norte) e o início da Cocanha. Entre o Capricórnio e Massaguaçu (centro), o transporte longitudinal é para norte. Os processos sedimentares atribuídos a estas direções são mais pronunciados ao sul do arco praial, entre o Capricórnio e Massaguaçu (sul), onde foram observadas as maiores variações morfológicas neste arco praial.

Para todas as outras direções propagadas em condições de tempestades, a resultante do transporte longitudinal é predominante para o norte, sendo que as ondas propagadas de ESE, SE e SSE geram os maiores

potências de transporte longitudinal e, desse modo, causam as maiores variações morfológicas para todos os casos. Já as ondas de SW, S são ondas bem difratadas pela ilha Bela, chegando ao arco praial de Massaguaçu com uma altura de onda relativamente baixa, em torno de 1 metro, e não acarretam significativas mudanças nos processos da dinâmica do transporte sedimentar.

Estes resultados estão de acordo com a discussão realizada por Nuber (2008) acerca dos padrões de distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do arco praial de Massaguaçu obtidas com base nos trabalhos de McIntyre (1977), Nordstrom (1977), McLaren (1981), e Klein *et al.*, (2005).

Nuber (2008), na face emersa do arco praial de Massaguaçu, observou valores obtidos com a média dos tamanhos médios do grão e constatou uma clara tendência de diminuição do tamanho médio do grão em direção à praia da Cocanha, que é uma região mais abrigada, enquanto que os maiores valores dos tamanhos de grão foram observados na região mais exposta ao embate de ondas na praia do Capricórnio. Com exceção da região centro – norte do arco praial de Massaguaçu, onde foi observada uma variabilidade dos valores médios de tamanho de grão, entre areias médias e areia grossas, sendo, talvez, esta variação associada à mudança da direção de transporte causada por diferentes ângulos de direção de incidência das ondas.

Em condições de tempestades, além do transporte longitudinal, que é predominante, ocorre o transporte transversal à costa, onde a areia é erodida da região próxima à linha de costa e é depositada em maiores profundidades, onde se estabelecem os bancos submersos. Esta variação da morfologia varia conforme as direções de incidências das ondas.

A máxima resposta do perfil praial às ondas de tempestades é expressa pela Regra de Bruun (Bruun, 1954), na qual o balanço sedimentar entre o volume erodido da face praial e o volume depositado em águas profundas está relacionado linearmente ao aumento do nível do mar induzido pelas ondas de alta energia (tempestade).

O sedimento fornecido para a célula litorânea de Massaguaçu (segmento 2) é, possivelmente, erodido da face emersa e transportado para a região submersa da praia, podendo ser aprisionado pela corrente longitudinal e transportado ao longo do arco praial. Ou, na ausência de correntes ao longo da

costa, este sedimento erodido da face emersa da praia pode atuar como um suplemento de areia para preencher as cúspides na linha de costa e os canais de corrente, através de uma retroalimentação negativa (Thornton *et al.*, 2007).

Para as ondas originárias de ESE, SE e SSE, esta variação em perfil ocorre de maneira continua, desde o Capricórnio até o início da Cocanha, contudo este processo sedimentar é mais intenso entre o Capricórnio até quase Massaguaçu (centro). Para as ondas de direções de ENE e E, esta variação morfológica ocorre de modo mais intenso e continuo apenas entre o Capricórnio até quase Massaguaçu (centro), onde, a partir de Massaguaçu (centro) até o início da Cocanha, as variações da morfologia observadas ocorrem de maneira mais esparsa, ou seja, em determinados locais ao longo deste segmento e também com menor intensidade que ao sul do arco praial.

Este processo sedimentar com o estabelecimento dos bancos rítmicos submersos, com maior ocorrência ao sul do arco praial e mais esparsos em direção ao norte do arco praial, puderam ser observados através do mapeamento sonográfico.

As barras ou bancos submersos correspondem a feições batimétricas rítmicas, devido às variações longitudinais na ocorrência das alturas da onda associadas com a presença de células de circulação. São formações de grande escala e, em longo prazo, alteram as condições de aproximação das ondas junto à costa. A resposta para variações na morfologia da zona de surfe pode formar diferentes formas de barras ao longo da costa, como uma barra crescente, uma barra unida à costa ou, em outras situações, barras transversas ou oblíquas à costa (Ruessink *et al.*, 2000).

Ainda, as barras formadas ao longo da costa podem ser um indicativo de um processo de retração da linha de costa (erosão). Neste caso, com os bancos poucos desenvolvidos ou esparsos (segmento centro – norte), ou o contrário, quando apresentam muitas barras e estas com tendência a se unir com a linha de costa, como observado no segmento mais ao sul do arco praial, evidenciam um processo de progradação da linha de costa.

Observando o padrão hidrodinâmico e sedimentar obtido com a modelagem numérica para as ondas de tempestades, pode-se notar a presença de três segmentos distintos ao longo do arco praial de Massaguaçu.

O primeiro segmento (Segmento 1) compreende a região entre o Capricórnio até quase Massaguaçu (centro), caracterizada por ser a região do arco praial com maior influência da dinâmica de ondas, correntes e transporte e que ocasionam as maiores variações da morfologia (erosão e sedimentação).

Foram observadas neste segmento células de circulação em vórtices bem desenvolvidas ocorrendo em locais bem definidos (persistentes no espaço), que podem aprisionar o sedimento que é transportado longitudinalmente pela deriva de corrente longitudinal. Desta forma, esta parcela de sedimento aprisionada pode acabar retornando em direção ao sul do arco praial (Capricórnio). Aliado a isto, ainda, pode-se observar que, na região próxima a Massaguaçu (centro), as correntes de deriva longitudinal perdem competência e, assim, diminui o potencial de transporte das areias ao longo da costa. Este fato sugere uma célula de circulação e de transporte de sedimentos de certa forma restrita a este segmento, onde uma parcela das areias movimentadas através da dinâmica costeira permanece neste segmento e não é disponibilizada para o transporte ao longo do arco praial de Massaguaçu.

O Segmento 1, entre o Capricórnio e Massaguaçu (centro) é constituído predominantemente de areias grossas na face emersa e areias finas na face submersa, onde se desenvolvem as formações rítmicas como bancos submersos, devido aos intensos processos de variação da morfologia observados. Em condições de tempestades, predomina a erosão dos sedimentos na zona junto à linha de costa, que é transportado ao longo do perfil e se deposita costa afora em maiores profundidades. A manutenção dos bancos nestes locais permite que, durante os eventos de tempestade, a praia se ajuste a um novo equilíbrio, permitindo que as ondas arrebenhem antes sobre estes bancos e dissipem assim parte de sua energia. Isto permite que a praia não venha a ser destruída, ou, em outras palavras, evite que ocorra a erosão sobre a linha de costa e sobre a face emersa da praia.

O segundo segmento (Segmento 2) compreende a região entre Massaguaçu (centro) até o início da Cocanha, onde a dinâmica de ondas, correntes e transporte e as variações da morfologia (erosão e sedimentação) são pronunciadas, porém menos significativas em comparação com o sul do

arco praial. Ainda, observa-se que, na região próxima a Massaguaçu (norte), os processos costeiros aumentam de intensidade e as correntes de deriva longitudinal para norte (direções ESE, E e SSE) ganham competência e aumentam o potencial de transporte das areias ao longo da costa. Nesses casos de deriva para o norte, uma parcela das areias remobilizadas e transportadas pelas correntes de deriva pode ultrapassar a Cocanha e ficar retida na zona de sombra existente entre a Cocanha e a Tabatinga. Para as ondas originárias de ENE e E, o sedimento é transportado para o meio desta enseada, através das correntes longitudinais para sul, principalmente para as ondas de ENE.

Este segmento é constituído na sua face emersa de tamanhos de grãos menores em relação ao Segmento 1. No Segmento 2 predominam as areias médias sobre a face emersa do perfil e sobre a face submersa predominam as areias finas. Quanto menor o tamanho de grão sobre um perfil de praia, maior a tendência de a praia ser mais plana e, assim, maior parte de seu volume tende a ficar depositada na porção submersa do perfil.

Porém, através do mapeamento sonográfico foi observada a presença de poucos bancos rítmicos neste segmento, o que leva a considerar que muito do sedimento que era para estar depositado sobre a face submersa do perfil pode estar sendo transportado longitudinalmente para outros setores do arco praial de Massaguaçu. Em condições de tempestades, a ausência desses bancos na face submersa do perfil não permite que a onda dissipe parte de sua energia sobre os bancos, indo dissipá-la mais diretamente sobre a linha de costa e a face emersa da praia, o que torna a praia mais suscetível a erosão de seu perfil emerso.

Nuber (2008), através da comparação de fotografias aéreas, observou que as ZEAs, segundo as definições de McNish (2004), apresentaram grande variação ao longo da costa, mas que os processos de erosão mais intensos se concentram principalmente na parte central do arco praial, iniciados em algum período entre os anos de 1977 a 1994. O mesmo autor, por meio dos resultados de variação de volume e de largura de 36 perfis bidimensionais obtidos no período de novembro de 2006 a março de 2008, reconheceu a existência de cinco possíveis ZEAs no segmento centro – norte do arco praial

de Massaguaçu (perfis 17 a 33), enquanto ocorre um crescimento de sedimentos, ou progradação da linha de costa nas regiões da praia do Capricórnio (perfis 1 a 10) e na praia da Cocanha (perfis 34 a 36), (Figura 11a e b).

Destas 5 (cinco) ZEAs, (3) três das ZEAs observadas ZEA 1, ZEA 2 e ZEA 3 encontram-se na área identificada como uma ZEA, pela da análise da variação da posição da linha de costa obtida através de fotografias aéreas. As outras duas ZEAs ocorrem ao sul da praia da Cocanha e têm, possivelmente, sua origem relacionada a uma tempestade, ocorrida em outubro de 2007, podendo ser definidas, de acordo com List *et al.*, (2006), como zonas de erosão acentuada reversas (*Reversing Storm Hotspots*), nesses casos definidas como ZEAT1 e ZEAT2 (Figura 12).

Nuber (2008) ressaltou que tais ZEAs relacionadas a eventos de tempestade (ZEAT1 e ZEAT2) puderam ser identificadas três meses após o evento, diferentemente do que indicado por List *et al.*, (2006), que observaram que tais feições se recuperam em poucos dias após o término da tempestade.

As zonas de erosão acentuada geradas pelas tempestades (ZEAT) têm sido reportadas apenas na costa leste americana, enquanto a formação de megacúspides na linha de costa associadas com as correntes de retorno são mais comumente observadas na costa oeste e do golfo. Isto é presumido devido às diferenças do clima de ondas entre essas costas (Thornton *et al.*, 2007).

