

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA RECIFAL NA TRANSFORMAÇÃO DAS
ONDAS DO LITORAL DE RECIFE E JABOATÃO DOS
GUARARAPES/PE - BRASIL**

MIRELLA BORBA SANTOS FERREIRA COSTA

RECIFE/2010

MIRELLA BORBA SANTOS FERREIRA COSTA

**INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA RECIFAL NA TRANSFORMAÇÃO DAS
ONDAS DO LITORAL DE RECIFE E JABOATÃO DOS
GUARARAPES/PE – BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Orientadora: Dr. Tereza Cristina M. de Araújo
Co-orientador: Dr. Moacyr Araújo.

RECIFE/2010

C837i

Costa, Mirella Borba Santos Ferreira

Influência da estrutura recifal na transformação das ondas do litoral de Recife e Jaboatão dos Guararapes / PE - Brasil / Mirella Borba Santos Ferreira Costa.- Recife: O Autor, 2010.

xi 92 f., il : grafs., tabs., figs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2010.

Inclui bibliografia.e anexos.

1. Oceanografia 2. Dinâmica costeira 2. Transmissão da onda 3. Recifes de coral. 4. Modelagem numérica. 5. Pernambuco-Brasil.. I. Título.

UFPE

551.46

CDD (22. ed.)

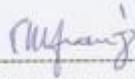
BCTG/2010-116

MIRELLA BORBA SANTOS FERREIRA COSTA

**INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA RECIFAL NA TRANSFORMAÇÃO DAS ONDAS DO
LITORAL DE RECIFE E JABOATÃO DOS GUARARAPES/PE - BRASIL**

Dissertação apresentada à seguinte banca examinadora em 30/04/2010.

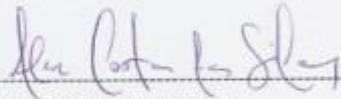
EXAMINADORES



Dra. Tereza Cristina Medeiros de Araújo (Orientadora/UFPE)



Dr. Eduardo Siegle (USP)



Dr. Alex Costa da Silva (UFPE)

SUPLENTES

Dr. Marcus André Silva (UFPE)

Dr. Roberto Lima Barcellos (UFPE)

*“Emancipate yourselves from mental slavery
None but ourselves can free our minds
Have no fear for atomic energy,
'Cause none of them can stop the time
How long shall they kill our prophets,
While we stand aside and look
Some say it's just a part of it:
We've got to fully fill the book”*

Bob Marley

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo incentivo e apoio incondicional durante cada etapa da minha vida.

Aos Profs. Tereza Araújo e Moacyr Araújo, pelo interesse em me orientar, pelas contribuições significativas oferecidas ao trabalho e pelas oportunidades de desenvolvimento acadêmico.

À Eduardo Macedo que durante todo nosso tempo de convivência tem me apoiado constantemente e fornecido ótimos momentos de descontrações.

Aos amigos do Departamento de Oceanografia da UFPE, pelos bons momentos de convivência e ajuda no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Eduardo Siegle, por me receber em seu laboratório e pela imensa contribuição dispensada durante a aprendizagem do modelo MIKE 21 SW.

À banca, por aceitar contribuir para o aprimoramento dessa pesquisa.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Os recifes submersos agem como obstáculos naturais à passagem das ondas provocando transformações bruscas em suas características e conseqüente diminuição de sua energia. Neste estudo, a influência dos recifes submersos presentes ao longo do litoral de Recife e Jaboatão dos Guararapes, na transmissão das ondas, foi investigada a partir de dados obtidos *in situ* e modelagem numérica. Inicialmente, os recifes foram mapeados através de levantamentos batimétricos para análise de suas características geométricas. As informações geradas permitiram a elaboração de mapa detalhado da região, onde foi identificada a presença de várias linhas recifais. Com respeito às proporções geométricas dessas linhas, a feição com maior potencial em promover alterações na transmissão das ondas é um banco recifal submerso com 17 km de extensão, paralelo à linha de costa, cuja largura e profundidade de topo variam entre 800 m – 1500 m e 0,5 m - 4 m, respectivamente. A análise da geometria típica dessa estrutura, realizada a partir de uma análise de similaridade entre os perfis batimétricos, mostrou que em 75 % da área, ela apresenta uma configuração semelhante a um recife plataforma (Grupo 1), enquanto que em 25 % da área (Grupo 2), assemelha-se geometricamente a um recife de franja. Foram realizados, então, dois experimentos com ondógrafos fundeados antes e depois do banco recifal submerso, para obtenção simultânea das características das ondas incidentes (H_i) e transmitidas (H_t) em cada um dos grupos supracitados. Os resultados indicaram variações em H_t numa escala de tempo de 6 h com ciclos bem definidos de 12 h nos dois experimentos. De 40 % - 60 % (experimento 1) e 1 % - 90 % (experimento 2) de H_i é atenuada, pelo topo do recife, durante os estágios de maré alta e baixa, respectivamente, indicando uma modulação da onda pela maré. Além do estágio da maré, o coeficiente de transmissão da onda (K_t) está relacionado com a geometria do recife e esbeltez da onda incidente. A análise de regressão múltipla entre essas variáveis (realizada com 95% da série temporal) obteve $R^2 = 0.901$ ($p < 0.0001$; $ic = 0,95$; $cc = 0,949$). A partir desta análise uma equação empírica foi proposta e validada com os 5 % restante da série temporal indicando um erro médio absoluto de 7 % no K_t calculado. Os dados de onda obtidos pelo fundeio dos ondógrafos foram, ainda, utilizados na implementação do modelo numérico MIKE 21 SW na área de estudo. A utilização dessa ferramenta computacional permitiu a elaboração de dois cenários hipotéticos, onde a transmissão das ondas foi analisada sem a presença dos recifes, e com a elevação de 1 m no nível do mar. A comparação da altura da onda, desses cenários, com o cenário atual, indicou um aumento de aproximadamente 30 % e 50 %, respectivamente, da energia da onda incidente na costa. A partir dos resultados levantados nesta pesquisa, ficou evidente a influência que os recifes submersos, presentes em Recife e Jaboatão dos Guararapes, provocam na dissipação de energia das ondas, ressaltando a importância dessas estruturas nos processos locais de dinâmica costeira.

Palavras-Chave: dinâmica costeira, transmissão da onda, recifes de coral, modelagem numérica, Pernambuco, Brasil.

ABSTRACT

Studies have shown that coral reefs act like submerged breakwaters and impose major constraints on ocean swell, leading to dramatic transformations in wave characteristics and consequent attenuation of wave energy. In this study we investigate the direct effects of coral reefs on wave transformation along Recife and Jaboatão dos Guararapes - PE (Brazil) coast using field experiments and numerical model. The reefs were mapped by bathymetric surveys and their geometric characteristics described. This allowed the elaboration a high resolution map of the region, where we identified the presence of several reef lines. The map show a submerged reef bank with 17 km long and 1 km wide, parallel to the coastline, which have a quasi-horizontal top that vary from 0.5 – 4 m in depth at low tides. Compared with the other lines, this reef has the greatest potential to promote changes in the wave transmission. In 75 % of the area, it presents a configuration similar to a platform reef (Group 1), whereas 25 % of the area (Group 2), it resembles a fringe reef. Measurements of wave pressure fluctuations were made at two stations (experiments 1 and 2) across the reef profile with one equipment deployed behind the reef and another in front of the reef. Transmitted wave height variations at a time scale of 6 h with a well-defined 24 h cycle are evident at both experiments. Up to 40 % – 60% (exp. 1) and 1 % – 90 % (exp. 2) of incident wave energy is attenuated by the reef top at high and low tide, respectively. A strong linear relationship exists between H_s and h , showing a modulation by tide. The results show that the wave transmission coefficient (K_t) is related to the tide stage, reef geometry and wave steepness. The multiple regression analysis show that 90,5 % of the variability in K_t can be explained by these variables ($R^2= 0.901$; $p<0.0001$; $ic =0,95$; $cc= 0,949$). An empirical equation was proposed to estimate the wave transmission along the reef bank. The average absolute error from the observed wave data was 7 %. The wave data obtained by the experiments were also used in the calibration of the numerical model MIKE 21 SW. The MIKE 21 SW model system was used to analyze the coral reef influence over the energy dissipation in three different conditions: present, elevation of mean sea level at 1 m, and without the presence of the reefs. The values of the wave height calculated in the two last situation were subtracted from the present situation results. The results show an increase of approximately 30% and 50% of the wave energy incident on the coast. It was found that coral reefs play a significant role in dissipating wave energy along Recife and Jaboatão dos Guararapes coastal. It underlines the overall degree of protection provided by coral reefs, and the importance of water depth over them.

Keywords: coastal dynamics, wave transmission, coral reefs, numerical models, Pernambuco, Brasil.

Lista de Figuras

- Figura 1. Localização da área de estudo.-----6
- Figura 2. Representação esquemática de um recife plataforma e de franja (adaptado de Gorlay, 1996a e 1996b).-----11
- Figura 3. Malha batimétrica projetada na área de estudo.-----12
- Figura 4. Mapa batimétrico detalhado da zona recifal de Recife e Jaboatão dos Guararapes. A: pequenas linhas próximas a praia; B: canal; C: 1ª linha recifal submersa (banco recifal submerso); D: 2ª linha recifal submersa; E: 3ª linha recifal submersa; E': Banco Ituba. -----14
- Figura 5. Visualizações das zonas norte e sul, referente às características do banco recifal submerso. A linha tracejada está posicionada sobre o quebra-mar de Candeias, onde há um corte transversal no banco recifal conhecido como Barra dos Abreus; (5.a) Fotografia aérea da praia de Boa Viagem, onde o banco recifal encontra-se totalmente submerso (Fonte: Emerson Zamprogno, 2009); (5.b) Fotografia da praia de Candeias, onde pode ser observado o banco recifal com presença de piscinas naturais (Fonte: Suzana Santos, 2007).-----16
- Figura 6. (6.a) Perfil esquemático realizado por Laborel (1969) sobre as linhas de recifes em frente a praia de Piedade. (6.b) Perfil batimétrico de número 52, correspondente ao esquema de Laborel (1969). A letra A indicada nas figuras mostra a posição da primeira linha recifal submersa, e a letra C o banco recifal submerso, denominado por Laborel (1969) de banco de coral.-----18
- Figura 7. Exemplo de perfis batimétricos em frente à praia do Pina. A seta vermelha indica a posição da linha recifal submersa.-----19
- Figura 8. Perfis batimétricos demonstrando a presença da linha recifal da isóbata de 10 m, unida ao banco recifal submerso.-----20
- Figura 9. Estruturas recifais de município de Tamandaré. Configuração de linhas recifais unidas em algumas áreas.-----20
- Figura 10. Dendograma gerado pela análise de similaridade com a medida de Bray-Curtis. O eixo x corresponde a similaridade, e o eixo y, aos perfis batimétricos. Ao lado de cada grupo, encontra-se a geometria do perfil representativo.-----23

Figura 11. Distribuição espacial dos agrupamentos gerados pela análise de similaridade. Os números dentro das áreas retangulares correspondem à numeração dos grupos de perfis.-----	24
Figura 12. Geometria típica da região representada pelo perfil de número 113 do Grupo 1 e o de número 28 do Grupo 2.-----	25
Figura 13. Modelos de perfis para estudo da transformação da onda. Perfil típico de um recife de franja (13.a) e de um recife plataforma (13.b). Os números ao longo dos perfis indicam a profundidade (m). Fonte: Modificado de Gorlay (1996a).-----	31
Figura 14. Definição das variáveis que afetam a transmissão da onda sobre uma estrutura recifal.-----	32
Figura 15. Localização do fundeio dos S4 na área de estudo e fotografias dos equipamentos. BVI – BVE: Praia de Boa Viagem (Exp. 1); CANI – CANE: Praia de Candeias (Exp. 2). Fonte das fotografias: Autora, 2009.-----	37
Figura 16. Localização de fundeio dos S4s ao longo dos perfis recifais representativos da geométrica típica da área de estudo.-----	37
Figura 17. Séries temporais de altura da onda e maré durante os Experimentos 1 (17.a) e 2 (17.b) para as estações internas e externas ao recife.-----	39
Figura 18. Dados de H_s medidos pelos ondógrafos da estação externa ao recife (BVE e CANE) e prevista pelo modelo NWW3 para águas profundas. As linhas de tendência estão indicadas pelas linhas pretas no gráfico.-----	40
Figura 19. Variação do K_t durante os Experimentos 1 e 2.-----	41
Figura 20. Relação entre a onda transmitida (H_t) e a profundidade relativa (h/d).-----	43
Figura 21. Relação entre o coeficiente de transmissão (K_t) e a esbelteza da onda ($\xi = H_i/gT^2$) para diferentes valores de profundidade relativa (h/d) referente aos estágios de maré alta, baixa e intermediária (enchente ou vazante).-----	44
Figura 22. Comparação entre o K_t observado durante os experimentos e o estimado pela equação empírica proposta (Equação 25).-----	45
Figura 23. Resolução da malha computacional do domínio modelado (23.a) e detalhe do gradiente no tamanho de elemento em cada malha (23.b). As cores indicam o tipo de condição de contorno: amarelo contorno fechado; verde contorno aberto (parâmetro das ondas 1); azul e vermelho contorno lateral.-----	54
Figura 24. Resolução batimétrica utilizada no domínio modelado.-----	56

Figura 25. Mapa batimétrico interpolado no módulo de pré-processamento MIKE ZERO <i>Mesh Generator</i> .-----	57
Figura 26. Altura significativa da onda (linha vermelha), período (linha azul) e direção (setas) previstas pelo modelo NWW3 para águas profundas. -----	58
Figura 27. Curva da maré durante o período de simulação.-----	58
Figura 28. Condições do vento durante o período de simulação.-----	59
Figura 29. Detalhe do mapa batimétrico com os recifes submersos (29.a) e após a remoção dos mesmos (29.b).-----	60
Figura 30. Posição de fundeio dos ondógrafos utilizados na calibração do modelo.----	61
Figura 31. Comparação entre as H_s , medidas e simuladas, para as estações interna (BVI) e externa (BVE) ao recife. Situação do modelo calibrado. A linha em vermelho representa a série temporal do dado medido (H_{me}) e a em azul do dado modelado (H_{mo}). Os gráficos com ΔH_s nos eixos das ordenadas representam o erro do modelo no tempo ($\Delta H_s = H_{mo} - H_{me}$).-----	65
Figura 32. Direção média das ondas, demonstrando os principais pontos de convergência das ortogonais das ondas. Os números indicam as porções elevadas do recife submerso onde ocorre a convergência: 1- parte adjacente a praia de Candeias; 2 – recife <i>Abreus</i> ; 3 – parte adjacente ao enrocamento na praia de Boa Viagem; 4 – parte adjacente à praia do Pina.-----	67
Figura 33. Divergência das ortogonais das ondas ao se propagarem pela Barra dos <i>Abreus</i> . O recife indicado como Grupo 1, pela seta branca, corresponde a classificação da geometria típica realizada no Capítulo 1. A escala de cores representa a profundidade local.-----	68
Figura 34. Processo físico da difração da onda provocada pelo quebra-mar da praia de Candeias. A escala de cores representa a profundidade local.-----	68
Figura 35. Fotografia do quebra-mar localizado na praia de Candeias. Condição de maré baixa. Fonte: Emanuella Belém, 2008.-----	69
Figura 36. Variação na altura significativa da onda ao longo da costa. Os pontos 1 e 2 indicam a localização de menor e maior altura significativa da onda incidente na linha de costa, respectivamente.-----	70
Figura 37. Altura significativa da onda no ponto de menor energia (Ponto 1) e no ponto de maior energia da costa (Ponto 2), durante o período de simulação.-----	70
Figura 38. Distribuição da diferença nos valores de H_s entre o cenário hipotético de elevação de 1 m no nível médio do mar e o cenário atual ($H_{\text{cenário hipotético}} - H_{\text{atual}}$).-----	72

Figura 39. Distribuição da diferença nos valores de H_s entre o cenário hipotético de remoção dos recifes submersos e o cenário atual ($H_{\text{cenário hipotético}} - H_{\text{atual}}$).-----73

Figura 40. Valor médio da altura significativa da onda incidente na linha de costa das praias de Candeias, Piedade, Boa Viagem e Pina, durante o período de simulação. Barras pretas – cenário atual; barras cinzas – cenário hipotético de elevação do nível do mar em 1 m; barras brancas – cenário hipotético de remoção dos recifes submersos.-----74

Figura 41. Série temporal do período de simulação para cada cenário em dois pontos distinto da costa: na área correspondente ao Grupo 1 e na área correspondente ao Grupo 2, posições definidas através da análise da geometria típica (Capítulo 1).-----45

Lista de Tabelas

Tabela 1. Índices de qualidade do modelo para as várias simulações de ajuste do coeficiente de fricção de fundo. Comparação entre os dados medidos *in situ* nas estações BVI e BVE.-----64

Tabela 2. Valores de coeficiente de transmissão (K_t) calculados a partir dos resultados simulados pelo modelo MIKE 21 SW, para o cenário atual e o cenário hipotético de elevação de 1 m no nível médio do mar.-----72

SUMÁRIO

Agradecimentos	VI
Resumo	VII
<i>Abstract</i>	VIII
Lista de Figuras	IX
Lista de Tabelas	XIII
INTRODUÇÃO	3
Objetivo	4
Localização da Área de Estudo	5
Organização do Documento	6
CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS RECIFES COSTEIROS DE RECIFE E JABOATÃO DOS GUARARAPES – PE	8
1. Introdução	8
2. Geometria de Perfis Recifais	9
3. Métodos	11
3.1. Levantamento Batimétrico	11
3.2. Análise da Geometria Típica	13
4. Resultados e Discussões	14
5.1. Mapa Batimétrico da Zona Recifal	14
5.2. Geometria Típica	21
5. Conclusão	26
CAPÍTULO 2: TRANSMISSÃO DA ONDA SOBRE OS RECIFES SUBMERSOS DE RECIFE E JABOATÃO DOS GUARARAPES – PE	27
1. Introdução	27
2. Transmissão das Ondas sobre Estruturas Submersas	28
2.1. Processos Físicos	28
2.2. Coeficiente de Transmissão (K_t)	32
3. Métodos	35
3.1. Fundeio dos Equipamentos	35
3.2. Condições de Vento, Onda e Maré durante os Experimentos	38
4. Resultados e Discussões	39
4.1. Coeficiente de Transmissão da Onda	40
4.2. Modulação da Onda pela Maré	42
4.3. Modelo Empírico do Coeficiente de Transmissão	44
5. Conclusões	46

CAPÍTULO 3: APLICAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA NA ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE AS ONDAS E OS RECIFES SUBMERSOS DE RECIFE E JABOATÃO DOS GUARARAPES –PE.....	48
1. Introdução	48
2. Modelo Numérico	49
2.1. Equações Governantes	50
2.2. Método Numérico	51
3. Métodos	53
3.1. Parâmetros do Modelo	53
3.2. Dados de Entrada	56
3.2.1. Batimetria	56
3.2.2. Ondas de Água Profunda	57
3.2.3. Maré	58
3.2.4. Vento	59
3.3. Cenários	59
4. Verificação do Modelo	61
4.1. Dados <i>in situ</i>	61
4.2. Índices de Qualidade	61
4.3. Calibração e Validação	63
5. Resultados e Discussões	66
5.1. Propagação das Ondas na Plataforma Continental: Aspectos Gerais	66
5.2. Dissipação de Energia: Análise a partir dos Cenários Hipotéticos....	71
6. Conclusão	75
 CAPÍTULO 4: CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	77
 REFERÊNCIAS	81
 ANEXO A – CAMPO DE ONDAS SIMULADAS NO CENÁRIO ATUAL EM TODO O DOMÍNIO MODELADO	
 ANEXO B – CAMPO DE ONDAS SIMULADAS NO CENÁRIO ATUAL COM DESTAQUE NA ZONA DE INTERESSE	
 ANEXO D – CAMPO DE ONDAS SIMULADAS NO CENÁRIO HIPOTÉTICO DE ELEVAÇÃO DE 1 M NO NÍVEL MÉDIO DO MAR	
 ANEXO E – CAMPO DE ONDAS SIMULADAS NO CENÁRIO HIPOTÉTICO DE REMOÇÃO DOS RECIFES SUBMERSOS NATURAIS	

INTRODUÇÃO

Recifes de coral são abundantes em águas rasas de regiões tropicais e subtropicais onde existem condições meteo-oceanográficas propícias para o seu desenvolvimento. A estrutura física desses ambientes é notavelmente diferente daquela existente em praias formadas apenas por sedimentos inconsolidados, que têm sido o foco principal de estudos em dinâmica costeira (Komar, 1998). Diferente das praias que tipicamente possuem declive suave e fundo liso, os recifes geralmente formam uma transição brusca entre águas relativamente profundas e águas rasas, e criam um meio poroso de superfície bastante rugosa devido à presença dos organismos recifais (Lowe *et al.*, 2005).

Vários estudos realizados, sobretudo na Austrália e no Hawaii, demonstram que os recifes de coral atuam como quebra-mares submersos, barras ou limite profundo da linha de costa (Dally *et al.*, 1985; Masselink, 1998; Moller *et al.*, 1999; Nelson & Gonsalves, 1992; Sallenger & Holman, 1985). Eles agem como obstáculos naturais à passagem das ondas provocando transformações bruscas em suas características e conseqüente diminuição de sua energia (Kench & Brander, 2006). Ou seja, à medida que esses organismos se desenvolvem, criam uma estrutura tri-dimensional de variabilidade geométrica, onde grande quantidade de energia da onda pode ser dissipada durante sua propagação (Lowe *et al.*, 2005; Storlazzi *et al.*, 2004).

A transformação e dissipação das ondas pelos recifes podem envolver um grande número de processos e interações físicas, como empolamento (*wave shoaling*), refração, difração, fricção de fundo e dissipação de energia através da turbulência provocada pela arrebentação (Massel & Brinkman, 2001; Nelson, 1999). No entanto, as características específicas da modificação da onda e a extensão espacial da dissipação são fortemente controladas pela geometria da estrutura recifal (elevação, declive, largura), profundidade relativa entre o nível do mar e o topo do recife (Gorlay, 1994; Hardy & Young, 1996; Nelson, 1999) e parâmetros da onda incidente (Kobayashi & Wurjanto, 1989).

Como resposta às alterações na altura e direção da onda, a deriva litorânea pode ser também modificada (Longuet-Higgins, 1970). Em conseqüência, a linha de costa adota uma configuração adaptada às variações na onda provocada pelos recifes, criando áreas de baixa intensidade de deriva litorânea na zona de sombra dos recifes e áreas de maior energia nas imediações. Em outros termos, a morfodinâmica praias é condicionada por essas interações primárias.

Nesse sentido, o conceito de morfodinâmica, definido como o ajustamento mútuo entre topografia e dinâmica de fluidos envolvendo o transporte de sedimentos (Cowell

& Thom, 1994; Wrigth & Thom, 1977), tem sido amplamente desenvolvido para litorais siliciclásticos. Entretanto, em ambientes recifais, esses estudos apresentam maior complexidade, pois além da existência das variáveis oceanográficas como onda, maré, correntes, vento, existe a interação dessas variáveis com os recifes, provocando padrões específicos de transporte sedimentar.

Nos últimos anos, tem-se observado um número crescente de trabalhos que utilizam modelos numéricos para simulação da transformação da onda em ambientes com presença de estrutura recifais (Legrand *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2005; Stone *et al.*, 2005; Sorensen, 2004; Wolanski *et al.*, 2003; Lewis, 2001; Lee, 1993). Apesar da complexidade desses ambientes, os modelos têm sido aprimorados, e termos fontes específicos tem sido incluídos nas equações governantes para representar os fenômenos físicos ocorrentes em águas rasas (Andrew, 1999). Esse aprimoramento foi, em parte, impulsionado pelos problemas de erosão ocorrentes em litorais com ou sem a presença de recifes e a conseqüente necessidade de implantação de obras costeiras, o que requer o uso dessas ferramentas durante a etapa de projeção e previsão de causa-efeito.

Pernambuco configura como uma das áreas de maior desenvolvimento de recifes costeiros do litoral brasileiro (Laborel, 1970). Devido à intensificação dos processos erosivos que vêm ocorrendo nos litorais urbanos do estado durante as últimas décadas, várias pesquisas sobre dinâmica costeira (Façanha, 2007; Rollnic, 2002), evolução da linha de costa (Costa *et al.*, 2008; Mallmann, 2008; Gregório *et al.*, 2004) e morfologia praial (Gregório, 2009; Pontes, 2008) vêm sendo desenvolvidas. No entanto, poucas são as pesquisas existentes sobre a alteração de ondas, correntes e transporte de sedimentos, considerando a interação com os recifes.

Os problemas erosivos nos centros urbanos do Estado de Pernambuco, em destaque na cidade do Recife e Jaboatão dos Guararapes, motivaram ainda uma série de financiamentos públicos. Em 2006, órgãos federais (Ministério da Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco), estaduais (Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - CPRH) e municipais (Prefeituras dos municípios de Paulista, Olinda, Recife e Jaboatão dos Guararapes) firmaram uma parceria e criaram o Projeto de Monitoramento Ambiental Integrado - Avaliação dos Processos de Erosão Costeira nos Municípios de Paulista, Olinda, Recife e Jaboatão dos Guararapes (FINEP/MAI, 2009). Esta iniciativa permitiu o levantamento de dados oceanográficos locais, essenciais para a realização de uma análise integrada sobre várias forças envolvidas no processo erosão costeira. Em 2008 foram iniciados também os Projetos MAPLAC, PROCosta e PGEST, onde, além da aquisição e análise de dados, estão sendo desenvolvidas atividades de aplicações de modelos numéricos para análise da circulação costeira desta região. Em 2009, foi aprovado o Projeto VULSPE, uma parceria entre a Universidade de São Paulo - USP e a Universidade Federal de

Pernambuco – UFPE, para desenvolvimento de estudos sobre o impacto das mudanças climáticas na zona costeira.

Todos os projetos supracitados têm, portanto, como objetivo comum, a compreensão dos processos costeiros na região. As pesquisas já desenvolvidas em Recife e Jaboatão dos Guararapes, demonstram que a erosão não é homogênea ao longo da linha de costa, existindo zonas críticas de recuo ao lado de áreas progradação. Considerando que a dinâmica costeira em ambientes recifais está intimamente relacionada às interações entre os processos de transformação das ondas e essas estruturas, é imprescindível que haja estudos que abordem essa temática.

Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o papel dos recifes submersos de Recife e Jaboatão dos Guararapes na transformação das ondas gravitacionais de superfície, a partir da análise de dados *in situ* e de técnicas de simulação numérica. Pretende-se, dessa forma, contribuir para a compreensão dos processos de dinâmica costeira ocorrentes na região.

Para atingir este objetivo as seguintes etapas foram propostas:

- Analisar a geometria dos recifes submersos de Recife e Jaboatão dos Guararapes;
- Analisar a transmissão das ondas através dos recifes e seus processos dissipativos;
- Aplicar um modelo numérico de propagação de ondas em água rasa, elaborando cenários hipotéticos que permitam analisar a influência da estrutura recifal sobre o campo de ondas.

Localização da Área de Estudo

As cidades do Recife e Jaboatão dos Guararapes pertencem a Região Metropolitana do Recife - RMR, porção oriental do Nordeste do Brasil. Estão localizadas entre as coordenadas planas 285000E – 9085000N e 29500E – 9112000N (*datum* WGS84), delimitada ao norte pelo Porto do Recife e ao sul pela desembocadura do rio Jaboatão, correspondendo a uma faixa de cerca de 18 km de extensão (Figura 1).

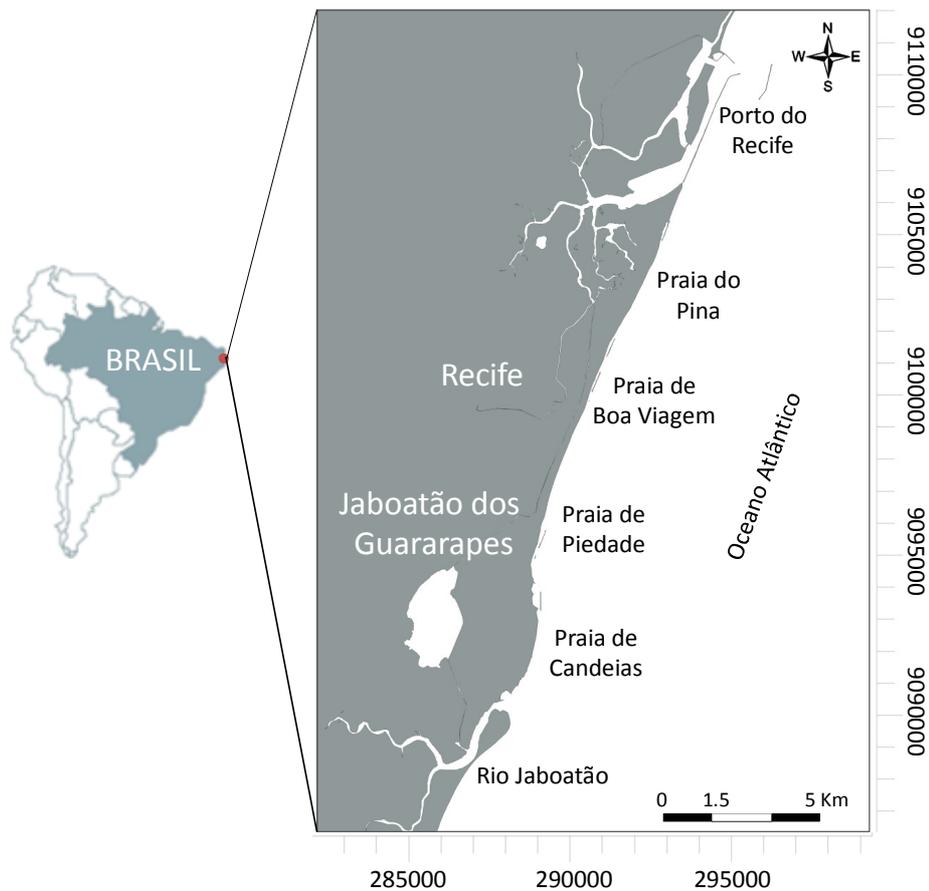


Figura 1. Localização da área de estudo.

O regime de marés na região é do tipo semidiurno, com número de forma $F=0,09$ e período médio de 12,42 horas, apresentando duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar, e com pouca desigualdade diurna. A partir de previsões regulares das alturas das marés para o Porto do Recife, fornecidas pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil), calcula-se que as marés apresentam altura média de 1,67 m, com alturas médias de sizígia de 2,07 m e alturas médias de quadratura de 0,97 m. Durante o período de fevereiro a setembro predominam ventos de SE com velocidades médias de 2,6 m/s a 4,0 m/s, com ventos mais intensos nos meses de julho e agosto. Durante os meses de outubro e janeiro, predominam ventos E-SE com velocidades de 3,0 m/s a 3,2 m/s. Ventos de E-NE e menos intensos (2,0 m/s a 2,1 m/s) ocorrem com mais frequência nos meses de novembro e dezembro (FINEP/MAI, 2009).

Não existe uma série longa de medição de ondas que permita identificar com segurança as características do clima de ondas da região. Análises das séries temporais de curta duração (8 dias) obtidas para a área de estudo, apontam para a ocorrência de ondas de gravidade com alturas significativas médias de 0,60 m a 0,97 m, com períodos significativos das ondulações entre 5,1 s e 6,8 s. De acordo com Innocentini *et al.* (2005) as maiores ondulações ocorrem durante os meses de julho, agosto e

setembro provenientes da direção sul e estão associadas com perturbações derivadas de eventos de ciclones extratropicais do Atlântico Sul.

O litoral da área de estudo apresenta-se intensamente urbanizado, e a forma como foi ocupado o torna bastante vulnerável a qualquer tipo de evento extremo. Em Jaboatão dos Guararapes, 41 % da linha de costa não apresentam mais pós-praia arenosa, constituindo-se, principalmente, de trechos com obras do tipo enrocamentos, espigões e muros. Em Recife, a presença de obras costeiras é verificada em 55 % da costa, incluindo a parte de proteção do Porto do Recife, a norte da área (FINEP/MAI, 2009).

Organização do Documento

Esta dissertação foi estruturada em três capítulos, onde os objetivos específicos são abordados de forma progressiva. Como exposto nas seções anteriores, o grau de transformação da onda é função da geometria do recife e, portanto, no Capítulo 1, essa geometria é investigada com técnicas de sondagem *in situ*, onde é elaborado um mapa batimétrico detalhado da região, com a descrição de sua geometria típica, através de métodos de análise estatística.

No Capítulo 2, a dissipação da energia da onda ao passar pelos recifes é investigada através do cálculo do coeficiente de transmissão. Para isto, são utilizadas as informações geométricas geradas no capítulo anterior, somadas às informações obtidas por ondógrafos fundeados ao longo da estrutura submersa. A partir da análise dos dados obtidos, é proposta uma equação empírica para estimar a atenuação da onda incidente após sua passagem pelo recife.

O Capítulo 3 trata da implementação do modelo espectral de ondas MIKE 21 SW para a área de estudo, o qual é calibrado e validado a partir das informações geradas pelo fundeio dos ondógrafos abordadas no Capítulo 2. O objetivo deste capítulo consiste em verificar de forma sinótica as transformações das ondas ao passarem através das estruturas recifais e elaborar cenários hipotéticos que evidenciem a influência dos recifes na evolução espacial das ondas.

No Capítulo 4 são apresentadas as considerações finais do trabalho, integrando os principais resultados obtidos nos capítulos anteriores, e sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 1

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS RECIFES SUBMERSOS DE RECIFE E JABOATÃO DOS GUARARAPES – PE

1. Introdução

Um dos traços morfológicos característicos do litoral do Estado de Pernambuco é a presença de linhas de arenito de praia (*beachrocks*) paralelas à costa, as quais servem de substrato para o desenvolvimento de corais e de algas calcárias (Manso, 2003). Esses organismos secretam grandes quantidades de carbonato de cálcio ao longo do tempo, crescendo tanto vertical como horizontalmente, e podem formar estruturas orgânicas de grandes proporções.

Comparativamente aos arenitos de praia não colonizados, os recifes de coral são mais expressivos quanto à diversidade de formas e tamanhos possuindo, em geral, um potencial maior de alterar a hidrodinâmica local e de dissipar grandes quantidades de energia da onda. Desempenham, assim, importante papel na morfologia recente da costa (Ramanujam & Sudarsan, 2003). Estimativas dos níveis de atenuação da energia das ondas causada por recifes de coral em todo mundo, variam entre 72 % a 97 % (Lugo-Fernandéz *et al.*, 1998).

A relação entre as proporções de um recife e o grau de modificação que ele pode causar na transmissão das ondas é objetivo de diversos estudos em costas tropicais e em projetos para construção de quebra-mares artificiais e estruturas surfáveis (Beamsley *et al.*, 2003; Mead *et al.*, 2003; Black, 2001; Gorlay, 1996a; Gorlay, 1996b; Gorlay, 1994). Esses trabalhos mostram que, quanto mais largo o recife e quanto menor a sua profundidade de submersão, ou seja, profundidade relativa entre topo recifal e nível do mar, maior será a dissipação de energia pelos processos de fricção de fundo e quebra da onda (Shirlal *et al.*, 2007).

Em Recife e Jaboatão dos Guararapes, estudos realizados anteriormente mostram a existência de um banco recifal submerso que se estende ao longo da região, aproximadamente paralelo a linha de costa, com largura média de 1000 m e topo localizado a uma profundidade variável de 4 m a 10 m (FINEP/MAI, 2009). Esta estrutura exerce influência significativa na hidrodinâmica costeira, apresentando grande variabilidade de formas, sendo difícil identificar uma geometria típica. Além do mais, sua complexidade geométrica requer um levantamento batimétrico com alto nível de detalhe.

