

**MARCOS GÂNDOR PORTO LIMA**

**CONTROLE DA EROSÃO EM PRAIAS ARENOSAS PELO MÉTODO DE RECIFES  
SUBMERSOS: PRAIA BRAVA DE MATINHOS – PR**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pelo aluno Marcos Gândor Porto Lima, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

**Orientador:** Prof. Dr. Eduardo Marone

**PONTAL DO PARANÁ  
2008**

L732 Lima, Marcos Gândor Porto, 1973-  
Controle da erosão em praias arenosas pelo método de recifes submersos: Praia Brava de Matinhos, PR / Marcos Gândor Porto Lima. – Pontal do Paraná, 2008. xv, 81 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Marone.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Centro de Estudos do Mar. Programa de Pós-graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

1. Erosão costeira. 2. Recifes artificiais - Paraná. 3. Modelagem numérica. 4. Oceanografia física. I. Título. II. Marone, Eduardo. II. Universidade Federal do Paraná.

CDD 574.526367

*Dedicado a minha família...*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda força e serenidade nos momentos mais difíceis que passei. “Obrigado Senhor por estar sempre ao meu lado me mostrando a melhor linha dessa onda que é a vida.”

Agradeço de todo coração:

A minha mãe que, além de ser fonte de inspiração, nunca deixou de me apoiar nas minhas decisões, mesmo que estas fossem totalmente fora do normal.

“Mãe, obrigado.”

Aos meus filhos Yasmine e Enzo por estarem ao meu lado mesmo que na maior parte em pensamento...

Ao Professor, conselheiro e amigo Eduardo Marone por ter apostado todas as fichas em mim e sempre ter me apoiado nas minhas idéias.

Aos colegas do Grupo de Física Marinha do CEM/UFPR:

Prof. Maurício Noernberg, Clécio, Rangel, Rafaela, Joaquim, Larissa, Thaís por terem me ajudado nas tarefas e me aturado durante estes 2 anos.

Aos que me apoiaram quando estava realizando a parte de modelagem naquele país longínquo do velho mundo: Prof. Zanke, Prof. Roberto Mayerle, Dr. Peter Menwis, Aaron Roland, Gregor Dahlem e Andreas Wurpts.

E finalmente a todos que me apoiaram de uma maneira ou de outra...

Muito obrigado!

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 ÁREA DE ESTUDO.....	2
1.2 ESTABILIDADE COSTEIRA COM RECIFES NATURAIS E ARTIFICIAIS .....	4
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>8</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	8
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
<b>3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>9</b>
3.1 BENEFÍCIOS SOCIAIS .....	9
3.2 BENEFÍCIOS AMBIENTAIS .....	9
3.3 BENEFÍCIOS ECONÔMICOS.....	10
3.3.1 <i>Praia de Narrowneck, Austrália (estratégia de proteção de praia)</i> .....	10
3.3.2 <i>Cables Beach, Costa Oeste, Austrália (estratégia de esportes aquáticos)</i> ...	10
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>12</b>
4.1 SIMULAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS .....	13
4.2 BATIMETRIA .....	14
4.3 MODELAGEM NUMÉRICA .....	15
4.3.1 <i>Formulação dos modelos</i> .....	15
4.3.2 <i>Considerações sobre os modelos</i> .....	29
4.4 MODELO DE RAM PARA MATINHOS .....	31
4.4.1 <i>Dimensões e Formato</i> .....	34
4.4.2 <i>Orientação</i> .....	34
4.4.3 <i>Cálculo da Saliência</i> .....	35
4.5 AVALIAÇÃO DE ESTUDO E METODOLOGIA PARA REDUÇÃO DA EROÇÃO EM MATINHOS.....	37
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>