As 3 (três) zonas de erosão acentuada (ZEAs), observadas no arco praias de Massaguaçu, são aparentemente irreversíveis, pois a retração da linha de costa no setor onde se observaram as 3 (três) ZEAs têm se mostrado permanentes ao longo das últimas décadas e, no presente momento, não existe um mecanismo natural que possa recuperar esta retração natural da linha de costa.

Kraus e Galgano (2001) propuseram que este fenômeno pode ser classificado de diversas maneiras: segundo a duração, extensão de influência lateral, processos responsáveis pela formação, mecanismo de erosão predominante (longitudinal ou perpendicular em relação à linha de costa) e, ainda, se o processo pode ser previsto e/ou remediado.

Dentre os vários tipos de ZEAs definidos na literatura, as ZEAs similares às observadas no arco praial de Massaguaçu aparentam ter sua geração e manutenção relacionadas a uma combinação de fenômenos, sejam eles, atuando de maneira direta (geração e manutenção), ou de forma indireta, apenas contribuindo para a manutenção destas ZEAs. Destes possíveis fenômenos associados às ZEAs observadas ao longo do arco praial de Massaguaçu, estão:

1. Aumento na frequência e na intensidade dos eventos de alta energia sobre a costa (ressacas) em um período de tempo de longo prazo (últimas décadas);
2. Presença de promontórios e/ou obstáculos, que podem alterar a os processos de refração e difração;
3. A batimetria residual ou a alteração dos contornos batimétricos próximos à costa;
4. A dinâmica sedimentar resultante do transporte sedimentar ao longo da costa, contribuindo para a perda de sedimentos;
5. Obras de engenharia costeira e a intensificação da urbanização;
6. Aumento do nível médio relativo do mar;
7. Mudança na orientação da linha de costa induzida por algum processo;
8. Redução da praia emersa (estreitamento) no embaçamento, onde ocorre a presença de megacúspides (feições rítmicas) e que estão associados com as correntes de retorno.
9. A variação na composição granulométrica e do tamanho médio de grão depositado na região aonde ocorre as ZEAs.

A presença da ilha do Tamanduá, localizada a nordeste do arco praial de Massaguaçu, é responsável por governar os processos de difração de ondas, que ocorrem principalmente no segmento centro – norte do arco praial de Massaguaçu. A difração redistribui lateralmente a energia das frentes de ondas devido à diferença de altura de onda, além de mudar as orientações das frentes das ondas, garantindo um gradiente longitudinal de altura de onda na praia. Além disto, a ilha do Tamanduá condiciona os contornos batimétricos próximo à isóbata de 10 metros de profundidade e, desta forma, pode estar

contribuindo para a manutenção de zonas de foco de ondas (refração) no segmento centro – norte (Figura 45). A batimetria residual, ou a alteração dos contornos batimétricos, em Massaguaçu pode, conseqüentemente, modificar os padrões de propagação de ondas e causar convergência e divergência de ondas em determinados pontos do arco praiar. Os efeitos da difração junto com a refração de ondas influenciam na orientação das frentes de onda na costa, contribuindo para o transporte sedimentar e gerando as ZEAs no arco praiar de Massaguaçu (Figura 50).

Figura 50: Os efeitos da ilha do Tamanduá condicionando a configuração da isóbatas de profundidades em seu entorno.

Mecanismos potenciais para explicar os desenvolvimentos das ZEA incluem a influência de fatores próximo à costa (barreiras, recifes), que interferem na propagação de ondas próximas à costa (Benedet *et al.*, 2007).

Mas, se a ilha do Tamanduá, em larga escala de tempo, sempre atuou de maneira direta na difração de ondas, criando as possíveis zonas de foco de ondas no segmento centro-norte do arco praiar, em conjunto com a refração de ondas, outro(s) fenômeno(s) a médio e curto prazo de tempo, possivelmente, vem causando a alteração da configuração da atual linha de costa. Ou seja, outro fenômeno deve ter desencadeado a geração das ZEAs no arco praiar de Massaguaçu.

Outro fator associado às ZEAs são os eventos de tempestades sobre a costa (ressacas), que causam grandes mudanças na dinâmica marinha e na

variação morfológica em um curto prazo, como observado através da modelagem numérica.

Assumindo que os eventos de tempestades atuam em combinação com os fenômenos de difração e refração ao longo prazo (escala decadal), para o estabelecimento da geomorfologia atual do arco praial, seria necessário um aumento na frequência e na intensidade destes eventos extremos, em um período de longo prazo, (últimas décadas), possibilitando assim a formação da ZEA. Isto também implicaria em um desfavorecimento do processo natural de recomposição do perfil praial, contribuindo para a manutenção da ZEA.

O estudo realizado por Calliari *et al.*, (1998) observou os impactos das tempestades sobre as praias do litoral do Rio Grande do Sul, analisando seus efeitos sobre a morfologia das praias e a erosão da linha de costa. Estes autores observaram um aumento na intensidade destas tempestades ao longo dos anos, relacionadas ao deslocamento das tempestades que passaram a atuar mais próximo do continente, causando um aumento dos processos erosivos sobre a linha de costa associadas às passagens das tempestades extratropicais.

Allan e Komar (2006) observaram para a costa oeste USA uma tendência de aumento das alturas de ondas e períodos em águas profundas durante os últimos 25 anos, possivelmente, relacionadas com o aquecimento global e outras oscilações (*El Niño*). Em águas rasas o aumento das alturas de ondas eleva o nível da água na costa através dos processos combinados da ascensão da onda (*run-up*) sobre a praia durante eventos de tempestades e das marés, resultando em maior erosão costeira.

A dinâmica dos sedimentos ao longo do arco praial de Massaguaçu, apesar de ser resultante do transporte sedimentar associado à dinâmica de ondas e correntes, está exercendo um importante papel na manutenção das ZEAs observadas no segmento centro - norte. Este papel deve-se, principalmente, à perda do material sedimentar, que é transportado longitudinalmente em condições de tempestades do Segmento 2 para o Segmento 3, localizado na região de sombra entre a Cocanha e a Tabatinga. Neste local o sedimento que foi transportado longitudinalmente fica retido (sumidouro). Ainda, assumindo um insuficiente aporte sedimentar externo à

enseada, que poderia repor o sedimento que foi perdido, fica mais evidente a contribuição da dinâmica sedimentar na manutenção destas ZEAs.

As obras de engenharia costeira realizadas em Massaguaçu e a intensificação da urbanização nessa praia ao longo das últimas décadas, aparentemente, não é a causa direta na formação das ZEAs observadas, pois muitas das obras realizadas são anteriores à geração dessas ZEAs. Por outro lado, quando os processos erosivos acentuados já estavam estabelecidos em alguns locais, foram realizadas obras para tentar conter a erosão nesses pontos, através de barreiras fixas, como a construção de um muro de contenção. A construção deste muro, possivelmente, facilitou a manutenção das ZEAs observadas. Este tipo de obra ocasiona um aumento da reflexão de ondas sobre o perfil praiar e faz com que se aumente a erosão e o potencial de transporte dos sedimentos da face emersa da praia (adjacentes ao muro) para a face submersa do perfil, de onde podem vir a ser transportados longitudinalmente. Ainda, como parte da orla foi aterrada, muito do sedimento, que poderia estar disponível para recompor o perfil ou ajustá-lo durante eventos de tempestades, não é disponibilizado, tornando esses locais ainda mais suscetíveis a erosão costeira.

O aumento do nível médio relativo do mar não poderia ser a causa principal da geração das ZEAs, pois em uma praia de tombo (alta declividade) sua variação horizontal sobre o perfil da praia seria pequena, a ponto de ser muito pouco provável que um aumento do nível médio do mar tenha gerado as ZEAs. Por outro lado, este aumento causaria uma elevação na cota de atuação dos processos costeiros (variação vertical), podendo, junto a outros fatores climáticos, contribuir para uma intensificação dos processos erosivos sobre a linha de costa.

Mudança da orientação da linha de costa induzida por algum fenômeno pode levar a um aumento das velocidades de correntes, principalmente as longitudinais, que são fortes no segmento das ZEAs e, conseqüentemente, elevar as magnitudes do transporte de sedimentos e as mudanças morfológicas. Benedet *et al.*, (2007) observaram que o efeito da mudança de orientação da linha de costa induzidas pela alimentação praiar (engordamento)

foi o processo relativamente mais significativo para o desenvolvimento das ZEA na praia de Delray, na costa sudeste da Flórida (USA) (Benedet *et al.*, 2007).

As ZEAs podem também se formar devido à redução da praia emersa (estreitamento) no embaçamento, onde existe a presença de megacúspides (feições rítmicas) e que estão associadas às correntes de retorno. A posição do estabelecimento das ZEAs pode migrar conforme a migração das correntes transversais associadas às megacúspides. (Thornton *et al.*, 2007). A região onde ocorrem as megacúspides é mais vulnerável à erosão esporádica da área emersa da praia, devido ao espraiamento da onda (*swash*) durante períodos em que coincidem altas marés e ressacas, que erodem a face emersa da praia e a deixam mais vulnerável frente às futuras tempestades. (Thornton *et al.*, 2007).

A variação na composição granulométrica e do tamanho médio de grão depositado na região aonde vem ocorrendo as ZEAs poderiam ser um fator não causador, mas um fator que ajudaria na manutenção destas ZEAs. Pois, na região centro – norte (segmento 2) do arco praial de Massaguaçu, foram observados tamanhos de grãos menores em relação aos da região ao sul do arco praial (Segmento 1). Sendo assim, áreas que recebem sedimentos mais finos tenderão a perder volumes mais facilmente da porção sub-aérea, na maioria dos casos em função do transporte perpendicular para fora da costa.

Por outro lado, Benedet *et al.*, (2007) ressaltam que as variações dos tamanhos de grãos ao longo da costa não poderiam ser a causa do aumento da erosão nos segmentos das ZEAs, uma vez que os tamanhos de grãos não são suficientemente finos onde a alta erosão é observada, ou vice-versa, e o tamanho de grão varia significativamente no tempo e no espaço.

O terceiro segmento compreende a região de sombra existente entre a Cocanha e a Tabatinga. Neste segmento, fica caracterizada uma região do arco praial com uma dinâmica menos intensa de ondas, correntes e transporte, e por consequência, onde ocorrem as menores variações da morfologia, em comparação com os outros segmentos deste arco praial. Nessa região as ondas são bem difratadas pelo promontório ao norte do arco praial de Massaguaçu, pela Ilha do Tamanduá e pelas ilhotas em frente à Cocanha.