Segundo Laborel (1969), essa estrutura foi formada ao longo do tempo por espécies de corais e hidrocorais, sendo a *Mussismilia Hartii* a sua principal espécie construtora. Esses organismos tiveram seu crescimento associado a variações no nível do mar, tendo por base uma linha de *beachrock* (Leão, 1996). Entretanto, impactos antrópicos relativos à retirada de material calcário para construção civil e correção do solo, poluição das águas e aumento da sedimentação, podem ter causado uma mortalidade significativa desses organismos.

Embora haja sinais claros de que as condições das comunidades de corais declinaram ao longo do tempo, não existem avaliações mais recentes publicadas sobre a saúde destes recifes desde os levantamentos realizados por Laborel (1970), há aproximadamente 40 anos atrás. Observações preliminares e não publicadas, realizadas nos anos 90, mostraram que os recifes localizados próximos as cidades grandes, como Recife e Maceió, encontram-se em péssimas condições (Castro, 1999). Frente às tendências de aumento do nível do mar (IPCC, 2007), pode-se ainda especular que a impossibilidade de crescimento vertical da estrutura recifal implicaria numa menor atenuação da energia das ondas (Sheppard *et al.*, 2005).

O presente capítulo tem por objetivo analisar a geometria dos recifes submersos de Recife e Jaboatão dos Guararapes através do mapeamento detalhado das feições batimétricas desta região. As informações levantadas aqui serão utilizadas na análise da transmissão das ondas realizadas no Capítulo 2, bem como dado de entrada para o modelo numérico de propagação de ondas no Capítulo 3.

2. Geometria de Perfis Recifais

A forma ou morfologia de um recife influencia fortemente os processos de transformação da onda que acontecem sobre ele e, conseqüentemente, o grau de dissipação de energia e quebra da onda. Não somente o perfil recifal influencia na onda, mas as variações na magnitude da força da onda influenciam na configuração de um recife, tanto diretamente devido à erosão e remobilização de materiais biogênicos, como indiretamente, através dos efeitos provocados na zonação dos organismos recifais (Gorlay, 1996b).

Os recifes tendem a desenvolver perfis definidos de profundidade associados à zonação dos corais sob a influência constante da ação das ondas. Estes padrões resultam da diminuição do impacto da onda nos organismos construtores com o aumento da profundidade (Glynn, 1997).

De forma geral, o perfil recifal pode ser subdividido em quatro sub ambientes: crista, zona frontal, planície recifal e zona retro-recifal. A parte mais alta do recife,

correspondente a crista, está permanentemente submetida à ação das ondas, podendo ficar emersa durante as marés baixas. Em locais onde a ação das ondas é intensa, somente organismos incrustantes com formas delgadas conseguem sobreviver. A zona frontal estende-se da crista até profundidades indeterminadas, geralmente inferiores a 20 metros, apresentando maior diversidade de corais. A planície recifal é constituída por pavimentos cimentados, ou bancos arenosos com detritos esqueléticos, em áreas de energia de ondas moderada. Os bancos arenosos são em sua maioria constituídos por placas de algas calcárias denominadas Halimeda. A região retro-recifal posiciona-se a sotavento da planície recifal, possuindo condições relativamente tranquilas, com presença de sedimentos finos (James, 1983).

Os recifes brasileiros apresentam uma zanação de corais que, em geral, ocorre na maior parte das formações recifais ao longo da costa. Ela consiste no seguinte: uma cadeia formada por algas *Melobesia* e gastrópodes vermitídeos nas cristas recifais; uma zona de ocorrência de *Palythoa* e *Millepora* abaixo da crista; uma zona de *Mussismilia* spp. nas partes intermediárias das paredes laterais dos recifes, e uma zona com *Montastrea cavernosa* em águas mais profundas (Maida & Ferreira, 2004).

As definições utilizadas nesta pesquisa foram adaptadas de Gorlay (1996a; 1996b), que definiu as várias partes de um perfil recifal, considerando sua variedade morfológica natural, com objetivo de relacionar sua geometria com a transformação das ondas. Estas definições são utilizadas por este e outros autores (Gourlay, 1994; Jensen, 1991; Seelig, 1983; Gerritsen, 1981), para reproduzir modelos físicos em experimentos de tanques de onda em laboratórios, que, de acordo com sua geometria, são divididos em recifes plataforma ou de franja, conforme Figura 2. Cabe ressaltar que o termo recife de franja e recife plataforma utilizado aqui, refere-se a configuração geométrica adotada pelo perfil e não faz referência ao tipo de origem dos recifes. Conforme descrito por Labrel (1967) e Dominguez *et al.* (1990), os recifes de coral da costa nordeste brasileira tem seu crescimento associado a uma base de *beachrocks*, sendo comum encontrar diversas linhas recifais paralela a costa. Maida & Ferreira (1997) descrevem que em Tamandaré, cidade localizada ao sul de Pernambuco, as construções recifais próximas as praias assemelham-se a recifes de franja com uma lagoa rasa e diversos pináculos recifais na zona do retro-recife, enquanto que as linhas recifais mais afastadas formam barreiras com topos expandidos lateralmente, podendo ficar emersos em marés baixas.

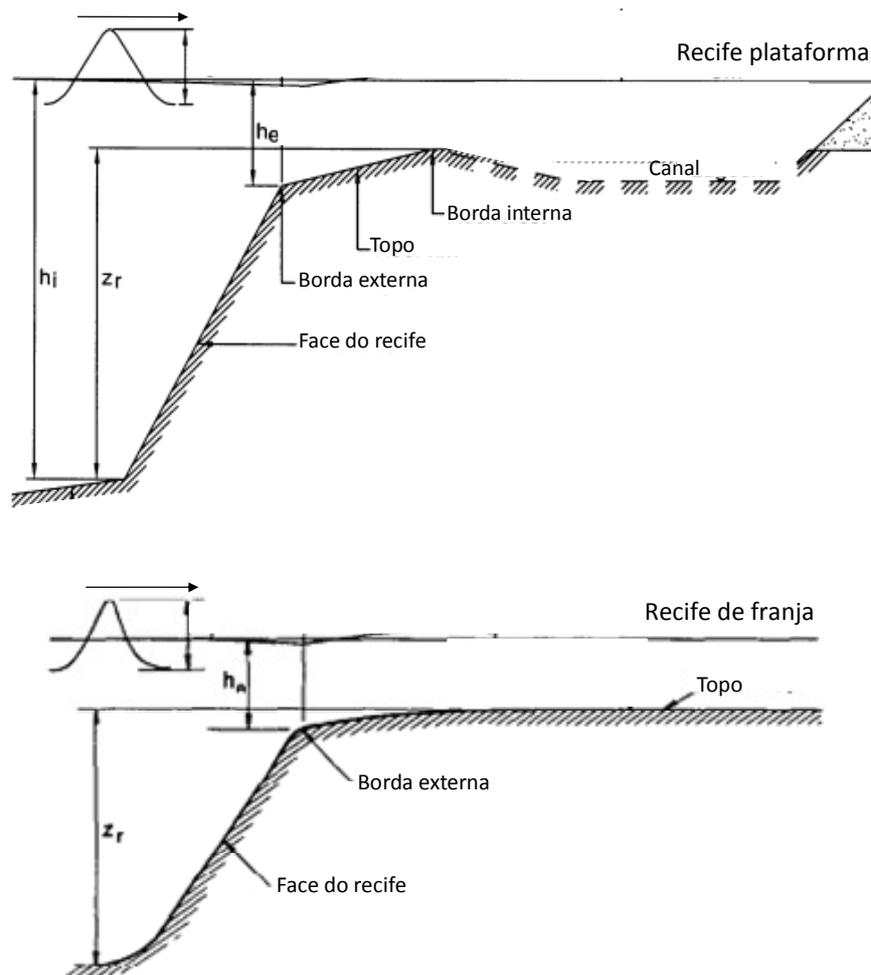


Figura 2. Representação esquemática de um recife plataforma e de franja (adaptado de Gorlay, 1996a e 1996b).

Face do recife – a face submersa voltada para o mar com declividade relativamente alta;

Topo – parte relativamente plana do recife localizada após a borda externa;

Borda externa – ponto de inflexão entre a face recifal e o topo voltado para o mar;

Borda interna – ponto de inflexão entre a face recifal e o topo voltado para a praia;

Canal – um corpo de água delimitado pelo recife e por uma massa de terra;

Recife de franja – um recife defronte a uma massa de terra;

Recife plataforma – um recife cercado pelo mar.

3. Métodos

3.1. Levantamento Batimétrico

Inicialmente, realizou-se um trabalho extensivo de batimetria detalhada para mapear as feições recifais na área de estudo, bem como sua geometria específica. Este

trabalho teve por base os levantamentos iniciais do Projeto MAI (FINEP/MAI, 2009), onde foram realizados perfis perpendiculares a linha de costa, espaçados entre si em 200 m. A possibilidade de existência de recifes isolados (*patch reefs*), não mapeados anteriormente, e a complexidade geométrica do banco recifal submerso, apontou a necessidade de recobrimento da malha batimétrica. Foi então, realizado nesta pesquisa, outro conjunto de perfis interpostos aos do Projeto MAI o que resultou numa malha final com 100 m de espaçamento entre os perfis.

Os levantamentos foram realizados em 7 dias de sondagem, durante o mês de setembro/09, onde foram acrescentados 76 perfis aos 72 já levantados anteriormente pelo Projeto MAI, totalizando 150 perfis. O ponto inicial foi a linha de arrebentação, prolongando-se até a isóbata de aproximadamente 18 m, cobrindo uma extensão equivalente de 24 km de costa (Figura 3). Esta atividade foi financiada pelo Projeto MAPLAC – MCT.

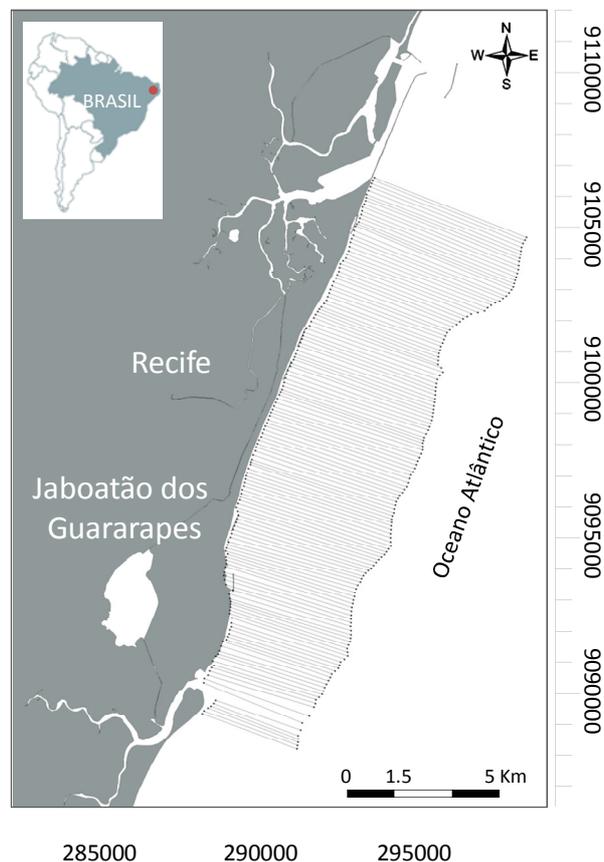


Figura 3. Malha batimétrica projetada na área de estudo. Primeiro perfil batimétrico localizado no extremo sul da área (perfil 1) e último perfil (perfil 150), localizado no extremo norte.

Além do recobrimento interposto dos perfis batimétricos, o levantamento realizado mapeou os recifes mais rasos, localizados a sul da área de estudo, região na qual foi

possível navegar apenas nas marés de sizígia e com mar calmo, visto que ocorre intensa arrebentação de ondas.

O levantamento batimétrico no Projeto MAI foi efetuado com a ecossonda da marca Garmin modelo GPSMap 298 Sounder, com frequência programada de 200 kHz e armazenagem de registros a cada 3 s. Este sistema foi instalado em uma embarcação monocasco, motor 40 HP, com calado de 24 cm. Esses mesmos equipamentos foram utilizados no levantamento realizado durante o Projeto MAI, evitando assim mudanças na precisão e navegabilidade da embarcação.

Os dados foram corrigidos ao Nível de Redução (a média das baixas-marés de sizíguas do local - MSLW) considerando-se os horários de nível d'água no momento das sondagens fornecidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). O modelo digital de terreno foi criado a partir do método de interpolação *Krigagem*, o qual possui a vantagem de permitir uma interpolação mais fidedigna de superfícies interpoladas a partir de dados com distribuição irregular, pois considera a tendência geométrica dessa distribuição para a totalidade dos pontos amostrais (Chludinsk & Bonetti, 2002).

3.2. Análise da Geometria Típica

A geometria típica de recifes de coral é difícil de ser definida em função da complexidade de suas formas, rugosidade e porosidade, o que cria um meio bastante irregular. A maioria dos trabalhos utiliza modelos em duas dimensões (em perfil) para caracterizar e delimitar um recife (Gourlay, 1996a).

Levantamentos batimétricos anteriores indicaram que o eixo principal dos recifes submersos está orientado paralelo a linha de costa (FINEP/MAI, 2009). A elaboração de perfis perpendiculares à linha de costa permitiu obter transectos dessa estrutura, revelando sua geometria em duas dimensões. Esses perfis foram analisados em função de profundidade relativa ao nível do mar, em pontos com distância regular de 25 m, servindo de entrada em um programa estatístico para realização de uma análise de similaridade entre esses parâmetros. Dessa maneira, foi possível obter um meio estatístico que possibilitou identificar o perfil representativo de cada área levantada.

A análise de similaridade permite definir grupos homogêneos dentro de um conjunto de dados, distinguindo-os dos outros grupos em função no grau de semelhança entre eles (Hair *et al.*, 2005). Aplicou-se a distância de Bray-Curtis para elaboração da matriz de similaridade, onde o processo de grupamento hierárquico dos perfis foi representado graficamente por meio de um dendograma, com a posição geográfica de cada grupo tendo sido posteriormente plotada no mapa base da região.

4. Resultados e Discussões

4.1. Mapa Batimétrico da Zona Recifal

A batimetria obtida nesse trabalho foi gerada a partir de 37.644 pontos de profundidades, que somados aos pontos cotados pelo projeto MAI, totalizaram 74.947 pontos, permitindo a elaboração de um modelo digital de terreno de alta resolução. Além de se obter detalhes da geometria do banco recifal submerso, foi possível detectar a presença de outras duas linhas recifais mais profundas, além de algumas outras de menor proporção na região submersa próxima a praia, e de recifes isolados distribuídos ao longo da região (Figura 4).

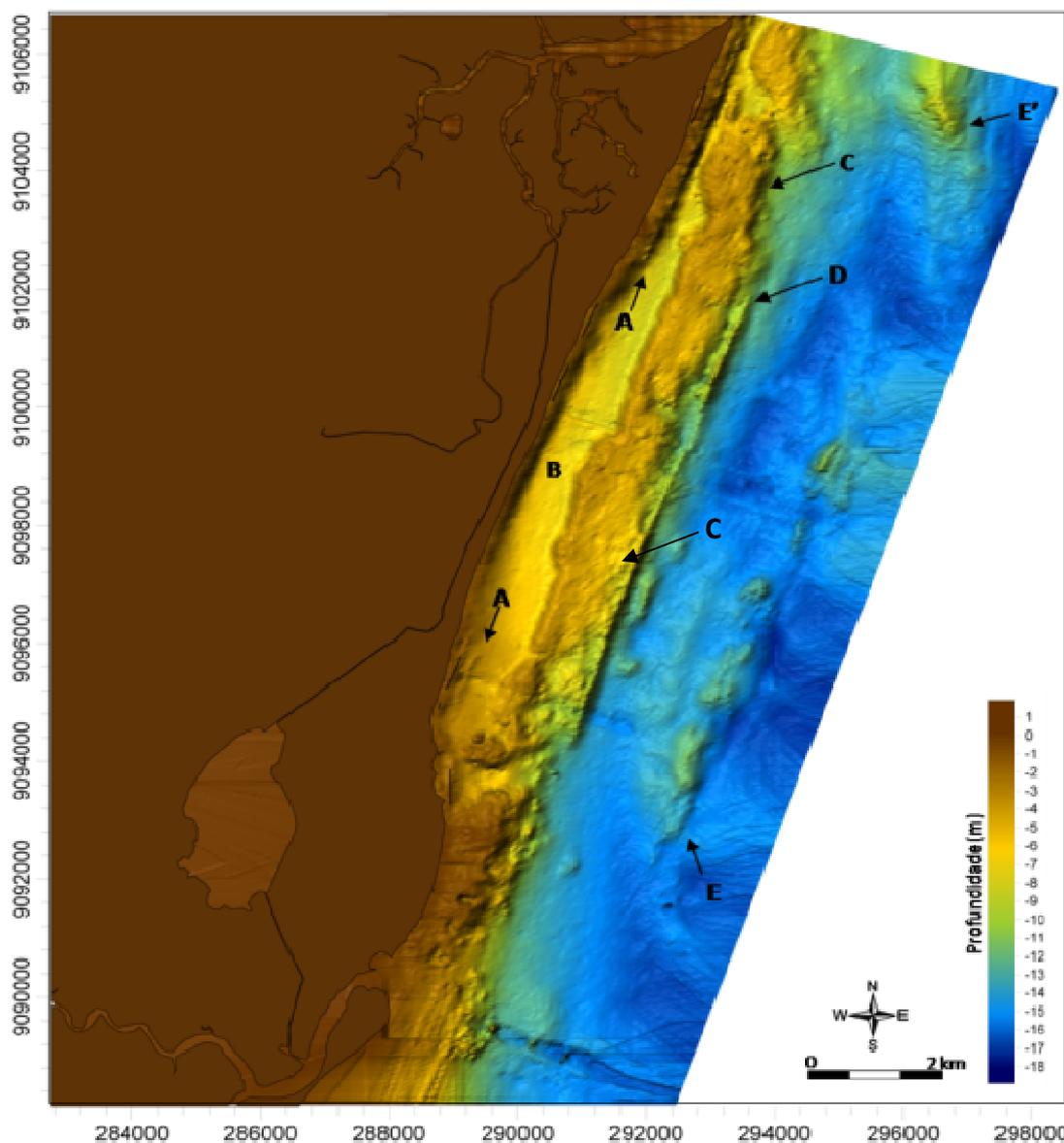


Figura 4. Mapa batimétrico detalhado da zona recifal de Recife e Jaboatão dos Guararapes. A: pequenas linhas próximas a praia; B: canal; C: 1ª linha recifal submersa (banco recifal submerso); D: 2ª linha recifal submersa; E: 3ª linha recifal submersa; E': Banco Ituba;

Dada as suas proporções geométricas, a feição que mais se destaca nesse revelo é o banco recifal submerso (feição correspondente a letra C indicada na Figura 4), uma linha de recife ininterrupta que se estendem por toda a plataforma interna de Recife e Jaboatão do Guararapes. Essa estrutura está disposta no sentido SW-NE, aproximadamente paralela a linha de costa, apresentando uma extensão total de 18 km. A análise do mapa permite observar detalhes de sua superfície rugosa, marcada por pequenas elevações e depressões, além de cortes transversais, como em frente à praia de Piedade e do Pina. Entretanto, sua maior variabilidade geométrica diz respeito à largura e profundidade média do topo. Uma análise geral desses dois parâmetros permite dividir essa estrutura em duas partes distintas: zona norte e zona sul, conforme ilustrado na Figura 5.

Na zona norte, o banco recifal submerso apresenta 1,1 km de largura e sua profundidade de topo média é de 4 m. Nessa zona, ele encontra-se afastado da praia cerca de 800 m, e entre eles verifica-se a presença de um canal com profundidade de aproximadamente 7 m, o qual vai se tornando mais raso no sentido sul. Segundo Gregório (2009), este canal é formado por sedimentos superficiais de frações lama (silte + argila) e areia muito fina, o que indica a baixa energia dessa região. Macedo (2009), em um estudo realizado no recife Ilha da Barra, em Tamandaré (sul de Pernambuco), mostrou que a zona entre os recifes e praia favorece a deposição de sedimentos em suspensão provenientes de plumas estuarinas, pois os recifes servem de barreira mecânica a passagem das ondas, criando uma zona de baixa energia. Nas extremidades dessa zona, os recife são mais elevados, atingindo 2,8 m de profundidade em frente à parte norte da praia do Pina e 0,7 m na divisa de Candeias e Piedade, local conhecido popularmente como Abreus. Em frente à região da praia de Boa Viagem, onde atualmente existe um enrocamento com 2250 m de extensão, o recife também é um pouco mais elevado, atingindo 2,9 m de profundidade.

Na zona sul, verifica-se que o banco recifal é consideravelmente mais raso, com profundidade média de 0,5 m. A baixa profundidade relativa entre a crista do recife e o nível do mar provoca uma zona de arrebentação constante nessa região e, em marés baixas de sizígia, algumas partes do recife podem chegar a ficar emersas, o que diminui efetivamente a energia da onda. A largura do recife, nessa região, tem aproximadamente 1,4 km. Diferente do restante da área de estudo, a linha de costa nesse trecho não apresenta uma configuração retilínea e aproxima-se da estrutura com formato de U, no que se assemelha a uma saliência formada pela zona de sombra do recife. Não existe um canal entre a praia e a crista do recife, sendo esse trecho bastante raso e plano ($\sim 0,4$ m), com exceção de algumas piscinas naturais onde a profundidade pode chegar a 2 m. Próximo ao quebra-mar localizado na praia de Candeias (Figura 5) observa-se uma pequena interrupção perpendicular ao banco recifal, conhecida localmente como Barra dos Abreus, a qual apresenta largura de 330

m e profundidade média de 6,2 m. Ela é utilizada como rota de barcos de pesca que desejam transpassar a zona protegida dos recifes e aportar junto à praia.

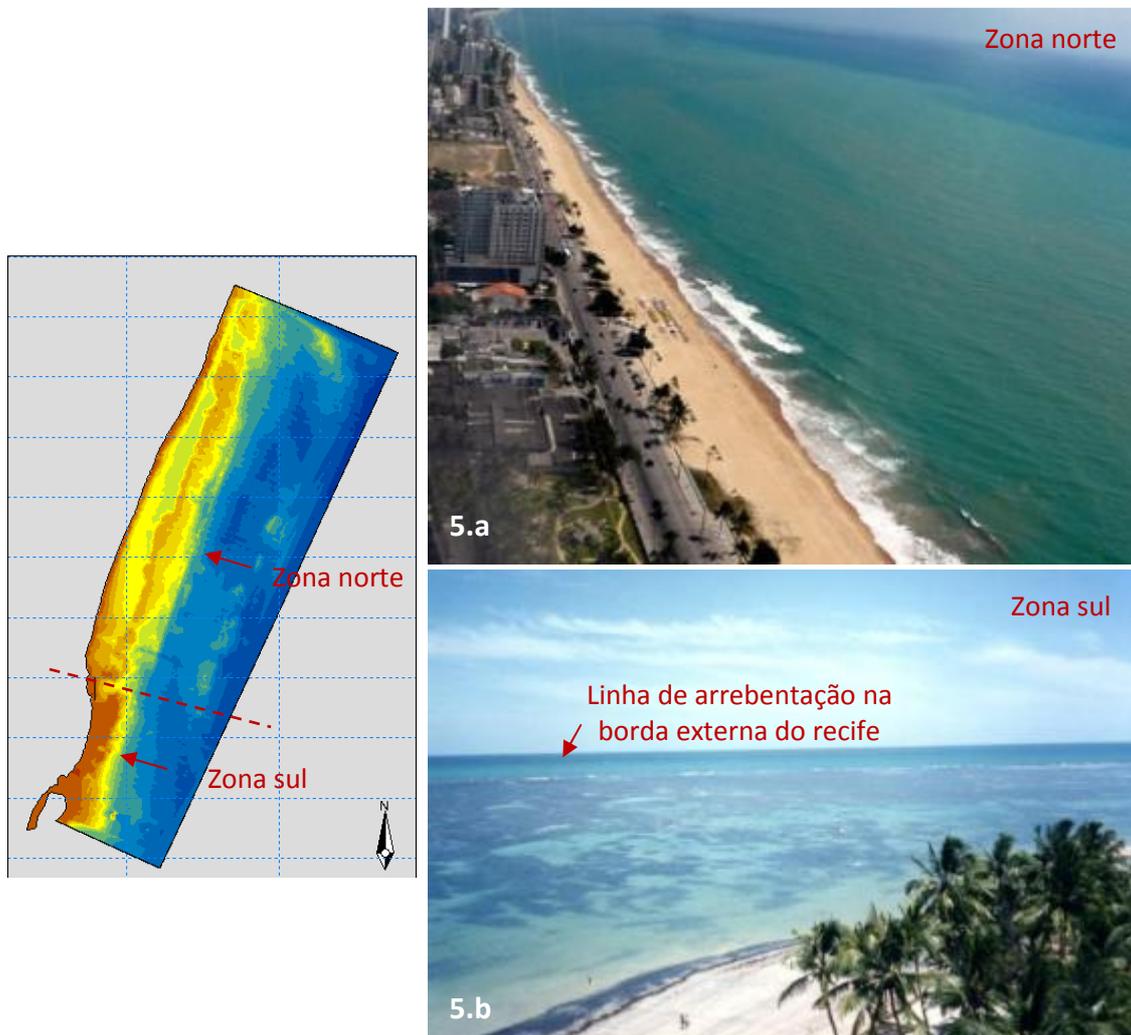


Figura 5. Visualizações das zonas norte e sul, referente às características do banco recifal submerso. A linha tracejada está posicionada sobre o quebra-mar de Candeias, onde há um corte transversal no banco recifal conhecido como Barra dos Abreus; (5.a) Fotografia aérea da praia de Boa Viagem, onde o banco recifal encontra-se totalmente submerso (Fonte: Emerson Zamprogno, 2009); (5.b) Fotografia da praia de Candeias, onde pode ser observado o banco recifal com presença de piscinas naturais (Fonte: Suzana Santos, 2007).

O banco recifal submerso foi inicialmente descrito por Laborel (1969), em termos de formação e composição superficial. Este autor realizou um perfil esquemático sobre as linhas de recife localizadas em frente à praia de Piedade (Figura 6) demonstrando que o banco recifal, chamado por ele de banco de coral, possui uma base de *beachrock*

intensamente colonizada por organismos construtores de recifes. As principais espécies identificadas em seu trabalho foi *Mussismilia harttii*, *Mussismilia hispida*, *Monstrastea cavernosa*, *Mileporas* e *Siderastrea*.

Segundo Castro (1999), as formações dos bancos recifais no Brasil estão associadas a uma fase de estabilidade do nível do mar, que durou cerca de 1000 anos favorecendo o crescimento de numerosas estruturas recifais ao longo de todo o litoral. Porém, desde há 4.000 anos, devido a várias descidas bruscas do nível do mar, as quais deixaram os topos de diversos recifes emersos e sujeitos à erosão, as estruturas recifais cresceram preferencialmente para os lados (Castro, 1999). Este processo foi responsável por criar uma estrutura com grandes proporções geométricas, a qual possui a capacidade de modificar a propagação das ondas e da circulação costeira na região. Além do mais, a força da onda influencia no padrão de distribuição de várias espécies construtoras dentro de um ambiente recifal e, em larga escala, controlam o desenvolvimento do recife como uma estrutura tri-dimensional (Gourlay, 2006).

O perfil esquemático realizado por Laborel (1969) corresponde ao perfil batimétrico de número 52 levantado nesta pesquisa, conforme mostra a Figura 6. Além do banco recifal submerso, é possível identificar uma segunda linha submersa de menor proporção, localizada entre os *beachrocks* do ambiente praial expostos durante a maré baixa e o banco recifal submerso (feição correspondente a letra A indicada na Figura 4). Esta linha foi detectada do perfil 46 ao perfil 55, e está orientada no sentido SW-NE, a uma distância de aproximadamente 290 m da linha de costa, com 850 m de extensão e 95 m de largura. A profundidade entre o nível do mar e seu topo é de aproximadamente 2,5 m. Como mostra o esquema de Laborel (1969), essa estrutura não foi intensamente colonizada por corais, apresentando uma cobertura leve de algas.

Os *beachrocks* do ambiente praial não foram detectados pelo levantamento batimétrico devido à impossibilidade de navegação sobre eles, entretanto, suas coordenadas foram plotadas no mapa base (Figura 4), revelando sua ocorrência e posição espacial dentro da área de estudo. Essas estruturas estão presentes ao longo do litoral e podem modificar localmente os parâmetros das ondas. Laborel (1969) apontou o *beackrock* da praia de Piedade como uma estrutura complexa, composta por três camadas de arenito sobrepostas, formadas há aproximadamente 5900 anos atrás. Segundo Gregório (2009) as idades dos *beachrocks* da cidade de Recife refletem um nível relativo do mar mais alto do que o atual.

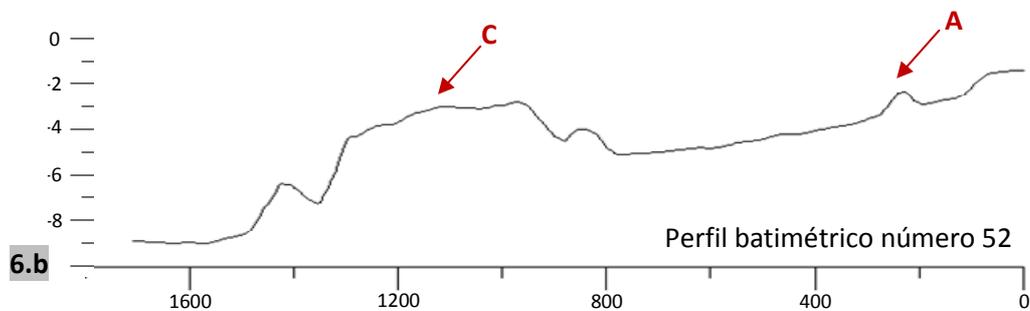
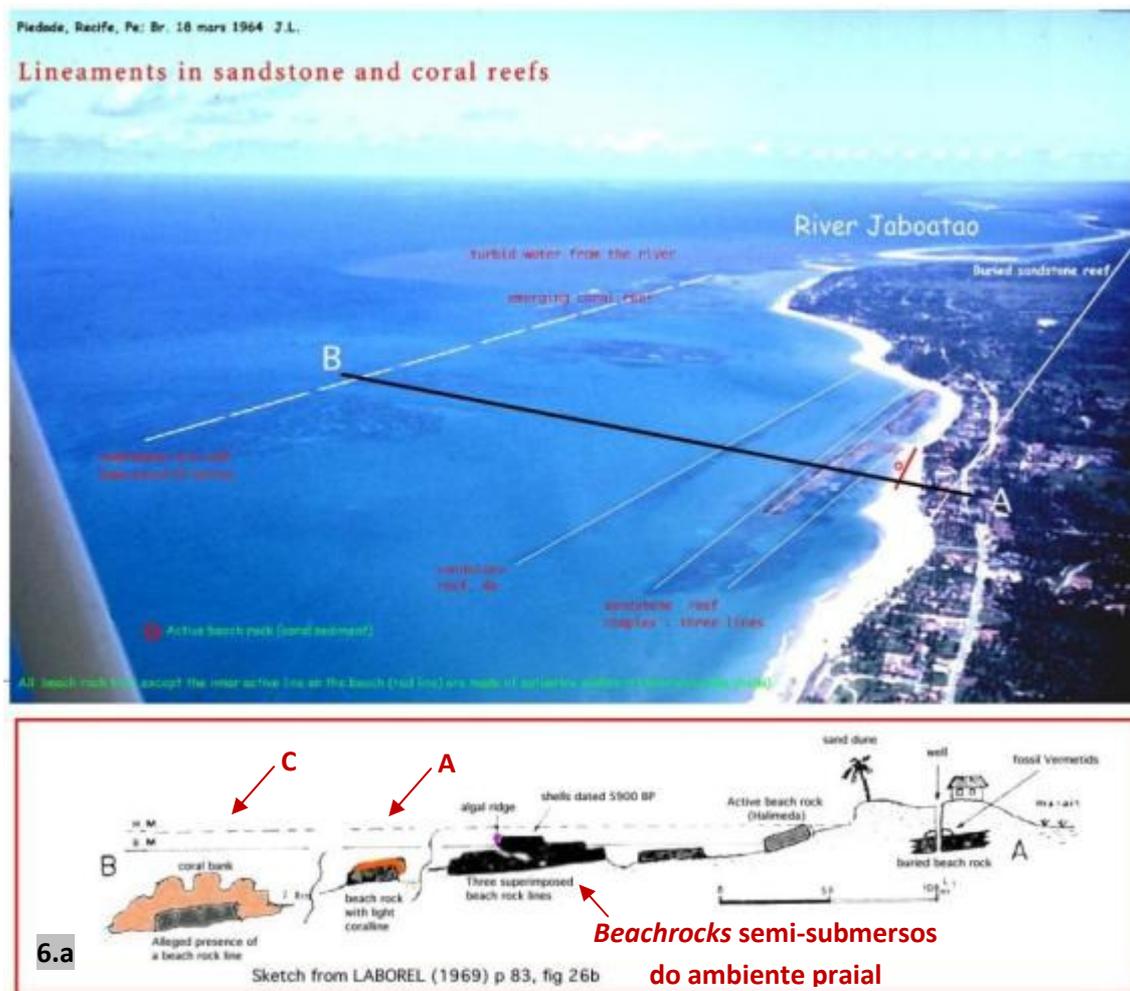


Figura 6. (6.a) Perfil esquemático realizado por Laborel (1969) sobre as linhas de recifes em frente a praia de Piedade. (6.b) Perfil batimétrico de número 52, correspondente ao esquema de Laborel (1969). A letra A indicada nas figuras mostra a posição da primeira linha recifal submersa, e a letra C o banco recifal submerso, denominado por Laborel (1969) de banco de coral.

Na praia do Pina (norte da área de estudo), a batimetria revela também uma linha submersa de menor proporção, semelhante à localizada em Piedade, com aproximadamente 3600 m de extensão, paralela ao *beachrock* exposto no ambiente praial. A profundidade relativa entre seu topo e nível do mar é de cerca de 2,8 m (Figura 7).