5.1 CLIMA DE ONDAS .....	38
5.2 MODELAGEM NUMÉRICA .....	40
5.2.1 Testes para a Verificação dos Modelos .....	40
5.2.3 Condições de contorno .....	50
5.2.4 Modelo de RAM para Matinhos .....	51
5.2.5 Avaliação do modelo de RAM para Matinhos .....	53
<b>6 DISCUSSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>76</b>
<b>9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>77</b>
<b>10 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - ÁREA DE ESTUDO: (A) MAPA DA AMÉRICA DO SUL; (B) MAPA DO LITORAL DO PARANÁ; (C) ARCO PRAIAL CAIOBÁ – PRAIA BRAVA NO MUNICÍPIO DE MATINHOS – PR; (D) ÁREA DE INTERESSE NO EXTREMO NORTE DA PRAIA BRAVA DE MATINHOS (IMAGEM: GOOGLE EARTH ®). .....3
- FIGURA 2 - VISÃO PANORÂMICA DO TRECHO EXTREMO NORTE DA PRAIA BRAVA (CENTRO) E REGISTRO FOTOGRÁFICO DA EROÇÃO NO LOCAL (SUPERIOR E INFERIOR). NOTAR PLACA NOTIFICANDO A ÁREA COM RISCO DESABAMENTO E CASA PRÓXIMA À ÁREA DE RISCO. ...4
- FIGURA 3 - ESTRUTURA SUBMERSA NA PRAIA DE NARROWNECK, AUSTRÁLIA. SACOS PREENCHIDOS COM SEDIMENTO DE MESMA GRANULOMETRIA DA PRAIA (BLACK E MEAD 2001).....6
- FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS NO ESTUDO..... 12
- FIGURA 5 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO ONDÓGRAFO S4 ADW UTILIZADO NO PROJETO. .... 13
- FIGURA 6 - MAPA CONTENDO OS PONTOS BATIMÉTRICOS DO LEVANTAMENTO REALIZADO PELA NATEEC GEOLOGIA E SANEAMENTO LTDA..... 14
- FIGURA 7 – QUADRO REPRESENTATIVO DOS COMPONENTES DE FUNDO DEFINIDOS POR MEAD E BLACK (2001). AS SETAS REPRESENTAM DIREÇÃO DE ONDAS E AS LINHAS TRACEJADAS AS ISÓBATAS. .... 32
- FIGURA 8 - COMBINAÇÃO DE DIFERENTES COMPONENTES DE FUNDO E SUA RESPECTIVA AÇÃO NO COMPORTAMENTO DO TREM DE ONDAS (MEAD E BLACK, 2001). AS SETAS REPRESENTAM A DIREÇÃO DE ONDAS E AS LINHAS CONTÍNUAS AS ISÓBATAS..... 33
- FIGURA 9 - ESQUEMA DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA FORMAÇÃO DE SALIÊNCIA NA COSTA (MODIFICADO DE BLACK E ANDREWS, 2001)..... 36
- FIGURA 10 - CURVA SIGMÓIDE ASSIMÉTRICA REPRESENTANDO O FORMATO TEÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DE SALIÊNCIAS COSTEIRAS (BLACK E ANDREWS, 2001) ..... 37
- FIGURA 11 – GRÁFICOS DOS VALORES DOS PARÂMETROS DE ONDAS  $H_{MAX}$ ,  $T_{MAX}$ ,  $\theta$ , COLETADOS DURANTE O PERÍODO DE 11/10/2006 A 17/01/2008. NOTAR O MOMENTO NO REGISTRO (ZOOM) ONDE FORAM OBTIDOS VALORES ELEVADOS PARA  $H_{MAX}$  E  $T_{MAX}$ , CARACTERIZANDO ONDAS DE TEMPESTADE..... 39
- FIGURA 12 – GRÁFICO DE ALTURA DE ONDAS E PROFUNDIDADE ORIUNDAS DO TESTE PARA VERIFICAÇÃO DOS MODELOS SWAN E WWM, NO PROCESSO: “QUEBRA DE ONDAS INDUZIDA PELA PROFUNDIDADE”. COMPARAÇÃO COM DADOS MEDIDOS DE BATJES E JANSSEN (1978)..... 41
- FIGURA 13 – GRÁFICO DE ALTURA DE ONDAS, PERÍODO DE ONDAS E PROFUNDIDADE ORIUNDAS DO TESTE PARA VERIFICAÇÃO DOS MODELOS SWAN E WWM NO PROCESSO: “INTERAÇÕES TRIPLAS”. COMPARAÇÃO COM DADOS MEDIDOS DE BEJI E BATJES (1993). 43