Apesar de ocorrerem variações morfológicas menos pronunciadas que nos segmentos 1 e 2, observam-se altas velocidades de correntes na zona de sombra atrás das ilhas devido aos gradientes dos níveis da água induzidos pelas ondas e pelas mudanças na direção da onda induzida pela difração e refração, e pode-se notar claramente a formação de células de circulação em vórtices, conseqüentemente, movimentando os sedimentos nestes locais.

É possível que grande parte das areias transportadas longitudinalmente ao longo do arco praial, e que chega a este segmento, fique retida e localmente retrabalhada. Pois, como as ondas de ENE e E, que geram o transporte longitudinal para o sul e que poderiam disponibilizar estes sedimentos de volta aos outros segmentos ao sul deste arco praial, são parcialmente barradas pelo promontório a nordeste do arco praial e pela ilha do Tamanduá.

Nesse segmento, os sedimentos ficam retidos, podendo ser considerados como que deslocados para fora da dinâmica, que seria responsável pela realimentação do sistema praial.

Porém, é importante ressaltar a necessidade da realização de uma batimetria de detalhe nesta região compreendida entre a Cocanha e a Tabatinga (Segmento 3). A melhora nas condições de contorno (batimetria de detalhe) possibilitaria uma representação mais realista dos processos costeiros, que foram observados nesse segmento, através dos resultados da modelagem numérica.

A distribuição sedimentológica no Segmento 3 é predominantemente constituída de tamanho de grãos de areia média sobre a face emersa da praia e de areias finas a muito finas em sua porção submersa. Através do mapeamento com o sonar, foi identificada a presença de bancos bem desenvolvidos de ordem métrica, principalmente a tardoz, da ilha do Tamanduá, e das ilhotas da Cocanha, que ressaltam características de processos de acumulação de sedimentos (depósitos sedimentares).

Este processo acumulativo em frente à Cocanha já havia sido identificado por Nuber (2008), através da comparação de fotografias aéreas, tendo observado que, na região da Cocanha, ocorreu progradação da linha de costa (avanço em direção ao mar) em todo o período avaliado. Esse autor sugere que os sedimentos que chegam e se depositam nesta região abrigada

podem ficar retidos nesse local, caracterizando-o como um sumidouro de sedimentos.

Nuber (2008), através da comparação de fotografias aéreas, também observou que grande parte da linha de costa no arco praial de Massaguaçu sofreu progradação entre 1962 e 2006, sendo exceção a isso, as regiões no segmento centro - norte do arco praial, onde estaria ocorrendo retração da linha de costa, que deu início, em algum período entre os anos de 1977 e 1994 e, supostamente, estaria relacionada ao aumento da urbanização em Massaguaçu nesse período. Este processo erosivo no segmento centro – norte do arco praial (segmento 2) intensificou-se durante o período de 2001 até 2006.

Em contrapartida, os resultados observados por Nuber (2008), Souza e Luna (2010), também através cálculos das taxas de variação da linha de costa e do balanço sedimentar a partir de fotografias aéreas de 1962, 1977 e 2001, observaram um processo de recuo da atual linha de costa (em direção ao continente) em quase todos os transectos ao longo do arco praial de Massaguaçu, com as maiores taxas de retrogradação no trecho central da praia.

As diferenças encontradas entre os dois autores podem ter ocorrido porque as análises das variações da posição da linha de costa, através de fotografias aéreas, são métodos limitados, principalmente pela incapacidade de se calcular o erro da análise de sobreposição nas fotos aéreas e por trabalhar apenas com os valores de progradação e retração da linha da costa.

Nuber (2008) procurou validar as variações da linha de costa através da comparação entre as variações da linha de costa (m/ano), entre os anos de 2001 e 2006, com as variações de largura dos perfis (m/ano) medidas em campo realizadas nesse mesmo período. Esta comparação para representar as variações da linha de costa foi prejudicada, pois os 36 perfis bidimensionais medidos em campo utilizaram como linha de costa a máxima linha de água, enquanto, para a análise das variações da linha de costa através de fotografias aéreas, foi adotado como a linha de costa o limite superior da praia.

Contudo, Nuber (2008) notou que as tendências de variação entre a largura dos perfis praias e as variações da linha de costa são semelhantes em grande parte das linhas de controle. Com isso, o autor inferiu que as análises

da variação da linha de costa são válidas, uma vez que maior parte delas apresentou tendência de variação semelhante entre a linha de costa e a largura dos perfis. As regiões nas quais as tendências não coincidem estão associadas às regiões mais urbanizadas na linha de costa e podem ser decorrentes de erros na determinação da posição linha de costa.

De maneira geral, observando os processos sedimentares atuante sobre todo o arco praial de Massaguaçu, é possível interpretar que, para o transporte ao longo da costa, as correntes longitudinais formadas pela arrebentação das ondas e pelo seu ângulo de aproximação em relação à linha de costa, são os principais agentes causadores deste transporte. As correntes transversais à costa, em direção ao mar e em direção à costa, apesar de, aparentemente, serem menos pronunciadas que as correntes longitudinais, também são importantes para a dinâmica sedimentar e acarretam um esquema de tridimensionalidade dos processos costeiros nessa praia, onde os mecanismos de transporte através e ao longo da costa são de grande importância. Este esquema de tridimensionalidade fica evidente através das formações rítmicas observadas, como bancos submersos e cúspides ao longo do arco praial.

A partir da análise dos resultados foi elaborada uma carta síntese para visualização dos principais processos atuantes no comportamento da dinâmica sedimentar e na caracterização das zonas de erosão acentuada (ZEAs) no arco praial de Massaguaçu (Anexo 6).

7. CONCLUSÕES

A dinâmica sedimentar do arco praial de Massaguaçu apresentou dois padrões característicos responsáveis por criar diferentes cenários de erosão, transporte e sedimentação ao longo desse arco praial em condições de ondas de tempestades.

Um padrão, relacionado com as ondas de tempestades originárias de ENE e E, que exercem relativamente menor influência na dinâmica costeira no arco praial de Massaguaçu, principalmente no segmento centro – norte, onde se localizam as ZEAs, e no segmento a nordeste na zona de sombra, entre a Cocanha e a Tabatinga. Foram os únicos casos em que se observa uma corrente longitudinal à costa de baixa intensidade para sul, no segmento centro-norte, e que ocorre intercalada por pequenas células de retorno. A este padrão geral, opõem-se as ondas de E, que no Segmento 1 ao sul do arco praial onde, a corrente longitudinal é para o norte associada a correntes de retorno com células de circulação em vórtices em locais permanentes.

Os processos sedimentares atribuídos aos sistemas de ondas incidentes de ENE e E são mais acentuados e contínuos no Segmento 1 ao sul do arco praial, onde foram observadas as maiores taxas de transporte e as maiores variações da morfologia.

Outro padrão está relacionado às ondas de tempestades originárias de ESE, SE e SSE, principalmente as ondas de ESE e SE, que exercem maior influência na dinâmica costeira ao longo de todo o arco praial de Massaguaçu. As correntes de deriva longitudinal, em comparação aos outros casos, são de alta magnitude e direcionadas para o norte do arco praial. Ao sul, ocorrem correntes transversais associadas a restritas células de circulação em vórtices, especialmente posicionadas em locais permanentes. Já no segmento centro – norte as correntes transversais à costa são menos pronunciadas e ocorrem em locais semipermanentes, deslocadas lateralmente, em função da direção incidente das ondas.

Os processos sedimentares atribuídos aos sistemas de ondas originárias de ESE, SE e SSE são mais acentuados e contínuos no segmento ao sul do

arco praial (Segmento 1), onde foram observadas as maiores taxas de transporte e variações da morfologia. Apesar disso, possivelmente, uma significativa parcela do sedimento, que é transportado longitudinalmente em direção ao norte do arco praial, é aprisionada dentro das restritas células de circulação em vórtices e fica retida neste segmento. Não existindo nenhuma fonte externa atual de sedimentos que cheguem a este segmento e que permitam repor os sedimentos transportados longitudinalmente à costa, o aprisionamento dos sedimentos pelas células em vórtices explicaria, em parte, a ligeira progradação da linha de costa no Segmento 1 observada (o) nas últimas décadas.

No segmento centro – norte (Segmento 2), as taxas de transporte e as variações da morfologia também são pronunciadas. Ao contrário do que acontece no Segmento 1, a grande parcela do material sedimentar transportado longitudinalmente não é aprisionado pelas pequenas células de circulação semipermanentes observadas neste segmento. Deste modo, os sedimentos desta área são transportados longitudinalmente para o norte do arco praial (Segmento 3) e, nessa área, podem permanecer depositados. Isto explicaria, em parte, as taxas de retração da linha de costa observadas ao longo das últimas décadas no segmento centro – norte do arco praial de Massaguaçu, considerando que, no segmento ao sul, também ocorre o transporte longitudinal, porém a linha de costa apresenta ligeira progradação.

O modelo MOPLA do Sistema de Modelo Costeiro (SMC) mostrou ser uma boa ferramenta para o estudo da dinâmica costeira no arco praial de Massaguaçu, SP, embora não tenha sido possível realizar a calibração e a validação do modelo através de dados medidos.

Apesar dessa limitação, o MOPLA reproduziu, em linhas gerais, os processos costeiros de curto prazo ocorrentes nesse arco praial e seus resultados conseguiram explicar, de maneira satisfatória, a dinâmica sedimentar envolvida na geração e manutenção das zonas de erosão acentuada (ZEAs) no arco praial de Massaguaçu. Esses resultados contaram com o respaldo dos resultados obtidos pela caracterização sedimentar e pelo mapeamento sonográfico da face submersa do arco praial.

O motivo da intensificação dos processos erosivos ao longo das últimas décadas no segmento centro – norte do arco praial de Massaguaçu ainda não está totalmente claro. Dentre os possíveis fenômenos, que atuam na geração das ZEAs e na sua manutenção, o que parece fazer mais sentido é uma combinação de alguns desses fenômenos.

Supõe-se que a principal causa que desencadeou a geração das ZEAs no segmento centro – norte do arco praial de Massaguaçu seria um possível aumento na frequência e na intensidade dos eventos de tempestade sobre a costa (ressacas), ao longo das últimas décadas (longo prazo). Associado a isto, os efeitos de difração de ondas causada pela ilha do Tamanduá, redistribuindo lateralmente a energia das frentes de ondas ao longo da praia (diferença de altura de onda) e condicionando as isóbatas batimétricas em seu entorno, e que através dos efeitos da refração sobre essas isóbatas também influenciam na orientação das frentes de onda que chegam à praia.

Assumindo que os eventos de tempestades atuam em combinação com os fenômenos de difração e refração ao longo prazo (escala decadal), para o estabelecimento da geomorfologia atual do arco praial, seria necessário um aumento na frequência e na intensidade destes eventos extremos, em um período de longo prazo (últimas décadas), possibilitando assim a formação da ZEA. Isto também implicaria em um desfavorecimento do processo natural de recomposição do perfil praial, contribuindo para a manutenção da ZEA.