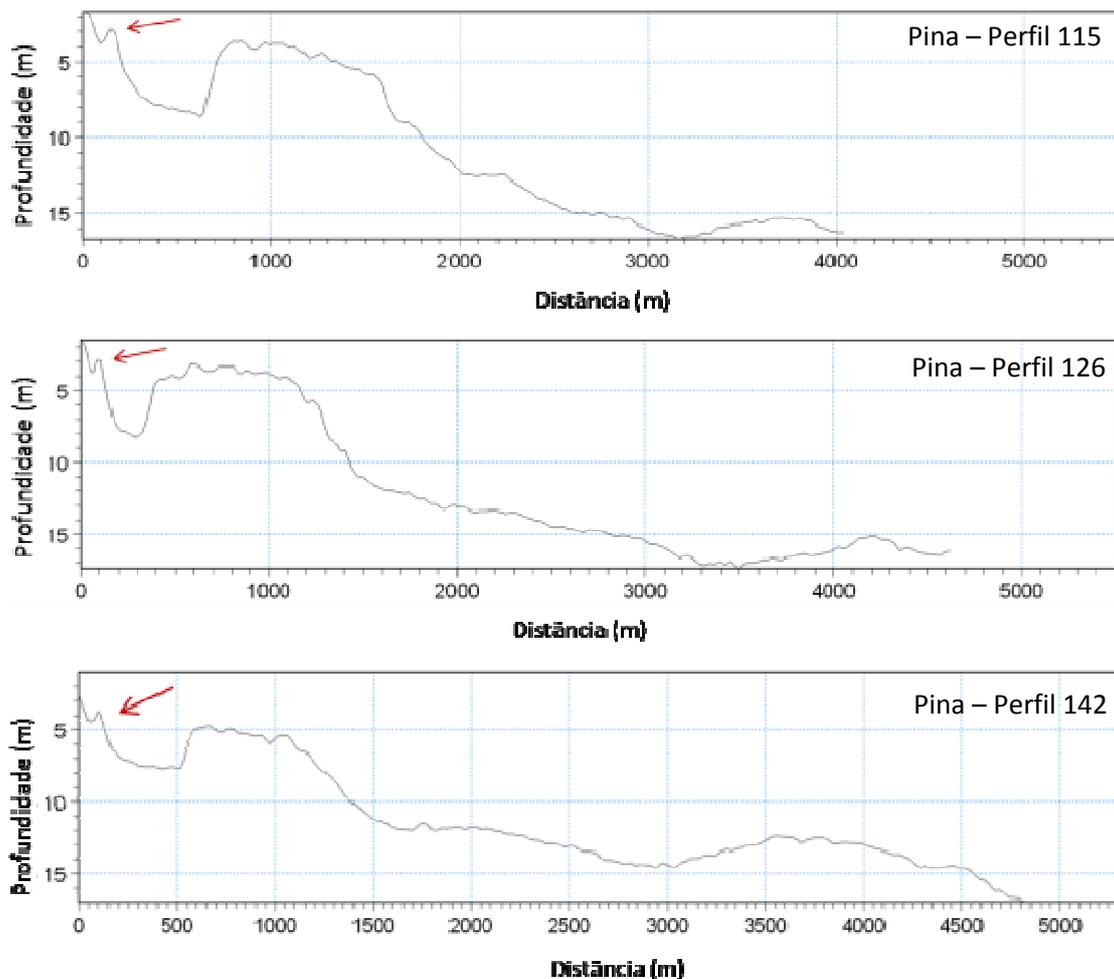


Figura 7. Exemplo de perfis batimétricos em frente à praia do Pina. A seta vermelha indica a posição da linha recifal submersa.

Além do banco recifal submerso (feição C) e as duas linhas submersas próximas a praia (feições A), observa-se ainda, duas outras linhas mais profundas, que se estendem ao longo da plataforma interna, nas isóbatas de 10 m e 15 m, respectivamente. A primeira delas está, em alguns pontos, unida ao banco recifal submerso (feição correspondente a letra D indicada na Figura 4). A forma como está disposta, paralela ao banco recifal e as demais linhas de recifes, sugere que a mesma seja formada por uma base de *beachrock*. Entretanto, o desenvolvimento de construções cabornáticas orgânicas acabou unindo essa duas linhas em alguns locais, o que resultou numa estrutura única, conforme detectada pelos perfis batimétricos (Figura 8). Processo semelhante, de junção entre duas linhas recifais, é observado nos recifes costeiros de Tamandaré, como mostra a Figura 9.

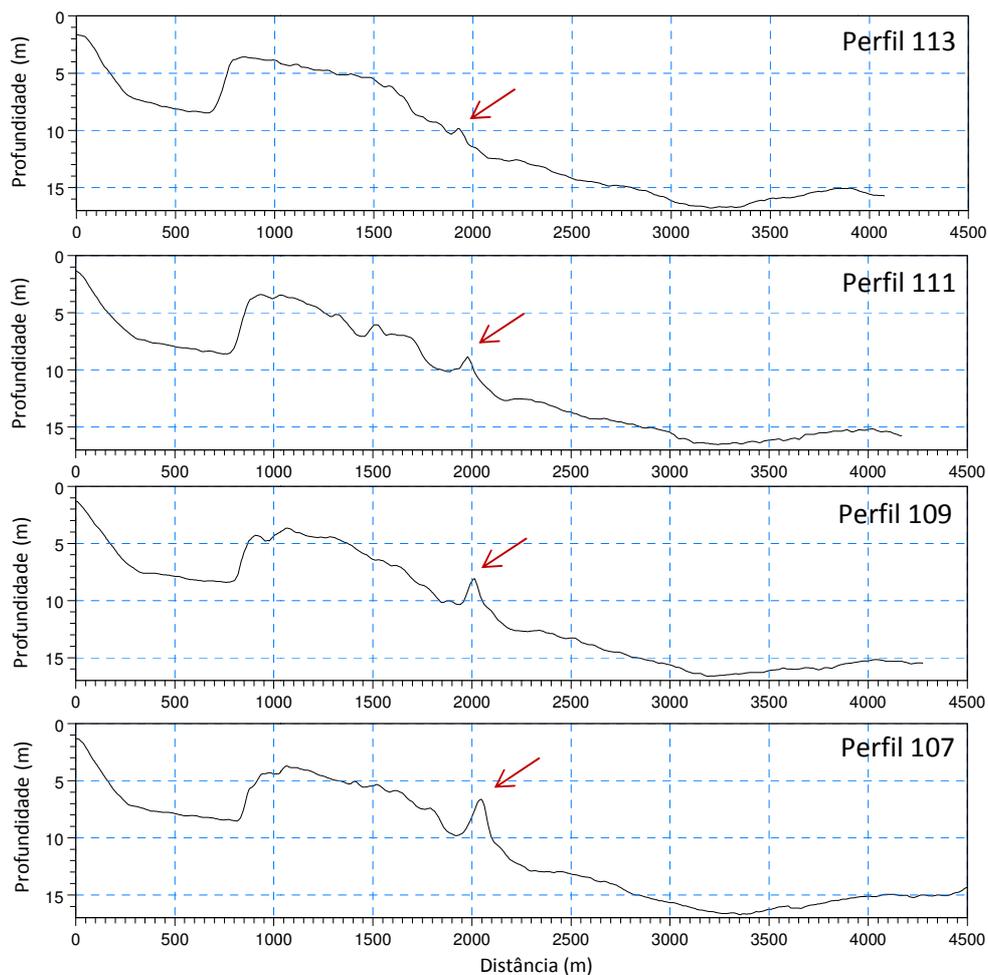


Figura 8. Perfis batimétricos demonstrando a presença da linha recifal da isóbata de 10 m, unida ao banco recifal submerso.



Figura 9. Estruturas recifais de município de Tamandaré. Configuração de linhas recifais unidas em algumas áreas.

A linha localizada em torno da isóbata de 15 m apresenta forma alongada com orientação predominante SW-NE (feição correspondente a letra E indicada na Figura 4). Foi detectada pela batimetria uma extensão contínua de 6600 m na parte central do mapa, mas seguindo o mesmo eixo ao norte observa-se um banco cuja profundidade no topo é de apenas 8 m, conhecido localmente como *Banco Ituba*, e ao sul, próximo a desembocadura do rio Jaboatão verifica-se um recife isolado, elevado 13 m do fundo. É possível que esta linha seja contínua, podendo estar assoreada em alguns trechos, devido à sedimentação. Entretanto, isto, só poderia ser verificado, com uso de equipamentos de sísmica rasa. De acordo com o mapa de distribuição de sedimentos realizado pelo Projeto MAI (FINEP/MAI, 2009), no entorno do rio Jaboatão, existe um bolsão de lama, indicando a tendência para deposição de sedimentos finos nessa região.

Uma descrição realizada por Maida & Ferreira (1997) para os recifes costeiros da cidade de Tamandaré (sul de Pernambuco), demonstra o mesmo padrão de disposição dos recifes em linhas consecutivas e paralelas entre si. Também neste local, a primeira linha, localizada próximo a praia, é constituída por de arenito de praia pouco colonizado por organismos construtores de recifes, e com largura relativamente reduzida. A segunda e terceira linhas são mais desenvolvidas em termos de dimensões espaciais, apresentando colunas de corais que se expandem lateralmente no topo. Estas colunas originam um amplo sistema de cavernas interconectadas abaixo da superfície.

A existência de várias linhas recifais, bem como recifes isolados, podem promover a alteração na propagação da onda e dissipação de energia em vários níveis da plataforma interna de Recife e Jaboatão dos Guararapes. Entretanto, em termos de proporções geométricas, o banco recifal submerso possui o maior potencial em promover tais alterações. O mapeamento detalhado dessas feições é de extrema importância para a utilização em modelos numéricos, pois a qualidade dos dados de saída é, em parte, dependente do nível de detalhe que se tem sobre a batimetria da zona de interesse.

4.2. Geometria Típica

O dendograma resultante da análise de similaridade com a medida de Bray-Curtis, permitiu dividir os perfis em 2 grupos principais, com 84% de similaridade entre eles (Figura 10). Esses dois grupos correspondem exatamente à zona norte e à zona sul, conforme identificado no tópico anterior e que se distinguem, principalmente, pela variação da profundidade no sentido praia-*offshore*. O grupo 1 tem a geometria semelhante a um recife de franja, com baixa profundidade da praia à borda externa,

enquanto que o grupo 2 se aproxima de um recife plataforma, seguindo as definições de Gorlay (1996a, 1996b).

O grupo 2 apresenta maior variedade de formas, e foi subdividido por esta análise em 2 outros grupos, representados pelos perfis da extremidade, localizados em frente a praia de Piedade e praia do Pina (subgrupo 2.b), e pela parte central, que engloba principalmente a praia de Boa Viagem (subgrupo 2.a). Os perfis das extremidades compartilham semelhanças em função da profundidade média e distância entre o recife e a costa. Nesses dois locais, existe um trecho do banco recifal submerso mais rebaixado, seguido de porções mais elevadas, enquanto que os perfis centrais são mais homogêneos entre si. A Figura 11 demonstra a distribuição espacial dos agrupamentos gerados pela análise de similaridade.

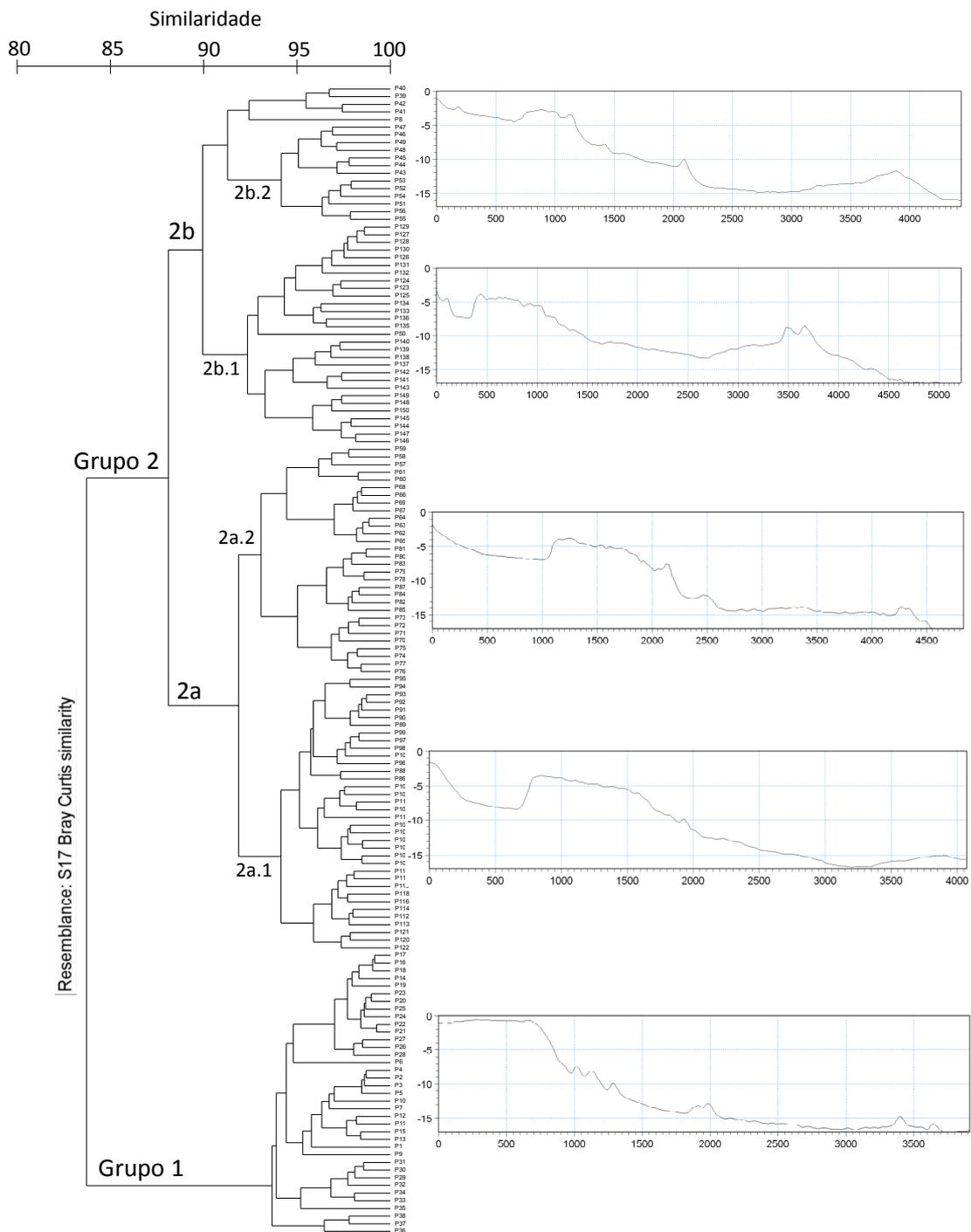


Figura 10. Dendrograma gerado pela análise de similaridade com a medida de Bray-Curtis. O eixo x corresponde a similaridade, e o eixo y, aos perfis batimétricos. Ao lado de cada grupo, encontra-se a geometria do perfil representativo.

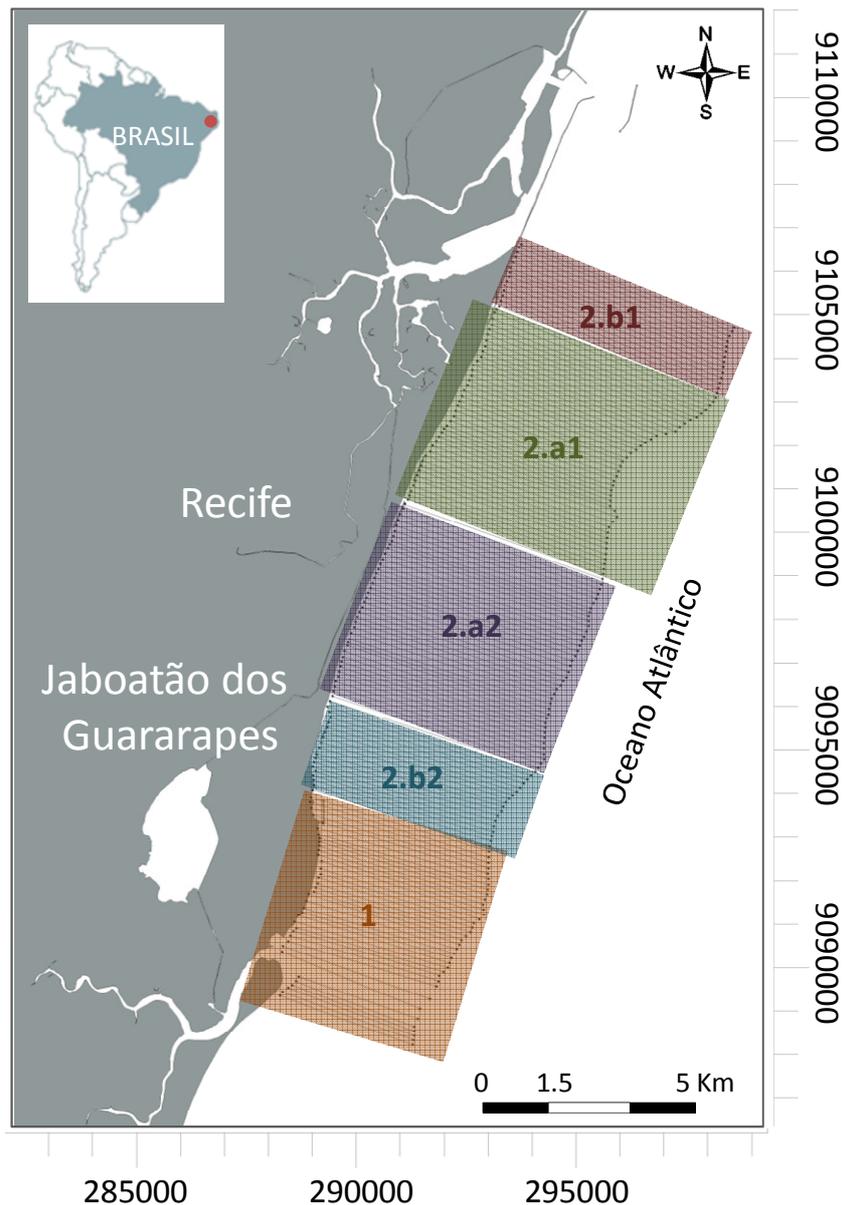


Figura 11. Distribuição espacial dos agrupamentos gerados pela análise de similaridade. Os números dentro das áreas retangulares correspondem à numeração dos grupos de perfis.

O grupo 2a equivale a 44% da área amostrada, enquanto que o grupo 1, equivale a 25%, e os dois compartilham 92% de similaridade entre seus perfis. Suas geometrias típicas são representadas pelos perfis de número 113 e 28, respectivamente (Figura 12).

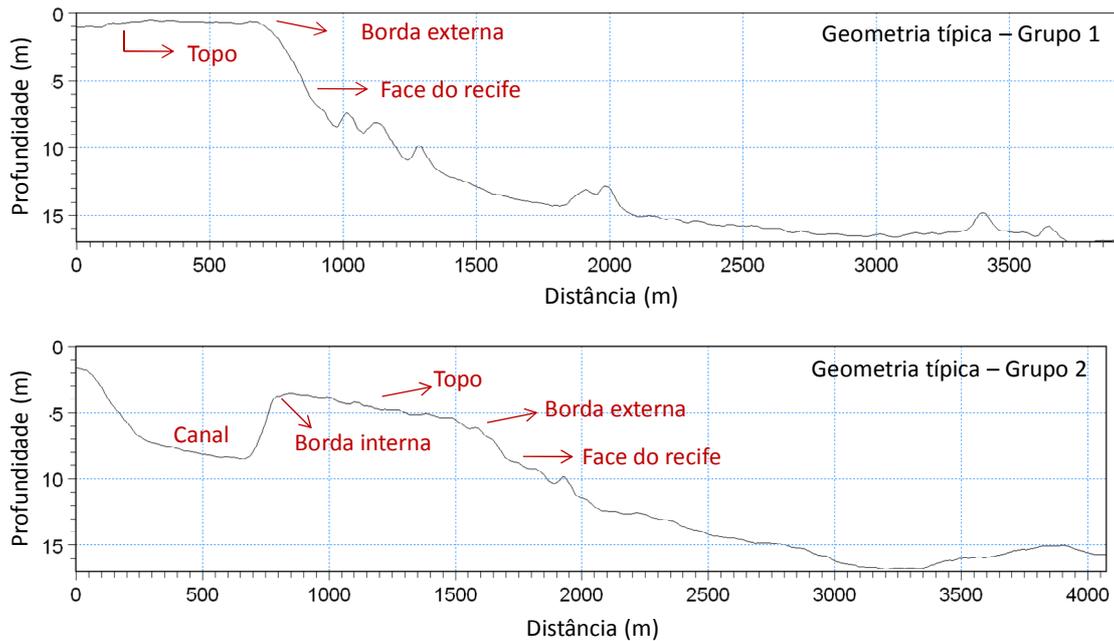


Figura 12. Geometria típica da região representada pelo perfil de número 113 do Grupo 1 e o de número 28 do Grupo 2.

O topo recifal do grupo 1 é, quase horizontal, e raso ($< 1\text{m}$), e a borda externa está a uma profundidade de $0,6\text{ m}$. A face recifal é íngreme, com declive de $1:39$. Como mencionado anteriormente, essa geometria recifal provoca grande dissipação de energia no campo de ondas incidentes, onde é observada no local uma zona de arrebenção sobre a borda da estrutura. Já no perfil típico do grupo 2a, o topo está a uma profundidade média de 4 m e possui uma leve inclinação para *offshore*, com declive de $1:255$. A partir da borda externa, a declividade aumenta para $1:50$, compondo a face do recife. Neste perfil, a borda interna é o ponto mais alto do recife, com $3,5\text{ m}$ de profundidade. Após a borda interna, a profundidade aumenta para $8,5\text{ m}$ na posição do canal.

Como discutido em Gorlay (1996b), os recifes são muito variáveis em sua morfologia, estrutura e ecologia. Essas variações são condicionadas pela interação entre erosão da estrutura e sua capacidade de crescimento. A transmissão da onda, e consequentemente, a energia que atingirá a praia, é em parte controlada por essa morfologia, e dessa forma, vão diferir entre o grupo 1 e o grupo 2a, podendo acarretar em processos de transporte sedimentar distintos entre os dois locais, apesar de estarem submetidos aos mesmos forçantes oceanográficos e meteorológicos.

5. Conclusão

O mapa batimétrico detalhado da plataforma interna adjacente aos municípios do Recife e de Jaboatão dos Guararapes (até a isóbata aproximada de 18 m) revelou as características geométricas, e disposições espaciais dos recifes submersos presente na região.

Foi identificado um total de quatro linhas recifais, sendo todas aproximadamente paralelas entre si e à linha de costa, além de alguns de recifes isolados, o que demonstra a irregularidade da plataforma e as mudanças bruscas nas isolinhas batimétricas. A análise dessas feições, em termos de proporções e complexidade geométricas, permite concluir que o banco recifal submerso (estrutura com 17 km de extensão, largura e profundidade de topo variáveis entre 800 m – 1500 m e 0,5 m – 4 m, respectivamente) é a principal feição capaz de promover alterações na propagação das ondas. Essa feição destaca-se das demais, devido à intensa colonização ocasionada, ao longo do tempo, por organismos recifais capazes de secretarem carbonato de cálcio, cuja principal espécie construtora é a *Mussismilia harttii* (Laborel 1969, 1970).

Essa estrutura apresenta variabilidade geométrica, sendo possível identificar dois grupos representativos para a região: o Grupo 1 que assemelha-se a configuração geométrica de um recife de franja e representa 25 % da área, e o Grupo 2 que assemelha-se a um recife plataforma, representando 75 % da área. A configuração atual do Grupo 1 pode ter sido originada pelo assoreamento do canal entre a linha recifal e a linha de costa, devido a formação de uma zona de sombra induzida pelo desenvolvimento dos organismos recifais. A distinção dessas duas áreas compõe um dado importante nos estudos da transmissão das ondas, tendo em vista que os processos dissipativos podem ocorrer de forma diferenciada em cada grupo.

Ressalta-se, ainda, a importância das informações geradas neste capítulo para os estudos de dinâmica costeira da região, considerando que a localização, distribuição e características geométricas dos recifes submersos são fatores relevantes nos processos de transporte sedimentar ao longo da costa.

CAPÍTULO 2

TRANSMISSÃO DAS ONDAS SOBRE OS RECIFES SUBMERSOS DE RECIFE E JABOATÃO DOS GUARARAPES – PE

1. Introdução

As ondas de gravidade, ao se propagarem sobre uma estrutura recifal, sofrem expressivas modificações que envolvem os processos de refração, difração, empolamento, quebra, dissipação de energia por fricção de fundo, e reflexão (Massel & Brinkman, 2001; Nelson, 1999).

Os recifes apresentam tipicamente uma face inclinada com topos largos, relativamente planos, rugosos e porosos, capazes de atenuar significativamente a energia da onda (Smith, 1993). Observações sobre a altura da onda mostram uma redução de 20 % a 47 % por fricção de fundo na face recifal (Roberts *et al.*, 1975; Gerritsen, 1981) e à medida que a onda se propaga para o topo do recife a redução pode atingir de 50 % e 90 %, por sobretudo indução ao processo de quebra (Lugo-Fernández *et al.*, 1998; Kench & Brander, 2006). Esses estudos demonstram que um dos principais fatores controladores do grau de atenuação da onda é a geometria da estrutura recifal (elevação, declive e largura do topo), a profundidade relativa entre o nível do mar e o topo do recife (Gorlay, 1994; Hardy & Young, 1996; Nelson, 1999), e as próprias características das ondas incidentes (Kobayashi & Wurjanto, 1989).

Em geral, observam-se dois tipos de abordagens metodológicas nos estudos sobre a transformação das ondas em estruturas: as que são realizadas a partir de medições em recifes naturais com uso de equipamentos *in situ* (Lugo-Fernández *et al.*, 1998; Nelson, 1999; Kench & Brander, 2006); e as que usam modelos físicos reduzidos para reprodução das condições equivalentes em laboratório (Goda & Suzuki 1977; Gorlay, 1994, 1996a, 1996b). Nos dois tipos de abordagem, o uso de parâmetros adimensionais tem fornecido uma boa representação de dados experimentais, sendo a atenuação da onda comumente expressa através do coeficiente de transmissão (K_t), ou seja, da proporção direta entre a altura da onda transmitida (H_t) pela altura da onda incidente (H_i).

Em Pernambuco, poucos trabalhos envolvendo medições de ondas foram realizados até hoje. A série mais longa que se tem registro sobre altura da onda foi obtida durante os anos de 1977 a 1978, e 1979 a 1984, próxima ao Porto de Suape, com o objetivo voltado para o planejamento das atividades portuárias. Para o período de 1980 a 1984, a média da altura significativa foi cerca de 1 m com direções entre 105° e

120°, obtidas por observações visuais (CONSUPLAN, 1989 *apud* Neves & Muehe, 1995). Outros trabalhos, com o foco na problemática da erosão costeira foram publicados, envolvendo, em geral, observações visuais na zona de arrebentação (Manso *et al.*, 1995; Borba, 1999) e séries curtas com ondógrafos fundeados próximo a praia (FINEP/MAI, 2009).

Apesar de Pernambuco, assim como diversas regiões tropicais no mundo, apresentar como característica marcante a presença de expressivas estruturas recifais em seu litoral, ainda não existem estudos com medições *in situ* que quantifiquem a transformação das ondas sobre essas estruturas. Bragard (1992, 1995) abordou o tema com uso de modelagem numérica aplicada para a Região Metropolitana do Recife. Bragard (1992) utilizou a formulação de Wiegel (1962) para modelar a altura da onda, considerando a estrutura recifal como uma barreira submersa, estreita e vertical. Posteriormente, Bragard (1995) apresentou novos valores de K_t , fundamentados nos estudos de Kobayashi *et al.* (1987), concluindo que os resultados prévios, obtidos por Bragard (1992) estavam subestimados. Nos dois trabalhos citados acima, foram discutidos os efeitos que uma possível elevação de 1 m no nível médio do mar implicaria na transmissão das ondas sobre os recifes submersos da região.

O presente capítulo pretende contribuir para compreensão das interações entre os recifes submersos e as ondas através de experimentos em campo. Serão utilizadas as informações sobre a geometria do banco recifal submerso presente ao longo da plataforma interna de Recife e Jaboatão dos Guararapes, apresentadas no Capítulo 1, e de dados obtidos por equipamentos fundeados antes e depois do banco recifal submerso. A atenuação da onda é quantificada através do cálculo do coeficiente de transmissão, e com base na análise dos experimentos, uma equação empírica para prever o K_t é proposta.

2. Transmissão de Ondas sobre Estruturas Submersas

2.1. Processos Físicos

Os processos físicos envolvendo as interações entre onda e estruturas submersas são complexos. Essa complexidade deriva de duas fontes distintas: a extrema variabilidade do clima de ondas local; e os numerosos processos físicos associados com a interação entre as características específicas da geometria da estrutura. É essa interação que define o grau de transformação de onda, e com isso, os níveis da transmissão e dissipação de energia (Ferrante, 2007).

A onda começa a interagir com face inclinada do recife quando o comprimento de onda (L) se torna comparável com a profundidade (d). Neste caso, a onda é classificada como de água rasa ($d/L < 1/20$) ou intermediária ($1/20 < d/L < 1/2$). Caso contrário,

quando não há interação com o fundo, a onda é classificada como de água profunda ($d/L > 1/2$). O comprimento da onda, em qualquer situação acima, é dado por:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \operatorname{tgh} \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \quad \text{eq. 1}$$

onde T é o período da onda.

À medida que a onda se move em direção à linha de costa e entra em contato com as partes mais rasas do recife, a mesma aumenta de altura, dissipando parte da energia através da fricção de fundo (Lowe *et al.*, 2005). O aumento de altura em contato com águas rasas, ou seja, o empolamento da onda (*wave shoaling*) pode ser expresso por:

$$H = K_s H_o \quad \text{eq. 2}$$

Onde K_s representa o coeficiente de empolamento e H_o a altura da onda em água profunda. Através da teoria linear da onda (Stokes, 1847), K_s pode ser representado por:

$$K_s = \left[\operatorname{tgh} \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \left(1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right) \right]^{1/2} \quad \text{eq. 3}$$

Eventualmente a altura da onda (H) atinge uma proporção crítica com a profundidade local, se tornando instável e então ocorrendo a quebra da onda. Em um determinado ponto do recife, a altura máxima da onda suportada é controlada pela profundidade local de acordo com:

$$H < \gamma d \quad \text{eq. 4}$$

sendo γ o parâmetro crítico de quebra (Thornton & Guza, 1982). Este região de quebra estende-se por uma distância finita, chamada de zona de arrebatção, e geralmente ocorre na borda externa do recife, onde 95 % da energia pode ser dissipada (Roberts *et al.*, 1977; Roberts & Suhayda, 1983; Lee & Black, 1978; Hardy & Young, 1996). Muitos trabalhos apontam a quebra da onda como o principal processo de dissipação de energia em recifes de coral (Young, 1989; Gourlay, 1994; Massel & Gourlay, 2000). O parâmetro de quebra (γ) por sua vez, vem sendo extensivamente avaliado, tanto em recifes naturais quanto em modelos físicos. Thornton & Guza (1982), observaram a quebra da onda quando $\gamma \sim 0,42$. Raubenheimer *et al.* (1996) demonstraram que γ aumenta com o aumento da declividade de fundo. Nelson (1994), através de experimentos laboratoriais, observou que a quebra da onda sobre fundos planos

ocorre quando $\gamma < 0,55$, enquanto que Hardy & Young (1991) demonstraram que γ é reduzido para 0,4 sobre topos de recifes de coral. A relação obtida por Nelson (1994) é a seguinte:

$$\gamma = \frac{F_c}{22 + 1,82F_c} \quad eq.5$$

onde F_c é um parâmetro para classificar ondas em fundos horizontais proposto por Swart & Loubser (1979):

$$F_c = \frac{g^{1,25} H^{0,5} T^{2,5}}{d^{1,75}} \quad eq.6$$

Para aplicações em recifes de coral, Gorlay (1994) definiu F_c em função das condições ocorrentes na borda do recife, assumindo que as ondas que quebram no recife são as de água profundas. Então:

$$F_{co} = \frac{g^{1,25} H_o^{0,5} T^{2,5}}{h_b^{1,75}} \quad eq.7$$

sendo h_b a profundidade na borda do recife.

Gorlay (1994) observou que para o intervalo $530 < F_{co} < 160$ as ondas arrebatam no recife de forma mergulhante (*plunging waves*), dissipando grande quantidade de energia na borda externa do recife. Com $150 < F_{co} < 100$, as ondas sofrem empolamento (*shoaling*) a medida que passam pela borda do recife e quebram progressivamente no topo recifal (*spilling wave*). Para $100 < F_{co} < 65$, as ondas passam pela borda do recife sem quebrar e suas alturas permanecem quase constantes antes de se tornarem instáveis e quebrar em forma progressiva na parte interna do topo recifal. E para $65 < F_{co} < 25$, as ondas são capazes de passar pelo topo recifal sem quebrar.

Smith & Kraus (1991), através de resultados empíricos, verificaram que o valor de γ em um determinado ponto é função do parâmetro de similaridade do surf (*surf wave similarity*), também chamado de número de Iribarren (Equação 8). Esse parâmetro demonstra que o tipo de quebra da onda está relacionado à sua declividade (Equação 9) e a inclinação do fundo, denotando a importância destas características nos processos de dissipação de energia.

$$I_r = \frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad eq.8$$

$$\xi = \frac{H_i}{gT^2} \quad eq. 9$$

Segundo Smith & Kraus (1991), caso $0,3 \leq I_r \leq 0,85$, a profundidade limite será dada pela relação:

$$\gamma = 0,41 + 0,98I_r \quad eq. 10$$

e para $1,6 \leq I_r \leq 3,5$:

$$\gamma = 1,41 - 0,22I_r \quad eq. 11$$

As mudanças da altura da onda implicam em alteração na energia por unidade superficial de área. De acordo com a Teoria Linear (Stokes, 1847), as componentes de energia cinética e potencial são iguais a energia total, dada por:

$$E = \frac{1}{8}\rho gH^2 \quad eq. 12$$

onde ρ é a densidade da água do mar.

Os trabalhos de transmissão de onda, realizados em recifes de coral, mostram que os mesmos se assemelham a um quebra-mar submerso, no tocante a dissipação da energia da onda (Gorlay, 1994). A maior contribuição nesse tipo de estudo, no entanto, é fornecida pela análise da interação da onda com estruturas submersas reproduzidas em laboratório. Gorlay (1994), a partir do perfil real de diversos recifes, elaborou modelos físicos com geometrias semelhantes a recifes naturais, como mostra a Figura 13.

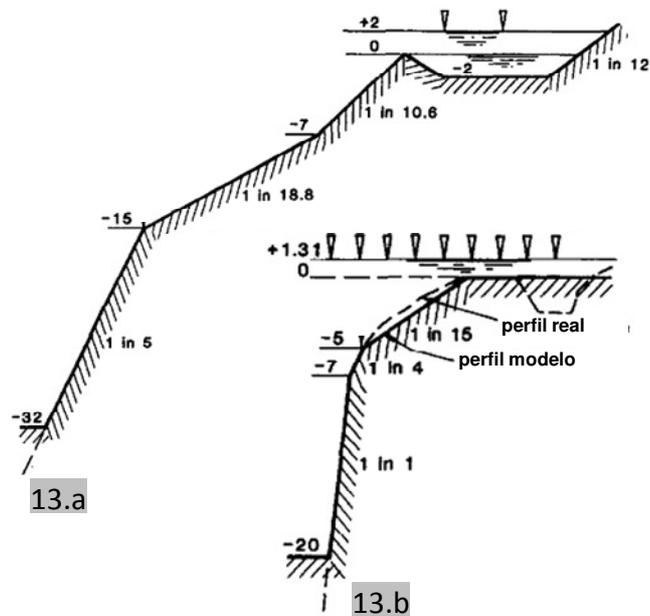


Figura 13. Modelos de perfis para estudo da transformação da onda. Perfil típico de um recife de franja (13.a) e de um recife plataforma (13.b). Os números ao longo dos perfis indicam a profundidade (m). Fonte: Modificado de Gorlay (1996a).

2.2 Coeficiente de Transmissão (K_t)

O coeficiente de transmissão pode variar no intervalo $0 < K_t < 1$, onde o valor 0 implica em ausência de transmissão e o valor 1 em transmissão total. Os fatores que controlam a transmissão da onda sobre uma estrutura incluem largura (B) e elevação do recife (h), profundidade de submersão (F), altura (H_i) e período (T) da onda incidente (Figura 14).