FIGURA 14 - GRÁFICO DE ALTURA DE ONDAS, PERÍODO DE ONDAS E PROFUNDIDADE ORIUNDAS DO TESTE PARA VERIFICAÇÃO DOS MODELOS SWAN E WWM NO PROCESSO: “QUEBRA DE ONDAS INDUZIDA PELA PROFUNDIDADE E SET-UP INDUZIDO POR ONDAS”. COMPARAÇÃO COM DADOS MEDIDOS DE BOERS (1996). NOTAR A DIFERENÇA DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA WWM COM A MANIPULAÇÃO DOS PARÂMETROS TRICO E TRIRA. ....	46
FIGURA 15 – ÁREA DO DOMÍNIO (RETÂNGULO) EXTRAÍDA DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO REALIZADO PELA NATEEC GEOLOGIA E SANEAMENTO LTDA. NOTAR ÁREA DE INTERESSE REPRESENTADA PELO CÍRCULO. ....	48
FIGURA 16 – GRADE COMPUTACIONAL UTILIZADA EM SWAN.....	49
FIGURA 17 – GRADE COMPUTACIONAL UTILIZADA EM WWM.....	49
FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO DA PROFUNDIDADE NA ÁREA DE DOMÍNIO UTILIZADA EM AMBOS OS MODELOS. NOTAR ÁREA DE INTERESSE REPRESENTADA NO DETALHE.....	50
FIGURA 19 – BATIMETRIA DO MODELO DE RAM DESENVOLVIDO PARA MATINHOS. NOTAR DIMENSÕES DE COMPRIMENTO TOTAL E LARGURA DO RECIFE. ....	52
FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO DA PROFUNDIDADE NA ÁREA DE DOMÍNIO MODIFICADA DE ACORDO COM O RAM. NOTAR ÁREA DE INTERESSE REPRESENTADA NO DETALHE E RESPECTIVA DISTÂNCIA DO RAM PARA A LINHA DE COSTA.....	53
FIGURA 21 – DIAGRAMAS DOS RESULTADOS DE ALTURA DE ONDAS PARA AS SITUAÇÕES DA BATIMETRIA ORIGINAL (PERFIL 1) E BATIMETRIA RAM (PERFIL 2) EM SWAN; E RESPECTIVOS GRÁFICOS DE ALTURA DE ONDAS E PROFUNDIDADE.....	55
FIGURA 22 – DIAGRAMAS DOS RESULTADOS DE ALTURA DE ONDAS PARA AS SITUAÇÕES DA BATIMETRIA ORIGINAL (PERFIL 1) E BATIMETRIA RAM (PERFIL 2) EM WWM; E RESPECTIVOS GRÁFICOS DE ALTURA DE ONDAS E PROFUNDIDADE.....	56
FIGURA 23 – DIAGRAMAS DA SUBTRAÇÃO DOS RESULTADOS DE ALTURA DE ONDAS NAS DUAS SITUAÇÕES SIMULADAS NOS MODELOS SWAN E WWM. NOTAR AS ÁREAS ONDE SÃO REPRESENTADAS: (1) DIFERENÇA MÁXIMA DE ALTURA DE ONDAS (MANCHA VERMELHA), (2) DIFERENÇA ZERO NA ALTURA DE ONDAS (ÁREA BRANCA). ....	57
FIGURA 24 – DIAGRAMAS DE REFRAÇÃO DE ONDAS NA ÁREA DE INTERESSE E ÁREA DO RAM (ZOOM) PARA SWAN E WWM. AS SETAS REPRESENTAM OS VETORES DE DIREÇÃO DE ONDAS E A LEGENDA A ALTURA DE ONDAS EM METROS. NOTAR MAIOR NÚMERO DE SETAS EM WWM DEVIDO MAIOR REFINAMENTO NA GRADE COMPUTACIONAL NO LOCAL. ....	59
FIGURA 25 – DIAGRAMAS DOS RESULTADOS RELATIVOS AO PERÍODO DE ONDAS EM SWAN E WWM. AS SITUAÇÕES BATIMETRIA ORIGINAL E BATIMETRIA RAM FORAM DISPOSTAS À ESQUERDA E A DIREITA RESPECTIVAMENTE. ....	60
FIGURA 26 - DIAGRAMAS DA SUBTRAÇÃO DOS RESULTADOS DE PERÍODO DE ONDAS NAS DUAS SITUAÇÕES SIMULADAS NOS MODELOS SWAN E WWM. NOTAR AS ÁREAS ONDE SÃO REPRESENTADAS: (1) DIFERENÇA NEGATIVA DE PERÍODO DE ONDAS (MANCHA AZUL), (2) DIFERENÇA ZERO NA ALTURA DE ONDAS (ÁREA BRANCA), (3) DIFERENÇA POSITIVA NO PERÍODO DE ONDAS (MANCHA VERMELHA) E SUAS RESPECTIVAS FEIÇÕES. ....	61