A mudança na dinâmica de ondas ao longo dos últimos anos, como um aumento na frequência e na intensidade das tempestades, ocasionaria um aumento do nível do mar induzido por estas ondas e, por conseqüência, um aumento da erosão na face praial.

Outros fatores podem ser considerados como responsáveis pela manutenção das ZEAs, entre eles a dinâmica sedimentar resultante do transporte sedimentar ao longo da costa, contribuindo para a perda de sedimentos. A mudança na orientação da linha de costa induzida pela própria ZEA, podendo intensificar as correntes longitudinais nestes setores, pode ser considerada como um desses fatores, além do aumento do nível médio relativo do mar, elevando a cota de atuação dos processos costeiros sobre a atual linha de costa.

A zona de erosão acentuada observada no arco praial de Massaguaçu é, aparentemente, irreversível, porque a retração da linha de costa no local onde se observou as três ZEAs é permanente e, no presente momento, não existe um mecanismo natural para recuperar esta retração da linha de costa e da pós-praia.

8. REFERÊNCIAS

ALLAN, J. C. and KOMAR, P. D., 2006. Climate Control in US West Coast Erosion Processes. *Journal of Coastal Research*. 22 (3), 511 – 529.

BAILARD, J. A., 1981. An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach. *Journal of Geophysical Research*. 86, 10938 – 10964.

BATTJES, J., 1971. Run-up distributions of waves breaking on slopes. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*. 97, 91 – 114.

BENEDET, L., FINKL, C. W. and HARTOG, W. M., 2007. Processes Controlling Development of Erosional Hot Spots on a Beach Nourishment Project. *Journal of Coastal Research*. 23(1), 33 – 48.

BRUUN, P., 1954. Coast erosion and the development of beach profiles. Beach Erosion Board. Washington D.C.: US Army Corps of Engineers. Technical Memorandum, 44, 1 – 79.

CALLIARI, L. J; TOZZI, H. E KLEIN, A. H. F., 1998. Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in southern Brazil – Rio Grande to Chuí, RS. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 70121: 231 – 247.

CARTER, R. W. G., 1988. *Coastal Environments – An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*. London: Academic Press, 617p.

CARTER, R. W. G. and WOODROFFE. C. D., 1994. Coastal Evolution: an introduction. In: CARTER R. W. G. and WOODROFFE C. D (org.), 1994. *Coastal Evolution: later quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press. 1 – 32.

CHAPPELL, J., 1983. Thresholds and lags in geomorphologic changes. *Australian Geographer*. 15, 357 – 366.

COWELL P. J. and THOM, B. G., 1994. Morphodynamics of coastal evolution. In: CARTER, R. W. G and WOODROFFE, C. D. (org.), 1994. Coastal Evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics. Cambridge: Cambridge University Press. 33 – 86.

DOMINGUEZ, J. M. L., ANDRADE, A. C. S., ALMEIDA, A. B. and BITTENCOURT, A. C. S. P., 2009. The Holocene Barrier Strandplains of the State of Bahia. In: DILLENBURG, S. R.; HESP, P. A. (org), 2009. Geology and Geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil. Berlin: Springer. 253 – 288. (Lecture Notes in Earth Sciences, v. 107, 2009).

FINKL, C. W., 1996. What Might Happen to America's Shorelines if Artificial Beach Replenishment is Curtailed: a Prognosis for Southeastern Florida and Other Sandy Regions Along Regressive Coasts. Journal of Coastal Research. 12 (1), iii – ix.

FOLK, R. L. and WARD, W. C., 1957. Brazos River bar: a study in significant of grain size parameters. Journal of Sedimentary Research. 27, 3 – 26.

GIOC, 2003. Coastal Modelling System (SMC) – Reference and User Manual. State Coast-Office-Spanish Environmental Ministry and the University of Cantabria. 82p. [in Spanish].

GIOC, 2003a (Ocean and Coastal Research Group). Spectral Wave Propagation Model (OLUCA-SP 2.0). State Coast-Office-Spanish Environmental Ministry and the University of Cantabria. 170p. [in Spanish].

GIOC, 2003b. Wave-Induced Currents Model in the Surf Zone (COPLA-SP). CITY, COUNTRY: State Coastal Office–Spanish Environmental Ministry and the University of Cantabria. 61p. [in Spanish].

GIOC, 2003c. 2DH-Morphodynamic Evolution Model for Near Shore Areas (MOPLA). Santander, Spain: State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and the University of Cantabria. 262p. [in Spanish].

GIOC, 2003d. Erosion and Sedimentation Evolution Model (EROS). State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and the University of Cantabria. 55p. [in Spanish].

GONZÁLEZ, M., MEDINA, R., GONZÁLEZ-ONDINA, J., OSORIO, A., MÉNDEZ, F. J., and GARCÍA, E., 2007. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. Computers & Geosciences. 33(7), 916 – 931.

GONZÁLEZ, M., MEDINA, R., BERNABEU, A. M. and NOVÓA, X., 2009. Influence of beach morphodynamics in the deep burial of fuel in beaches. Journal of Coastal Research. West Palm Beach (Florida). 25(4), 799 – 818.

HSU, J. R. C., SILVESTER, R. and XIA, Y. M., 1989. Static equilibrium bays: new relationships. J. Waterway, Port, Coastal Ocean. Eng., ASCE 115 (3), 285 – 298.

KERWIN, L. 1997. Potential Application for Recycled Glass in Beach Management: Emergency Stabilization of Erosional “Hot Spots” Broward County, Florida. Dissertação de Mestrado. Florida Atlantic University, Faculty of College of Science, 152 p.

KIRBY, J. T. and ÖZKAN, H. T., 1994. Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions. REF/DIF version 1.1 Documentation and user's manual. Report nº CACR – 94 – 04, Center Applied Coastal Research, University of Delaware.

KLEIN, A. H. F. and MENEZES, J. T., 2001. Beach morphodynamics and profile sequence for a headland bay coast. Journal of Coastal Research. 17(4), 812 – 835.

KLEIN, A. H. F., MIOT DA SILVA, G., FERREIRA, Ó. and DIAS, J. A., 2005. Beach Sediment Distribution for a Headland Bay Coast. Journal of Coastal Research. SI 42, 285 – 293.

KOMAR, P. D., 1997. Beach Processes and Sedimentation. 2nd Edition. New Jersey: Prentice Hall. 546p.

KRAUS, N. C. and GALGANO, F. A., 2001. Beach Erosional Hot Spots: Types, Causes and Solutions. Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note CHETN-II-44. U.S. Army Engineering Research and Development Center, Vicksburg, MS. 17p.

KRUMBEIN, W. C., 1934. Size Frequency Distribution of Sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*. 4, 65 – 77.

LIST, J. H., FARRIS, A. S. and SULLIVAN, C., 2006. Reversing storm hotspots on sandy beaches: Spatial and temporal characteristics. *Marine Geology*. 226, 261 – 279.

LIU, P. L-F., 1990. “Wave transformation”, in the Sea, Wiley-Interscience Publication. (9), 27-63.

LIU, P. L-F. and LOSADA, I. J., 2000. El modelado matemático de la propagacion del oleaje em ingeniería de costas. *Ingeniería Del Água*. (7), 1 – 10.

LONGUET-HIGGINS, M. S., 1970. Longshore currents generated by obliquely incident seawaves. *J. Geophys. Res.* 75, 6778–6801.

MARTINS, C. C., 2006. Morfodinâmica de Praias Refletivas: Estudo de Caso na Praia da Sununga, Litoral Norte do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 209p.

MASSELINK, G. and TURNER, I. L., 1999. The effect of tides on beach morphodynamics. In: SHORT, A. D., *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. London: John Wiley & Sons, Chichester. 204 – 229.

McINTYRE, A. D., 1977. Sandy Foreshore. In: BARNES, R. S. K. (org.). *The Coastline*. London: John Wiley & Sons. Cap. 2.

McLAREN, P., 1981. An Interpretation of Trends in Grain Size Measures. *Journal of Sedimentary Petrology*. 51(2), 611 – 624.

McNISH, J. E., 2004. Geologic control in the nearshore: shore-oblique sandbars and shoreline erosional hotspots, Mid-Atlantic Bight, USA. *Marine Geology*. 211, 121 – 141.

MESQUITA, A. R. and HARARI, J., 1983. Tides and tides gauges of Cananéia and Ubatuba – Brazil (Lat. 24°). Relatório interno Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 11, 1 – 14.

MODENESI, M. C., TESSLER, M. G., CRUZ, O. and COIMBRA, A. M., 1983. Influence of Marine and Contiental Processes on Dynamics of a Sand-Ridge at the Mouth of the Massaguaçu River (Caraguatatuba, SP): preliminary conditions. *Boletim do Instituto Oceanográfico da USP*. 32(1), 77 – 81.

NORDSTROM, K. F., 1977. The Use of Grain Size Statistics to Distinguish Between High and Moderate Energy Beach Environments. *Journal of Sedimentary Petrology*. 47(3), 1287 – 1294.

NUBER, E., 2008. Evolução morfológica e sedimentológica do Arco Praial de Massaguaçu, Litoral Norte de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico.

ORSELLI, J., 1986. Climatologia. In: GAPLAN-SC. Atlas de Santa Catarina. 38 – 39.

PIANCA, C., MAZZINI, P. L. F. and SIEGLE, E., 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*. 58(1), 53 – 70.

RUESSINK, B. G. and TERWINDT, J. H. J., 2000. The behaviour of nearshore bars on the time scale of years: a conceptual model. *Marine Geology*. 163, 289 – 302.

SCHUMM, S. A., 1979. Geomorphic thresholds: the concept and its applications. *Transactions of the Intitute of British Geographers*, NS. 4, 485 – 515.

SIEGLE, E., 2003. Sediment Transport and Morphodynamics at an Estuary Mouth: a Study using Coupled Remote Sensing and Numerical Modelling. Tese de doutorado. University of Plymouth. 267p.

SILVEIRA, L. F., 2009. Apostila do curso para aplicação da modelagem numérica com os programas SWAN e SMC. Itajaí: IH Cantábria e Univali.

SOUZA, C. R. G., 1990. Considerações sobre os Processos Sedimentares Quaternários e Atuais na Região de Caraguatatuba, Litoral Norte do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico.

SOUZA, C. R. G. and LUNA G. da C., 2010. Variação da linha de costa e balanço sedimentar de longo período em praias sob risco muito alto de erosão do município de Caraguatatuba (Litoral Norte de São Paulo, Brasil). Revista da Gestão Costeira Integrada. 10(2), 31 – 51.