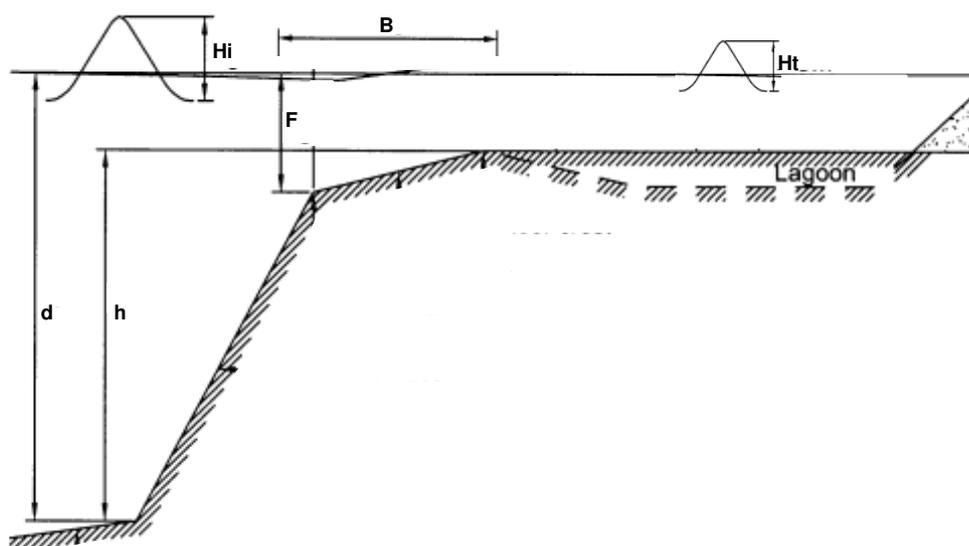


Figura 14. Definição das variáveis que afetam a transmissão da onda sobre uma estrutura recifal.

A análise de similaridade de Armono & Hall (2001) permite exprimir o coeficiente de transmissão (K_t) através da seguinte expressão:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = f[h, T, \rho_w, H_i, H_t, d, B, V_w, \mu, g] \quad eq. 13$$

onde, ρ_w , μ , e V_w é a densidade de massa, viscosidade dinâmica e a velocidade da água próxima a estrutura submersa, respectivamente, enquanto que g é a aceleração da gravidade. Resolvendo a Equação 13 pelo método matricial (Sharp, 1991), os seguintes termos π são produzidos:

$$\frac{H_i}{h}, \frac{H_t}{h}, \frac{d}{h}, \frac{B}{h}, \frac{V_w T}{h}, \frac{\mu T}{h^2 \rho_w}, \frac{g T^2}{h} = \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7 \quad eq. 14$$

Através da composição dos termos π tem-se:

$$\frac{H_i}{g T^2}, \frac{H_t}{H_i}, \frac{h}{d}, \frac{h}{B}, \frac{V_w T}{h}, \frac{V_w h}{\mu / \rho_w}, \frac{V_w^2}{g h} = \frac{\pi_1}{\pi_7}, \frac{\pi_2}{\pi_1}, \pi_3^{-1}, \pi_4^{-1}, \pi_5, \pi_6^5, \frac{\pi_5}{\pi_6}, \frac{\pi_5^2}{\pi_7} \quad eq. 15$$

Os primeiros quatro termos explicam as propriedades da onda incidente e transmitida, disposição e geometria da estrutura, chamados de: esbeltez da onda, transmissão da onda, profundidade relativa e proporções do recife. Os três últimos parâmetros são o número de Keulegan-Carpenter (KC), número de Reynolds e número de Froude, os quais são importantes em análises de similitudes na hidráulica e modelagem da turbulência (Hughes, 1993). Quando os últimos três termos são considerados constantes, a equação 15 pode ser expressa como:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = f \left[\frac{H_i}{g T^2}, \frac{h}{d}, \frac{h}{B} \right] \quad eq. 16$$

Vários estudos experimentais foram desenvolvidos para analisar a influência das variáveis acima na transmissão da onda. Goda & Suzuki (1977) realizaram uma série de experimentos em tanques de ondas, verificando que o K_t está relacionado com a razão entre a profundidade do topo do recife artificial e a altura da onda incidente (H_i) (o que corresponde ao γ citado anteriormente). Estes autores constataram que, quanto maior a largura do topo, menor será o valor de K_t . Eles propuseram a seguinte equação empírica para cálculo do K_t :

$$K_t = 0,5 \left[1 - \text{sen} \frac{\pi}{2\alpha} \left(\beta - \frac{F}{H_i} \right) \right] \quad eq. 17$$

onde α e β são variáveis definidas por: $\alpha = 2$, $\beta = 0,1, 0,3$ ou $0,5$, para alta, média e baixa elevação da estrutura, respectivamente. Seeling (1980) mostrou que a equação proposta por Goda & Suzuki (1977) também era válida para ondas irregulares.

d'Angremond *et al.* (1996) reanalisaram dados coletados de outros experimentos (Seeling, 1980; Allsop, 1983; Daemrich & Kahle, 1985; Powel & Allsop, 1985; van der Meer, 1991; Daemen, 1991) com o objetivo de fornecer uma melhor formulação para a altura da onda transmitida sobre uma estrutura permeável e impermeável,

$$K_t = 0,4 \frac{F}{H_i} + \left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0,31} \cdot a(1 - e^{-0,5I_r}) \quad eq. 18$$

onde $a = 0,64$ e $0,8$ para estrutura permeável e impermeável, respectivamente, com valores limites de $0,075 < K_t < 0,8$ para estas duas condições. I_r é o número de Iribarren fornecido pela Equação 8.

Gironella & Sanchez-Arcilla (2000), através da análise de experimentos em tanques de ondas, elaboraram um modelo para previsão do K_t baseado na proporção entre F/L e o número de Iribarren. Os autores aplicaram um teste de regressão múltipla e encontraram:

$$K_t = C_1 \left(I_r \frac{F}{L}\right) + C_2 \frac{F}{L} + C_3 \quad eq. 19$$

onde os coeficientes empíricos de C_1 , C_2 e C_3 foram determinados como 6,43, 14,63 e 0,52, respectivamente. Estes coeficientes forneceram um nível de determinação de $R^2 = 0,98$ para a série de experimentos realizados, que se situaram nos limites dados por:

$$3,2 \leq I_r \leq 5,5; \quad 0 \leq \frac{F}{L} \leq 0,04; \quad 0,015 \leq \frac{H_i}{L} \leq 0,04$$

Armono & Hall (2001) utilizaram modelos de recifes artificiais produzidos com estruturas porosas, conhecidas como *Reef Balls*, para testar a influência da esbeltez da onda, proporção do recife e profundidade de submersão sobre a transmissão da onda. Eles propuseram a seguinte equação empírica para prever o K_t :

$$K_t = 1,616 - 31,322 \frac{H_i}{gT^2} - 1,099 \frac{h}{d} + 0,265 \frac{h}{B} \quad eq. 20$$

Os teste de validação para os experimentos indicaram um erro padrão da estimativa de 0,0065, onde 84,1% da variabilidade do K_t pôde ser explicada pelas variáveis consideradas na Equação 20.

Tsukayama & Nazaka (2000) utilizaram nove medidores de onda ao longo de um recife de coral, para testar a equação empírica proposta anteriormente por Takayama (1977):

$$K_t = B. \exp \left[-A \frac{x}{H_i} \right] + \alpha \frac{(F \pm \eta)}{H_i} \quad eq. 21$$

onde x é a distância horizontal da borda do recife, η o empilhamento (*wave set-up*) no ponto x , e A , B e α são coeficientes. Os dados obtidos em campo mostraram boa concordância com a Equação 21, entretanto os autores sugeriram novos coeficientes para A e B .

O fenômeno da transmissão da onda sobre uma estrutura também foi abordado através de métodos numéricos. Wiegel (1964), através de um estudo analítico, desenvolveu a Equação 22, considerando o balanço de energia e admitindo que a lâmina d'água seja finita. Neste caso a largura da estrutura é desprezível.

$$K_t = \left[\frac{\frac{4\pi(F+d)/L}{\sinh 4\pi d/L} + \frac{\sinh 4\pi(F+d)/L}{\sinh 4\pi d/L}}{1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh 4\pi d/L}} \right]^{0,5} \quad eq. 22$$

Kobayashi & Wurjanto (1988) desenvolveram um modelo numérico para prever a reflexão e transmissão da onda sobre estruturas submersas impermeáveis para o caso de ondas monocromáticas. Garcia *et al.* (2004) utilizou o modelo numérico COBRAS (*Cornell BReaking waves And Structures*) (Lin & Liu, 1998), para calcular, através das equações de Navier-Stokes, a elevação e circulação na superfície da água induzidas por ondas regulares em presença de uma estrutura permeável. Johnson (2006) utilizou o MIKE 21 PMS (desenvolvido pela DHI *water & environment*) para modelar a evolução do campo de onda através de quebra-mares submersos, com base na aproximação parabólica da equação de declive suave (*parabolic mild-slope*).

3. Métodos

3.1. Fundeio dos Equipamentos

Os dados de ondas *in situ* foram obtidos através do fundeio de ondógrafo/marégrafos InterOcean S4ADWi, com frequência de amostragem de 2 Hz, operando em modo intermitente com duração de 30 minutos em ciclos de 1 hora. As oscilações na superfície do mar, mensuradas através do sensor de pressão de alta-resolução (4 mm) do equipamento, foram convertidas em informações sobre os parâmetros da onda (H , T) e nível médio do mar, através do método da Transformada de Fourier (FFT). Foram

consideradas ondas de gravidade com espectro limitado por 0,333 Hz e 0,0333 Hz (3 s - 30 s). Por se tratarem de ondas irregulares, foi utilizado sistematicamente a altura significativa da onda (H_s) para representar a altura da onda em cada ciclo de medição, ou seja:

$$H_s = \frac{1}{\frac{1}{3}N} \sum_{m=1}^{\frac{1}{3}N} H_m \quad eq.23$$

onde H_m é altura das onda individuais decrescentemente ordenadas, de forma que a maior onda tem $m = 1$ e a menor $m = N$. Os dados de maré obtidos *in situ* foram utilizados para a análise entre a variação do nível d'água na transmissão da onda.

No sentido de verificar a transformação da onda ao passar pelo recife, dois instrumentos foram instalados, simultaneamente, ao longo de um perfil recifal, fundeados antes e após o topo do recife (a 1 m do fundo) (Figura 15). A escolha do perfil foi baseada na análise da geometria típica da plataforma interna, conforme apresentado no Capítulo 1. O resultado dessa análise indicou dois grupamentos distintos ao longo da área de estudo, onde o Grupo 1 apresenta geometria semelhante a um recife de franja, e o Grupo 2 de plataforma (Figura 16). Foram então realizados dois experimentos: um ao longo do perfil representativo do Grupo 2, localizado na praia de Boa Viagem (Exp. 1), e o outro ao longo do perfil representativo do Grupo 1, localizado na praia de Candeias (Exp. 2). A execução dos experimentos foi financiada pelo Projeto PROCosta – MCT.

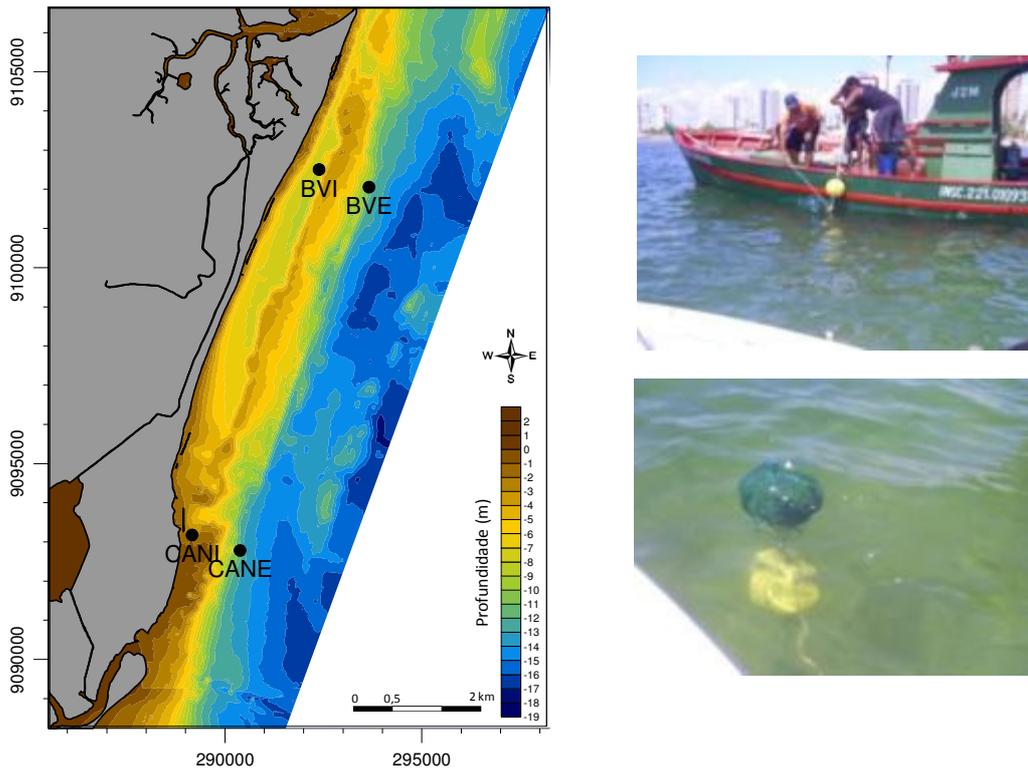


Figura 15. Localização do fundeio dos S4 na área de estudo e fotografias dos equipamentos. BVI – BVE: Praia de Boa Viagem (Exp. 1); CANI – CANE: Praia de Candeias (Exp. 2). Fonte das fotografias: Autora, 2009.

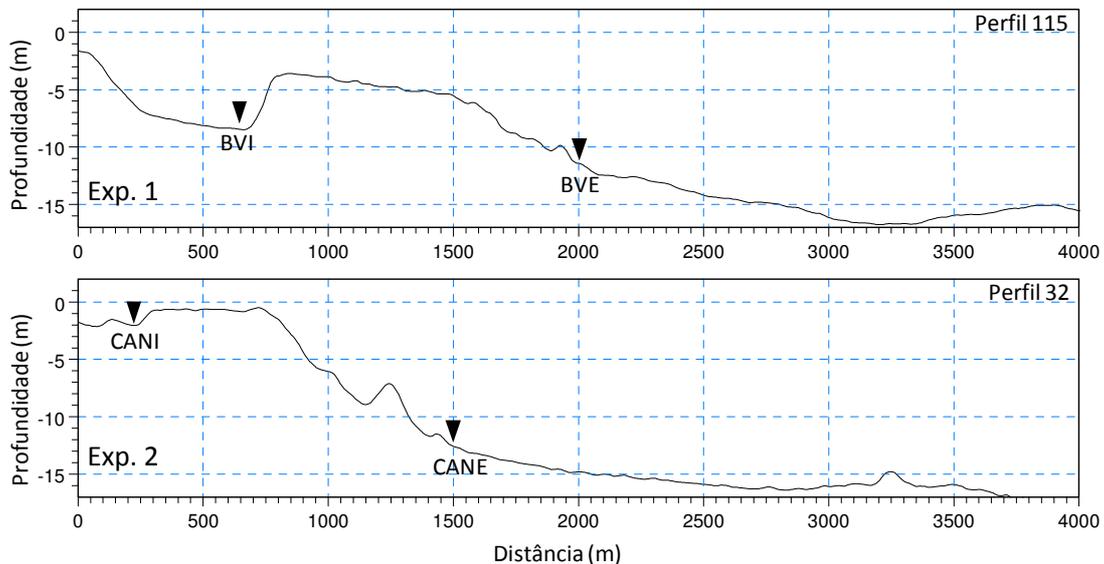


Figura 16. Localização de fundeio dos S4s ao longo dos perfis recifais representativos da geométrica típica da área de estudo.

No local do Exp. 1, o equipamento da estação BVI foi fundeado a uma distância de 100 m da borda interna do recife, na zona do canal, a uma profundidade de 7 m em relação ao nível médio das marés baixas de sizígia – MSLW, enquanto que o da estação BVE ficou afastado 900 m da borda externa, no limite da face recifal, a uma profundidade de 11 m (Figura 16). O recife neste local apresenta um topo levemente inclinado para *offshore*, com declive de 1:255 e largura total de 800 m. A borda interna é mais elevada que a externa, com 3,5 m de profundidade. Da face do recife em direção à *offshore*, os sedimentos possuem granulometria de areia grossa e cascalho (FINEP/MAI, 2009), formados principalmente por fragmentos de corais e algas calcárias verdes (Halimeda) (Carannante *et al.*, 1988). Após a borda interna, na posição do canal, os sedimentos são de granulometria fina, compostos principalmente por lama e areia fina (Gregório, 2009).

O perfil escolhido para o Exp. 2 possui o topo recifal quase plano, com profundidade acima de 1 m. A parte mais elevada corresponde a borda externa (0,5 m), onde existe uma linha de arrebatção de ondas. O equipamento da estação CANI ficou situado a 475 m da borda externa, na zona da rasa do complexo recifal, a 0,9 m de profundidade, enquanto o da estação CANE ficou a 750 m da borda externa em profundidade de 11 m (Figura 16). A fração areia grossa, formada principalmente por material biogênico, é predominante nos sedimentos superficiais da face recifal. Adiante, a poucos metros do local da estação CANE, o fundo é composto por lama (FINEP/MAI, 2009).

3.2. Condições de Vento, Onda e Maré durante os Experimentos

Os experimentos foram programados a partir de dados de previsão de ondas, marés e medição de ventos locais, tendo sido conduzidos entre o mês de julho e setembro de 2009. Estes meses correspondem aos períodos em que há entrada de *swells* associados a eventos de ciclones extratropicais do hemisfério sul (Innocentini *et al.*, 2005). Durante o Exp. 1, realizado entre os dias 29/07/09 e 11/08/09, o valor de H_s das ondas de águas profundas prevista pelo modelo numérico WaveWatch III (NWW3) variou entre 1,8 m e 3 m, com T_s entre 7 s e 15,9 s, provenientes principalmente da direção SE. A velocidade média dos ventos para o período, calculada a partir dos dados da PCD de Olinda (INPE, 2009) é de 6,4 m/s, com alguns picos de 13 m/s, e direção predominante de S-SE. O fundeio foi programado para abranger um ciclo de maré de sizígia e de quadratura, com amplitudes máximas de 1,7 m e de 0,9 m, correspondente aos dois ciclos, respectivamente.

Durante o Exp. 2, realizado na praia de Candeias, o equipamento apresentou alguns problemas técnicos, só tendo sido possível obter registros entre os dias 18/09/09 e 21/09/09. Esse período correspondeu a maré de sizígia, com amplitudes máximas no

intervalo 2,5 e 2,0 m. Os ventos apresentaram velocidade média de 4,8 m/s e direção predominante de S-SE (INPE, 2009). As previsões das alturas significativas das ondas de águas profundas variaram, para este período, entre 1,3 m e 1,8 m, com T_s entre 6,9 s e 8,4 s, e direção predominante de ESE.

4. Resultados e Discussões

As séries temporais obtidas pelos ondógrafos/marégrafos, em ambos os experimentos, estão apresentadas na Figura 17. Durante o Exp. 1, a altura da onda registrada pela estação BVE variou entre 2,1 m e 0,82 m, sendo menores e mais constantes nos dois primeiros dias, com valores de H_s em torno de 1 m. No restante do período houve um aumento seguido de oscilações, onde 22% das ondas apresentaram H_s acima de 1,5 m. No Exp. 2 as condições de mar estavam mais calmas, com ondas de cerca de 0,3 m de H_s para a estação externa (CANE).

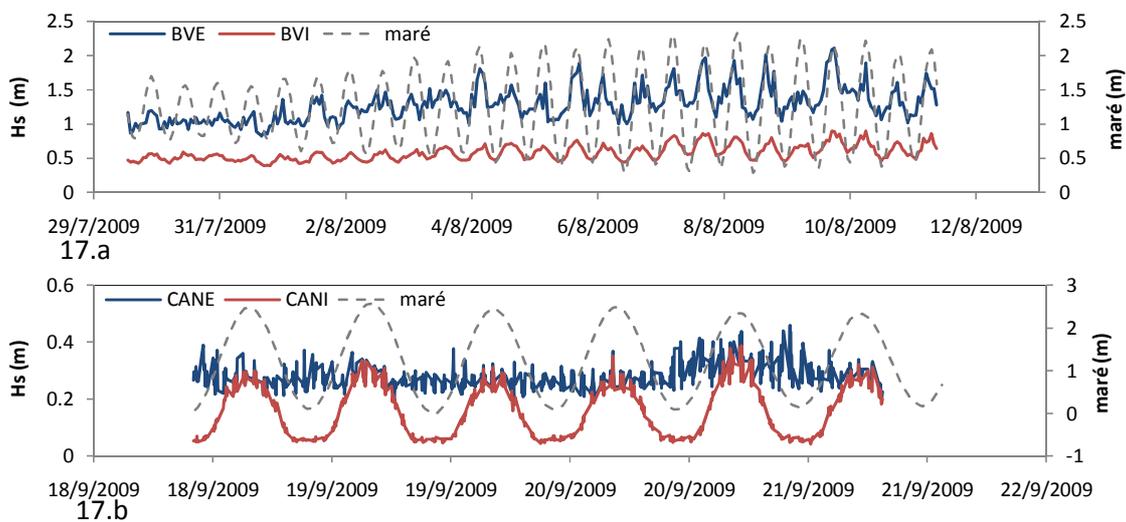


Figura 17. Séries temporais de altura da onda e maré durante os Experimentos 1 (17.a) e 2 (17.b) para as estações internas e externas ao recife.

A tendência da evolução de H_s registrada pelos ondógrafos está de acordo com os dados de previsão para águas profundas extraída do modelo NWW3 (Figura 18), onde a curva de H_s também mostra uma subida a partir do dia segundo dia de medição, oscilando em torno de 2 m e 3 m no restante do período do Exp. 1. O valor de H_s no local do fundeio de ondógrafo (BVE) é, em média, 1,21 m menor que a H_s de água profunda, sendo essa diferença associada aos processos de dissipação de energia durante sua propagação em direção a águas intermediárias e rasas. Na estação CANE, o valor de H_s manteve-se, em média, 1,24 m abaixo dos dados do modelo NWW3 para águas profundas. Em ambas as estações acima, posicionadas na isóbata aproximada de 12 m, a altura significativa da onda é cerca de 80 % menor do que a altura

correspondente da onda prevista pelo NWW3. O relevo irregular da plataforma interna (ver Capítulo 1), com presença de linhas recifais em isobátas de até 18 m de profundidade, contribui para o aumento da dissipação de energia da fricção de fundo.

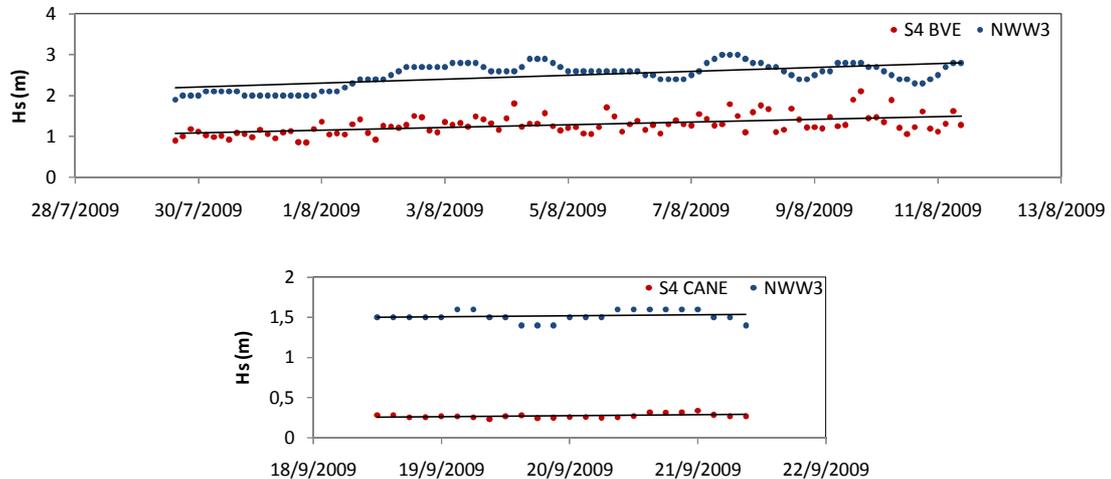


Figura 18. Dados de H_s medidos pelos ondógrafos da estação externa ao recife (BVE e CANE) e prevista pelo modelo NWW3 para águas profundas. As linhas de tendência estão indicadas pelas linhas pretas no gráfico.

Nas estações protegidas pelo banco recifal submerso (BVI e CANI) a altura significativa da onda não é apenas menor que as registradas pelos ondógrafos externos (BVE e CANE), mas variações numa escala de tempo de 6 h com ciclos bem definidos de 12 h são evidenciados. A magnitude desse período sugere uma modulação da onda provocada pela maré, com máximos e mínimos valores ocorrendo nos estágios de maré alta e baixa, respectivamente. A análise desta relação, bem como dos aspectos associados à geometria do recife e às características da onda incidente serão abordadas adiante, quando do cálculo do coeficiente de transmissão da onda.

4.1. Coeficiente de Transmissão da Onda

As variações temporais dos coeficientes de transmissão da onda (K_t) para os Exps. 1 e 2 estão representadas na Figura 19. No Exp. 1, o K_t variou entre 0,33 e 0,59, com valor médio de 0,45. O Exp. 2 apresentou valores mais amplos, com K_t entre 0,99 e 0,10 e média de 0,57. Os valores calculados indicam que no Exp. 1 a atenuação da onda provocada pelo recife foi mais constante, ou seja, apesar das variações entre as alturas das ondas incidentes e a maré durante o tempo de medição, a atenuação da onda se limitou entre 35 % a 60 %. No Exp. 2, observam-se períodos com baixo coeficiente de transmissão ($K_t = 0,10$), onde a atenuação da onda chega a atingir 90 %, ou ainda altos

valores ($K_t = 0,99$), onde a passagem da onda pelo recife sofre muito pouca atenuação (1 %). Estudos em estruturas submersas mostram que o K_t tende a aumentar à medida que a profundidade da coluna d'água sobre o topo da estrutura aumenta (Gorlay, 1994). Portanto, se a amplitude da maré é alta, como no caso do Exp. 2, é esperado que a transmissão da onda seja maximizada durante as marés altas e minimizada durante as marés baixas.

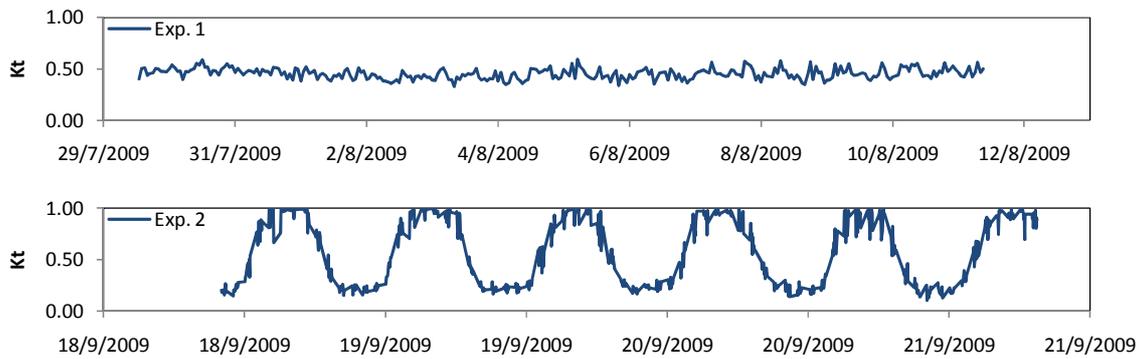


Figura 19. Variação do K_t durante os Experimentos 1 e 2.

A influência da geometria do recife interfere na transmissão da onda à medida que sua elevação (h) diminui a profundidade da coluna d'água sobre o topo, ou, profundidade de submersão (F). Por outro lado, quanto mais largo o topo do recife (B) maior será a dissipação de energia através da fricção de fundo (Kench & Brander, 2006). A relação entre F/B , portanto, resulta em um número adimensional que representa o grau de influência que a geometria de um recife pode provocar na onda.

Os recifes em análise obtiveram valores de F/B de 0,0045 e 0,0011 (em relação ao MLSW) (Exp. 1 e 2, respectivamente), concluindo-se daí que a geometria típica do grupo 1, referente ao perfis localizados na praia de Candeias (Exp. 2), possui maior capacidade em atenuar a onda incidente do que a geometria típica do grupo 2 (perfis de Boa Viagem – Exp. 1). Além do mais, os perfis de Candeias, por se assemelharem a configuração de um recife de franja, a onda, após sua passagem pela parte mais alta do recife (borda externa), continua dissipando energia induzida pelo fundo até atingir a praia, enquanto que em Boa Viagem (Exp. 1), após a passagem pelo topo recifal, a onda entra em uma zona mais profunda (canal) e os processos de dissipação por interação com o fundo só voltam a predominar próximos à praia.

Baseado na relação entre F/B , Kench & Brander (2006) criaram o índice da janela de energia do recife (*reef energy window index* – ψ), calculado a partir da profundidade de submersão do topo recifal durante marés altas, e a largura do recife. Eles demonstraram que recifes com baixos valores de índices de janela são mais aptos em dissipar a energia da onda, enquanto as estruturas com altos índices permitem a

propagação de ondas de gravidade (0,05 – 0,33 Hz) através do recife por um maior intervalo de tempo. De acordo com esta abordagem, foi calculado o índice da janela de energia do recife para os Exps. 1 e 2, considerando-se a média das marés altas de sizígia da região – MHSW. Os valores encontrados foram $\psi = 0,0066$ e $\psi = 0,0051$, respectivamente. Quando comparados ao estudo de caso australiano, apresentado por Kench & Brander (2006), verifica-se que os exemplos deste estudo se enquadram no grupo dos maiores valores. Isto significa que, durante as MHSW grande parte das ondas de gravidade pode atingir a parte protegida dos recifes de Candeias e Boa Viagem sem aumentar sua frequência, apesar de Candeias apresentar relativamente maior capacidade de alteração do que Boa Viagem. De fato, os valores de K_t encontrado durante os Exps. 1 e 2, indicam menor modificação durante esse estágio de maré para ambos experimentos, refletindo assim, a influência das características geométricas dos recifes.

4.2. Modulação da onda pela maré

A variação da maré foi expressa em termos de profundidade relativa (h/d), referente a profundidade total (d) e a elevação do recife (h). A vantagem do uso dessa relação para representar as oscilações no nível do mar em estudos de transmissão de ondas é devida à possibilidade de comparação de seus valores com outros trabalhos, ou mesmo com modelos físicos elaborados em tanques de ondas. Além do mais, ao se incorporar a elevação do recife, fica intrínseca a consideração da profundidade de submersão (F), ou seja:

$$\frac{h}{d} = \frac{d - F}{d} = 1 - \frac{F}{d} \quad eq. 24$$

No Exp. 1, h/d variou entre 0,639 e 0,759 com média de 0,699, enquanto que no Exp. 2 a amplitude de variação foi maior, com valores entre 0,797 e 0,990 e média de 0,887. Nos experimentos foi observada forte correlação (cc) entre h/d e a altura da onda transmitida (Exp. 1 $cc = 0,71$ e Exp. 2 $cc = 0,95$), o que indica que a diminuição da profundidade da água sobre o recife submerso está associada com o aumento da atenuação da onda (Figura 20).

No Exp. 1, durante os estágios de maré baixa, os valores de H_t tiveram média de 0,50 m, enquanto que durante as marés altas a média foi de 0,72 m. No Exp. 2, a modulação da onda pela maré é ainda mais evidente. Durante os estágio de maré alta, com a altura atingindo 2,5 m, e conseqüentemente a superfície livre atingido aproximadamente 3 m, o valor de K_t aproxima-se de 1, ou seja, o valor H_t é mais elevado devida a pouca atenuação da onda. O valor médio de H_t nesse estágio foi de 0,27 m. À medida que o nível do mar se aproxima da elevação do recife ($h/d \sim 1$),

verifica-se uma diminuição no K_t , com conseqüente diminuição de H_t . Com uma superfície livre de alguns centímetros a profundidade limite (Equação 4) é facilmente atingida e os processos de dissipação induzida pela quebra da onda são predominantes. O valor médio de H_t nesse estágio foi de 0,07 m.

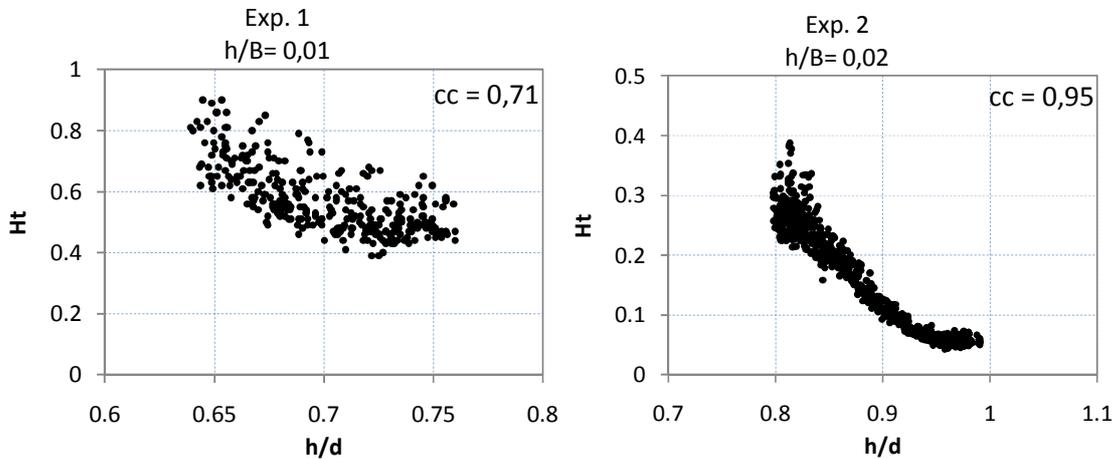


Figura 20. Relação entre a onda transmitida (H_t) e a profundidade relativa (h/d).

A modulação da onda pela provoca implicações na costa, pois, em períodos de maré alta, o potencial de remobilização dos sedimentos ao longo do topo recifal e na praia adjacente é maior, enquanto que nos estágios de maré baixa o sedimento transportado pela deriva litorânea tende a se acumular na zona de sombra. Storlazzi *et al.* (2004) observaram que a concentração dos sedimentos em suspensão em um ambiente recifal é maior durante as marés altas devido a passagem de onda mais energéticas para a parte protegida do recife. Este processo afeta também as correntes e com isso a renovação de água nos recifes (Gorlay & Colleter, 2005). Segundo Roberts (1980), quando a onda quebra, ela cria picos de correntes em direção à parte protegida do recife, sendo mais intensas durante as marés baixas quando a profundidade relativa é menor. Nestes casos, a velocidade da corrente pode atingir valores de até 180 cm/s, sendo capazes de remobilizar sedimentos grossos no topo do recife (Roberts & Suhayda, 1983).

As características da onda incidente, expressas em termos de esbeltez da onda (ξ) constituem uma variável importante no estudo da transmissão das ondas em estruturas submersas (Armono & Hall, 2001). Para analisar a influência dessa variável no K_t , a profundidade relativa (h/d) nos dois experimentos foi dividida em classe que representam os estágios de maré alta, baixa e intermediária (enchente ou vazante), sendo os valores (ξ , K_t) plotados para cada uma destas classes (Figura 21). Durante o Exp. 1 foram registradas ondas com valores de ξ entre 0,002 e 0,015 incidindo sobre o banco recifal submerso. No Exp. 2 houve pouca variação de ξ com valores entre 0,001 e 0,004.