FIGURA 27 – DESENHO ESQUEMÁTICO REPRESENTANDO AS DIMENSÕES OBTIDAS ATRAVÉS DE METODOLOGIA PROPOSTA POR BLACK E ANDREWS (2001) PARA O RAM DE MATINHOS. ....	64
FIGURA 28 – POSSÍVEL FORMATO E DIMENSÕES TEÓRICAS DA SALIÊNCIA FORMADA NA COSTA PELO RAM DE ACORDO COM BLACK E ANDREWS (2001). ....	64
FIGURA 29 – DIAGRAMAS BATIMÉTRICOS DA ÁREA DE INTERESSE NAS DUAS SITUAÇÕES ANALISADAS. NOTAR A AMPLITUDE MÉDIA APROXIMADA DA SALIÊNCIA NA SITUAÇÃO BATIMÉTRICA COM O RAM. ....	65
FIGURA 30 - EROSÃO NA PRAIA BRAVA DE MATINHOS APÓS O EVENTO DE TEMPESTADE EM 1979 (FOTO DISPONÍVEL EM: <a href="http://www.netpar.com.br/lindroth/bravapor.htm">HTTP://WWW.NETPAR.COM.BR/LINDROTH/BRAVAPOR.HTM</a> ). ....	66
FIGURA 31 - PRAIA DE CAIOBÁ EM 1983. NOTAR SETAS VERMELHAS (GABIÕES JÁ SOTERRADOS), TENTATIVA DE RECUPERAÇÃO DA FAIXA DE AREIA (FOTO DISPONÍVEL EM: <a href="http://www.netpar.com.br/lindroth/bravapor.htm">HTTP://WWW.NETPAR.COM.BR/LINDROTH/BRAVAPOR.HTM</a> ). ....	67
FIGURA 32 - ARCO PRAIAL CAIOBÁ-PRAIA BRAVA E RESPECTIVAS LOCALIZAÇÕES DO CANAL DO DNOS E EXTREMO NORTE DA PRAIA BRAVA (ÁREA DE INTERESSE). NOTAR FOTOGRAFIA DO CANAL DO DNOS EM 1986 (CANTO SUPERIOR DIREITO) COM O GUIA-CORRENTE CONSTRUÍDO (IMAGEM: GOOGLE EARTH ®; FOTO HISTÓRICA DISPONÍVEL EM: <a href="http://www.netpar.com.br/lindroth/bravapor.htm">HTTP://WWW.NETPAR.COM.BR/LINDROTH/BRAVAPOR.HTM</a> ). ....	68
FIGURA 33 - SEQÜÊNCIA DE FOTOGRAFIAS HISTÓRICAS DO TRECHO CAIOBÁ (CANTO INFERIOR) PRAIA BRAVA (CANTO SUPERIOR). NOTAR FAIXA DE AREIA NAS DUAS PRAIAS NAS FOTOGRAFIAS QUE EVIDENCIA OS RESULTADOS APENAS NA PRAIA DE CAIOBÁ (FOTOS DISPONÍVEIS EM: <a href="http://www.netpar.com.br/lindroth/bravapor.htm">HTTP://WWW.NETPAR.COM.BR/LINDROTH/BRAVAPOR.HTM</a> ). ....	69
FIGURA 34 - MATÉRIA NO JORNAL GAZETA DO POVO SOBRE A RESSACA DE 1993 (FONTE: PERH, 2007). ....	70
FIGURA 35 - MATÉRIA SOBRE A RESSACA NO JORNAL DO ESTADO DO PARANÁ EM 1993 (FONTE: PERH, 2007). ....	70
FIGURA 36 - MATÉRIA DO JORNAL DO ESTADO DO PARANÁ SOBRE A RESSACA DE 1994 (FONTE: PERH, 2007). ....	71
FIGURA 37 - FOTO DA RESSACA DE 1997 NA PRAIA CENTRAL DE MATINHOS NO MOMENTO DO AVANÇO DA ONDA SOBRE A AVENIDA (FONTE: PERH, 2007). ....	72
FIGURA 38 - EXTREMO NORTE DA PRAIA BRAVA DE MATINHOS EM 2006. NOTAR A CALÇADA DESTRUÍDA E PEDRAS COLOCADAS PARA TENTAR CONTER A FORÇA DAS ÁGUAS (FOTOS: MARCOS GÂNDOR). ....	73