SHEPARD, F. P., 1954. Nomenclature based a sand-silt-clay rations. Journal Sedimentary Petrology. 24(3).

SOULSBY, R., 1997. Dynamics of marine sands. London: Thomas Telford Publications. 249p.

SUGUIO, K., 1973. Introdução à Sedimentologia. São Paulo: Edgard Blücher/EDUSP. 317p.

TESSLER, M. G., 1988. Dinâmica Sedimentar Quaternária no Litoral Paulista. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. 2 vol.

THORNTON, E. B., MACMAHAN, J. and SALLENGER Jr. A. H., 2007. Rip currents, mega-cusps, and eroding dunes. Marine Geology. 240, 151 – 167.

TOLMAN, H. L., 2002. User Manual and System documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA.

WENTWORTH, C. K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology. 30, 377 – 392.

WOODROFFE. C. D., 2002. Coasts: Form, process and evolution. Cambridge: Cambridge University Press. 623p.

WRIGHT, L. D. and SHORT, A. D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*. 56, 93 – 118.

WRIGHT, L. D. and THOM, B. G., 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography*. 1, 412 – 459.

ANEXOS 1

Tabela 6: Resultados das análises estatísticas baseados em Folk e Ward (1957) das 81 amostras coletadas em outubro de 2009, com valores em milímetros.

Amostras	%CaCO ₂	% granulos	% areia	% silte	% argila	% lama	Intervalo predominante Ø	Folk & Ward (1957)				Classificação Separd (1954)
								DM	DP	ASS	CURT	
1	6.40	-	94.44	5.56	-	5.56	4	3.70	0.50	-0.38	4.28	Areia
2	14.22	0.53	76.85	22.62	-	22.62	4	3.64	0.62	-0.32	1.73	Areia
3	5.65	-	91.61	8.39	-	8.39	4	3.78	0.17	0.06	1.14	Areia
4	7.73	-	76.49	23.51	-	23.51	4	3.83	0.31	-0.07	1.48	Areia
5	10.00	-	99.54	0.46	-	0.46	1.5	1.19	0.47	0.20	1.53	Areia
6	6.87	-	87.07	12.93	-	12.93	4	3.78	0.25	-0.07	1.52	Areia
7	6.43	-	83.57	16.43	-	16.43	4	3.81	0.22	0.03	1.28	Areia
8	8.10	-	75.66	24.34	-	24.34	4	3.86	0.25	0.06	1.23	Areia
9	6.27	-	83.15	16.85	-	16.85	4	3.82	0.21	0.08	1.20	Areia
10	5.23	-	84.92	15.08	-	15.08	4	3.76	0.25	0.03	1.15	Areia
11	3.87	-	94.31	5.69	-	5.69	4	3.70	0.22	-0.08	1.25	Areia
12	7.17	-	81.23	18.77	-	18.77	4	3.78	0.30	-0.04	1.32	Areia
13	6.53	-	88.70	11.30	-	11.30	4	3.79	0.19	0.07	1.17	Areia
15	6.67	-	81.77	18.23	-	18.23	4	3.78	0.28	-0.02	1.27	Areia
16	5.70	-	90.59	9.41	-	9.41	4	3.70	0.24	0.00	1.16	Areia
17	15.27	-	5.33	89.44	5.03	94.47	5.5	5.32	1.26	0.63	0.97	Silte
18	4.07	-	90.09	9.91	-	9.91	4	3.69	0.27	-0.05	1.23	Areia
19	15.07	-	76.24	23.76	-	23.76	4	3.75	0.35	-0.06	1.09	Areia
20	7.00	-	87.65	12.35	-	12.35	4	3.68	0.29	0.01	1.09	Areia
21	16.30	-	54.53	42.43	3.04	45.07	4.5	4.11	0.72	0.58	2.03	Areia Siltosa
22	5.90	-	89.84	10.16	-	10.16	4	3.73	0.26	-0.08	1.44	Areia
23	6.63	-	91.47	8.53	-	8.53	4	3.74	0.23	-0.06	1.36	Areia
24	9.20	-	84.91	15.09	-	15.09	4	3.70	0.32	-0.09	1.28	Areia
25	8.65	-	88.74	11.26	-	11.26	4	3.65	0.36	-0.22	1.58	Areia
26	7.50	-	86.70	13.30	-	13.30	4	3.74	0.26	0.00	1.23	Areia
27	5.87	-	87.79	12.21	-	12.21	4	3.67	0.30	-0.02	1.11	Areia
28	3.43	-	97.18	2.82	-	2.82	4	3.57	0.23	-0.02	1.01	Areia
29	4.33	-	95.45	4.55	-	4.55	3.5	3.51	0.27	0.12	1.01	Areia
30	5.70	-	91.16	8.84	-	8.84	4	3.66	0.28	-0.08	1.24	Areia
31	5.18	-	95.95	4.05	-	4.05	4	3.58	0.25	-0.09	1.05	Areia
32	-	-	90.82	9.18	-	9.18	4	3.54	0.48	-0.24	1.68	Areia
33	10.07	-	84.81	15.19	-	15.19	4	3.62	0.36	0.05	0.98	Areia
34	5.67	-	90.64	9.36	-	9.36	4	3.61	0.30	0.02	1.04	Areia
35	5.50	-	88.13	11.87	-	11.87	4	3.59	0.32	0.17	0.98	Areia
36	5.00	0.11	95.08	4.81	-	4.81	3.5	3.47	0.26	0.24	1.11	Areia
37	3.35	-	99.20	0.80	-	0.80	3.5	3.42	0.24	0.01	1.00	Areia
38	3.90	0.08	97.32	2.61	-	2.61	3.5	3.46	0.26	0.08	1.02	Areia
39	3.90	0.96	96.90	2.14	-	2.14	3.5	3.42	0.25	0.11	1.07	Areia
40	2.88	-	98.40	1.60	-	1.60	3.5	3.47	0.23	0.08	1.02	Areia
41	3.28	1.89	94.97	3.14	-	3.14	4	3.53	0.27	-0.13	1.04	Areia
42	4.10	1.14	96.34	2.51	-	2.51	3.5	3.47	0.27	0.03	1.00	Areia
43	3.95	4.85	92.65	2.50	-	2.50	4	3.51	0.71	-0.51	4.01	Areia
44	2.80	2.88	95.34	1.78	-	1.78	4	3.49	0.31	-0.29	1.27	Areia
45	3.58	0.54	96.94	2.51	-	2.51	4	3.55	0.26	-0.15	1.06	Areia
46	3.88	0.57	98.93	0.49	-	0.49	4	3.51	0.22	-0.17	1.04	Areia
47	3.18	1.24	97.49	1.27	-	1.27	3.5	3.43	0.29	-0.13	1.14	Areia
48	3.03	0.41	98.38	1.21	-	1.21	4	3.53	0.23	-0.14	1.04	Areia
49	4.50	0.84	97.88	1.28	-	1.28	3.5	3.45	0.24	0.04	1.01	Areia
50	2.93	-	98.04	1.96	-	1.96	4	3.47	0.60	-0.57	2.62	Areia
51	4.05	-	98.67	1.33	-	1.33	3.5	3.45	0.26	-0.03	0.99	Areia
52	4.48	-	96.34	3.66	-	3.66	4	3.46	0.54	-0.38	2.31	Areia
53	38.02	-	94.46	5.54	-	5.54	4	3.03	0.91	-0.64	0.66	Areia
54	18.43	-	63.84	31.87	4.29	36.16	4.5	4.10	1.20	0.45	2.63	Areia Siltica
55	35.93	-	14.33	63.34	22.33	85.67	6.5	6.16	1.80	0.05	0.62	Silte Argiloso
56	20.80	-	84.83	15.17	-	15.17	4	3.76	0.28	-0.06	1.37	Areia
57	16.25	0.33	83.09	16.58	-	16.58	3	2.81	1.39	-0.67	0.75	Areia
58	17.03	0.03	56.14	40.58	3.25	43.83	4.5	4.40	1.83	0.29	1.78	Areia Siltica
59	15.80	0.34	68.98	26.61	3.07	29.68	4	3.56	1.68	-0.10	2.32	Areia Siltica
60	13.15	0.12	90.23	9.65	-	9.65	3	2.96	1.14	-0.69	0.77	Areia
61	11.18	0.76	83.14	13.28	2.81	16.09	4	3.61	1.05	0.07	4.32	Areia
62	7.45	0.00	96.75	3.25	0.00	3.25	4	3.68	0.47	-0.39	4.41	Areia
63	9.25	0.14	93.68	6.18	-	6.18	4	3.58	0.52	-0.44	2.68	Areia
64	27.17	1.05	98.90	0.05	-	0.05	1	0.94	0.78	-0.02	0.96	Areia
65	16.85	0.49	85.73	10.72	3.06	13.78	4	3.74	0.93	0.08	6.94	Areia
66	8.68	0.00	96.65	3.35	0.00	3.35	4	3.68	0.21	-0.13	1.34	Areia
67	21.77	13.17	86.47	0.36	0.00	0.36	1	0.56	1.34	0.04	1.41	Areia
71	6.95	-	88.85	11.15	-	11.15	4	3.72	0.49	-0.33	3.34	Areia
72	5.43	-	98.20	1.80	-	1.80	4	3.14	0.67	-0.51	1.27	Areia
74	5.43	-	89.28	10.72	-	10.72	4	3.76	0.23	-0.02	1.31	Areia
75	9.80	-	79.00	21.00	-	21.00	4	3.85	0.23	0.11	1.18	Areia
76	16.72	0.00	77.29	18.17	4.54	22.71	4	3.88	1.77	0.25	3.61	Areia
77	7.08	-	92.59	7.41	-	7.41	4	3.69	0.23	-0.04	1.21	Areia
78	8.40	-	91.06	8.94	-	8.94	4	3.66	0.45	-0.37	2.72	Areia
79	8.43	-	89.20	10.80	-	10.80	4	3.65	0.51	-0.42	2.94	Areia
80	11.15	0.11	84.17	15.71	-	15.71	4	3.63	0.46	-0.28	1.53	Areia
81	5.03	-	96.75	3.25	-	3.25	4	3.52	0.45	-0.48	1.95	Areia
82	5.48	0.19	99.48	0.33	-	0.33	1.5	1.15	0.58	0.13	1.36	Areia Média
84	5.05	-	93.89	6.11	-	6.11	4	3.53	0.57	-0.52	2.41	Areia
85	7.23	-	93.48	6.52	-	-	4	3.70	0.40	-0.32	3.10	Areia
86	5.15	-	97.42	2.58	-	2.58	4	3.31	0.64	-0.59	1.77	Areia
87	5.30	-	94.96	5.04	-	5.04	4	3.62	0.47	-0.48	3.38	Areia
88	5.27	-	92.11	7.89	-	7.89	4	3.77	0.17	0.05	1.12	Areia

ANEXOS 2

Tabela 7: Os 210 casos de ondas propagados propagados (SWAN_OLUCA).