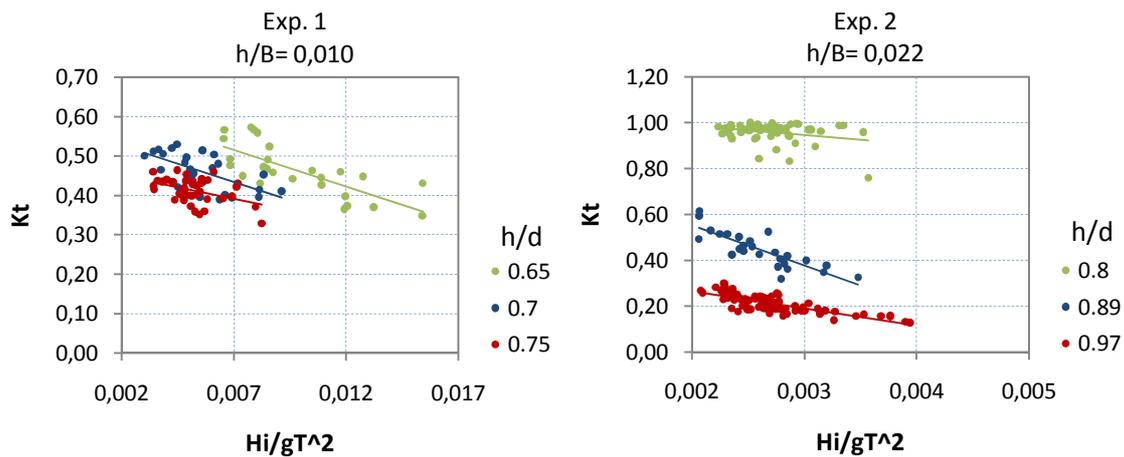


Figura 21. Relação entre o coeficiente de transmissão (K_t) e a esbelteza da onda ($\xi = H_i/gT^2$) para diferentes valores de profundidade relativa (h/d) referente aos estágios de maré alta, baixa e intermediária (enchente ou vazante).

A análise do gráfico demonstra uma relação inversamente proporcional entre ξ e K_t . Quando a profundidade relativa (h/d) é mantida constante, o aumento de ξ provoca uma redução no K_t , sendo essa redução tanto mais intensa quanto maior a for profundidade relativa (h/d). Isto significa que uma onda com maiores valores de esbelteza tende a dissipar maior energia durante sua propagação pelos recifes em questão (Exp. 1 e 2), e que a magnitude dessa dissipação é maior durante as marés baixas, onde a coluna d'água sobre o topo do recife é menor. Estas observações estão de acordo com experimentos realizados em situações controladas de quebra-mares submersos em tanques de ondas (Armono & Hall, 2001).

No Exp. 1, parte das ondas com valores elevados de ξ que se propagaram durante períodos de maior profundidade da coluna d'água sobre o topo recifal (classe $h/d=0,65$) obteve valor semelhante de K_t quando comparadas à dinâmica verificada para ondas de menor ξ em situações de menor profundidade ($h/d=0,75$), exaltando a importância desse parâmetro como condicionante do K_t . No Exp. 2 houve uma clara separação entre os valores de K_t para os diferentes níveis de água como contribuição da alta elevação do recife. Durante as classes representativas de maré baixa e intermediária ($h/d = 0,97$ e $0,89$, respectivamente), um pequeno aumento na ξ induziu uma diminuição K_t , com atenuação da onda chegando a 87%. Contudo, durante os períodos de maré alta ($h/d= 0,8$), a onda incidente não foi capaz de interagir com a superfície do recife devido aos baixos valores de ξ (associados a baixos valores de H_i). Dessa forma, a maior parte das ondas propagadas através do recife tiveram baixa atenuação (em torno de 10%).

4.3. Modelo Empírico do Coeficiente de Transmissão

Os resultados obtidos nos tópicos anteriores comprovam a relação de dependência do coeficiente de transmissão (K_t) com relação à geometria do recife (h/B), às marés (h/d)

e às características das ondas incidentes (ξ) propagadas sobre o banco recifal submerso. Essas três variáveis independentes, obtidas a partir das medições realizadas nos Exp. 1 e 2, foram utilizadas como dados de entrada em um teste de regressão múltipla com o propósito de desenvolver uma equação empírica capaz de expressar numericamente o K_t e dessa forma, de estimar a atenuação da onda transmitida sobre o recife em questão.

Somente 95% dos dados medidos de cada experimento foram usados na análise. Os 5% restantes do conjunto de dados do Exp. 1 e do Exp. 2 foram removidos aleatoriamente para fins de validação. O coeficiente de determinação (R^2) encontrado com a análise conjunta das variáveis foi 0.901 ($p < 0.0001$), ou seja, 90,1% da variabilidade do K_t podem ser explicadas pela geometria do recife, oscilação da maré e esbeltez da onda. O quadrado médio dos erros obteve valor de 0,0072 para intervalo de confiança de 95% e o coeficiente de correlação múltipla foi igual a 0,949. Portanto, a equação encontrada (Equação 25) fornece uma boa representação do coeficiente de transmissão da através da estrutura recifal presente na área de estudo.

$$K_t = 3,279 - 45,593 \frac{H_i}{gT^2} - 4,645 \frac{h}{d} + 70,179 \frac{h}{B} \quad \text{eq. 25}$$

Para validar a equação proposta, os dados previamente retirados do Exp. 1 e Exp. 2 foram comparados com os valores de K_t calculados pela Equação 25 (Figura 22). O erro médio (bias) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) foram 0,001 e 0,091, respectivamente. O coeficiente de correlação indica forte relação entre os dados estimados e observados ($cc = 0,941$). A análise da frequência do erro demonstra que os valores tendem a se distribuir igualmente entre a classe positiva e negativa. Contudo, isolando-se os experimentos, observa-se que no Exp. 2, a equação tende a retornar um valor de K_t um pouco mais elevado do que o observado, com 67% da diferença entre K_t estimado e observado sendo positiva.

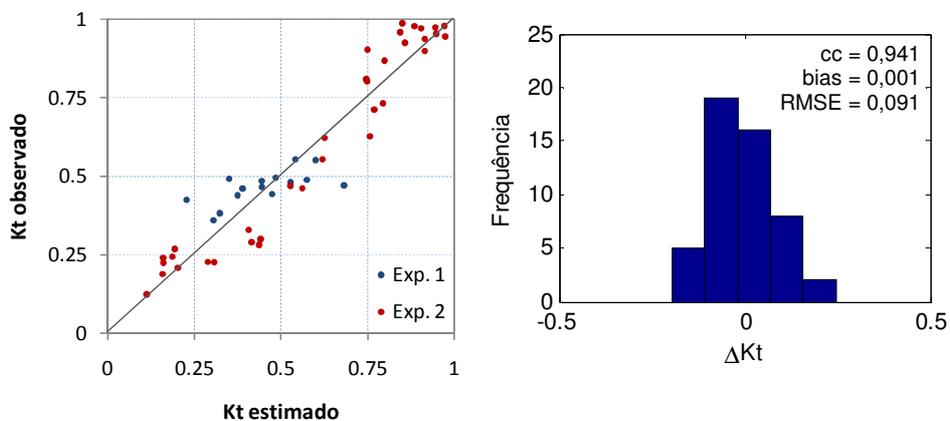


Figura 22. Comparação entre o K_t observado durante os experimentos e o estimado pela equação empírica proposta (Equação 25).

5. Conclusões

A transmissão da onda sobre o banco recifal submerso presente ao longo do litoral de Recife e Jaboatão dos Guararapes foi mensurada a partir da obtenção de séries temporais das características das ondas antes e depois da estrutura, em dois locais representativos, durante o período mais energético do ano (meses de julho, agosto e setembro). A escolha do local do fundeio dos equipamentos foi fundamentada na análise da geometria típica realizada no Capítulo 1, sendo denominado de Exp. 1 um recife do tipo plataforma e o Exp. 2 um recife semelhante ao de franja. A comparação da série temporal dos valores de H_s antes do recife (BVE e CANE) indica uma redução de cerca de 80% em relação aos valores de H_s da onda de água profunda, prevista pelo modelo NWW3, sendo essa redução relacionada a dissipação de energia durante sua propagação pela plataforma continental.

Os resultados mostram que a geometria do recife e as variações no nível controlam a magnitude da atenuação da onda, implicando na variabilidade dos coeficientes de transmissão encontradas nos dois experimentos. A atenuação da onda foi maior durante os estágios de maré baixa e menor durante as marés alta, indicando uma modulação da onda pela maré. A esbeltez constitui um parâmetro importante, pois indica quais as características da onda incidente mais propícias a serem transformada pelo recife. Em Candeias (Exp. 2), a baixa profundidade relativa entre a elevação do recife e do nível do mar, contribui para a que a principal forma de dissipação ocorra pela quebra da onda. O recife atua, portanto, como um filtro de passa-baixa, atenuando a transmissão das ondas cuja altura excede a proporção da profundidade limite (Equação 4), sendo esta última função também do estágio de maré. Durante esse experimento foram observada distintos valores de K_t relacionados ao estágio de maré, com 90% de atenuação durante os estágios de maré baixa e apenas 1% nas marés altas.

Em Boa Viagem (Exp. 1), mesmo durante as marés baixa de sizígia, ainda existe uma superfície livre de 5,5 m. Nesses casos, os processos de dissipação por quebra de onda não são predominantes, tendo em vista que a profundidade limite não é facilmente atingida. No entanto a atenuação da onda está principalmente associada à fricção de fundo e a redução dos movimentos orbitais devido à porosidade característica da estrutura recifal. Apesar de não haverem ainda estudos que quantifiquem a o grau de porosidade dos recifes em Pernambuco, eles possuem a característica típica de formarem sistemas de cavernas interconectadas, conforme descrito por Maida & Ferreira (1997), devendo então apresentar alta porosidade.

A geometria do recife (h/B), variação na maré (h/d) e esbeltez das ondas (ξ) mostraram-se boas preditoras do coeficiente de transmissão para a área de estudo e estão de acordo com diversos trabalhos publicados sobre transmissão da onda em modelos físicos de estruturas submersas realizadas em situações controladas de

tanque de ondas, assim como em experimentos realizados em recifes de coral em outras regiões tropicais do mundo. A análise conjunta dessas variáveis permitiu o desenvolvimento de uma equação empírica para prever o K_t ao longo da estrutura, mostrando boa concordância com os dados observados.

Os resultados da atenuação das alturas de onda e do coeficiente de transmissão, sugerem que o banco recifal submersos atua como um quebra-mar submerso dissipando grande parte da energia das ondas, e que os processos de dinâmica costeira em ambientes recifais são influenciados por esta interação, modulada ainda pelo estágio da maré.

CAPÍTULO 3

APLICAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA NA ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE AS ONDAS E OS RECIFES SUBMERSOS DE RECIFE E JABOATÃO DOS GUARARAPES – PE

1. Introdução

No Capítulo 2, a influência da estrutura recifal submersa (presente ao longo da plataforma interna de Recife e Jaboatão dos Guararapes) nas ondas foi analisada e quantificada a partir de dados obtidos com o fundeio de ondógrafos/marégrafos. Os resultados indicam que existe uma modulação da onda pela maré, onde até 60 % -90 % da energia pode ser dissipada durante as marés baixas. O grau de atenuação da altura da onda está relacionado também à geometria do recife e às características da onda incidente. Os resultados demonstram a forte influência que a presença dos recifes pode provocar no campo de ondas, sendo sensível também as variações das oscilações no nível do mar. A análise da influência da onda através da implementação de um modelo numérico na área de estudo, apresenta a vantagem de permitir a elaboração de cenários hipotéticos, diferentes do atual, que evidenciem os efeitos diretos dos recifes na distribuição e dissipação de energia das ondas. Além do mais, é possível obter uma visão sinótica dos processos de refração, difração e mudanças no espectro, ocorrente em cada cenário.

Os modelos de onda de terceira geração têm sido extensivamente usados para prever o crescimento, decaimento e transformação de ondas geradas por vento e *swell* em oceano profundo e plataformas continentais. Recentemente, esses modelos foram adaptados para aplicação em zonas costeiras (Sorensen *et al.*, 2004). Nestas regiões ocorrem diversos fenômenos físicos (como refração, difração, dissipação de energia devido a quebra da onda e fricção de fundo), que devem ser considerado pelos modelos de propagação em águas rasas.

Em ambientes recifais, os processos físicos tornam-se ainda mais complexos, pois o gradiente batimétrico sofre bruscas alterações e os processos passam a ocorrer em uma ampla variação de escalas, desde poucos metros a vários quilômetros (Monismith, 2007; Wolanski *et al.*, 2003). Nessas regiões, é recomendado o uso de modelos que, além de considerar os fenômenos acima citados, trabalhem com malhas adaptativas flexíveis, onde é possível aninhar uma malha de alta-resolução a uma malha grossa para lidar com as diferentes escalas dos processos (Legrand *et al.*, 2006).

A evolução nos modelos numéricos de águas rasas, com a inclusão de termos fontes específicos, malhas flexíveis e métodos numéricos eficientes, tornaram seu uso cada vez mais frequente na análise da interação entre ondas e recifes. A aplicação do modelo MIKE 21 NSW na região de Caravelas – BA (Brasil) mostrou que os recifes provocam uma alteração na direção de propagação da onda, resultando em áreas de concentração e/ou dispersão de energia de ondas ao longo da costa. A interação dessa distribuição irregular da energia de onda e o ângulo de incidência das ondas, em relação à linha de costa, definem o padrão das correntes de deriva litorânea e o seu potencial no transporte de sedimentos (Barroso, 2007).

A influência dos recifes de coral nas ondas tem sido também analisada, com uso da modelagem numérica, a respeito de sua capacidade de proteção da costa. Sheppard *et al.* (2005), com uso do modelo WaveEnergy (Gorlay, 1996a, 1996b e 1997), verificaram que a energia da onda que atingem a costa de Seychelles tem aumentado devido ao aumento do nível do mar (com taxa de 5mm/ano) e a mortalidade em massa do corais, os quais estão sofrendo gradativa erosão. Esses dois fatores juntos contribuem para que a profundidade de submersão aumente e com isso ondas com maiores energias atinjam a costa. Bragard (1995) observou que o aumento do nível do mar de 1 m aumentaria o coeficiente de transmissão das ondas sobre os recifes da praia de Boa Viagem (Recife) em torno de 14 %, o que implicaria, conseqüentemente, no aumento da deriva litorânea na região.

Stone *et al.* (2005) elaborou cenários hipotéticos com o uso do modelo SWAN para testar a influência direta de recifes na atenuação das ondas durante tempestades no litoral de Louisiana (EUA). A distribuição da altura da onda foi modelada em um cenário sem a presença dos recifes, onde foi verificada a transformação de uma região protegida, em um ambiente de mar aberto, com a maior parte da dissipação da energia da onda ocorrendo diretamente na linha de costa.

Dentro dessa abordagem, o presente capítulo tem por objetivo implementar um modelo numérico de propagação de ondas no litoral de Recife e Jaboatão dos Guararapes, onde a influência dos recifes nas ondas será avaliada a partir da elaboração de dois cenários hipotéticos: o primeiro através da elevação de 1 m no nível médio do mar; e o segundo através da remoção do banco recifal submerso da malha batimétrica. Pretende-se dessa forma, avaliar a energia da onda incidente na linha de costa nas duas condições acima, em comparação com o cenário atual.

2. Modelo numérico MIKE 21 SW

No presente estudo utilizou-se o modelo numérico de terceira geração MIKE 21 Spectral Wave (SW), desenvolvido pela *Danish Hydraulic Institute* – DHI. Esse modelo

possui um conjunto de termos fontes que descrevem numericamente o crescimento, decaimento e transformação de ondas geradas por vento e *swell*, tanto em água profunda quanto em água rasa. Os processos físicos considerados pelo MIKE 21 SW são:

- Refração e empolamento devido a variações de profundidade;
- Difração;
- Quebra da onda;
- Dissipação devido ao *wwhitecapping*;
- Dissipação devido à fricção de fundo;
- Interações não-lineares onda-onda;
- Interações onda-corrente;
- Efeito da variação no nível de água;
- Crescimento da onda por efeito do vento;

O modelo é capaz de gerar malhas não-estruturadas e flexíveis, o que torna favorável sua aplicação em zonas de complexidade batimétrica, permitindo alta resolução apenas onde é necessário. Vários testes foram efetuados para testar a eficácia do MIKE 21 SW (Jose *et al.*, 2007; Rugbjerg *et al.*, 2006; Jones *et al.*, 2007), incluindo aplicações em locais de grande complexidade batimétrica, como é o caso de estudo elaborado no sistema de recifes de Horns Rev (Sorensen *et al.*, 2004). Neste caso, foi criada uma malha fina na parte rasa do domínio devido os recifes e uma malha grossa na região *offshore*. Os resultados do modelo foram comparados com séries temporais das características das ondas medidas por ondógrafos em duas localidades do domínio (um localizado na parte externa dos recifes à 17 m e outro na parte protegida dos recifes à 10 m de profundidade). Em geral, o dado modelado mostrou boa concordância com os dados medidos em campo. Contudo, nos testes em que não houve a inclusão da elevação do nível de água na modelagem, a altura da onda foi significativamente subestimada durante o pico da tempestade (Sorensen *et al.*, 2004).

2.1. Equações Governantes

No MIKE 21 SW a dinâmica das ondas de gravidade é representada pela equação de transporte para a densidade do espectro de ação da onda. O espectro varia no tempo e no espaço em função de dois parâmetros de fase da onda que pode ser o número de onda k e direção θ . Alternativamente, os parâmetros de fase da onda podem ser a direção θ , e a frequência angular relativa (Equação 26), ou a frequência angular absoluta (Equação 27). Na formulação do MIKE 21 SW os parâmetros independentes escolhidos são σ e θ . O espectro de densidade da ação da onda $N(\sigma, \theta)$ é relacionado à densidade de energia através da Equação 28.

$$\sigma = 2\pi f_r \qquad \text{eq. 26}$$

$$\omega = 2\pi f_a \quad eq.27$$

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad eq.28$$

Para a propagação da onda de água profunda para água rasa com variação de corrente, a relação entre a frequência angular relativa (σ) e a frequência angular absoluta (ω) é dada pela relação linear de dispersão (Equação 29):

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - \bar{k} \cdot \bar{U} \quad eq.29$$

onde g é a aceleração da gravidade, d é a profundidade, \bar{k} é o vetor do número de onda com magnitude k e direção θ , e \bar{U} é o vetor da velocidade da corrente. A magnitude da velocidade de grupo, c_g , da energia da onda é dada por (Equação 30):

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} \quad eq.30$$

A equação governante, ou seja, o espectro de densidade da ação da onda para as coordenadas cartesianas horizontais pode ser escrito como (Equação 31):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{(S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf})}{\partial} \quad eq.31$$

Onde $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$ é a densidade de ação, t é tempo, $\bar{x} = (x, y)$ é a coordenada cartesiana, $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ é a velocidade de propagação do grupo de onda nas dimensões de \bar{x} , σ e θ . ∇ é o operador do espaço dimensional em \bar{x} , σ , θ . Os termos fontes, no lado direito da Equação 31, representam os fenômenos de geração, dissipação e interações não-lineares onda-onda. S_{in} representa a geração de ondas por vento, S_{nl} a transferência não linear de energia através da interação onda-onda, S_{ds} a dissipação de energia por conta do *whitecapping*, S_{bot} a taxa de dissipação devido a fricção de fundo e S_{surf} a dissipação de energia devido a quebra da onda induzida pela profundidade.

2.2. Método Numérico

O módulo SW do MIKE 21 possui dois tipos de formulações. Para a avaliação das condições das ondas próxima a costa, a qual envolve a transformação da onda a partir de um conhecido dado estatístico para águas profundas, a formulação do parâmetro de dissociação direcional é adequada. Ela envolve os processos de refração, difração,

empolamento, fricção de fundo, quebra da onda, efeito do vento, interação onda-onda e interação onda-corrente. Sua resolução é baseada na parametrização da Equação 31, introduzindo no domínio da frequência o zero e primeiro momento do espectro de ação da onda como variáveis dependentes de acordo com Holthuijsen *et al.*, (1989).

A formulação do modelo espectral completo é geralmente usada simultaneamente para a previsão de ondas geradas por vento e análise da propagação em larga e curta escala. Demanda mais esforço computacional, mas possui melhor acurácia. Esta formulação inclui também o efeito de dissipação de energia por *whitecapping*.

A discretização no espaço geográfico e espectral é realizada a partir do método de volumes finitos centrado na célula, utilizando a técnica de malhas não estruturadas. As malhas não estruturadas são cada vez mais utilizadas na modelagem numérica de problemas de fenômenos de transporte, devido a sua flexibilidade na discretização de geometrias complexas, permitindo adensar a malha somente em regiões de interesse, sem a necessidade de se modificar toda a malha. Essa técnica é essencial para diminuir o esforço computacional e garantir que regiões de bruscas alterações batimétricas, como os ambientes recifais, tenham uma resolução adequada. O método de volumes finitos centrados na célula, por sua vez, possibilita discretizar as equações de transporte em volumes de controle com geometria arbitrária, onde as propriedades dos cálculos são realizada no baricentro do elemento (Enari & Travelho, 2001).

O domínio espacial é discretizado pela subdivisão do contínuo em elementos de malha não sobrepostos e separados por nós. A densidade de ação da onda $N(\bar{x}, \sigma, \theta)$ é representada por partes sobre os elementos e armazenadas nos centro geométricos. Para a frequência é utilizada a discretização logarítmica.

No MIKE 21 SW existem duas soluções para integração no tempo. Na formulação não-estacionária a integração é baseada numa abordagem de passo fracionário. Primeiro, a propagação no passo é feita calculando uma solução estimada do próximo passo de tempo pela integração da Equação 31 sem os termos fonte. Em segundo, um passo de termo fonte é realizado calculando a nova solução, a partir da solução estimada, levando em consideração os efeitos dos termos fontes. Na solução quase-estacionária, a integração de cada passo de tempo pode ser resolvida através do método de Newton-Raphson ou pelo método de Interação no Domínio do Tempo, onde o mesmo procedimento do modo não-estacionário é aplicado, entretanto o número de interações é determinado automaticamente para satisfazer a restrição de estabilidade numérica.

3. Métodos

3.1. Parâmetros do Modelo

O domínio do modelo englobou a zona recifal de interesse e a porção da plataforma continental adjacente até aproximadamente a isobáta de 50 m (próximo a quebra), possibilitando executar os cálculos da propagação de ondas de água profundas até os recifes e analisar os fatores que envolvem suas transformações. Compreende as áreas entre as coordenadas planas UTM (*datum* WGS84) 285000E - 9070000N e 330000E - 9125000N, entre o Porto de Suape no município do Cabo de Santo Agostinho, ao sul, e a praia de Pau Amarelo no município de Paulista ao norte do domínio. A zona recifal de interesse está localizada próxima a costa e no centro do domínio, correspondente a uma área de aproximadamente 19 km de extensão por 5 km de largura.

Considerando as diferentes escalas batimétricas do domínio do modelo, foi criada uma malha não-estruturada flexível com três níveis de resolução: uma malha fina com resolução de ~60 m, adaptada as variações bruscas na batimetria devido à presença dos recifes, incorporada a uma malha grossa com ~450 m de resolução para a parte mais externa do domínio, onde a batimetria é mais regular. Uma terceira malha, com resolução intermediária (~200 m) foi incluída no intuito de criar um gradiente de resolução no limite entre a malha fina e a grossa (Figura 23).

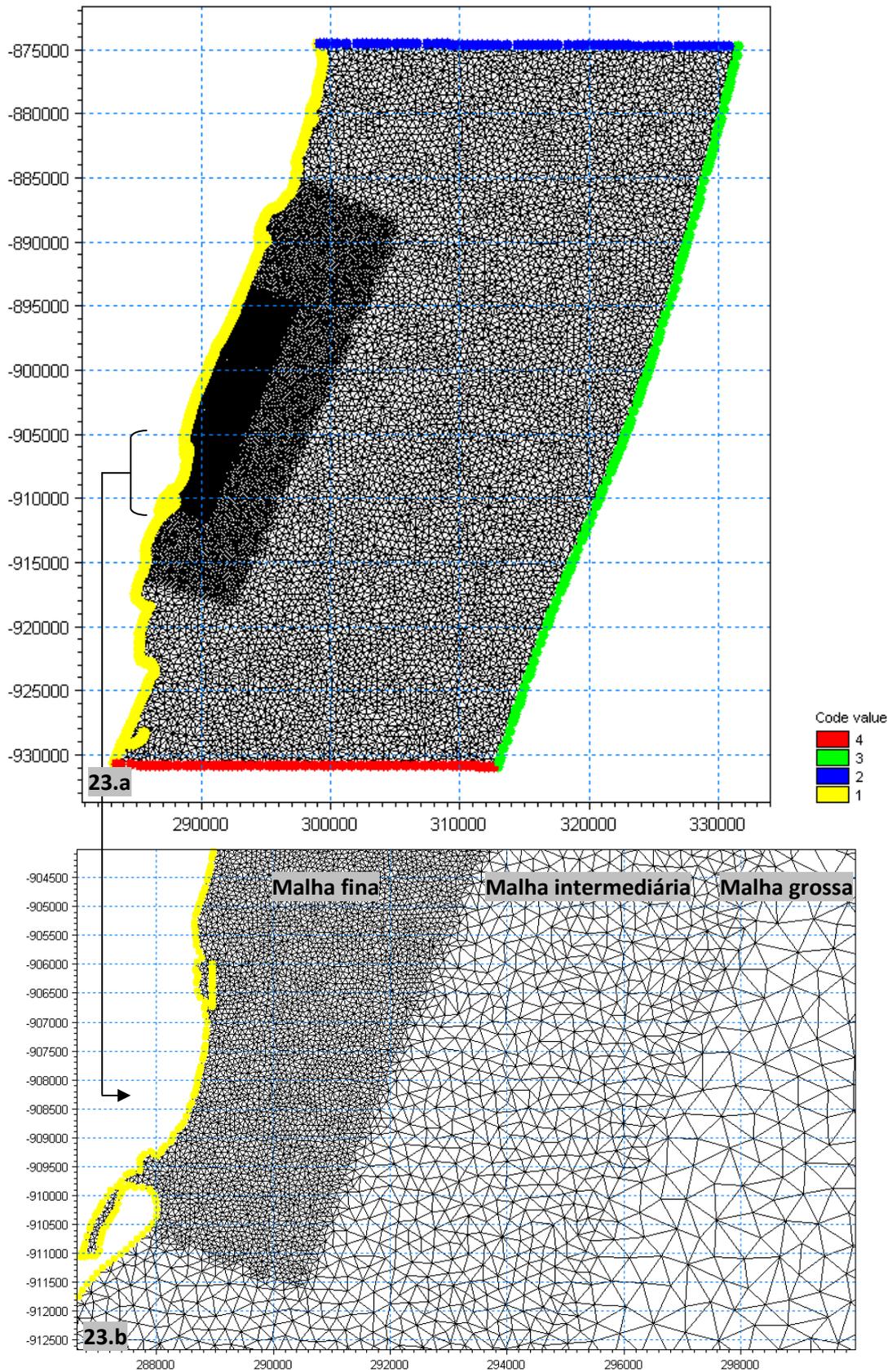


Figura 23. Resolução da malha computacional do domínio modelado (23.a) e detalhe do gradiente no tamanho de elemento em cada malha (23.b). As cores indicam o tipo de condição de contorno: amarelo contorno fechado; verde contorno aberto (parâmetro das ondas 1); azul e vermelho contorno lateral.

Para a discretização espacial foram utilizados elementos triangulares a partir da técnica de volume finito centrado na célula com esquema de primeira ordem, totalizando 19.949 elementos e 38.904 nós. A condição de contorno leste do modelo foi definida com séries temporais de altura significativa de onda (H_s), período (T), direção (dir) e índice de espalhamento direcional (n) constantes ao longo da linha. Para os contornos norte e sul optou-se pela condição de contorno lateral onde as características das ondas são calculadas ao longo da linha a partir do dado obtido na conexão do contorno leste.

A integração no tempo foi realizada com a formulação quase-estacionária, onde o tempo é removido como variável independente e uma solução do estado estacionário é calculada para cada intervalo de tempo. O período da simulação foi de 13 dias, começando em 29/07/09 até 11/08/09 para cada cenário. O número de intervalos de tempo escolhidos para a simulação foi de 1h.

Foi utilizada a formulação do parâmetro de dissociação direcional para computar os parâmetros da onda. Esta é indicada para o estudo da propagação e transformação de ondas em áreas costeiras onde se conhecem os parâmetros da onda em águas profundas e o processo de geração de ondas por ventos não é uma das variáveis em questão. A discretização direcional foi do tipo 360 graus com 16 números de direções.

O cálculo da difração foi incluído no modelo. A abordagem utilizada para incorporar o fenômeno da difração MIKE 21 SW é apresentada em Holthuijsen *et al.* (2003). A aproximação é baseada na equação do declive suave para refração-difração (*mild-slope equation for refraction and diffraction*), omitindo, entretanto, as informações sobre a fase da onda (diferente dos modelos do tipo Boussinesq que resolvem a difração considerando a fase da onda). Foi utilizado o fator de amortecimento 1 com número de passos de amortecimento 1, para corrigir os problemas de convergência (Zijlema & Vanderwesthuysen, 2005). O processo de quebra da onda induzida pela profundidade foi definido pela especificação do *gamma* ($\gamma = 0.8$), constante no domínio. O valor de *gamma* controla as condições da esbeltez da onda, onde uma razão limite é atingida antes da quebra, considerando também a profundidade local. Sua formulação pode ser encontrada em Battjes & Janssen (1978). Como parâmetro de fricção de fundo foi criado um mapa diferenciando o coeficiente de fricção entre a zona dos recifes e o restante da plataforma. Utilizou-se a rugosidade de Nikuradse (K_n), um coeficiente de dissipação em função das condições hidrodinâmicas da onda.

3.2. Dados de Entrada

3.2.1. Batimetria

A batimetria utilizada nas simulações numéricas foi obtida de duas fontes. Para a área de interesse, a qual possui variações bruscas de profundidades devido à presença das estruturas recifais, foi utilizada a batimetria de detalhe descrita no Capítulo 1 (perfis contínuos espaçados em 100 m). As informações batimétricas do restante da área, correspondente a plataforma continental até a isóbata de 50 m e as expansões a norte e sul, foram extraídas da carta náutica 930 da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação) (Figuras 24 e 25). O *datum* das duas fontes foi ajustado para o zero hidrográfico da fornecido pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para o Porto do Recife.

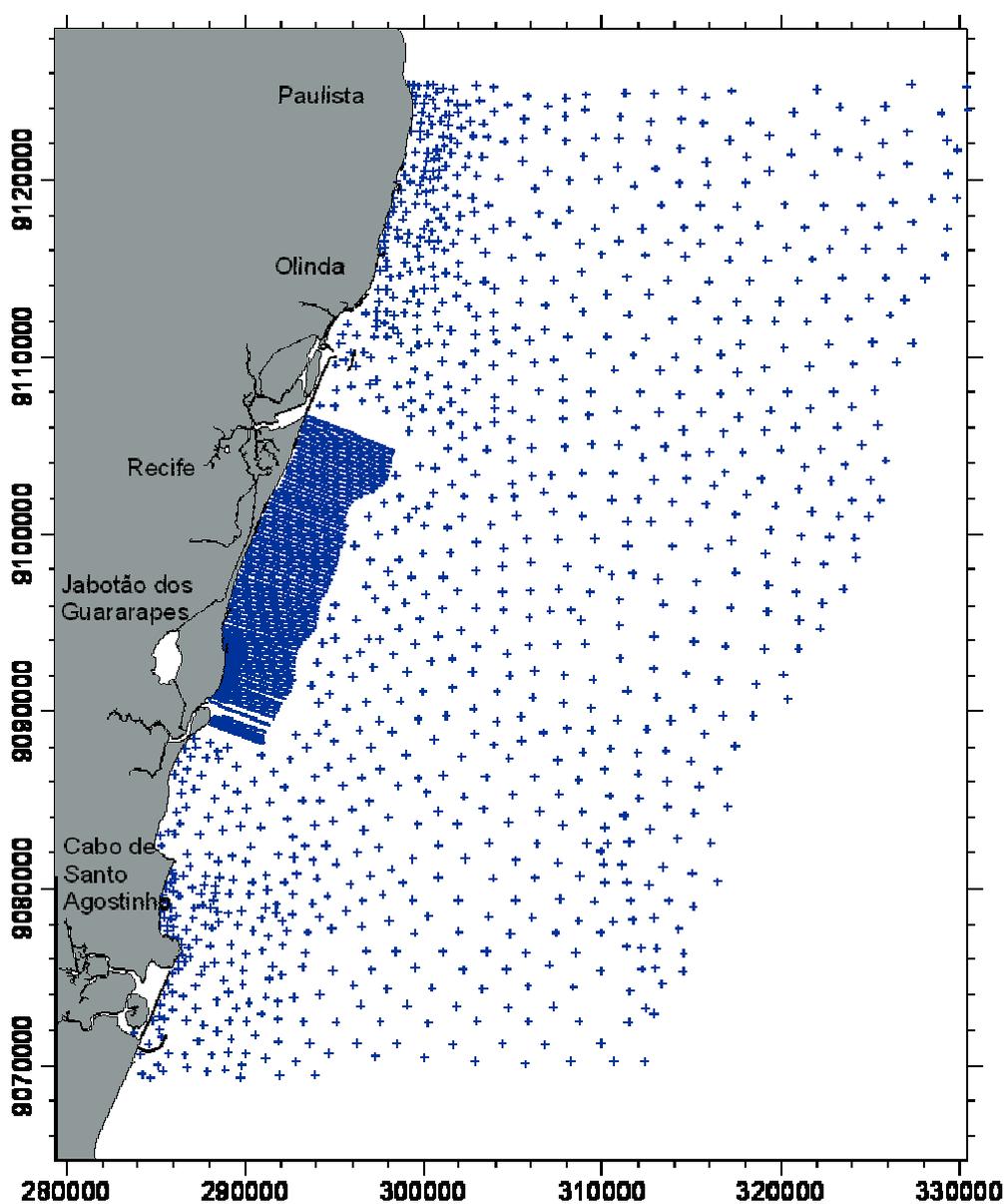


Figura 24. Resolução batimétrica utilizada no domínio modelado.