## RESUMO

A rotação de onda é um método de proteção costeira que ataca o problema erosivo em sua forçante principal: as correntes costeiras causadas por ondas. Recifes submersos perto da praia são orientados para girar o trem de ondas de forma que a corrente costeira (e deste modo o transporte de sedimento) é reduzida na costa. O realinhamento do ângulo da onda no ponto de quebra em harmonia com o alinhamento da praia resulta no acréscimo de sedimento na parte abrigada pelo recife. Modelos numéricos são utilizados para investigar o desempenho e os efeitos produzidos na costa por recifes submersos perto da costa. Recentemente estudos empíricos e numéricos forneceram relações que levaram a previsão do tamanho e da geometria de saliências e tómbolos produzidos por recifes naturais submersos. No Brasil, o litoral paranaense vem sofrendo ao longo de anos um processo acelerado e desordenado de urbanização devido à especulação imobiliária e turismo. A ocupação de faixa litorânea da Praia Brava, no município de Matinhos, exerceu papel fundamental na erosão costeira. Aliado a este fato a praia Brava também é alvo de eventos de tempestades responsáveis pelo agravamento de sua degradação. Assim, o presente trabalho apresenta resultados de modelos numéricos e empíricos para a diminuição da energia de ondas de tempestades e a formação de saliência na praia Brava de Matinhos. Para isso foi idealizado um recife artificial submerso que causou a dissipação teórica da energia das ondas a uma distância de 200 m da praia e saliência na parte da costa abrigada pela estrutura. A concepção teórica do Recife Artificial Multifuncional (RAM) foi realizada através da modificação batimétrica do local de implantação. O trabalho utilizou como base dados medidos de ondas, estudos batimétricos e simulações numéricas em modelos de ondas. Foram utilizados os modelos espectrais de onda WWM (Wind Wave Model) e SWAN. Os resultados de ambos os modelos demonstraram a diminuição brusca da altura de ondas a aproximadamente 200 m da costa e a convergência dos vetores de ondas para a parte protegida pela estrutura. Os modelos numéricos demonstraram ainda uma queda na altura de ondas sobre o RAM de 1 m em SWAN e 1,3 m em WWM. Os valores calculados de amplitude da saliência nas direções ao longo e perpendicular à costa foram de 640 m e 80 m, respectivamente. Com base nos resultados obtidos no estudo foi concluído que a construção de um RAM associada a um projeto de engordamento pode resolver o problema erosivo da praia Brava de Matinhos.

Palavras-chave: Erosão Costeira, Modelagem Numérica, Recifes Artificiais.

## ABSTRACT

The wave rotation is a coastal protection method that attacks the erosive problem in its source: the coastal currents caused by waves. Submerged reefs close to the beach are guided to rotate the wave trains so that the coastal chain (and thus the sediment transport) is reduced in the coast. The wave angle alignment in the breakage point in harmony with the beach alignment results in sediment increase in the area sheltered by the reef. Numeric models are used to investigate the performance and the effects produced in the coast by submerged reefs installed close to the coast. Recent empiric and numeric studies supplied relations that provide the size and geometry of the forecasted salient and tombolos produced by submerged natural reefs. In Brazil, the Paraná coast is suffering along several years an accelerated process and a disordered urbanization due to land/ realtor speculation and tourism. The occupation of the Brava Beach littoral strip, in Matinhos, exercised a fundamental impact in the coastal erosion. Allied to this fact, the Brava Beach also is target of storm surge events responsible for the aggravation of its degradation. Thus, the present work introduces results of numeric and empiric models for the storm waves energy decrease and the salient formation in the Brava Beach. For that purpose it was idealized a submerged artificial reef which promotes the waves energy theoretical dissipation, located at a distance of 200 m from the beach, and promotes a salience in the sheltered part of coast, back to the structure. The theoretical conception of Recife Artificial Multifuncional (RAM) was devised through the modification of the bathymetry in the planned location. The work used field data from measured waves, bathymetric studies and numeric simulations in wave models. The used wave models were the WWM (Wind Wave Model) and SWAN. The results from both models demonstrated that the waves height sudden decrease at about 200 m of the coast and the waves vectors converge to the part sheltered by the structure. The numeric models demonstrated a fall in the waves height on the RAM of 1 m in SWAN and 1, 3 m in WWM. The calculated values for the salient size in the directions along and perpendicular to the coast were 640 m and 80 m, respectively. Based in the results obtained in the study it was concluded that the construction of a RAM associate to a nourishment project could solve the Matinhos Brava Beach erosive problem.

Key-Words: Coastal Erosion, Numerical Modeling, Artificial Reefs.

## 1 INTRODUÇÃO

A maioria dos projetos de proteção costeira funciona como mitigadora dos efeitos da erosão, não atacando diretamente na sua causa. Por exemplo, Rochas/Muros de Contenção, Quebra-Mares ou Espigões ao longo de praias arenosas, atuam apenas abrandando os efeitos da erosão costeira. Os resultados finais na linha de costa muitas vezes não condizem com a proposta inicial, necessitando periódicas manutenções e modificações nos projetos iniciais.

Em praias arenosas, a erosão ocorre quando a quantidade de sedimento que entra é menor que a quantidade de sedimento que sai do sistema, sendo desta forma evidenciada em escalas de tempo diferentes (GRAAF, 1990). A maior parte dos sérios e insustentáveis problemas de erosão costeira tem sua causa relacionada à perda sedimentar em longa escala de tempo, que por sua vez está relacionada à mudança na fonte de sedimento, ou a mudanças na orientação da costa devido a construções. Neste último caso, o problema é predominante em cidades modernas ou de veraneio que tiveram sua linha de costa modelada pelo uso de muros de contenção devido à ocupação costeira (MEAD e BLACK, 2006). O problema fundamental, nestes casos, é o desequilíbrio entre a orientação da linha de costa em relação à orientação média da direção de ondas, a qual governa a direção das correntes ao longo da costa. São estas correntes as responsáveis pelo transporte de sedimento que ocasiona a erosão.