Caso	Hs	Tp	Dir	Marea	Gama	Disp	Caso	Hs	Tp	Dir	Marea	Gama	Disp	Caso	Hs	Tp	Dir	Marea	Gama	Disp
1	1	6	67.5	0.5	3.3	20	71	2	6	112.5	0.5	3.3	20	141	2.5	12	157.5	0.5	8	15
2	1	6	67.5	1	3.3	20	72	2	6	112.5	1	3.3	20	142	2.5	12	157.5	1	8	15
3	1	12	67.5	0.5	8	15	73	2	8	112.5	0.5	3.3	20	143	3.5	8	157.5	0.5	3.3	20
4	1	12	67.5	1	8	15	74	2	8	112.5	1	3.3	20	144	3.5	8	157.5	1	3.3	20
5	1.5	6	67.5	0.5	3.3	20	75	2	10	112.5	0.5	8	15	145	3.5	12	157.5	0.5	8	15
6	1.5	6	67.5	1	3.3	20	76	2	10	112.5	1	8	15	146	3.5	12	157.5	1	8	15
7	1.5	8	67.5	0.5	3.3	20	77	2	14	112.5	0.5	8	15	147	3.5	14	157.5	0.5	8	15
8	1.5	8	67.5	1	3.3	20	78	2	14	112.5	1	8	15	148	3.5	14	157.5	1	8	15
9	1.5	10	67.5	0.5	8	15	79	2.5	8	112.5	0.5	3.3	20	149	4.5	12	157.5	0.5	8	15
10	1.5	10	67.5	1	8	15	80	2.5	8	112.5	1	3.3	20	150	4.5	12	157.5	1	8	15
11	2	6	67.5	0.5	3.3	20	81	2.5	12	112.5	0.5	8	15	151	1	6	180	0.5	3.3	20
12	2	6	67.5	1	3.3	20	82	2.5	12	112.5	1	8	15	152	1	6	180	1	3.3	20
13	2	8	67.5	0.5	3.3	20	83	3.5	8	112.5	0.5	3.3	20	153	1	12	180	0.5	8	15
14	2	8	67.5	1	3.3	20	84	3.5	8	112.5	1	3.3	20	154	1	12	180	1	8	15
15	2	10	67.5	0.5	8	15	85	3.5	12	112.5	0.5	8	15	155	1.5	6	180	0.5	3.3	20
16	2	10	67.5	1	8	15	86	3.5	12	112.5	1	8	15	156	1.5	6	180	1	3.3	20
17	2	14	67.5	0.5	8	15	87	3.5	14	112.5	0.5	8	15	157	1.5	8	180	0.5	3.3	20
18	2	14	67.5	1	8	15	88	3.5	14	112.5	1	8	15	158	1.5	8	180	1	3.3	20
19	2.5	8	67.5	0.5	3.3	20	89	4.5	12	112.5	0.5	8	15	159	1.5	10	180	0.5	8	15
20	2.5	8	67.5	1	3.3	20	90	4.5	12	112.5	1	8	15	160	1.5	10	180	1	8	15
21	2.5	12	67.5	0.5	8	15	91	1	6	135	0.5	3.3	20	161	2	6	180	0.5	3.3	20
22	2.5	12	67.5	1	8	15	92	1	6	135	1	3.3	20	162	2	6	180	1	3.3	20
23	3.5	8	67.5	0.5	3.3	20	93	1	12	135	0.5	8	15	163	2	8	180	0.5	3.3	20
24	3.5	8	67.5	1	3.3	20	94	1	12	135	1	8	15	164	2	8	180	1	3.3	20
25	3.5	12	67.5	0.5	8	15	95	1.5	6	135	0.5	3.3	20	165	2	10	180	0.5	8	15
26	3.5	12	67.5	1	8	15	96	1.5	6	135	1	3.3	20	166	2	10	180	1	8	15
27	3.5	14	67.5	0.5	8	15	97	1.5	8	135	0.5	3.3	20	167	2	14	180	0.5	8	15
28	3.5	14	67.5	1	8	15	98	1.5	8	135	1	3.3	20	168	2	14	180	1	8	15
29	4.5	12	67.5	0.5	8	15	99	1.5	10	135	0.5	8	15	169	2.5	8	180	0.5	3.3	20
30	4.5	12	67.5	1	8	15	100	1.5	10	135	1	8	15	170	2.5	8	180	1	3.3	20
31	1	6	90	0.5	3.3	20	101	2	6	135	0.5	3.3	20	171	2.5	12	180	0.5	8	15
32	1	6	90	1	3.3	20	102	2	6	135	1	3.3	20	172	2.5	12	180	1	8	15
33	1	12	90	0.5	8	15	103	2	8	135	0.5	3.3	20	173	3.5	8	180	0.5	3.3	20
34	1	12	90	1	8	15	104	2	8	135	1	3.3	20	174	3.5	8	180	1	3.3	20
35	1.5	6	90	0.5	3.3	20	105	2	10	135	0.5	8	15	175	3.5	12	180	0.5	8	15
36	1.5	6	90	1	3.3	20	106	2	10	135	1	8	15	176	3.5	12	180	1	8	15
37	1.5	8	90	0.5	3.3	20	107	2	14	135	0.5	8	15	177	3.5	14	180	0.5	8	15
38	1.5	8	90	1	3.3	20	108	2	14	135	1	8	15	178	3.5	14	180	1	8	15
39	1.5	10	90	0.5	8	15	109	2.5	8	135	0.5	3.3	20	179	4.5	12	180	0.5	8	15
40	1.5	10	90	1	8	15	110	2.5	8	135	1	3.3	20	180	4.5	12	180	1	8	15
41	2	6	90	0.5	3.3	20	111	2.5	12	135	0.5	8	15	181	1	6	202.5	0.5	3.3	20
42	2	6	90	1	3.3	20	112	2.5	12	135	1	8	15	182	1	6	202.5	1	3.3	20
43	2	8	90	0.5	3.3	20	113	3.5	8	135	0.5	3.3	20	183	1	12	202.5	0.5	8	15
44	2	8	90	1	3.3	20	114	3.5	8	135	1	3.3	20	184	1	12	202.5	1	8	15
45	2	10	90	0.5	8	15	115	3.5	12	135	0.5	8	15	185	1.5	6	202.5	0.5	3.3	20
46	2	10	90	1	8	15	116	3.5	12	135	1	8	15	186	1.5	6	202.5	1	3.3	20
47	2	14	90	0.5	8	15	117	3.5	14	135	0.5	8	15	187	1.5	8	202.5	0.5	3.3	20
48	2	14	90	1	8	15	118	3.5	14	135	1	8	15	188	1.5	8	202.5	1	3.3	20
49	2.5	8	90	0.5	3.3	20	119	4.5	12	135	0.5	8	15	189	1.5	10	202.5	0.5	8	15
50	2.5	8	90	1	3.3	20	120	4.5	12	135	1	8	15	190	1.5	10	202.5	1	8	15
51	2.5	12	90	0.5	8	15	121	1	6	157.5	0.5	3.3	20	191	2	6	202.5	0.5	3.3	20
52	2.5	12	90	1	8	15	122	1	6	157.5	1	3.3	20	192	2	6	202.5	1	3.3	20
53	3.5	8	90	0.5	3.3	20	123	1	12	157.5	0.5	8	15	193	2	8	202.5	0.5	3.3	20
54	3.5	8	90	1	3.3	20	124	1	12	157.5	1	8	15	194	2	8	202.5	1	3.3	20
55	3.5	12	90	0.5	8	15	125	1.5	6	157.5	0.5	3.3	20	195	2	10	202.5	0.5	8	15
56	3.5	12	90	1	8	15	126	1.5	6	157.5	1	3.3	20	196	2	10	202.5	1	8	15
57	3.5	14	90	0.5	8	15	127	1.5	8	157.5	0.5	3.3	20	197	2	14	202.5	0.5	8	15
58	3.5	14	90	1	8	15	128	1.5	8	157.5	1	3.3	20	198	2	14	202.5	1	8	15
59	4.5	12	90	0.5	8	15	129	1.5	10	157.5	0.5	8	15	199	2.5	8	202.5	0.5	3.3	20
60	4.5	12	90	1	8	15	130	1.5	10	157.5	1	8	15	200	2.5	8	202.5	1	3.3	20
61	1	6	112.5	0.5	3.3	20	131	2	6	157.5	0.5	3.3	20	201	2.5	12	202.5	0.5	8	15
62	1	6	112.5	1	3.3	20	132	2	6	157.5	1	3.3	20	202	2.5	12	202.5	1	8	15
63	1	12	112.5	0.5	8	15	133	2	8	157.5	0.5	3.3	20	203	3.5	8	202.5	0.5	3.3	20
64	1	12	112.5	1	8	15	134	2	8	157.5	1	3.3	20	204	3.5	8	202.5	1	3.3	20
65	1.5	6	112.5	0.5	3.3	20	135	2	10	157.5	0.5	8	15	205	3.5	12	202.5	0.5	8	15
66	1.5	6	112.5	1	3.3	20	136	2	10	157.5	1	8	15	206	3.5	12	202.5	1	8	15
67	1.5	8	112.5	0.5	3.3	20	137	2	14	157.5	0.5	8	15	207	3.5	14	202.5	0.5	8	15
68	1.5	8	112.5	1	3.3	20	138	2	14	157.5	1	8	15	208	3.5	14	202.5	1	8	15
69	1.5	10	112.5	0.5	8	15	139	2.5	8	157.5	0.5	3.3	20	209	4.5	12	202.5	0.5	8	15
70	1.5	10	112.5	1	8	15	140	2.5	8	157.5	1	3.3	20	210	4.5	12	202.5	1	8	15

Hs - altura significativa (metros)

Tp - período de pico (segundos)

Dir - direção relativa ao azimute a norte (graus)

Maré - preamares de sizígia (1 metro) e preamar de quadratura (0.5 metro)

Parâmetro gama

Disp - dispersão direcional (graus)

ANEXOS 3

Figura 51: Regime médio de altura significativa de ondas (Hs), nos Pontos 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

Figura 52: Regime médio das direções de ondas, nos Pontos 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

*** Rosa de direções de altura significativa de ondas (Hs) em diferentes escalas

Tabela 8: Probabilidades dividida para cada direção, com os valores da variável que excedem as probabilidades de 50%, 90%, 99% e 12 horas por ano (99,863%), para cada direção, no ponto (PWW3 – águas profundas); a) altura significativa de ondas (Hs); b) período de pico de ondas (Tp).