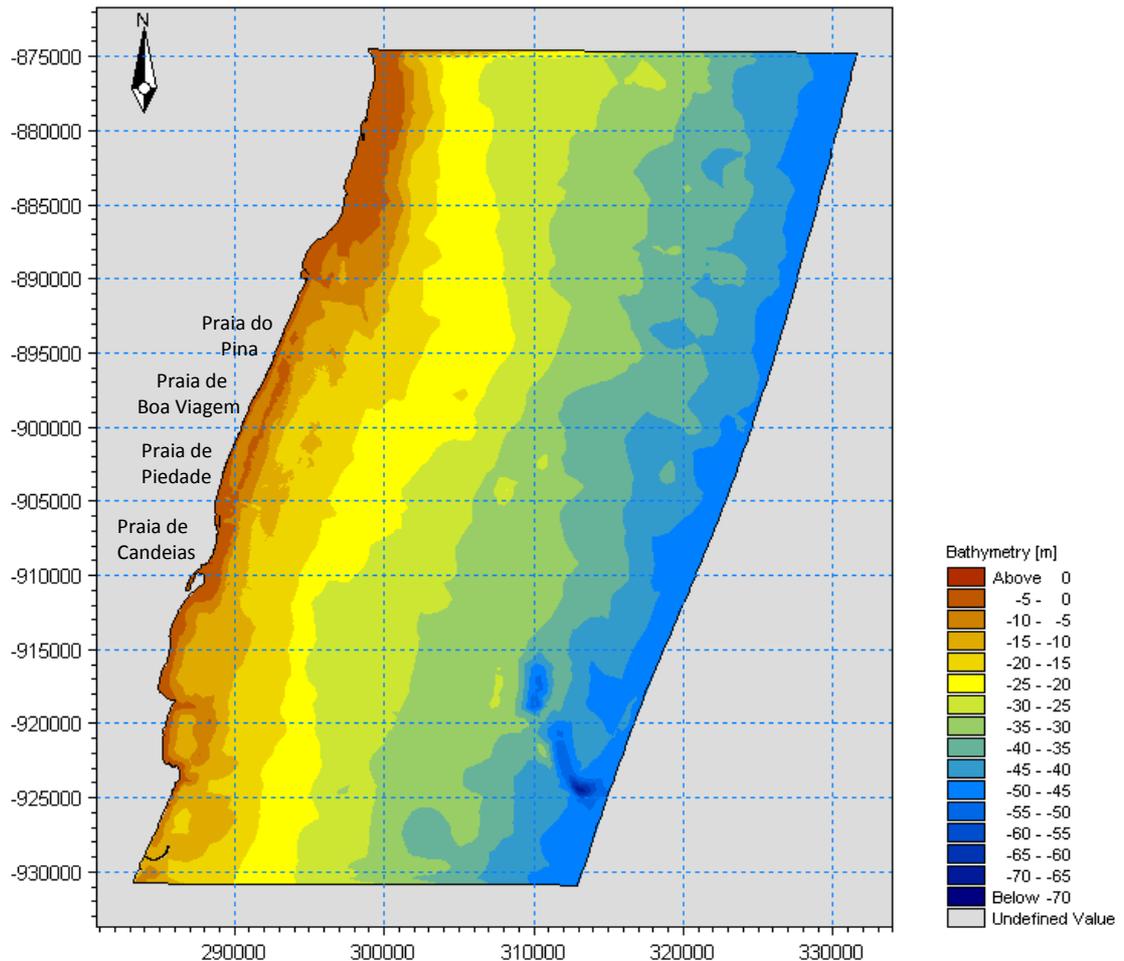


Figura 25. Mapa batimétrico interpolado no módulo de pré-processamento MIKE ZERO *Mesh Generator*.

3.2.2. Ondas de Água Profunda

Os parâmetros da onda, utilizado como dados de entrada nas condições de contorno foram extraídos do modelo de previsão WaveWatch III (NWW3) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Este modelo é considerado o estado-da-arte em simulações operacionais de agitação marítima gerada pelo vento em águas profundas. A equação governante é a da conservação da energia de ação espectral, em função do espectro de número de onda e direção, e utiliza como forçantes os campos de ventos produzidos pelo modelo atmosférico global AVN do NCEP. Uma descrição completa sobre o modelo pode ser obtida em Tolman (2002).

Os dados do NWW3 utilizados como dados de entrada no modelo mostrou uma relação com dados obtidos em campo por ondógrafos (ver Capítulo 2), com mesma tendência da curva, mas uma diferença de cerca de 80 % na H_s a qual foi atribuída aos processos de dissipação de energia durante a propagação em direção a águas rasas. A

série temporal obtida para o período de simulação mostrou um aumento na H_s da onda a partir do terceiro dia, iniciando com 1,9 m no dia 29/07/09 e atingindo 3,0 m no dia 7/08/09. A direção predominante foi de SE (Figura 26).

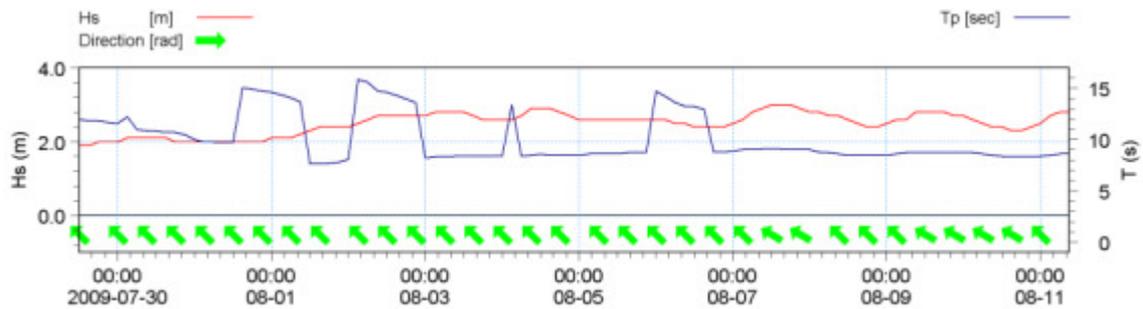


Figura 26. Altura significativa da onda (linha vermelha), período (linha azul) e direção (setas) previstas pelo modelo NWW3 para águas profundas.

3.2.3. Maré

A elevação da maré para o período de simulação foi extraída da série temporal dos ondógrafos interno (BVI) e externo (BVE), instalados na praia de Boa Viagem entre os dias 29/07/09 à 11/08/09. A amplitude da maré compreendeu um período inicial de quadratura, com amplitude mínima de 0,75 m, seguido por uma fase de sizígia em que a amplitude máxima atingiu 2,03 m (Figura 27). Os dados interpolados foram incluídos no modelo para definir a elevação superficial da água, o qual se mostrou um fator importante nas características das ondas após a passagem pelo banco recifal submerso (Capítulo 2).

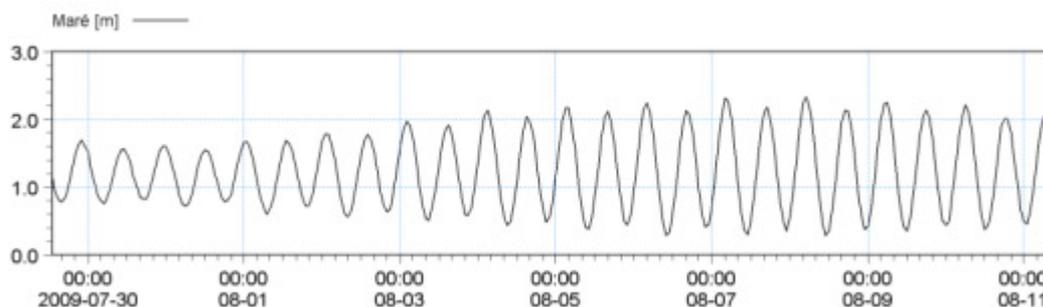


Figura 27. Curva da maré durante o período de simulação.

3.2.4. Vento

Como a simulação para cada cenário, inclusive dos cenários hipotéticos, foi projetada para o período de 13 dias ocorrido entre os dias 29/07/09 e 11/08/09, os quais representam o período mais energético do ano na área de estudo, optou-se por incluir nas simulações a intensidade e direção do vento ocorrente no período. Foi utilizada a opção variando no tempo e constante no domínio com o cálculo efetuado a partir da formulação de JONSWAP. Os dados da velocidade (m/s) e direção dos ventos foram obtidos a 10 m do solo a partir da plataforma de coleta de dados presente no município de Olinda, próxima ao Porto do Recife e disponibilizados pelo INPE (Figura 28).

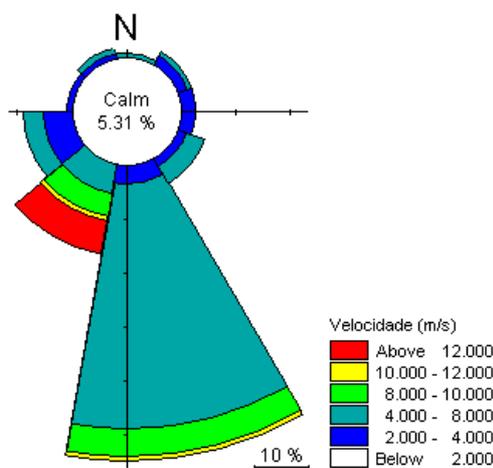


Figura 28. Condições do vento durante o período de simulação.

3.3. Cenários

Com o propósito de analisar o papel dos recifes na dissipação da energia da onda, foram configurados três cenários de simulação, sendo um referente às condições atuais e dois hipotéticos.

Cenário 1 – Corresponde à situação atual onde foram mantidos os parâmetros do modelo e dados de entrada descritos nos tópicos 3.1 e 3.2. Este cenário foi utilizado também na etapa de calibração e validação.

Cenário 2 – Cenário hipotético onde as linhas recifais submersas foram retiradas da batimetria (Figura 29). Este cenário foi criado com o intuito de verificar quais os parâmetros das ondas atingiriam a linha de costa caso não houvesse os recifes e dessa forma evidenciar o papel dessas estruturas na mitigação da energia da onda. Devido a eliminação da zona recifal a fricção de fundo foi mantida constante no domínio ($K_n=$

0,04). Os demais parâmetros do modelo e dados de entrada foram mantidos iguais ao do Cenário 1.

Cenário 3 – Cenário hipotético considerando a elevação do 1 m no nível do mar prevista pelos relatórios de aquecimento global para o ano de 2100 (IPCC, 2007). Neste caso, a estrutura recifal foi mantida constante (sem acrescentar o equivalente a taxas de crescimento vertical por parte dos organismos construtores de recife de coral), assim como os demais dados de entrada do modelo, alterando apenas a elevação do nível do mar. A partir deste cenário é possível estimar a magnitude da transformação das ondas ocasionada pelos recifes frente ao aumento do nível do mar.

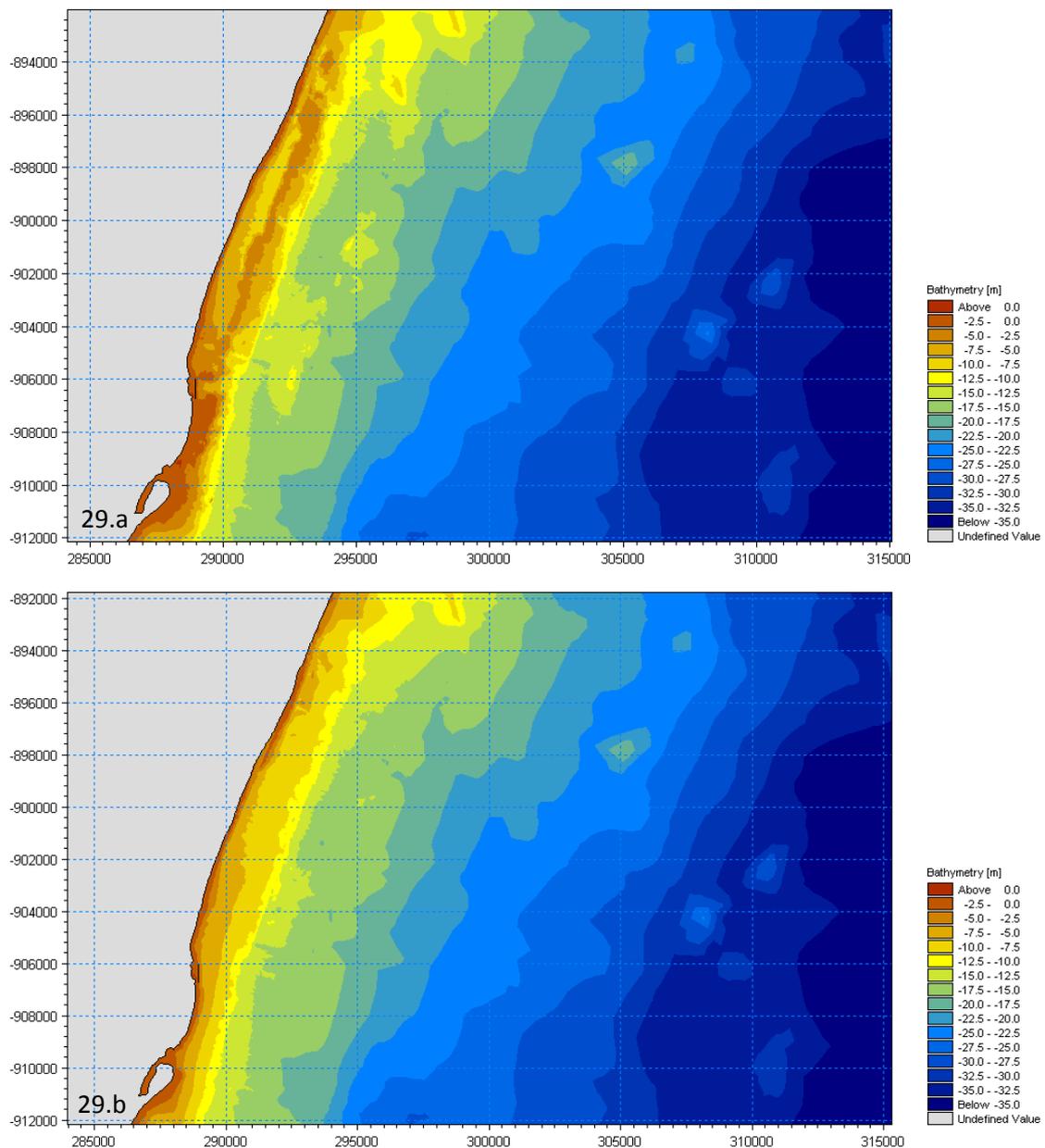


Figura 29. Detalhe do mapa batimétrico com os recifes submersos (29.a) e após a remoção dos mesmos (29.b).

4. Verificação do Modelo

4.1. Dados *in situ*

Para calibração e validação do modelo foi usada a série temporal obtida pelos ondógrafos interno e externo da praia de Boa Viagem, posicionados ao longo de um transecto perpendicular ao maior eixo do recife, entre os dias 29/07/09 à 11/08/09 (Figura 30). Utilizou-se a altura significativa da onda para tal, a qual é considerada um dos parâmetros mais comuns na validação de espectros de ondas (Abdalla *et al.*, 2006). A descrição detalhada dos métodos de configuração e fundeio dos equipamentos estão descritos no Capítulo 2.

Os dados obtidos pelo ondógrafo externo (BVE) foram utilizados para verificar a qualidade dos dados de saída do modelo após o cálculo relativo a propagação das ondas pela plataforma até a posição do ondógrafo, enquanto que o ondógrafo interno (BVI) foi utilizado para verificar a resposta do modelo com respeito à transformação da onda incidente através da estrutura recifal. Dessa forma, vários parâmetros foram ajustados simultaneamente, durante a etapa de calibração do modelo, para satisfazer as duas condições.

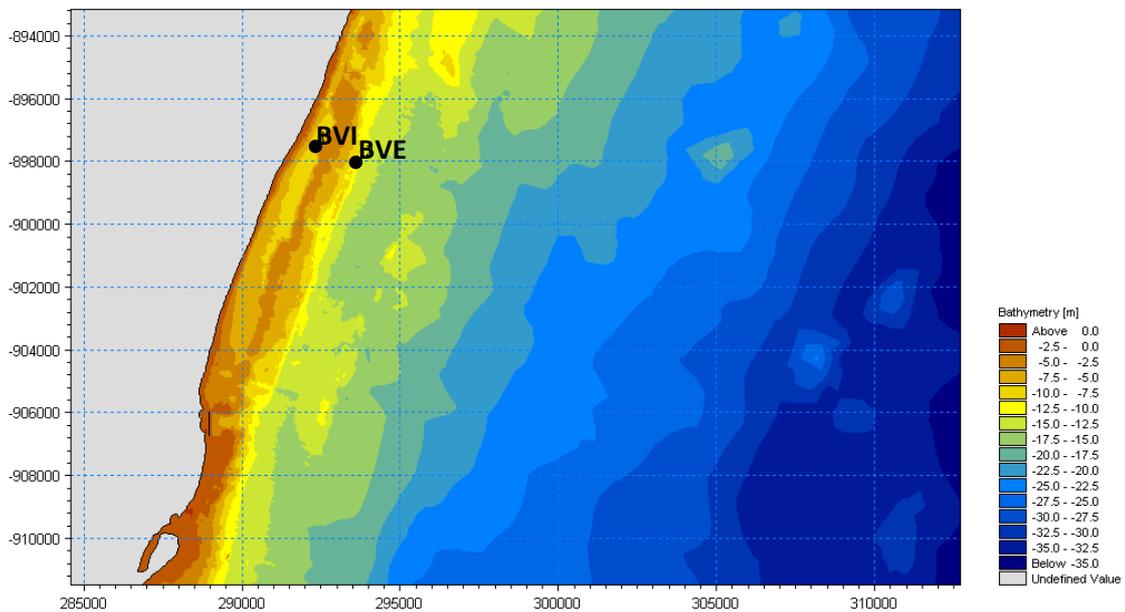


Figura 30. Posição de fundeio dos ondógrafos utilizados na calibração do modelo.

4.2. Índices de Qualidade

A comparação de duas séries temporais de origem diferentes utilizados para descrever um mesmo parâmetro é em geral realizada com a finalidade de verificar se as duas fontes de informação tem um mesmo padrão de comportamento, respondem aos

mesmos fenômenos externos, e qual a magnitude do erro entre as duas. (Bauer *et al.*, 1992; Bauer & Staabs, 1998; Chui *et al.*, 2004; Johnsen *et al.*, 2003; Swail *et al.*, 2000; Park, 2001).

Os termos estatísticos mais comuns nesse tipo de comparação, também chamados índices de qualidade do modelo (Groenewoud & Melger, 2009) são a média, o erro, o bias, a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o índice de bias, o índice de dispersão e o coeficiente de correlação.

Abaixo segue a descrição dos índices de qualidade para validação do modelo utilizados neste trabalho:

A diferença entre o dado modelado e medido representa o erro do modelo, e é dado pela Equação 32, onde H_{mo} é a altura significativa da onda estimada pelo modelo e H_{me} medida pelos ondógrafos.

$$\Delta H = H_{mo} - H_{me} \quad eq. 32$$

O bias, representado na Equação 33, indica a tendência do erro. Se positivo (negativo), o modelo tende a apresentar valores maiores (menores) que os ondógrafos e o Bias Index (BI), dado pela Equação 34, é um valor adimensional utilizado na comparação entre outras séries.

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta H \quad eq. 33$$

$$BI = \frac{bias}{H\overline{me}} \quad eq. 34$$

onde $H\overline{me}$ representa a média da série temporal dos dados medidos.

A raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 35), indica o valor médio dos erros, fornecendo um alto peso para os maiores erros da série.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta H^2} \quad eq. 35$$

O índice de dispersão (ID) (Equação 36) é uma medida utilizada para quantificar se um conjunto de ocorrências observadas estão relativamente dispersas ou agrupadas em comparação com um modelo estatístico padrão. Quando o coeficiente de dispersão é inferior a 1, o conjunto de dados é pouco disperso. Se o índice de dispersão é maior que 1, o conjunto de dados é muito disperso. Observando o diagrama de dispersão e

calculando o índice de dispersão pode-se saber a relação entre as duas variáveis (neste caso, a H_{mo} e H_{me}).

$$SI = \frac{RMSE}{H\bar{m}\bar{e}} \quad eq. 36$$

O coeficiente de correlação (cc) é a medida padronizada da relação entre duas variáveis, o qual indica se o crescimento de um tende a ser acompanhado pelo outro. Ele é dado por:

$$cc = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{me} - H\bar{m}\bar{e})(H_{mo} - H\bar{m}\bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (me - H\bar{m}\bar{e})^2 \sum_{i=1}^N (H_{mo} - H\bar{m}\bar{o})^2}} \quad eq. 37$$

onde $H\bar{m}\bar{e}$ representa a média da série temporal dos dados modelados.

O valor da correlação é dado entre 1 e -1. Uma correlação próxima a zero indica que as duas variáveis não estão relacionadas. Uma correlação positiva indica que as duas variáveis movem juntas, e a relação é forte quanto mais ρ se aproxima de 1. Uma correlação negativa indica que as duas variáveis movem-se em direções opostas, e que a relação também fica mais forte quanto mais próxima de -1.

4.3. Calibração e Validação

Foram feitas diversas simulações incluindo o ajuste da resolução da malha, resolução e qualidade do dado de entrada e alteração no coeficiente de fricção de fundo. Com relação à resolução da malha, buscou-se a melhor relação entre demanda de esforço computacional e quantidade de nós e elementos. As primeiras simulações, com nós espaçados aproximadamente 150 m entre si na zona de interesse, mostraram-se imprecisas, pois os elementos cobriam zonas muito rasas (em cima dos recifes) e zonas profundas ao mesmo tempo, dessa forma optou-se por aumentar a resolução para aproximadamente 50 m na zona de interesse e manter uma resolução mais grossa nas áreas externas.

Os dados de entrada de onda, extraídos do modelo NWW3 para águas profundas, fornecem a altura significativa total para o espectro de ondas e as direções primárias e médias. A utilização das direções primárias (direção da ondulação de maior intensidade) ocasionou quedas bruscas na H_s modelada, as quais não verificadas na série obtida em campo. As simulações com uso da direção média geraram dados mais consistentes em relação aos dados medidos pelos ondógrafos.

Para ajustar o melhor valor de K_n para o domínio modelado uma série de novas simulações foi efetuada. As simulações com a opção de K_n constante no domínio mostraram-se imprecisas, pois não foi possível obter uma dissipação de energia de cerca de 40 % a 60 % da H_v , como a observada pelos ondógrafos. Segundo Roberts *et al.* (1975) e Gerritsen (1980), a perda de energia da onda por fricção de fundo é normalmente baixa em fundos arenosos, entretanto é bastante significativa em topo recifais rugosos onde o coeficiente de fricção pode ser a uma ordem de magnitude maior. Dessa forma, as simulações posteriores foram realizadas com o coeficiente de fricção variando no domínio para que o modelo reproduzisse satisfatoriamente bem a tanto a onda incidente (estação BVE) quanto onda transmitida pelo recife (estação BVI). Foram elaborados mapas de fricção com maior valor de coeficiente para a zona dos recifes e valores menores para fundos de sedimentos inconsolidados (mapas com K_n entre 0 e 1.15). Os resultados dos índices de qualidade do modelo calculados para a série temporal na posição dos ondógrafos podem ser encontrados na Tabela 1.

Tabela 1. Índices de qualidade do modelo para as várias simulações de ajuste do coeficiente de fricção de fundo. Comparação entre os dados medidos *in situ* nas estações BVI e BVE.

BVI – Simulações									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
bias	0.626	0.61	0.66	0.692	0.481	0.4186	0.4063	0.3356	0.3504
RMSE	0.651	0.623	0.669	0.702	0.5102	0.4329	0.4213	0.3534	0.3661
BI	0.682	0.664	0.718	0.754	0.5237	0.4558	0.4424	0.3654	0.3815
SI	0.708	0.681	0.729	0.764	0.5555	0.4713	0.4587	0.3847	0.3986
cc	0.727	0.769	0.787	0.785	0.7397	0.8055	0.8021	0.7907	0.8137

BVE – Simulações									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
bias	-0.141	0.212	-0.0994	-0.038	-0.04	-0.0511	-0.101	-0.105	-0.1121
RMSE	0.369	0.404	0.3552	0.309	0.31	0.3129	0.3223	0.32	0.3256
BI	-0.069	0.104	-0.0487	-0.018	-0.02	-0.025	-0.0495	-0.0514	-0.0549
SI	0.18	0.198	0.174	0.151	0.152	0.1532	0.1578	0.1567	0.1595
cc	0.549	0.525	0.5484	0.62	0.619	0.6157	0.6246	0.6374	0.6262

A altura da onda transmitida (BVI) mostrou-se bastante sensível as alterações no coeficiente de fricção. O melhor resultado foi encontrado com gradiente espacial do coeficiente de fricção entre $0,04 < K_n < 1$, onde foi observado uma redução do bias e do RMSE de 0,626 e 0,651 para 0,335 e 0,353, respectivamente, quando comparado as primeiras simulações com K_n variando no domínio. A Figura 31 apresenta as séries de H_s medidas nas duas estações (BVE e BVI) a partir do resultado calibrado do modelo.

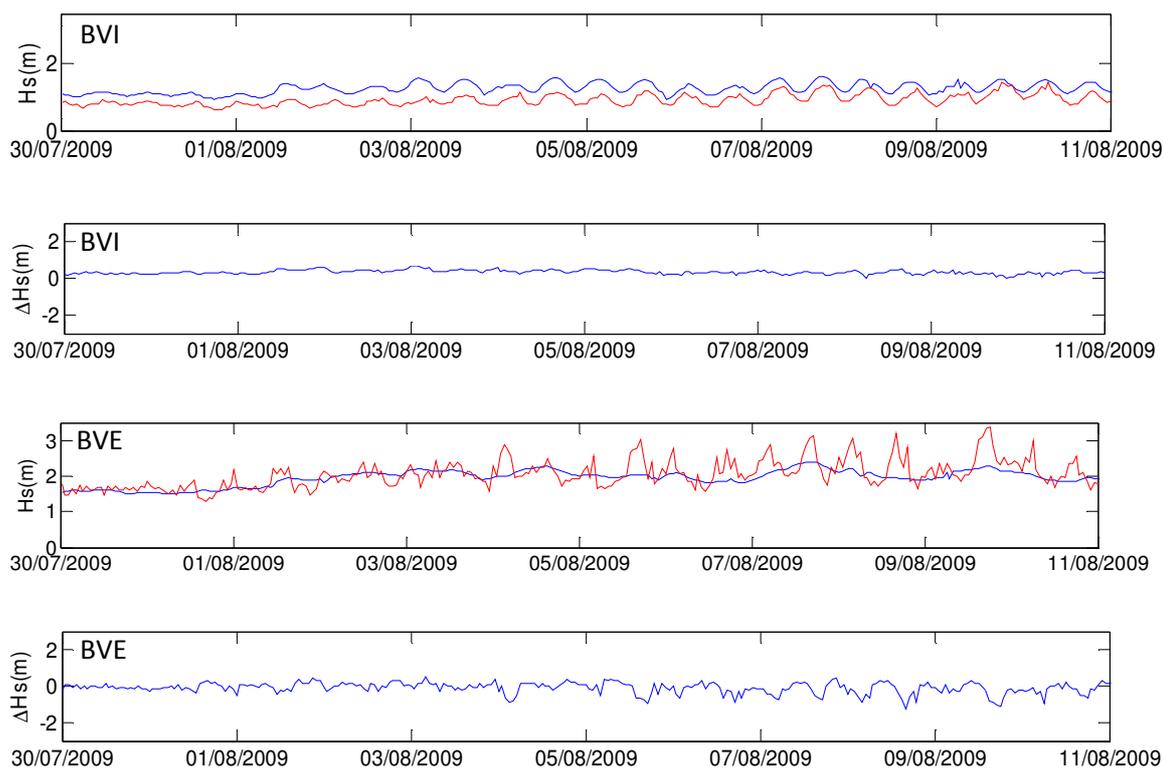


Figura 31. Comparação entre as H_s , medidas e simuladas, para as estações interna (BVI) e externa (BVE) ao recife. Situação do modelo calibrado. A linha em vermelho representa a série temporal do dado medido (H_{me}) e a em azul do dado modelado (H_{mo}). Os gráficos com ΔH_s nos eixos das ordenadas representam o erro do modelo no tempo ($\Delta H_s = H_{mo} - H_{me}$).

A análise da Figura 31 demonstra que o modelo reproduz melhor uma condição de ondas menores como dado de entrada. Isto pode ser atribuído ao fato que ondas com maiores comprimentos são capazes de sofrer os efeitos do fundo a uma profundidade maior, dessa forma, a linha recifal presente na isóbata aproximada de 15 m (ver Capítulo 1, Figura 4, feição E) poderá causar uma influência maior na onda do que a prevista pelo modelo. As ondas menores, por sua vez, passam por esta linha sem interação e são melhores representadas pelo modelo na localização da estação BVE. Como discutido no Capítulo 2, o ondógrafo da estação externa (BVE) demonstra certa modulação de H_s pela maré quando no caso de incidência de ondas acima de 2 m, com oscilações de H_s em um período de 6 h indicando a influência dessa linha, a 15 m, na modificação da H_s . Nestas condições de ondas o modelo retorna um valor médio de H_s entre as variações observadas com série extraída do ondógrafo BVE, apesar de também apresentar uma leve modulação pela maré.

O modelo foi capaz de reproduzir a modulação da onda transmitida pelo recife assim como observado com a série temporal obtida *in situ* (BVI). Foi observada uma forte correlação entre o dado medido e o dado modelado nesta estação ($cc = 0,81$), onde as

duas curvas apresentam o mesmo comportamento senoidal com valores máximos e mínimos de H_s correspondentes a maré alta e baixa, respectivamente. Entretanto os demais índices de qualidade indicam que o recife tem a capacidade de dissipar uma energia maior da onda do que a prevista pelo modelo (em torno de 33%).

Considerando que a superfície de um recife de coral é bastante irregular, a obtenção de uma malha batimétrica, a partir de um equipamento multi-feixe, poderia reproduzir com mais precisão essa rugosidade. Um outro fator seria a inclusão de um termo fonte que representasse a dissipação de energia devido a porosidade da estrutura. Análises realizadas em tanques de ondas demonstram estruturas porosas afetam significativamente a transmissão das ondas (Fernando *et al.*, 2008; Ting *et al.*, 2004). Segundo Johnson (2006), a não inclusão da dissipação de energia provocada pela percolação através de estruturas porosas (como é o caso dos recifes de coral) pode acarretar em alguns erros, os quais são esperados serem pequenos quando o processo a quebra da onda ocorre. Entretanto, em grande parte da área de estudo, dissipação de energia ocorre sem necessariamente ser forçada pela quebra da onda. A elaboração de testes com a inclusão de um parâmetro de porosidade poderia fornecer valores mais acurados.

5. Resultados e Discussões

Os resultados das simulações são apresentados e discutidos em duas seções principais. Na primeira, são apresentados os resultados do cenário atual e discutidos os aspectos gerais da propagação das ondas de águas profundas, até a zona de recifal de interesse. Na segunda, é realizada a comparação entre as características das ondas simuladas no cenário atual e simuladas nos dois cenários hipotéticos. Ressalta-se que a análise realizada aqui, corresponde às condições de ondas provenientes de S e SE, com intervalos $1,8 \text{ m} < H_s < 3 \text{ m}$ e $7,6 \text{ s} < T < 15,9 \text{ s}$, condições estas, que correspondem a uma amostra do período crítico do ano (Julho – Agosto 2009), conforme abordado anteriormente.

5.1. Propagação das Ondas na Plataforma Continental: Aspectos Gerais

Os resultados da simulação do cenário atual demonstram que a propagação das ondas de águas profundas, ao longo da plataforma média (de 20 m – 40 m) e externa (acima de 40 m), sofre pouco grau de refração, em torno de 5° , com o trem de cristas alinhando-se com a linha de costa. A refração nessa região é tanto mais intensa quanto maior o período da onda. Nesta porção da plataforma continental, o decaimento

observado das ondas foi em torno de cerca de 20 %. Os Anexos A e B trazem exemplos do campo de ondas obtidas na simulação.

À medida que as ondas atingem a plataforma interna (profundidade menor que 20 m), os processos de refração se tornam mais intensos. Os dados modelados indicam que os raios de ondas convergem em pontos mais elevados dos recifes submersos, conforme indicado na Figura 32.

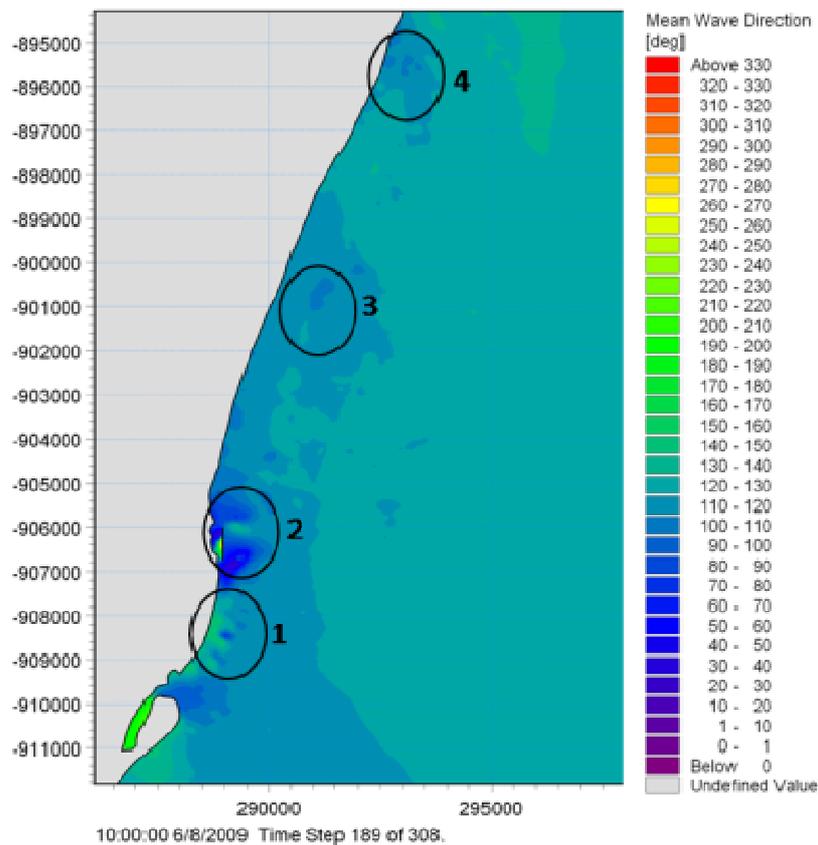


Figura 32. Direção média das ondas, demonstrando os principais pontos de convergência das ortogonais das ondas. Os números indicam as porções elevadas do recife submerso onde ocorre a convergência: 1- parte adjacente a praia de Candeias; 2 – recife *Abreus*; 3 – parte adjacente ao enrocamento na praia de Boa Viagem; 4 – parte adjacente à praia do Pina.

Na porção 2 indicada na Figura 32, além da convergência das ondas no recife *Abreus*, ocorre divergência dos raios de ondas na localidade conhecida como Barra dos *Abreus*, um canal perpendicular ao recife, com cerca de 6 m de profundidade (Figura 33). De frente a este canal existe um quebra-mar com 800 m de extensão, o qual foi construído no ano de 2004. A inclusão de um parâmetro de difração no modelo, permitiu observar a transferência lateral de energia na zona de sombra, criada por essa estrutura (Figura 34). A Figura 35 apresenta uma fotografia da região do quebra-mar.

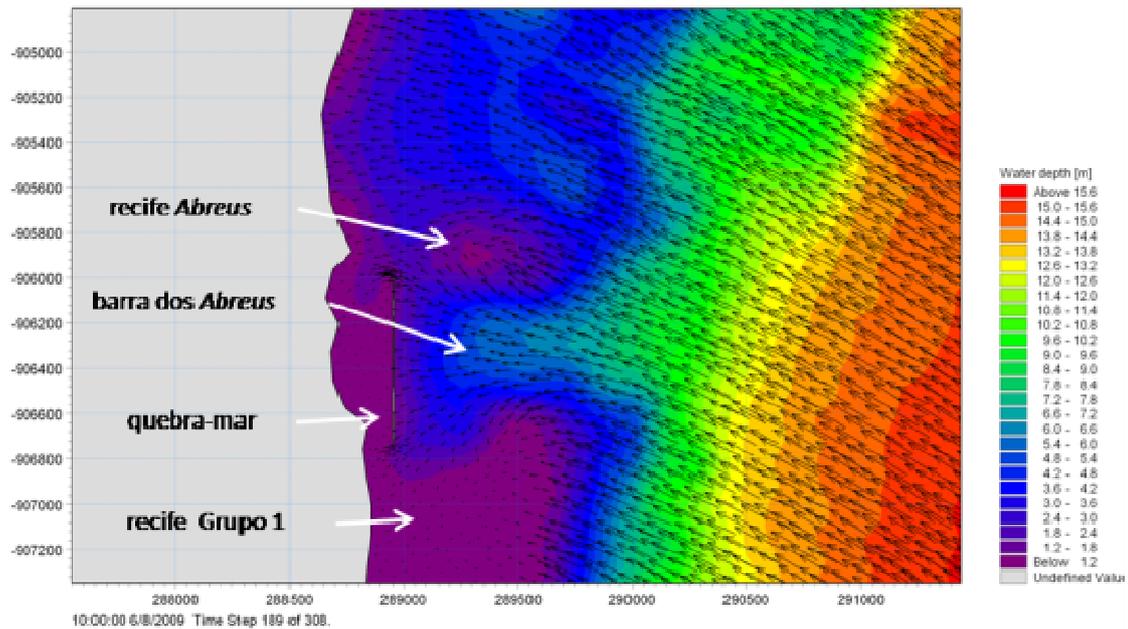


Figura 33. Divergência das ortogonais das ondas ao se propagarem pela Barra dos Abreus. O recife indicado como Grupo 1, pela seta branca, corresponde a classificação da geometria típica realizada no Capítulo 1. A escala de cores representa a profundidade local.