Uma ferramenta utilizada para o entendimento de sistemas costeiros é a modelagem numérica. A idéia da modelagem numérica pode ser entendida como a tentativa de explicar numericamente o comportamento ou característica de um determinado sistema. Para Christofolletti (2004), o processo de modelagem pode ser definido como uma construção teórica, que procura descrever e explicar o funcionamento de um determinado sistema através da representação de um fenômeno, ou conjunto de fenômenos do mundo real, e eventualmente fazer a previsão de novos fenômenos ou propriedades, tomando como base leis das diversas áreas da ciência. O objetivo é compreender as relações entre as diversas partes de um sistema para compreendê-lo como um todo. A modelagem ajuda a dizer se a forma de se tratar um determinado sistema é a mais adequada, sendo uma ferramenta extremamente útil.

Christofoletti (2004) salienta ainda que, a modelagem pode ser considerada como instrumento entre os procedimentos metodológicos da pesquisa científica, sob justificativa que a construção de modelos a respeito dos sistemas ambientais, representa a expressão de uma hipótese científica que necessita ser avaliada como enunciado teórico sobre o sistema ambiental focalizado. Essa avaliação se configura como teste de hipóteses, e sob essa perspectiva, a construção de modelos pode ser considerada como procedimento inerente a pesquisa científica acompanhando os critérios e normas da metodologia científica (CHRISTOFOLETTI, 2004).

### **1. 1 Área de Estudo**

O litoral do Paraná vem sofrendo ao longo dos anos um processo acelerado e desordenado de urbanização, oriundos da especulação imobiliária, turismo desordenado e exploração ilegal dos recursos naturais. No município de Matinhos, a ocupação da faixa litorânea exerceu papel fundamental na degradação da vegetação, ocasionando a erosão costeira. Segundo Angulo (2000), as edificações ali construídas muito próximas à praia, não possibilitam o desenvolvimento de um novo perfil que consiga restabelecer seu equilíbrio dinâmico. A evolução natural da linha de costa não deve ser motivo para intervenção antrópica, pois existe o risco de modificar seu desenvolvimento e provocar sérios problemas de erosão costeira, sendo os efeitos considerados mais graves em trechos restritos localizados em áreas urbanizadas (ANGULO, 2000).

Situado ao norte da baía de Guaratuba, o arco praiial Caiobá - Praia Brava, no município de Matinhos, mede aproximadamente 3 km (Fig. 1). Diversas tentativas de interromper o processo erosivo foram realizadas pelo governo local e associação de moradores, mas, nenhuma obteve sucesso definitivo. O trecho extremo norte da Praia Brava está completamente comprometido, tendo inclusive edificações com perigo de desabamento (Fig. 1 e 2). Na Praia Brava, a zona crítica possui 1000 m de extensão e nos últimos anos, as ondas de tormentas (ressacas) têm destruído a calçada e avenida beira-mar (ANGULO, 2000). Em estudo realizado com fotografias aéreas anteriores e posteriores a construção desta avenida, Angulo (2000) salienta que não foi respeitada a

configuração natural da praia. Nessa época, foi necessária a construção de aterros e muros de contenção, sendo posteriormente destruídos pela erosão.