TABELA ESTATÍSTICAS BÁSICAS (PWW3 - águas profundas)

Variável medida: Altura significativa (Hs)-metros

direções(°)	prob.direção	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0007	1.3000	1.6560	2.0100	2.0100
NNE	0.0020	1.3900	2.3480	2.5100	2.5100
NE	0.0359	1.8100	2.6300	3.3000	3.8370
ENE	0.2078	1.6400	2.5200	3.3400	3.8021
E	0.1282	1.6600	2.5900	3.4570	3.9171
ESE	0.0919	1.7200	2.5800	3.5100	3.9251
SE	0.0840	1.8000	2.7500	3.9900	5.2130
SSE	0.0839	1.8700	2.9100	4.0772	5.3721
S	0.1877	2.0700	3.1000	4.1195	4.7266
SSW	0.1599	2.3400	3.6000	4.9200	5.5600
SW	0.0095	2.6300	4.0340	5.3012	6.2800
WSW	0.0034	2.1200	3.3240	3.9700	3.9700
W	0.0019	2.0600	3.2880	4.0150	4.0600
WNW	0.0012	1.6400	2.4950	2.6700	2.6700
NW	0.0008	1.5500	2.2200	2.4100	2.4100
NNW	0.0011	1.2200	1.7600	1.8300	1.8300

a)

TABELA ESTATÍSTICAS BÁSICAS (PWW3 - águas profundas)

Variável medida: Período de pico (Tp)-segundos

direções(°)	prob.direção	Tp _{50%}	Tp _{90%}	Tp _{99%}	Tp ₁₂
N	0.0007	4.2700	4.6740	4.7500	4.7500
NNE	0.0020	4.4150	5.9130	7.0066	7.2200
NE	0.0359	5.8800	7.0900	7.8000	7.9600
ENE	0.2078	6.7700	7.7500	8.6283	9.2131
E	0.1282	7.4000	8.6750	9.8800	10.3116
ESE	0.0919	7.7700	9.4300	11.8893	14.6182
SE	0.0840	8.3500	10.8700	13.0084	13.5640
SSE	0.0839	8.7700	11.0810	13.2686	13.6812
S	0.1877	10.1900	12.5000	14.5600	15.6422
SSW	0.1599	10.2300	12.2150	13.8510	15.2200
SW	0.0095	7.4100	9.8080	11.0348	11.5100
WSW	0.0034	5.6000	6.9440	8.3178	8.4200
W	0.0019	5.3850	6.5540	7.6898	7.7600
WNW	0.0012	4.8200	5.3440	5.8200	5.8200
NW	0.0008	4.6700	5.7160	5.7600	5.7600
NNW	0.0011	4.3400	4.7200	4.9500	4.9500

b)

Tabela 10: Diagrama obtido através da distribuição conjunta de Hs-Tp e a probabilidade de ocorrência de cada direção indicada (P1 - Capricórnio).

Regime direcional (P1 - Capricórnio)																	
ESE	0	1	2	3	4	5	6	Hs	SSE	0	1	2	3	4	5	6	Hs
2	0.82	0	0	0	0	0	0		2	0.08	0	0	0	0	0	0	
3	8.36	0	0	0	0	0	0		3	1.03	0.03	0	0	0	0	0	
4	33.6	0	0	0	0	0	0		4	3.31	0.15	0	0	0	0	0	
5	56.3	10	0	0	0	0	0		5	5.95	0.4	0	0	0	0	0	
6	31.4	14	0	0	0	0	0		6	11.6	2.02	0	0	0	0	0	
7	1.12	4.1	0	0	0	0	0		7	20.3	4.99	0	0	0	0	0	
8	0	0.15	0	0	0	0	0		8	28.7	5.52	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0		9	34.3	4.87	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0		10	32.4	4.26	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0		11	21	2.45	0	0	0	0	0	
12	0	0	0	0	0	0	0		12	8.32	0.98	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	0	0		13	2.54	0.32	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	0	0		14	0.72	0.12	0	0	0	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	0		15	0.09	0.01	0	0	0	0	0	
16	0	0	0	0	0	0	0		16	0.01	0	0	0	0	0	0	
Tp									Tp								
SE	0	1	2	3	4	5	6	Hs									
2	0.13	0.01	0	0	0	0	0										
3	0.86	1.15	0	0	0	0	0										
4	2.46	8.37	0	0	0	0	0										
5	7.53	24.4	0	0	0	0	0										
6	12.5	42.6	0	0	0	0	0										
7	9.71	42.3	0	0	0	0	0										
8	3.93	23.4	0	0	0	0	0										
9	1.3	9.37	0	0	0	0	0										
10	0.63	3.77	0	0	0	0	0										
11	0.3	1.4	0	0	0	0	0										
12	0.06	0.49	0	0	0	0	0										
13	0	0.11	0	0	0	0	0										
14	0	0.01	0	0	0	0	0										
15	0	0	0	0	0	0	0										
16	0	0	0	0	0	0	0										
Tp																	
ESE/SE/SSE - direções Hs - altura significativa - metros Tp - período de pico - segundos																	

Tabela 11: Diagrama obtido através da distribuição conjunta de Hs-Tp e a probabilidade de ocorrência de cada direção indicada (P3 – Centro).

Regime direcional (P3 - Centro)																	
ESE	0	1	2	3	4	5	6	Hs	SSE	0	1	2	3	4	5	6	Hs
2	0.868	0	0	0	0	0	0		2	0.119	0	0	0	0	0	0	
3	9.028	0	0	0	0	0	0		3	1.601	0	0	0	0	0	0	
4	35.16	0	0	0	0	0	0		4	4.965	0	0	0	0	0	0	
5	59.98	5.035	0	0	0	0	0		5	8.718	0	0	0	0	0	0	
6	33.16	7.465	0	0	0	0	0		6	17.62	0.519	0	0	0	0	0	
7	0.174	2.431	0	0	0	0	0		7	31.12	1.904	0	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	0	0	0		8	43.3	2.574	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0		9	41.41	2.574	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0		10	23.28	2.639	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0		11	8.037	1.655	0	0	0	0	0	
12	0	0	0	0	0	0	0		12	1.666	0.433	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	0	0		13	0.065	0.087	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	0	0		14	0	0.054	0	0	0	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	0		15	0	0	0	0	0	0	0	
16	0	0	0	0	0	0	0		16	0	0	0	0	0	0	0	
Tp									Tp								
SE	0	1	2	3	4	5	6	Hs									
2	0.103	0	0	0	0	0	0										
3	0.881	0.654	0	0	0	0	0										
4	2.878	5.465	0	0	0	0	0										
5	8.028	16.52	0	0	0	0	0										
6	13.62	28.81	0	0	0	0	0										
7	13.24	27.92	0	0	0	0	0										
8	8.171	15.38	0	0	0	0	0										
9	8.938	6.906	0	0	0	0	0										
10	14.5	3.183	0	0	0	0	0										
11	12.48	1.117	0	0	0	0	0										
12	5.741	0.369	0	0	0	0	0										
13	1.938	0.123	0	0	0	0	0										
14	0.561	0.03	0	0	0	0	0										
15	0.069	0.005	0	0	0	0	0										
16	0.01	0	0	0	0	0	0										
Tp																	
ESE/SE/SSE - direções									Hs - altura significativa - metros				Tp - período de pico - segundos				

ANEXOS 4 - Modelagem com o SWAN.

Caso 26

Caso 26

Caso 56

Caso 56

Caso 65

Caso 65

Caso 86

Caso 86

Caso 116

Caso 116

Caso 146

Caso 146

ANEXOS 5 – Modelagem com o modelo MOPLA (SMC)

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores da altura significativa de onda + Magnitude

Caso espectral: 26 (A304)

A3: Detalhe

26: MOPLA $H_s=1.75\text{m}$; $T_p=12\text{s}$; $\text{Dir}=21.6$

26: SWAN $H_s=3.50\text{m}$; $T_p=12\text{s}$; $\text{Dir}=67.5$

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

$H_s: 1.751\text{ m}$

$h: 15\text{ m}$

$f_p: 0.083333\text{ Hz (Tp: 12 s)}$

$\gamma: 8$

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

$\theta_m: 21.61^\circ$ (S62.6E)

$\sigma: 15^\circ$ - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores da altura significativa de onda + Magnitude

Caso espectral: 56 (A308)

A3: Detalhe

56: MOPLA Hs=2.16m; Tp=12s; Dir=16.1

56: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=90.0

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 2.165 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: 16.14° (S47.1E)

σ: 16° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores da altura significativa de onda + Magnitude

Caso espectral: 65 (A309)

A3: Detalhe

65: MOPLA Hs=1.18m; Tp=6s; Dir=9.9

65: SWAN Hs=1.50m; Tp=6s; Dir=112.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequência (TMA)

Hs: 1.189 m

h: 15 m

Tp: 0.16667 Hz (Tp: 5.99988 s)

γ : 3.3

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : 9.917° (S40.9E)

σ : 20° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores da altura significativa de onda + Magnitude

Caso espectral: 86 (A30C)

A3: Detalhe

86: MOPLA Hs=2.22m; Tp=12s; Dir=1.7

86: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=112.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 2.228 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

δ_m : 1.778° (S32.8E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores da altura significativa de onda + Magnitude

Caso espectral: 116 (A30G)

A3: Detalhe

116: MOPLA Hs=2.21m; Tp=12s; Dir=-9.2

116: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=135.0

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 2.214 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: -9.296° (S21.7E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores da altura significativa de onda + Magnitude

Caso espectral: 146 (A30L)

A3: Detalhe

146: MOPLA Hs=1.68m; Tp=12s; Dir=-22.5

146: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=157.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.684 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: -22.57° (S8.4E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Correntes e altura de onda

Caso espectral: 26 (A304)

A3: Detalhe

26: MOPLA Hs=1.75m; Tp=12s; Dir=21.6

26: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=67.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.751 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : 21.61° (S52.6E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolho

ϵ : 10 m²/s

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Correntes e altura de onda

Caso espectral: 56 (A308)

A3: Detalhe

56: MOPLA Hs=2.16m; Tp=12s; Dir=16.1

56: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=90.0

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.165 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: 16.14° (S47.1E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolho

ε: 10 m²/s

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Correntes e altura de onda

Caso espectral: 65 (A309)

A3: Detalhe

65: MOPLA Hs=1.18m; Tp=6s; Dir=9.9

65: SWAN Hs=1.50m; Tp=6s; Dir=112.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1.189 m
h: 15 m
fp: 0.16667 Hz (Tp: 5.99988 s)
 γ : 3.3
Nº Comp.: 10
Espectro direcional
 θ_m : 9.917° (S40 SE)
 σ : 20° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
Kswc: 1 m