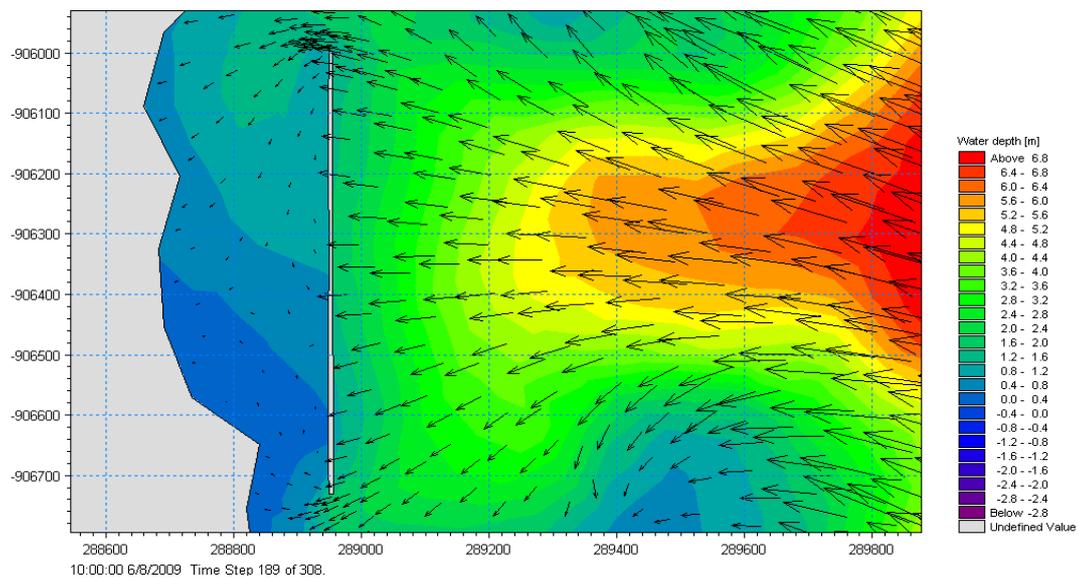


Figura 34. Processo físico da difração da onda provocada pelo quebra-mar da praia de Candeias. A escala de cores representa a profundidade local.



Figura 35. Fotografia do quebra-mar localizado na praia de Candeias. Condição de maré baixa. Fonte: Emanuella Belém, 2008.

Devido aos processos de refração das ondas, provocada pelos recifes, as ondas atingem alguns pontos da costa em direções completamente diferentes daquelas de águas profundas. Na praia de Candeias, por exemplo, a onda após passar pela Barra dos Abreus, atinge a costa com direção de 65° (NE), tendo como sua direção de origem é 135° (SE). Na praia de Boa Viagem, na localidade indicada na Figura 32 (número 3 – enrocamento), a onda atinge a costa com direção de 106° (L), tendo como direção de origem a mesma condição citada para a praia de Candeias.

Além da variabilidade nas direções das ondas incidentes na costa, foi observado também, que a altura significativa da onda, e, portanto, a distribuição de energia ao longo da costa, também não é uniforme (Figura 36). A análise da H_s média para o período de simulação demonstra que na praia de Candeias, a onda incidiu com 0,31 m, na praia de Piedade com 0,62 m, na praia de Boa Viagem com 0,84 m, e na praia do Pina com 0,71 m. Essa variabilidade está, em parte, relacionada com a presença e geometria dos recifes submersos. Na praia de Candeias essas estruturas formam uma zona de sombra devido à forte dissipação da energia decorrente da interação da onda com a borda externa e o topo recifal. Esta zona está bem representada pelos dados de saída de H_s das simulações, onde se observa uma forte atenuação da onda ao interagir com essa estrutura (Anexo B). Conforme apresentado nos capítulos anteriores, o recife nesta região é mais elevado que o restante da área, e assemelha-se geometricamente a um recife de franja (Grupo 1). Os resultados da modelagem indicam que o ponto de menor altura significativa incidente na costa está exatamente nesta região (Figura 37).

Comparativamente, os resultados mostram que a praia de Boa Viagem corresponde a zona mais exposta da área de estudo. Nesta região, localiza-se o ponto de maior altura significativa incidente na costa (Figura 37). Esta posição encontra-se a norte do enrocamento da praia de Boa Viagem, considerado, atualmente, um ponto crítico de erosão costeira.

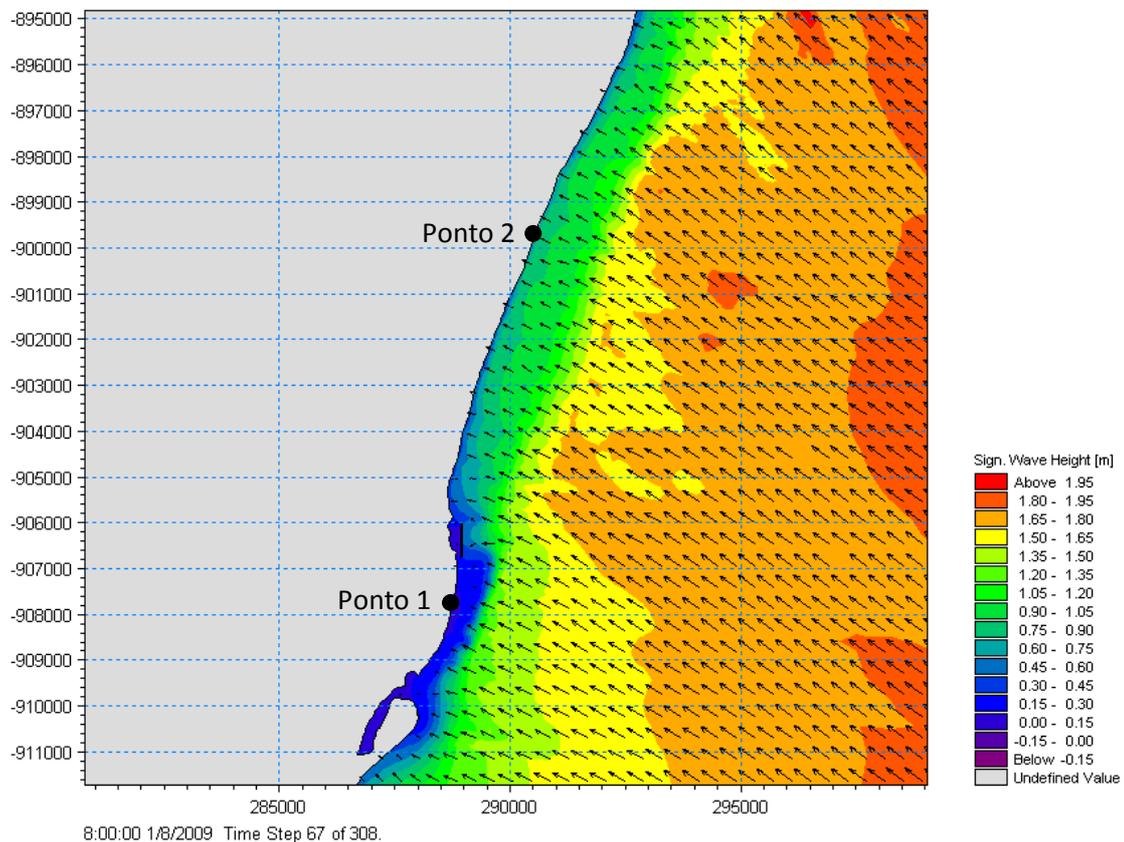


Figura 36. Variação na altura significativa da onda ao longo da costa. Os pontos 1 e 2 indicam a localização de menor e maior altura significativa da onda incidente na linha de costa, respectivamente.

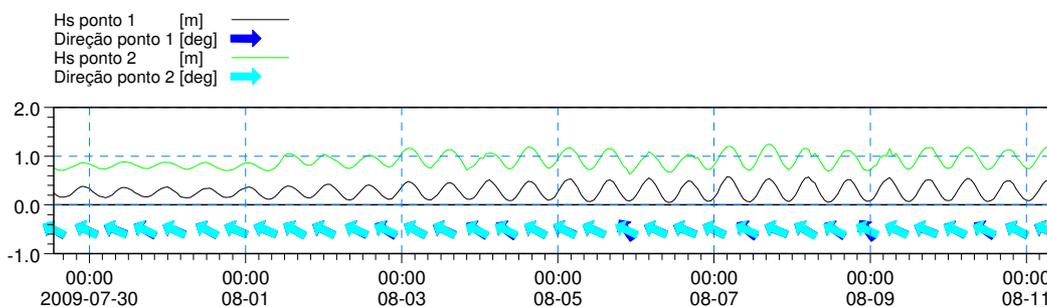


Figura 37. Altura significativa da onda no ponto de menor energia (Ponto 1) e no ponto de maior energia da costa (Ponto 2), durante o período de simulação.

A dissipação de energia da onda, na zona recifal, ocorre principalmente, ao longo da borda externa do banco recifal submerso. Na Figura 36, é possível observar também o efeito de empolamento (*shoaling*), o qual consiste no aumento da altura da onda propagando sobre os recifes.

5.2. Dissipação de Energia: Análise Comparativa dos Cenários Hipotéticos

Para avaliar a influência dos recifes submersos na atenuação das ondas, os valores de altura significativa calculados pelo modelo em cada cenário hipotético, foram subtraídos dos valores obtidos no cenário atual. Dessa forma, serão analisadas a distribuição e a magnitude da modificação da onda nas duas situações, enfatizando a altura da onda incidente na costa caso os recifes submersos não existissem na região, ou caso houvesse a elevação de 1 m no nível médio do mar. Para esta análise, optou-se por utilizar os dados simulados no passo de tempo 239, que corresponde a uma condição atual de MLSW, tendo como dados de entradas a altura da onda de água profunda igual a 2.5 m e período igual 8.5 s. Os Anexos C e D trazem exemplos do campo de ondas obtidos na simulação dos cenários hipotéticos.

As diferenças nos valores de H_s do cenário hipotético de elevação do nível mar em relação ao cenário atual estão representadas na Figura 38. Os efeitos da elevação de 1 m passam a ser percebido a partir da isóbata aproximada de 22 m, quando a altura significativa da onda se torna, em média, 0,1 m mais elevada que no cenário atual. Contudo, as maiores modificações ocorrem na região do banco recifal submerso, onde as ondas são capazes de atravessar essa estrutura com até 0,4 m maior que no cenário atual.

Nesta situação, a influência dos recifes submersos na atenuação da onda torna-se claramente menor. Isto ocorre devido ao aumento na profundidade da coluna d'água sobre a borda e o topo do recife, o que favorece o aumento no coeficiente de transmissão da onda, conforme discutido no Capítulo 2. Calculando o coeficiente de transmissão nos dois cenários, para trechos do recife submerso adjacente às praias de Candeias, Piedade, Boa Viagem e Pina, obtemos os valores apresentados na Tabela 2.

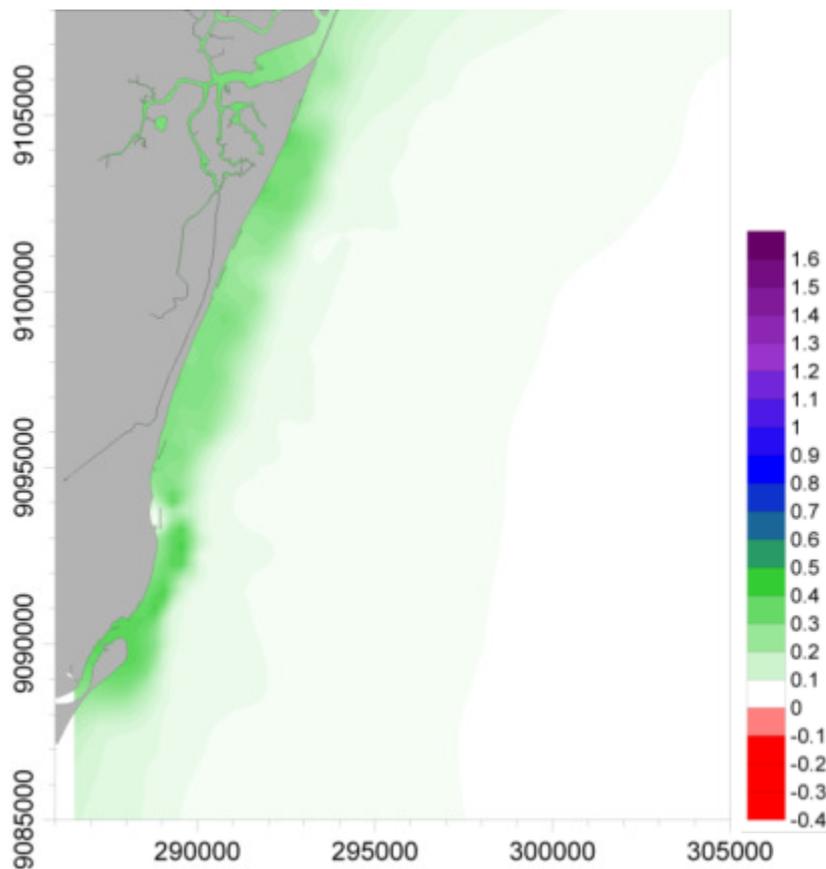


Figura 38. Distribuição da diferença nos valores de H_s entre o cenário hipotético de elevação de 1 m no nível médio do mar e o cenário atual ($H_{\text{cenário hipotético}} - H_{\text{atual}}$).

Tabela 2. Valores de coeficiente de transmissão (K_t) calculados a partir dos resultados simulados pelo modelo MIKE 21 SW, para o cenário atual e o cenário hipotético de elevação de 1 m no nível médio do mar.

Praias	Cenário Atual			Cenário Hipotético*		
	H_t	H_i	K_t	H_t	H_i	K_t
Candeias	0.10	1.76	0.06	0.36	1.82	0.20
Piedade	0.99	1.92	0.52	1.25	1.96	0.64
Boa Viagem	1.24	2.00	0.62	1.45	2.04	0.71
Pina	0.93	1.85	0.50	1.21	1.91	0.63

*Cenário hipotético de elevação de 1 m no nível médio do mar.

A análise da Figura 38 e da Tabela 2 demonstra que a propagação da onda seria afetada, principalmente a respeito da transmissão das ondas sobre os recifes submersos, no caso da elevação do nível médio. Estes resultados estão de acordo com os trabalhos de Bragard (1992) e Neves (1995).

No caso da análise comparativa entre o cenário hipotético de remoção dos recifes submersos e o cenário atual, verifica-se que as modificações na altura da onda são ainda mais expressivas Figura 39. Assim como mostrado na comparação dos cenários anteriores, a maior diferença positiva nos valores de H_s ocorre após a passagem da onda pelo banco recifal submerso, exaltando a função dessa estrutura em dissipar parte da energia da onda que se propaga na região. Em toda a área, correspondente à praia do Pina, de Boa Viagem e de Piedade, a altura da onda é no mínimo 0,5 m mais alta, atingindo até cerca de 1 m em algumas localidades.

A principal modificação é vista na zona de sombra provocada pelo recife adjacente à praia de Candeias, onde a onda passa a se propagar nessa região com até 1,6 m a mais de altura. Fica evidente que, sem a proteção dos recifes, a onda incidiria na costa com bem mais energia e provavelmente, a configuração da linha de costa encontrada hoje, nesta região, seria diferente. Isto é, sem o recife, a saliência existente na retaguarda da zona protegida de Candeias provavelmente não teria condições de ter sido formada.

Outro ponto observado foi a ausência do processo de empolamento da onda ocasionado pela interação com a linha recifal profunda, representado na Figura 39, pelos valores negativos (cor em vermelho).

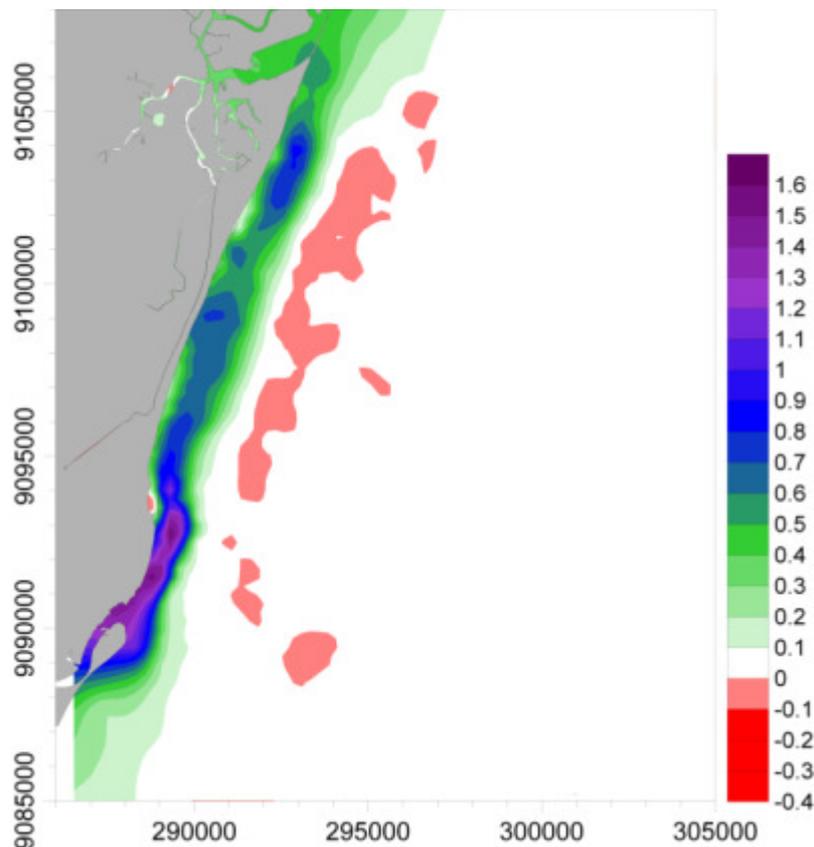


Figura 39. Distribuição da diferença nos valores de H_s entre o cenário hipotético de remoção dos recifes submersos e o cenário atual ($H_{\text{cenário hipotético}} - H_{\text{atual}}$).

A Figura 40 mostra o aumento progressivo na altura da onda incidente na linha de costa de cada trecho de praia, nos três cenários de simulação. A análise da figura ilustra o grau de proteção fornecido pelo recife submerso em cada praia, demonstrando também, a importância da variação no nível de água sobre sua superfície.

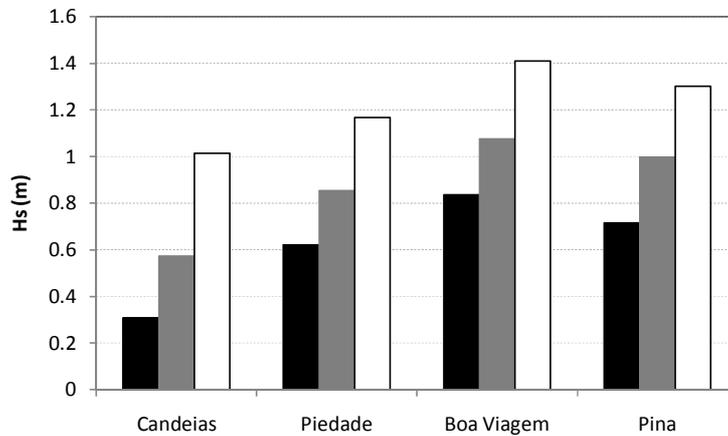


Figura 40. Valor médio da altura significativa da onda incidente na linha de costa das praias de Candeias, Piedade, Boa Viagem e Pina, durante o período de simulação. Barras pretas – cenário atual; barras cinzas – cenário hipotético de elevação do nível do mar em 1 m; barras brancas – cenário hipotético de remoção dos recifes submersos.

Outra questão é a relação da modulação da onda pela maré, tópico discutido no Capítulo 2. Uma análise comparativa dos três cenários mostra que o efeito da maré na atenuação da onda permanece no cenário hipotético de elevação do nível do mar, contudo, é desprezível no cenário de remoção dos recifes submersos, conforme mostra a Figura 41.

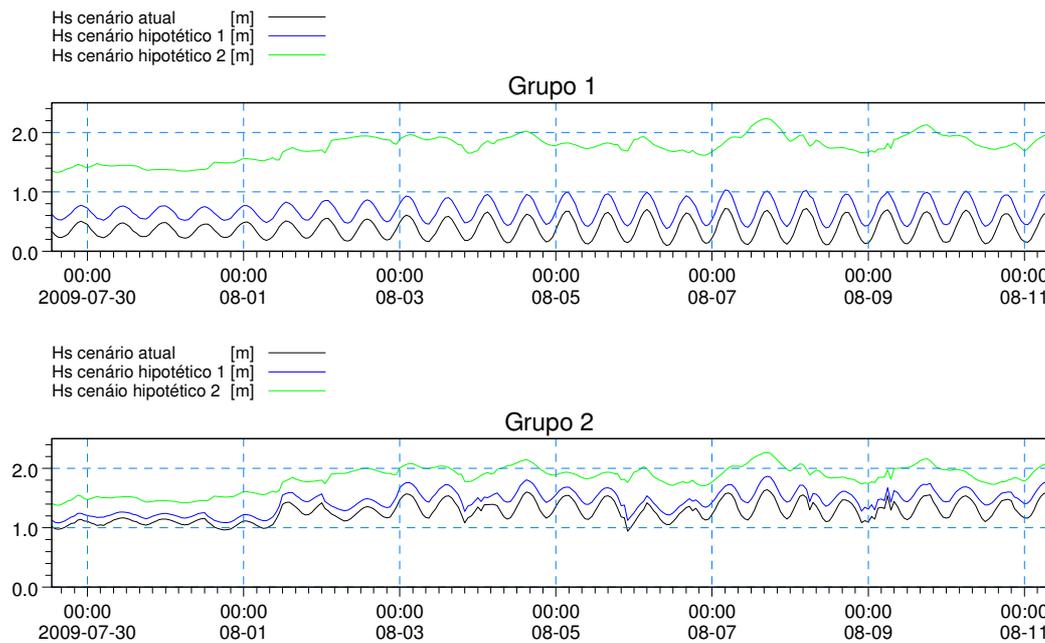


Figura 41. Série temporal do período de simulação para cada cenário em dois pontos distinto da costa: na área correspondente ao Grupo 1 e na área correspondente ao Grupo 2, posições definidas através da análise da geometria típica (Capítulo 1).

Isso demonstra um aspecto importante da dinâmica costeira em ambientes recifais, onde, a influência da maré nos processos de interação da onda com os recifes submersos, controla, em parte, a magnitude do transporte de sedimentos por deriva litorânea, os quais serão diferenciados em cada estágio de maré. Esta condição difere de um ambiente sem a presença de recifes submersos.

6. Conclusões

Neste capítulo a influência da estrutura recifal na transformação das ondas foi investigada com a utilização da modelagem numérica. Utilizou-se para tal o modelo MIKE 21 SW, que inclui a maioria dos processos físicos ocorrentes no campo de ondas durante sua propagação para águas rasas, além de permitir a construção de malhas flexíveis.

O processo de calibração permitiu verificar a qualidade dos dados modelados em relação aos dados registrados *in situ*, apresentados no Capítulo 2. Foi possível diminuir o bias e o RMSE de 0,62 e 0,65 para 0,35 e 0,36, respectivamente, para a altura da onda transmitida através do banco recifal submerso, demonstrando a importância desta etapa do trabalho na implementação do modelo. Considerando a porosidade dos recifes da região, tendo em vista suas características próprias de formar sistemas de

cavernas, é possível que a ausência de um termo para representar a porosidade no modelo, possa diminuir a acurácia dos resultados.

Os resultados das simulações do cenário atual, mostraram que a altura significativa da onda incidente ao longo da linha de costa não é uniforme. A maior parte da dissipação de energia ocorreu sobre o banco recifal submerso, entretanto em níveis diferentes, a depender de suas características geométricas. Adjacente à praia de Candeias, onde o recife possui a configuração de um recife de franja (Grupo 1), e com pouca profundidade de submersão ($\sim 0,5$ m), uma zona de sombra foi claramente identificada. Neste local encontra-se o ponto menos energético da costa. Adjacente à praia de Boa Viagem, onde o recife possui a configuração de um recife plataforma (Grupo 2), e a profundidade de submersão é maior (~ 4 m) encontra-se o ponto mais energético da costa.

A análise comparativa entre o cenário atual e o cenário hipotético de elevação do nível do mar em 1 m, mostrou que o coeficiente de transmissão da onda foi afetado, aumentando em até 70 % (na área do Grupo 1) . Nesta situação a onda atingiu a costa em até 46 % mais alta. No caso do cenário sem recifes submersos, notou-se claramente que, a altura da onda incidente na linha de costa foi consideravelmente maior (em até 74 %). As áreas protegidas pelos recifes submersos assumiram, nesta situação, características de mar aberto.

Os resultados obtidos permitem concluir, que os recifes influenciam significativamente a propagação do campo de ondas da região, sendo fator fundamental na quantidade de energia que irá incidir na linha de costa, e, portanto, nos processos de dinâmica costeira locais.

CAPÍTULO 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo geral analisar o papel dos recifes submersos de Recife e Jaboatão dos Guararapes na transformação das ondas, de forma a contribuir para a compreensão dos processos de dinâmica costeira ocorrentes na região. A motivação principal decorreu da necessidade do desenvolvimento de estudos que investigassem a complexidade da interação local entre ondas e recifes submersos, tendo em vista sua importância nos processos erosivos ocorrentes na região. Neste capítulo, os principais resultados dos capítulos anteriores serão apresentados de forma integrada, em conexão com a problemática da erosão costeira. Por fim, serão realizadas algumas recomendações de trabalhos futuros a serem desenvolvidos no litoral dessa região.

Os resultados apresentados e discutidos anteriormente permitiram avaliar e testar quantitativamente (através de dados *in situ* e modelagem numérica) o grau de influência que a presença dos recifes submersos do litoral de Recife e Jaboatão dos Guararapes provocam na atenuação do campo de ondas incidente.

O mapeamento batimétrico, realizado no Capítulo 1, mostrou que a plataforma interna de Recife e Jaboatão possui diversas linhas recifais. Entretanto, dada às suas proporções geométricas, a configuração com maior potencial de alterar a propagação das ondas na região é o banco recifal submerso, uma estrutura alongada (17 km de extensão) e disposta aproximadamente paralela à linha de costa (SW-NE) dos dois municípios. Essa estrutura apresenta variações de largura e elevação (800 m – 1500 m e 0,5 m - 4 m, respectivamente), exercendo, conseqüentemente, diferentes graus de influência na transmissão da onda. Sua complexidade geométrica está relacionada com o crescimento de organismos secretores de carbonato de cálcio (corais e algas calcárias), que se desenvolveram ao longo do tempo (Laborel, 1969). A análise de sua geometria típica demonstrou a existência de dois grupos geométricos distintos: o Grupo 1, localizado adjacente a praia de Candeias, apresentando configuração semelhante a um recife de franja, representando 25 % da área; e Grupo 2, localizado adjacente às praias de Piedade, Boa Viagem e Pina, apresentando configuração semelhante ao recife plataforma, representando 75 % da área.

Após a análise das características geométricas dos recifes submersos, foram realizados experimentos com o fundeio de ondógrafos/marégrafos em pontos específicos do Grupo 1 e 2 (Capítulo 2). Os dados de atenuação da altura da onda foram analisados quantitativamente, através do cálculo do coeficiente de transmissão. Os resultados

mostraram que a altura da onda após sua passagem pelo banco recifal submerso é modulada pela maré, com valores máximos e mínimos ocorrendo durante as marés altas e baixas, respectivamente. Foram observadas atenuações de até 60 % e 90 % durante as marés baixas (experimentos realizados no Grupo 1 e 2, respectivamente). A análise conjunta da geometria do recife, variação da maré e características das ondas incidentes, permitiu a elaboração de uma equação empírica (Equação 25, Capítulo 2), para estimar a altura da onda após sua passagem pelo banco recifal submerso, tendo-se como variáveis independentes a altura e período da onda incidente na estrutura, a elevação do recife, largura do topo e a oscilação da maré. Os resultados da validação mostraram um erro médio absoluto de 7 %, com índice de correlação, bias e RMSE iguais a 0,941, 0,001 e 0,091, respectivamente.

A implementação do modelo numérico MIKE 21 SW na área de estudo (Capítulo 3) permitiu analisar de forma sinótica os processos físicos atuantes na propagação das ondas ao longo da plataforma continental, e avaliar comparativamente a dissipação de energia em três cenários diferentes: atual, de elevação de 1 m do nível do mar, e sem a presença dos recifes submersos.

A análise dos aspectos gerais da transformação das ondas na zona recifal revelou pontos de convergências dos raios de ondas ao longo do banco recifal submerso. Foi observado também, que a distribuição da altura significativa da onda ao longo da costa não é uniforme. O local de menor ponto altura (e energia) incidente foi na praia de Candeias, enquanto que as maiores alturas situaram-se na praia de Boa Viagem. A comparação entre os cenários mostrou que altura significativa da onda incidente na linha de costa aumentou em até 0,4 m no caso da hipótese de elevação do nível médio do mar em 1 m. Os resultados para o cenário de remoção dos recifes submersos indicaram um acréscimo de altura significativa da onda incidente de 1,6 m. Na comparação do primeiro caso os resultados mostraram um aumento médio de até 70 % no coeficiente de transmissão da onda. No segundo caso, verificou-se maior uniformidade na altura da onda incidente, onde a modulação da onda pela maré não é significativa.

A partir da análise dos resultados dos capítulos anteriores, ficou evidente que a presença dos recifes influencia significativamente a propagação das ondas no litoral estudado, induzindo a dissipação de sua energia e mudanças em sua direção. Como consequência, a presença dessas estruturas fazem com que as ondas atinjam a linha de costa com energia inferior. A magnitude dessa influência está relacionada com a geometria do recife, o nível do mar e as características das ondas incidentes, e em maior escala espacial, relacionada também com os processos refração das ondas. Essas interações são de grande importância no estudo da dinâmica costeira local e, portanto, também no de erosão costeira, tendo em visto as implicações acerca do nível de proteção que essas estruturas podem fornecer a um ambiente praias.

Conforme destacado por Bragard (1995), como a Região Metropolitana do Recife apresenta problemas de erosão costeira, tende-se a supor que os recifes naturais não funcionam como estruturas de proteção costeira, mas é certo que a situação seria mais grave caso estes não existissem (Bragard, 1995). De fato, os resultados dos Capítulos 2 e 3 mostram que os recifes dissipam uma fração importante da energia da onda. Contudo, uma questão pertinente diz respeito à evolução temporal desta capacidade natural de proteção da praia. Sheppard *et al.* (2005) verificaram, por exemplo, que as praias protegidas por recifes estavam recebendo ondas com maior energia que antigamente, atribuindo como causas principais: 1 – mortalidade em massa dos corais; e 2 – aumento progressivo do nível médio do mar. Esses dois fatores em conjunto contribuem para que a profundidade de submersão (F) (abordada no Capítulo 2) aumente, com conseqüente aumento no coeficiente de transmissão das ondas (K_t). Na presente área de estudo, é possível que esses dois fatores estejam, também, ocorrendo. De acordo com medições do nível médio do mar durante um período de 41 anos, Harari & Camargo (1994) estimaram que o nível do mar próximo a cidade do Recife está aumentando a uma taxa de 5,2 mm/ano. Com relação à mortalidade dos corais, estima-se que nos últimos 40 anos, mais de 80 % da quantidade de corais tenha desaparecido, devido, sobretudo a diversas formas de impacto antrópico (Ferreira & Maida, 2006).

Considerando os fatores supracitados, é possível que parte da erosão costeira observada hoje na área de estudo, esteja relacionada com o aumento da profundidade de submersão, e, portanto, na menor capacidade de dissipação de energia da onda provocada pelos recifes submersos. Isto implicaria em um declínio no grau de proteção fornecido pelos recifes nos últimos anos, e, conseqüentemente, no reajuste na configuração da linha de costa.

Recomenda-se que, para o aprofundamento das questões relacionadas aos processos erosivos, sejam realizadas medições de deriva litorânea, em diferentes estágios de maré e ao longo do litoral, tendo como base, a influência dos recifes submersos na dinâmica costeira. A dinâmica de espraiamento constitui outro tópico de interesse, tendo em vista que a magnitude no *run-up* esteja também relacionada com as interações de dissipação de energia da onda ocasionada pelos recifes. No tocante, especificamente, à capacidade de representação numérica dos processos de transmissão da onda através dos recifes, recomenda-se a análise do efeito da porosidade da estrutura recifal como fator de atenuação da onda.

REFERENCIAS

- ABDALLA, S.; BIDLOT, J. R.; JANSSEN, P. 2006. Global Validation and Assimilation of ENVISATASAR Wave Mode Spectra. *Advances in SAR Oceanography from ENVISAT and ERS Missions (SEASAR)*. Frascati- Italy, 23 - 26.
- ANDREW, C. J. F. 1999. Bibliographic Review of Nearshore Wave Models. Report. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory. 45 p.
- ARMONO, H. D.; HALL, K. R. 2001. Wave transmission on submerged breakwaters made of hollow hemispherical shape artificial reefs. *Canadian Coastal Conference. Waves at Artificial Reefs*. 13 p.
- BARROSO, C. P. 2007. Refração de ondas e deriva litorânea na região de Caravelas, BA. *Monografia de Graduação*. Universidade de São Paulo. São Paulo – Brasil. 41 p.
- BATTJES, J. A.; JANSSEN, P. F. M. 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *In: Proc. 16th Int. Conf. On Coastal Eng., ASCE, NY*, 569-587.
- BAUER, E.; HASSELMANN, S.; HASSELMANN, K.; GRABER, H. C. 1992. Validation and assimilation of Seasat altimeter wave heights using the WAM wave model. *Journal of Geophysical Research*, 97: 12671-12682.
- BAUER, E.; STAABS, C. 1998. Statistical properties of global significant wave heights and their use for validation. *Journal of Geophysical Research*, 103: 1153-1166.
- BEAMSLEY, B.; BLACK, K. P. 2003. The effect of offshore reefs on inshore surfing conditions. *In: Proceedings for the 3rd International Artificial Surfing Reef Conference, Raglan, New Zealand, June 23-25*.
- BLACK, K. P. 2001. Natural and artificial reefs for surfing and coastal protection. *Journal of Coastal Research*, Editor: SI 29.
- BORBA, A. L. S. 1999. Estudos sedimentológicos, morfodinâmicos e da vulnerabilidade das praias de Piedade, Candeias e Barra de Jangadas – Município de Jaboatão dos Guararapes – PE. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – Brasil. 152 p.
- BRAGARD, A. S. 1992. Possíveis impactos na Região Metropolitana do Recife devido à elevação de um metro no nível relativo do mar. *Monografia de Graduação*. Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – Brasil. 90 p.
- BRAGARD, A. S. 1995. Modelo numérico de transmissão de ondas sobre estruturas submersas: aplicação ao litoral da Região Metropolitana do Recife. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – Brasil. 70 p.
- CARANNANTE, G.; ESTEBAN, M.; MILLIMAN, J. D.; SIMONE L. 1988. Carbonate litofacies as paleolatitude indicators: problems and limitations. *Sedimentary Geology*, 60: 333-346.