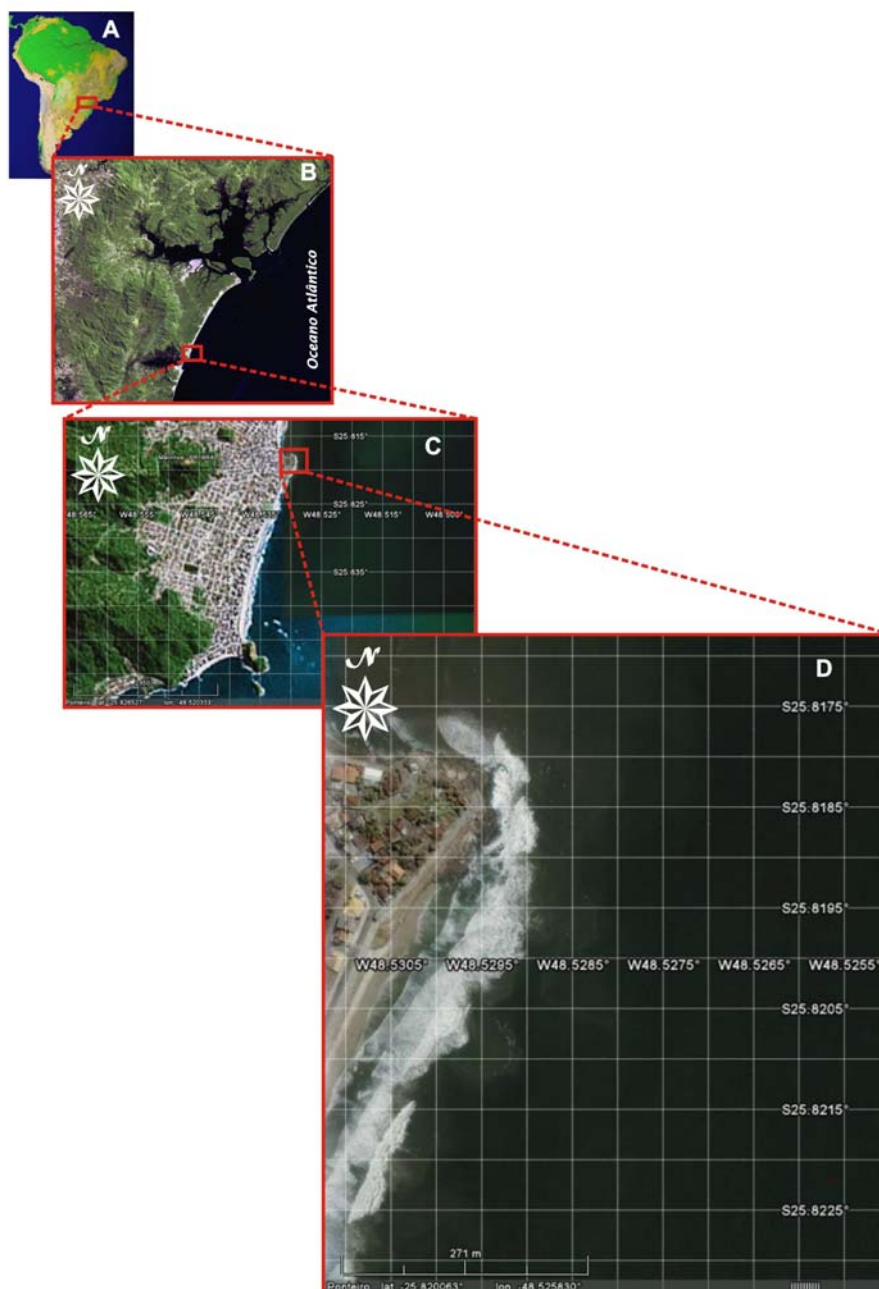


FIGURA 1 - Área de estudo: (A) Mapa da América do Sul; (B) Mapa do Litoral do Paraná; (C) Arco praial Caiobá – Praia Brava no Município de Matinhos – PR; (D) Área de interesse no extremo norte da Praia Brava de Matinhos (Imagem: Google Earth ®).



FIGURA 2 - Visão panorâmica do trecho extremo norte da Praia Brava (centro) e registro fotográfico da erosão no local (superior e inferior). Notar placa notificando a área com risco desabamento e casa próxima à área de risco.

## 1.2 Estabilidade Costeira com Recifes Naturais e Artificiais

Recifes naturais submersos próximos à costa, sempre produziram impacto benéfico na estabilidade costeira. Black (2003) descreve esta proteção natural citando exemplos de ilhas de corais de franja. Os recifes atuam como uma barreira natural dissipando a energia das ondas. Como resultado deste processo, saliências costeiras são sempre presentes a retaguarda de recifes costeiros<sup>1</sup> (BLACK, 2003). O crescimento de uma saliência na costa conduz ao aumento da estabilidade e proteção da zona costeira.

Estudos recentes em praias protegidas por recifes naturais têm fornecido relações empíricas que governam o tamanho e geometria das saliências produzidas

<sup>1</sup> Retaguarda de recifes costeiros: Área abrigada pelo recife voltada para a costa.