MOPLA-SP

Viscosidade de remolho
 ε : 10 m²/s

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Correntes e altura de onda

Caso espectral: 86 (A30C)

A3: Detalhe

86: MOPLA Hs=2.22m; Tp=12s; Dir=1.7

86: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=112.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 2.226 m

h: 15 m

f_p: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m: 1.778° (S32.8E)

α: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

K_{swc}: 1 m

Viscosidade de

remolinho

ε: 10 m²/s

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Correntes e altura de onda

Caso espectral: 116 (A30G)

A3: Detalhe

116: MOPLA Hs=2.21m; Tp=12s; Dir=-9.2

116: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=135.0

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.214 m

h: 15 m

f_p: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m: -9.296° (S21.7E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

K_{swc}: 1 m

Viscosidade de

remolino

ε: 10 m²/s

MOPLA-SP

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Correntes e altura de onda

Caso espectral: 146 (A30L)

A3: Detalhe

146: MOPLA Hs=1.68m; Tp=12s; Dir=-22.5

146: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=157.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.684 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : -22.57° (S8.4E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Ksw: 1 m

Viscosidade de

remolito

ϵ : 10 m²/s

MOPLA-SP

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: 26 (A304)

A3: Detalhe

26: MOPLA Hs=1.75m; Tp=12s; Dir=21.6

26: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=67.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.751 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : 21.61° (S52.6E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolho

ν : 10 m²/s

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: 56 (A308)

A3: Detalhe

56: MOPLA Hs=2.16m; Tp=12s; Dir=16.1

56: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=90.0

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 2.165 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : 16.14° (S47.1E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolinho

ν : 10 m²/s

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: 65 (A309)

A3: Detalhe

65: MOPLA Hs=1.18m; Tp=6s; Dir=9.9

65: SWAN Hs=1.50m; Tp=6s; Dir=112.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1.189 m
h: 15 m
fp: 0.16687 Hz (Tp: 5.99988 s)
 γ : 3.3
Nº Comp.: 10
Espectro direcional
 ϕ_m : 9.917° (S40.9E)
 σ : 20° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de
Nikuradse
Kswc: 1 m

MOPLA-SP

Viscosidade de
remolino
 ϵ : 10 m²/s

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: 86 (A30C)

A3: Detalhe

86: MOPLA Hs=2.22m; Tp=12s; Dir=1.7

86: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=112.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 2.226 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : 1.778° (S32.8E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolinho

ϵ : 10 m²/s

MOPLA-SP

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: 116 (A30G)

A3: Detalhe

116: MOPLA Hs=2.21m; Tp=12s; Dir=-9.2

116: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=135.0

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 2.214 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: -9.296° (S21.7E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolho

ε: 10 m²/s

MOPLA-SP

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de corrente

Caso espectral: 146 (A30L)

A3: Detalhe

146: MOPLA Hs=1.68m; Tp=12s; Dir=-22.5

146: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=157.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.684 m

h: 15 m

f_p: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m: -22.57° (S8.4E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

K_{swc}: 1 m

Viscosidade de

remolho

ε: 10 m²/s

MOPLA-SP

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Altura de onda e frentes

Caso espectral: 26(A304)

A3: Detalhe

26: MOPLA Hs=1.75m; Tp=12s; Dir=21.6

26: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=67.5

Componente:

Amplitude: 0.050 m

fc: 0.08317 Hz (Tc: 12.0237 s)

Dir: 21.61° (S52.6E)

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.751 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : 21.61° (S52.6E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Altura de onda e frentes

Caso espectral: 56(A308)

A3: Detalhe

56: MOPLA Hs=2.16m; Tp=12s; Dir=16.1

56: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=90.0

Componente:

Amplitude: 0.062 m

fc: 0.08317 Hz (Tc: 12.0237 s)

Dir: 16.14° (S47.1E)

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.166 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: 16.14° (S47.1E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Altura de onda e frentes

Caso espectral: 65 (A309)

A3: Detalhe

65: MOPLA Hs=1.18m; Tp=6s; Dir=9.9

65: SWAN Hs=1.50m; Tp=6s; Dir=112.5

Componente:

Amplitude: 0.034 m

fc: 0.1645 Hz (Tc: 6.0794 s)

Dir: 9.917° (S40.9E)

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.189 m

h: 15 m

fp: 0.16667 Hz (Tp: 5.99988 s)

γ: 3.3

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

6m: 9.917° (S40.9E)

σ: 20° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Altura de onda e frentes

Caso espectral: 86 (A30C)

A3: Detalhe

86: MOPLA Hs=2.22m; Tp=12s; Dir=1.7

86: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=112.5

Componente:

Amplitude: 0.064 m

fc: 0.08317 Hz (Tc: 12.0237 s)

Dir: 1.778° (S32.8E)

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.226 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: 1.778° (S32.8E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Altura de onda e frentes

Caso espectral: 116 (A30G)

A3: Detalhe

116: MOPLA Hs=2.21m; Tp=12s; Dir=-9.2

116: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=-135.0

Componente:

Amplitude: 0.064 m

fc: 0.08317 Hz (Tc: 12.0237 s)

Dir: -9.295° (S21.7E)

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.214 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: -9.296° (S21.7E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Altura de onda e frentes

Caso espectral: 146 (A30L)

A3: Detalhe

146: MOPLA Hs=1.68m; Tp=12s; Dir=-22.5

146: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=157.5

Componente:

Amplitude: 0.048 m

fc: 0.08317 Hz (Tc: 12.0237 s)

Dir: -22.58° (S8.4E)

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.684 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: -22.57° (S8.4E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

MOPLA-SP

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: 26 (A304)

A3: Detalhe

26: MOPLA Hs=1.75m; Tp=12s; Dir=21.6

26: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=67.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.751 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : 21.61° (S52.6E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolinho

ϵ : 10 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.08 mm

Duração: 24.0 h

Formulação:
Soulsby

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: 56 (A308)

A3: Detalhe

56: MOPLA Hs=2.16m; Tp=12s; Dir=16.1

56: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=90.0

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 2.165 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : 16.14° (S47.1E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Ksw: 1 m

Viscosidade de

remolho

ϵ : 10 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.08 mm

Duração: 24.0 h

Formulação:

Soulsby

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: 65 (A309)

A3: Detalhe

65: MOPLA Hs=1.18m; Tp=6s; Dir=9.9

65: SWAN Hs=1.50m; Tp=6s; Dir=112.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1.189 m
h: 15 m
fp: 0.16667 Hz (Tp: 5.99888 s)
 γ : 3.3
Nº Comp.: 10
Espectro direcional
 ϕ_m : 9.917° (S40.9E)
 σ : 20° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
Kswc: 1 m
Viscosidade de remolino
 ε : 10 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.08 mm
Duração: 24.0 h
Formulação: Soulsby

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: 86 (A30C)

A3: Detalhe

86: MOPLA Hs=2.22m; Tp=12s; Dir=1.7

86: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=112.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.226 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : 1.778° (S32.8E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolino

ϵ : 10 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.08 mm

Duração: 24.0 h

Formulação:

Soulsby

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: 116 (A30G)

A3: Detalhe

116: MOPLA Hs=2.21m; Tp=12s; Dir=-9.2

116: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=135.0

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 2.214 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : -9.296° (S21.7E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de
Nikuradse
Kswc: 1 m

Viscosidade de
remolinho
 ε : 10 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.08 mm

Duração: 24.0 h

Formulação:
Soulsby

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Vetores de transporte e magnitude

Caso espectral: 146 (A30L)

A3: Detalhe

146: MOPLA Hs=1.68m; Tp=12s; Dir=-22.5

146: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=157.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.684 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : -22.57° (S8.4E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolinho

ϵ : 10 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.08 mm

Duração: 24.0 h

Formulação:
Soulisby

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Topografia final e variação da topografia

Caso espectral: 26 (A304)

A3: Detalhe

26: MOPLA Hs=1.75m; Tp=12s; Dir=21.6

26: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=67.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 1.751 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: 21.61° (S62.6E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Ksw: 1 m

Viscosidade de

remolinho

ε: 10 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.08 mm

Duração: 24.0 h

Formulação:

Soulsby

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Topografia final e variação da topografia

Caso espectral: 65 (A309)

A3: Detalhe

65: MOPLA Hs=1.18m; Tp=6s; Dir=9.9

65: SWAN Hs=1.50m; Tp=6s; Dir=112.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)
Hs: 1.189m
h: 15 m
fp: 0.16667 Hz (Tp: 5.99988 s)
 γ : 3.3
Nº Comp.: 10
Espectro direcional
 θ_m : 9.917° (S40.9E)
 σ : 20° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de Nikuradse
Kswc: 1 m
Viscosidade de remolito
 ϵ : 10 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.08 mm
Duração: 24.0 h
Formulação: Soulsby

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Topografia final e variação da topografia

Caso espectral: 86 (A30C)

A3: Detalhe

86: MOPLA Hs=2.22m; Tp=12s; Dir=1.7

86: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=112.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 2.226 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : 1.778° (S32.8E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolinho

ε : 10 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.08 mm

Duração: 24.0 h

Formulação:

Soulsby

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Topografia final e variação da topografia

Caso espectral: 116 (A30G)

A3: Detalhe

116: MOPLA Hs=2.21m; Tp=12s; Dir=9.2

116: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=135.0

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro freqüencial (TMA)

Hs: 2.214 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ: 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θm: -9.296° (S21.7E)

σ: 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolinho

ε: 10 m²/s

MOPLA-SP

D₅₀: 0.08 mm

Duração: 24.0 h

Formulação:

Soulsby

MOPLA 2.0: Mbyes Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

Projeto: Massaguaçu

Gráfico: Topografia final e variação da topografia

Caso espectral: 156 (A30L)

A3: Detalhe

156: MOPLA Hs=1.68m; Tp=12s; Dir=-22.5

156: SWAN Hs=3.50m; Tp=12s; Dir=157.5

Características da simulação

OLUCA-SP

Espectro frequencial (TMA)

Hs: 1.684 m

h: 15 m

fp: 0.083333 Hz (Tp: 12 s)

γ : 8

Nº Comp.: 10

Espectro direcional

θ_m : -22.57° (S8.4E)

σ : 15° - Nº Comp.: 15

COPLA-SP

Rugosidade de

Nikuradse

Kswc: 1 m

Viscosidade de

remolino

ν : 10 m²/s

MOPLA-SP

D50: 0.08 mm

Duração: 24.0 h

Formulação:

Soulsby

MOPLA 2.0: Moyses Tessler IO_USP

Programa desenvolvido por

1 – Carta Síntese em folha A3, anexada junto a capa (última página desta dissertação)

ANEXOS 6 – Carta Síntese¹