CASTRO, C. B. 1999. Recifes de Coral – Relatório-base de workshop nacional sobre os *recifes de coral* brasileiros. 101 p. Disponível em: www.anp.gov.br, acessado em: jan/2009.

CHLUDINSKI, A.; BONETTI, J. 2002. Aplicação de um modelo digital de terreno na caracterização do relevo submerso da Reserva Biológica Marinha do Arvoredo e Baía de Tijucas - SC. *Gerenciamento Costeiro Integrado*, 2: 13-14.

CHU, P.; Qi, Y.; CHEN, Y.; SHI, P.; MAO, Q. 2004. South China Sea wind-wave characteristics. 1. Validation of Wavewatch-III using TOPEX/Poseidon data. *Journal of Atm. Ocean. Tech.* 21: 1718-1733.

COSTA, M. B. S. F.; PONTES, P. M.; ARAUJO, T. C. M. 2008. Monitoramento da linha de preamar das praias de Olinda - PE (Brasil) como ferramenta à gestão costeira. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 8(2): 101-112.

COWELL, P. J.; THOM, B. G. 1994. Morphodynamics of coastal evolution. *In: Carter, R.W.G., and Woodroffe, C.D. (eds.), Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 33–86.

D'ANGREMOND, K.; VAN DER MEER, J. W.; JONG, R. J. 1996. Wave transmission at low-crested structures, 25th Int. Conf. on Coastal Eng., Orlando, Florida, pp. 25-56.

DALLY, W.R.; DEAN, R.G.; DALRYMPLE, R.A. 1985. Wave height variation across beaches of arbitrary profile. *Journal of Geophysical Research*, 90(C6): 11917-11927.

DHI. 1998. MIKE 21 – User guide and reference manual, release 2.7. Technical report, Danish Hydraulic Institute. Denmark, 98 p.

DOMINGUEZ, J. M. L. BITTENCOURT, A. C. S.; LEÃO, Z. M. N. A.; AZEVEDO, A. E. G., 1990. Geologia do Quaternário costeiro do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geociências*, 20: 208-215.

ENARI, E. H.; TRAVELHO, J. S. 2001. Estudo sobre a geração de malhas tetraedrais não estruturadas para a modelagem tridimensional de problemas de fenômenos de transporte com o método de volumes finitos. *In: Anais do I WORCAP, INPE, São José dos Campos*, p. 76-78.

FAÇANHA, P. 2007. Modelagem matemática da circulação na região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 109 p.

FERNANDO, H. J. S.; SAMARAWICKRAMA, S. P.; BALASUBRAMANIAN, S.; HETTIARACHCHI, S. S. L.; VOROPAYEV, S. 2008. Effects of porous barriers such as coral reefs on coastal wave propagation. *Journal of Hydro-environment Research*, 1: 187-194.

- FERRANTE, I. V. 2007. Spectral analysis on wave transmission behind submerged breakwaters. Tese de doutorado. Univerità Degli di Napoli. Nápoles – Itália. 129 p.
- FERREIRA, B. P.; MAIDA, M. 2006. Monitoramento dos recifes de coral do brasil: situação atual e perspectivas. Ministério do Meio Ambiente: Brasília, 120 p.
- FINEP/UFPE. 2008. Monitoramento Ambiental Integrado – MAI-PE. Relatório Técnico Preliminar – Vols. 1, 2 e 3. Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, Recife, 383 pp.
- GARCIA, N.; LARA, J. L.; LOSADA, I. J. 2004. 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested breakwaters. *Coastal Engineering*, 51(10): 991-1020.
- GERRITSEN, F. 1981 Wave attenuation and wave set-up on a coastal reef. Look Lab. Tech. Report n. 48, University of Hawaii Sea Grant Program, University of Hawaii.
- GIRONELLA, X.; SÁNCHEZ-ARCILLA, A. 2000. Hydrodynamic behaviour of submerged breakwaters: some remarks based on experimental results. *Coastal Structures '99*, Balkema, Santander, 891-6 pp.
- GLYNN, P. W. 1997. Bioerosion and coral reef growth. *In*: Birkeland, C (ed.) *Life and Death of Coral Reefs*. Chapman & Hall, New York, p. 68-95.
- GODA, Y.; SUZUKI, Y. 1977. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *In*: 15 International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, p. 828- 845.
- GOURLAY, M. R. 1994. Wave transformation on a coral reef. *Coastal Engineering*, 23: 17–42.
- GORLAY, M. R. 1996a. Wave set-up on coral reefs. 1. Set-up and wave-generated flow on an idealised two dimensional horizontal reef. *Coastal Engineering*, 27: 161-193.
- GORLAY, M. R. 1996b. Wave set-up on coral reefs. 2. Set-up on reefs with various profiles. *Coastal Engineering*: 28: 17-55.
- GOURLAY, M. R. 1997. Wave set-up on coral reefs: some practical applications. *In*: *Proceedings of the 13th Australian Coastal and Ocean Engineering Conference*, Christ church, p. 959-964.
- GORLAY, M. R.; COLLETER, G. 2005. Wave-generated flow on coral reefs —an analysis for two-dimensional horizontal reef-tops with steep faces. *Coastal Engineering*, 52: 353–387.
- GREGÓRIO, M. N.; ARAÚJO, T. C. M.; VALENÇA, L. M. M. 2004. Variação sedimentar das praias do Pina e de Boa Viagem, Recife (PE) - Brasil. *Tropical Oceanography*, 32: 39-52.
- GREGÓRIO, M. N. 2009. Evolução da linha de costa e caracterização da plataforma continental interna adjacente a cidade do Recife – PE. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – Brasil. 191 p.

- GROENEWOUD, P.; MELGER, F. 2009. Validation of the global database. Relatório Técnico. BMT ARGOS. Disponível em: www.waveclimate.com. Acesso em: Jun/2009.
- HAIR Jr., J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. 2005. Análise Multivariada de Dados. 5a. Ed. (trad.). Porto Alegre: Bookman, 598 p.
- HARARI, J.; CAMARGO, R. Tides and means sea level in Recife (PE) – 8°33'S 34°51,9W – 1946 to 1988. Boletim do Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. Disponível em: www.mares.io.usp.br. Acesso em: Mar/2009.
- HARDY, T. A.; YOUNG, I. R. 1991. Modelling spectral wave transformation on a coral reef flat. *In: Proceedings of the 1991 Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering*, p.345–350.
- HARDY, T. A.; YOUNG, I. R. 1996. Field study of wave attenuation on an offshore coral reef. *Journal of Geophysical Research*, 101(C6): 311–326.
- HOLTHUIJSEN, L. H.; BOOJI, N.; HERBERS, T. H. S. 1989. A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering Journal*, 13: 23–54.
- HOLTHUIJSEN, L. H.; HERMAN, A.; BOOIJ, N. 2003. Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models. *Coastal Engineering*, 49: 291–305.
- HUGHES, S. A. 1993. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. The Physical Science Basis. Disponível em: <http://www.ipcc.un.org>. Acesso em: Jan/2009. 881 p.
- INNOCENTINI, V.; ARANTES, F. O; FERREIRA, R. J.; MICHELETO, R. G. 2005. A agitação marítima no litoral nordeste do Brasil associada aos distúrbios africanos de leste. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(3): 367-374.
- INPE – Instituto nacional de Pesquisas Espaciais. Plataforma de Coleta de dados. Estação de Olinda. Disponível em: www.cptec.inpe.br. Acessado em: Set/2009.
- JAMES, N. R. 1983. Reef environment. *In: SCHOLLE, P.A., BEBOUT, D.G.; MOORE, C.H. (eds.) Carbonate Depositional Environments*. Tulsa, AAPG Memoir 33. p. 346-462.
- JENSEN, O. 1991. Waves on coral reefs. *In: Proc. 7th Symp. Coastal and Ocean Management - Coastal Zone*, Long Beach. AXE, New York, 3: 2668-2680.
- JOHNSON, H.; ENGEN, G.; CHAPRON, B.; WALKER, N.; CLOSA, J.. 2003. Validation of ASAR wave mode level 2 product. *In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS*. Volume: 2, p. 1127- 1129.
- JOHNSON, H. K. 2006. Wave modeling in the vicinity of submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 53: 39–48.

- JONES, O. P.; PETERSEN, O. S.; KOFOED-HANSEN, H. 2007. Modelling of complex coastal environments: Some considerations for best practices. *Coastal Engineering*, 54: 717–733.
- JOSE, F., KOBASHI, D.; STONE, G. W., 2007. Spectral wave transformation over an elongated sand shoal off south-central Louisiana, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, 50: 757 – 761.
- KENCH, P. S.; BRANDER, R. W. 2006. Wave processes on coral reef flats on Coral Reef Flats: implications for reef geomorphology using Australian case studies. *Journal of Coastal Research*, 22(1): 209-223.
- KOBAYASHI, N.; OTTA, A.; ROY, I. 1987. Wave reflection and run-up on rough slopes. *Journal of Waterway Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 113(3): 282-297.
- KOBAYASHI, N; WURJANTO, A. 1989. Wave transmission over submerged breakwaters. *Journal of Waterway, Portand Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, New York*, 1155: 662-680.
- KOMAR, P. 1998. Beach processes and sedimentation. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 544 p.
- LABOREL, J. 1967. Les peuplements de Madréporaires des côtes tropicales du Brésil. Thèse Docteur. Université d'Aix-Marseille, Marseille – France. 313p.
- LABOREL, J., 1969. Madréporaires et hydrocoralliaires recifaux des brasiennes: systematique, ecologie, repartition verticale et geographie. *Anns Inst Oceanogr, Paris*, 47: 171 - 229.
- LEÃO, Z. M. A. N., 1996. The coral reefs of Bahia: morphology, distribution and the major environmental impacts. *An. Acad. bras.*, 68(3): 339-452.
- LEE, J. L., 1993 Wave-current interaction and quasi-three-dimensional modeling in nearshore zone. Ph.D. Dissertation. University of Florida. Gainesville – EUA. 157p.
- LEE, T. T.; BLACK, K. P., 1978. The energy spectra of surf wave sona coral reef. *In: Proc. 16th Int. Conf. Coast. Eng. ASCE, Hamburg*, p. 588–608.
- LEE, J. L.; TENG, M. H.; KANG, L. N. 2005. Modeling of sediment transport in a coral reef environment. *Journal of Coastal Research*, SI(42): 303-308.
- LEGRAND, S.; DELEERSNIJDER, E.; HANERT, E.; LEGAT, V.; WOLANSKI, E. 2006. High-resolution, unstructured meshes for hydrodynamic models of the Great Barrier Reef, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68: 36-46.
- LEWIS, A., 2001. Great Barrier Reef depth and elevation model: GBRDEM, Technical Report 33. CRC Reef Research Centre Ltd., Townsville, Australia, 58 p.
- LIN, P.; LIU, P.L. 1998. A numerical study of breaking waves in the surf zone. *Journal of Fluid Mechanics*, 359: 239-264.

- LIRA, A. R. A. 1997. Caracterização morfológica e vulnerabilidade do litoral entre as praias de enseadilha e Marinha Farinha, Paulista – PE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – Brasil. 106 p.
- LONGUET-HIGGINS, M. S., 1970. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. *Journal of Geophysics Research*, 75(33): 6778-6789.
- LOWE, R. J.; FALTER, J. L.; BANDET, M. D.; PAWLAK, G.; ATKINSON, M. J.; MONISMITH, S. G.; KOSEFF, J. R. 2005. Spectral wave dissipation over a barrier reef. *Journal of Geophysical Research*, 110: 1-16.
- LUGO-FERNÁNDEZ, A.; ROBERT, H. H.; WISEMAN, W. J. Jr. 1998. Tide effects on wave attenuation and wave set-up on a caribbean coral reef. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47: 385–393.
- MACEDO, E. C. 2009. Um ensaio sobre a sedimentação e suas implicações ecológicas nos recifes costeiros da baía de Tamandaré/PE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – Brasil. 144 p.
- MAIDA M.; FERREIRA, B. P. 1997. Coral reefs of Brazil: an overview. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, Panama, 1: 263-274.
- MAIDA, M; FERREIRA B. P. 2004. Os recifes de coral brasileiros. *In: Leça, E.E.; Neumann-Leitão, S.; Costa, M. F. (Ed.) Oceanografia – Um Cenário Tropical*, Recife. Ed. Bargaço, p. 617-640.
- MALLMANN, D. L. B. 2008. Vulnerabilidade das praias de Recife à erosão. Monografia de Especialização. Universidade Federal de Pernambuco. Recife - Brasil. 58 p.
- MANSO, V. A. V.; COUTINHO, P. N.; LIMA, A. T.; MEDEIROS, A. B.; BORBA, A. L.; LIRA, A. R. A.; PEDROSA, F. J.; MARTINS, M. H.; CHAVES, N. S.; DUARTE, R. X.; ALMEIDA, L. E. S. B.; TOLDO, JR. E. E.; IVO, P. S. 1995. Estudo da erosão marinha na praia de Boa Viagem. Convênio EMLURB/FADE/LGGM-UFPE. Relatório Final. 106 p.
- MANSO, V. A. V. 2003. Definição dos pontos de contorno da linha de preamar máxima atual do litoral do município de Ipojuca – PE. Relatório final. Termo de referência MMA/PNMA II - SECTMA Nº 249. Recife. 36 p.
- MASSEL, S. R.; BRINKMAN. R. M. 2001. Wave-induced set-up and flow over shoals and coral reefs. Part 1. A simplified bottom geometry case. *Oceanologia*, 43: 373-388.
- MASSEL, S. R.; GOURLAY, M. R. 2000. On the modelling of wave breaking and set-up on coral reefs. *Coastal Engineering*, 39: 1-27.
- MASSELINK, G. 1998. Field investigation of wave propagation over a bar and the consequent generation of secondary waves. *Coastal Engineering*, 33: 1-9.
- MEAD, S.; BLACK, K.; SCARFE B.; FRAZERHURST. J. 2003. The effects of wave focussing on surfing reef site selection, surfing wave quality and ASR design at scales of inner continental shelf to sub-tidal reef. *In: Proceedings of the 3rd International Surfing Reef Symposium*, Raglan, New Zealand. p. 115-137.

- MOLLER, I.; SPENCER, T.; FRENCH, J.R.; LEGGETT, D.J.; DIXON, M. 1999. Wave transformation over salt marshes; a field and numerical modelling study from Norfolk, England. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 49: 411-426.
- MONISMITH, S. G. 2007. Hydrodynamics of coral reefs. *Annu. Rev. Fluid Mech*, 39: 37–55.
- NELSON, R. C.; GONSALVES, J. 1992. Surf zone transformation of wave height to water depth ratios. *Coastal Engineering*, 17: 49- 70.
- NELSON, R. C. 1994. Depth limited design significant wave heights in very flat regions. *Coastal Engineering*, 23: 43–59.
- NELSON, R. C. 1999. Hydraulic roughness of coral reef platforms. *Applied Ocean Research*, 19: 265–274.
- NEVES, C. F.; MUEHE, D. 1995. Potencial impacts of sea-level rise on the Metropolitan Region of Recife, Brazil. *Journal of Coastal Research*, (SI) 14: 116-131.
- PARK, H. 2001. A new ocean wave validation methods using satellite retrieved data. In: *The Sixth OMISAR Workshop on Ocean Models*. Beijing, China. p. 11-14
- PONTES, P. M. 2008. Morfologia e sedimentologia das praias do litoral sul do município de Olinda-PE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – Brasil. 98 p.
- RAMANUJAM, N.; SUDARSAN, A. R. 2003. A study of coastal transformation at Tuticorin as a result of emerged and submerged natural breakwaters of Van Island, Gulf of Mannar. *Environmental Geology*, 43: 521–525.
- RAUBENHEIMER, B.; GUZA, R. T.; ELGAR, S. 1996. Wave transformation across the inner surf zone. *Journal of Geophysical Research*, 101: (C10), 25589–25597.
- ROBERTS, H. H.; MURRAY, S. P.; SUHAYDA, J. N. 1975. Physical processes in a fringing reef system. *Journal of Marine Research*, 33: 233–260.
- ROBERTS, H. H., MURRAY, S. P., SUHAYDA, M. 1977. Physical processes in afore-reef shelf environment. In: *Proc.3rd Int. Coral Reef Symp*. Miami, p.507–515.
- ROBERTS, H. H.; SUHAYDA, J. N. 1983. Wave-current interactions on a shallow reef (Nicaragua, Central America). *Coral Reefs*, 1: 209–214.
- ROLLNIC, M. 2002. Hidrologia, clima de onda e transporte advectivo na zona costeira de Boa Viagem, Piedade e Candeias - PE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – Brasil. 55p.
- RUGBJERG, M.; SØRENSEN, O. R.; JACOBSEN, V. 2006. Wave forecasting for offshore wind farms. In: *9th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, Victoria, B.C. Canada, p. 24-29.
- SALLENGER, A. H.; HOIMAN, R. A. 1985. Wave energy saturation on a natural beach of variable slope. *Journal of Geophysical Research*, 90(C6): 11939-11944.

- SEELIG, W. N. 1983. Wave reflection from coastal structures. Proceedings of Coastal Structures 83 Conference, New York, USA, 961-973 p.
- SHARP, J. J. 1981. Hydraulic Modelling, Butterworths, London, UK. 242 p.
- SHEPPARD, C.; DIXON, D. J.; GOURLAY, M.; SHEPPARD, A.; PAYET, R. 2005. Coral mortality increases wave energy reaching shores protected by reef flats: Examples from the Seychelles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64: 223-234.
- SHIRLAL, K. G.; RAO, S.; MANU. 2007. Ocean Wave transmission by submerged reef – a physical model study. *Ocean engineering*, 34: 2093-2099.
- SMITH, J. M. 1993. Nearshore wave breaking and decay, Coastal Engineering Research Center. U.S. Army Corps of Engineers. 53 p.
- SMITH, E. R.; KRAUS, N. C. 1991. Laboratory study of wave-breaking over bars and artificial reefs. *J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng.*, 117: 307-325.
- SORENSEN, O. R.; KOFOED-HANSEN, H.; RUGBJERG, M.; SORENSEN, L. S., 2004. A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique. *International Conference on Coastal Engineering Proceedings*. 29: 894-906.
- STOKES G. G., 1847. On the theory of oscillatory waves. *Camb. Trans*, 8: 441–473.
- STONE, G. W.; ZHANG. X.; SHREMET, A., 2005. The role of barrier islands, muddy shelf and reefs in mitigating the wave field along coastal Louisiana. *Journal of Coastal Research*, SI(44): 40-55.
- STORLAZZI, C. D.; OGSTON, A. S.; BOTHNER, M. H.; FIELD, M. E.; PRESTO, M. K., 2004. Wave and tidally-driven flow and sediment flux across a fringing coral reef: Southern Molokai, Hawaii. *Continental Shelf Research*, 24: 1397-1419.
- STORLAZZI, C. D.; FIELD, M. E.; DYKES, J. D.; JOKIEL, P. L.; BROWN, E. 2002. Wave Control on Reef Morphology and Coral Distribution: Molokai, Hawaii. *WAVES 2001 Conference Proceedings*, American Society of Civil Engineers, San Francisco, California, 1: 784-793.
- SWAIL, V. R.; CECCACCI, E. A.; COX, A. T. 2000. THE AES40 NORTH ATLANTIC WAVE REANALYSIS: VALIDATION AND CLIMATE ASSESSMENT. 6th International Workshop On Wave Hindcasting and Forecasting November 6-10, 2000 Monterey, California, USA. 17 p.
- TAKAYAMA, T. 1977. Wave deformation on the reef coasts, Tech. Report of the Port and Harbor. 38 p.
- THORNTON, E. B.; GUZA, R. T., 1982. Energy saturation and phase speeds measured on a natural beach, *Journal Geophysical Research*, 87: 9499–9508.
- TING, C. L.; LIN, M. C.; CHENG, C. Y. 2004. Permeable submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 50: 213–224
- TOLMAN, H. L. 2002. User manual and system documentation of WaveWatch – III version 2.22. Technical note, ncep-noaa, 133p.

TSUKAYAMA T. & NAZAKA. M. 2009. Wave transformations on coral reefs. Coastal Engineering 2000. Disponível em: <http://www.ascelibrary.org>. Acessado em: Out/2009

VAN DER MEER, J. W. 1991. Stability and transmission at low-crested structures. Delft Hydraulics Publication. 53 p.

WIEGEL, R. L. 1964. Oceanographical engineering. Prentice Hall, 532 p.

WOLANSKI, E.; BRINKMAN, R.; SPAGNOL, S.; MCALLISTER, F.; STEINBERG, C.; SKIRVING, W.; DELEERSNIJDER, W., 2003. Merging scales in models of water circulation: perspectives from the Great Barrier Reef. Advances in Coastal Modeling, 411-429.

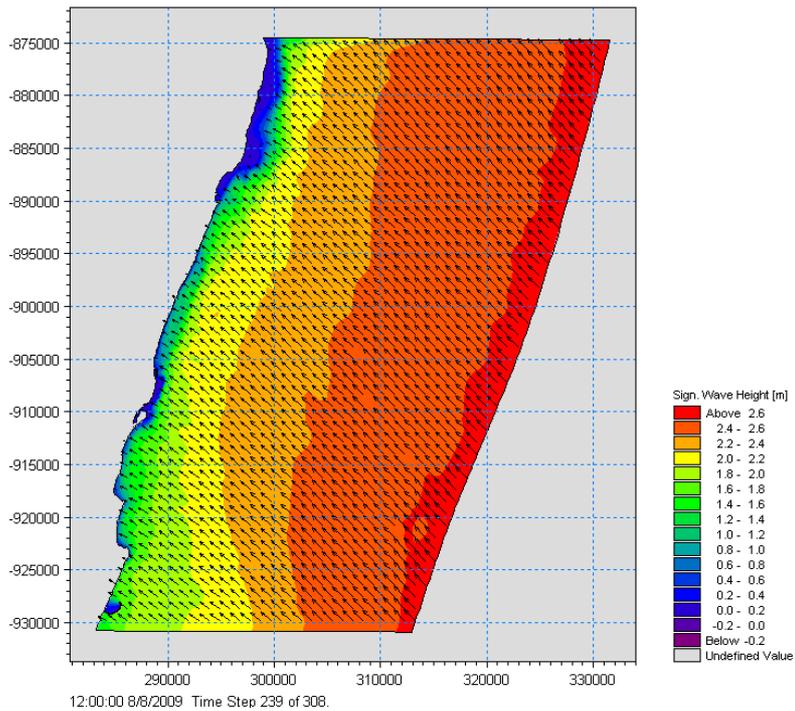
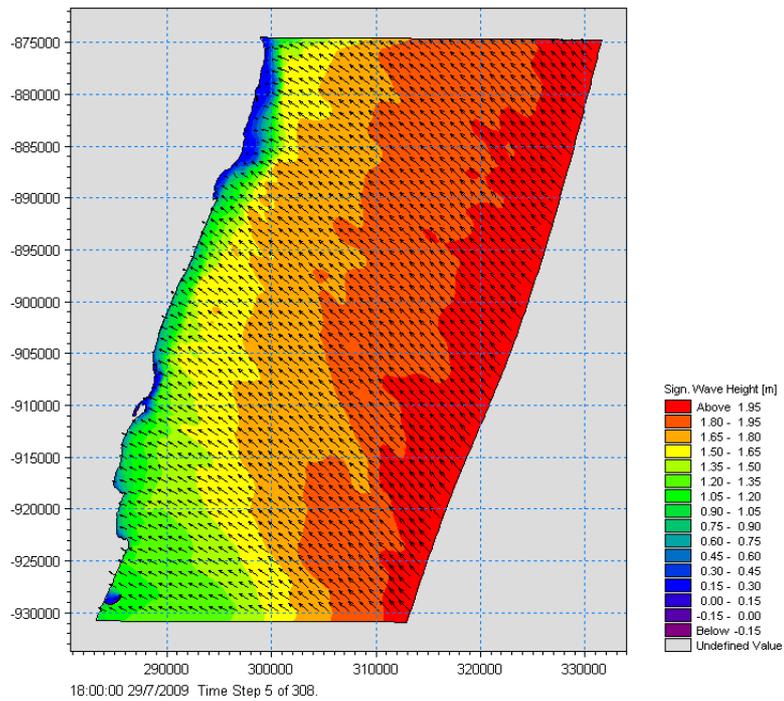
WRIGHT, L. D.; THOM, B., 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. Progress in Physical Geography, 1: 412–459.

YOUNG, I. R. 1989. Wave transformation over coral reefs, Journal of Geophysical Research, 94(C7): 9779-9789.

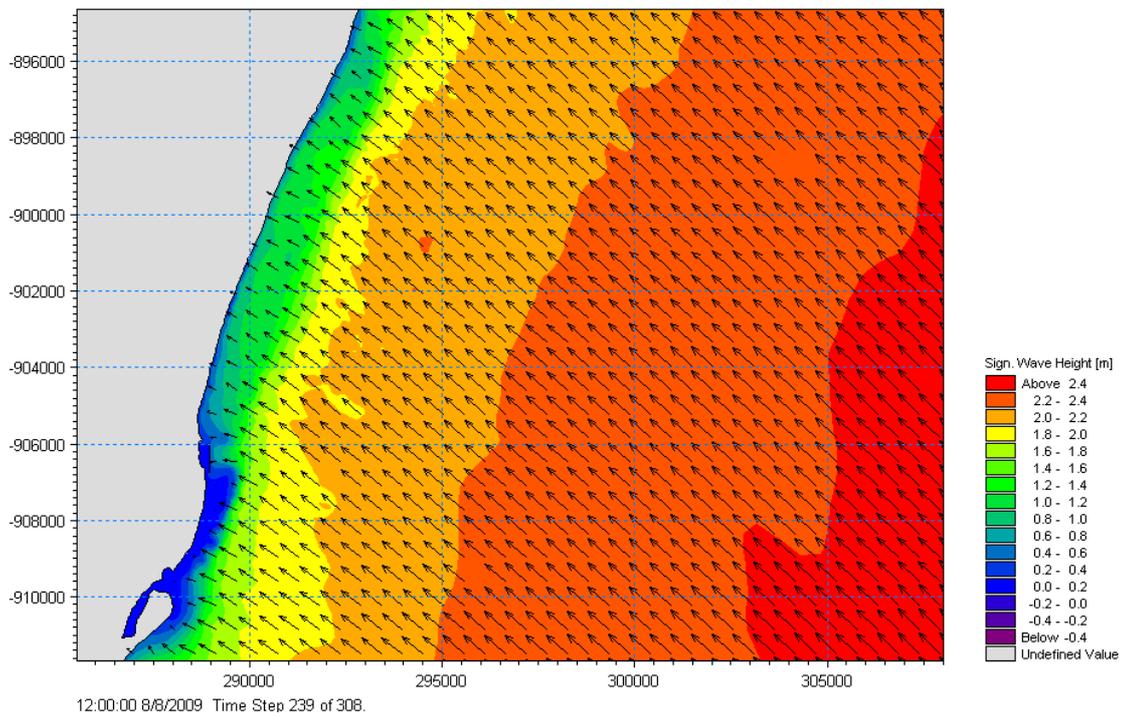
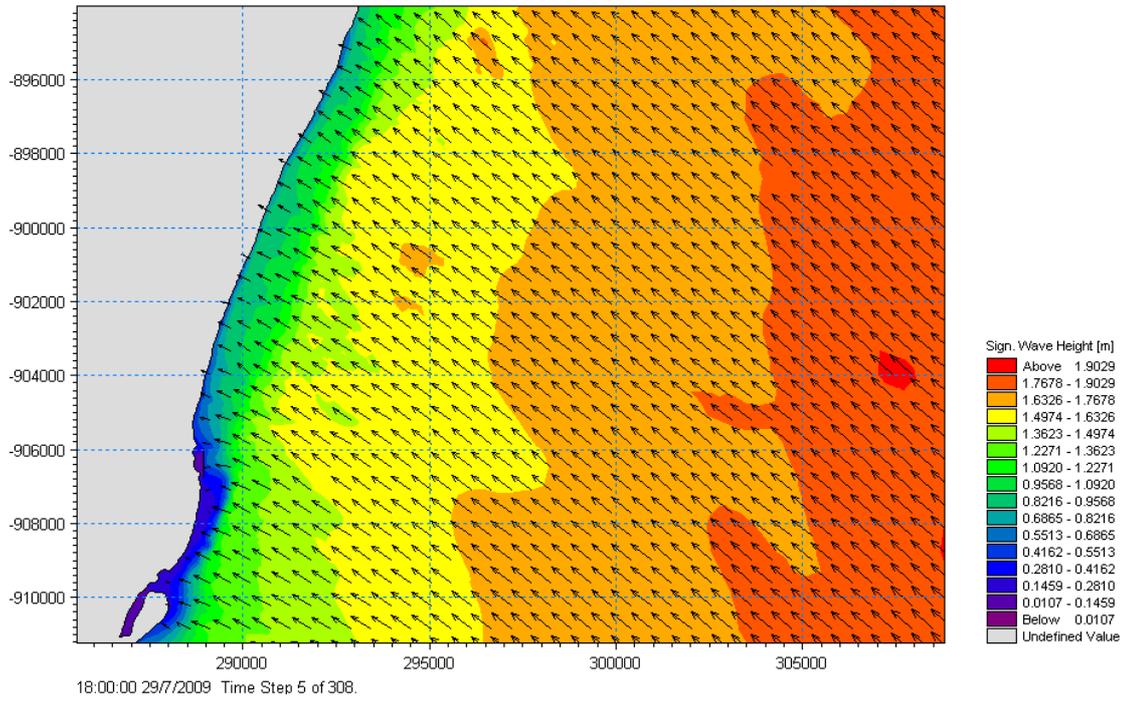
ZIJLEMA, M.; VANDERWESTHUYSEN, A. J. 2005. On convergence behaviour and numerical accuracy instationary SWAN simulations of near shore wind wave spectra. Coastal Engineering, 52(3): 237–256.

ANEXOS

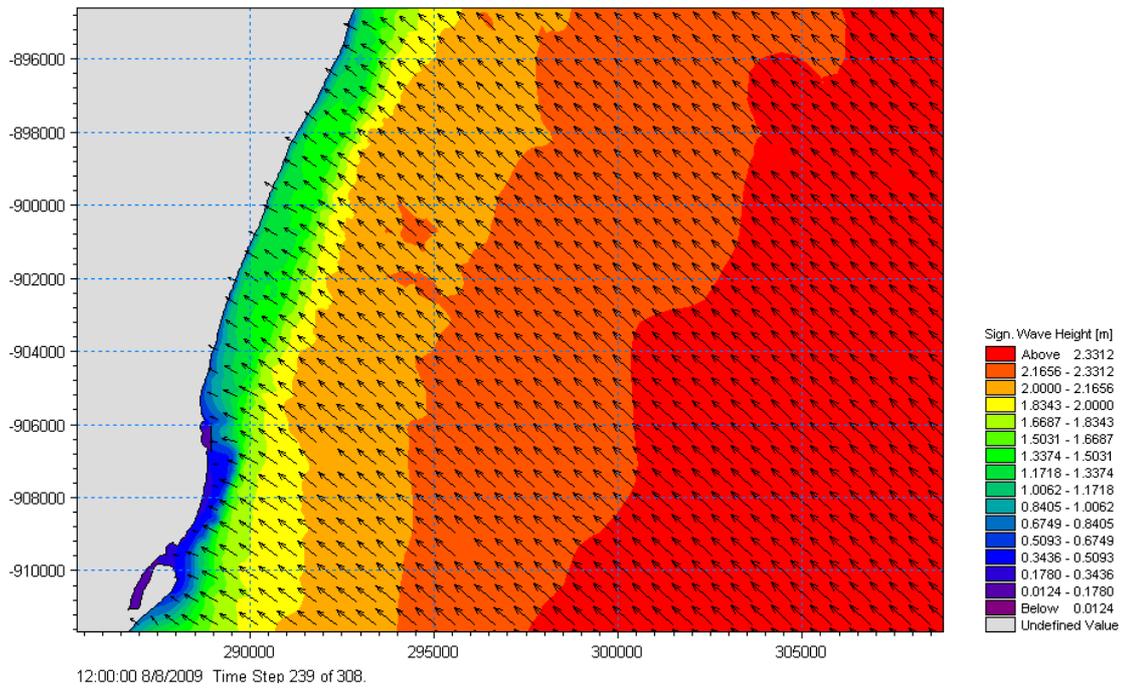
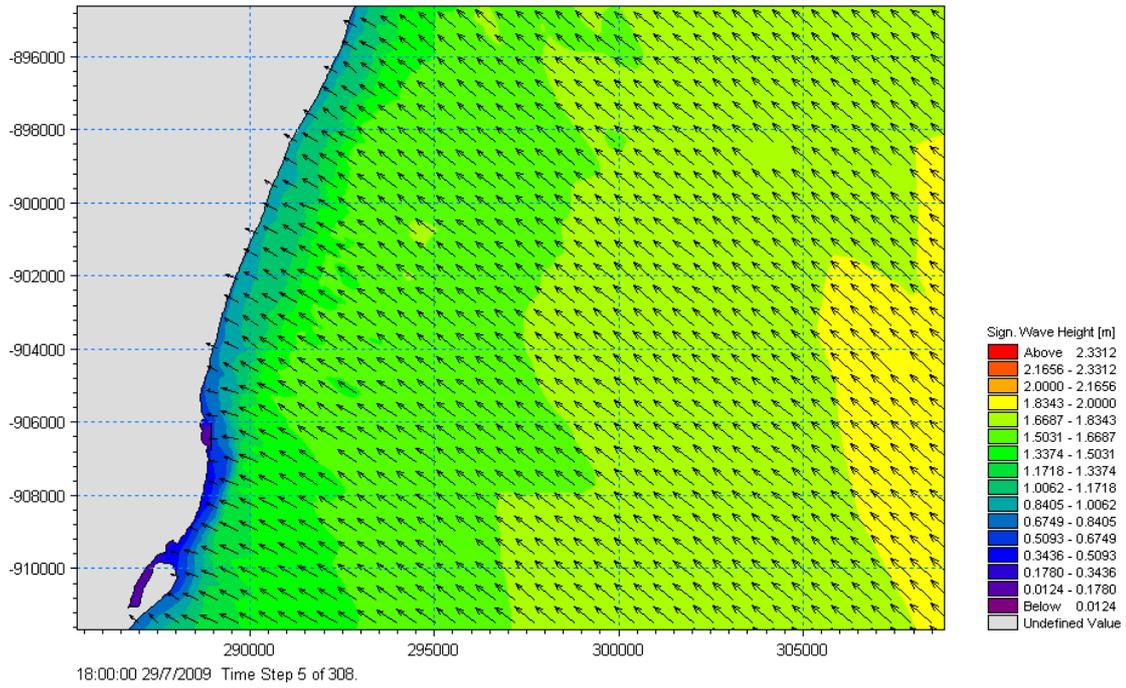
ANEXO A – CAMPO DE ONDAS SIMULADAS NO CENÁRIO ATUAL EM TODO O DOMÍNIO MODELADO



ANEXO B – CAMPO DE ONDAS SIMULADAS NO CENÁRIO ATUAL COM DESTAQUE NA ZONA DE INTERESSE



ANEXO C – CAMPO DE ONDAS SIMULADAS NO CENÁRIO HIPOTÉTICO DE ELEVÇÃO DE 1 M NO NÍVEL MÉDIO DO MAR



ANEXO D- CAMPO DE ONDAS SIMULADAS NO CENÁRIO HIPOTÉTICO DE REMOÇÃO DOS RECIFES SUBMERSOS NATURAIS