(BLACK e ANDREWS, 2001 a, b). Estas relações empíricas permitem pré-determinar tais feições de acordo com a necessidade da região afetada. Desta forma, a introdução de estruturas submersas próximas à costa, pode proporcionar uma solução de proteção costeira que simula os efeitos produzidos por recifes naturais. Este método de proteção costeira atinge a causa da erosão na sua forçante maior: as correntes ao longo da costa originadas por ondas de eventos como tempestades e ressacas. O procedimento consiste na modificação da batimetria local, de maneira que ocorra a mudança na direção predominante do trem de ondas incidente. A modificação batimétrica é realizada através da concepção de uma estrutura específica, com tamanho e formato pré-determinados. O trem de ondas ao interagir com a estrutura sofre os processos físicos de refração, empinamento, e quebra na região menos profunda. Como consequência desta quebra, a energia das ondas é dissipada, reduzindo assim a velocidade da corrente costeira e o transporte de sedimento na parte abrigada pela estrutura. O realinhamento do trem de ondas no ponto de quebra, bem como a dissipação de sua energia em uma região próxima à costa, resulta na redução do fluxo da corrente ao longo da costa e no incremento da sedimentação a retaguarda da estrutura submersa (BLACK, 2003). Com isso, haverá o desenvolvimento de uma saliência costeira que, por sua vez, irá interromper o processo erosivo no local abrigado pela estrutura.

Recife Artificial Multifuncional (RAM) recebe este nome por agregar funções múltiplas a uma só estrutura construída. Entre estas funções podemos citar: proteção costeira, local para desenvolvimento e manutenção de organismos marinhos, e prática de esportes aquáticos. A utilização pública recreacional pode ser incorporada à estrutura através de esportes como o surfe, mergulho, natação e jogos aquáticos. Um exemplo de projeto de RAM bem sucedido foi o realizado na praia de Narrowneck, Gold Coast Austrália. Neste local devido à erosão costeira, a área de praia era curta em demasia para o recreio dos turistas. Assim, foi requisitada pelo governo local, uma estrutura submersa visando cumprir dois principais objetivos: controlar o processo de erosão da praia e incrementar as condições do surfe local (BLACK e MEAD, 2001). Antes de sua construção em agosto de 1999, um conjunto de estudos foi estabelecido incluindo medições em campo (dados sobre clima de ondas e circulação), e simulações



em modelos físicos e numéricos. Após esta fase inicial foi construída uma estrutura submersa de aproximadamente 120.000 m<sup>3</sup>, formada por trezentos sacos de três tamanhos diferentes e preenchidos com sedimento da mesma granulometria da praia afetada pela erosão (Fig. 3).



FIGURA 3 - Estrutura submersa na praia de Narrowneck, Austrália. Sacos preenchidos com sedimento de mesma granulometria da praia (BLACK e MEAD 2001).

Segundo o relatório de monitoramento realizado desde sua implantação até Julho de 2004, o projeto obteve sucesso completo. Os dados do relatório salientam que a faixa de praia abrigada pelo recife se manteve com o comprimento variando entre 30 m (inverno) e 40 metros (verão), a região é descrita como um dos melhores pontos de surfe da Gold Coast, e ainda a estrutura proporciona um ecossistema para a prática do mergulho turístico (TURNER, 2004).

A efetivação deste tipo de projeto só pode ocorrer quando estudos de campo e de laboratório são realizados previamente. O entendimento prévio dos processos oceanográficos que governam a região é indispensável para que os objetivos sejam alcançados. O tamanho e formato da saliência a ser formada na costa, bem como da

estrutura a ser construída, devem ser obtidos anteriormente para se avaliar os impactos ambientais e o gerenciamento costeiro. Projetos mal administrados podem levar a formação de tómbolo (união entre a estrutura e a costa), o qual age como uma barreira para o transporte ao longo da costa. Por outro lado, nos projetos bem administrados para formação de saliências, uma lacuna entre a estrutura e a costa é mantida para permitir o transporte natural de sedimentos ao longo da costa. Além disto, proporcionam solução definitiva para o problema erosional, com possibilidade ainda de agregar funções para benefício da comunidade local. Desta forma, o presente trabalho estuda previamente e propõe metodologia de RAM com o objetivo de reduzir e interromper, teoricamente, o processo erosivo do extremo norte da Praia Brava de Matinhos.

## **2 OBJETIVOS**

### ***2.1 Objetivo Geral***

- Desenvolver estudo e metodologia de Recife Artificial Multifuncional para redução do processo erosivo da Praia Brava de Matinhos – PR.

### ***2.2 Objetivos Específicos***

- Simular o clima de ondas da praia de Matinhos utilizando cenários específicos e modelos numéricos para obtenção dos parâmetros de ondas;
- Modelar um Recife Artificial Multifuncional para a redução da erosão e formação de saliência no trecho extremo norte da Praia Brava de Matinhos;
- Simular clima de ondas da Praia Brava de Matinhos com a mudança na batimetria de acordo com o Recife Artificial Multifuncional para obtenção dos parâmetros de ondas;
- Comparar os resultados obtidos dos modelos numéricos nas duas situações.

### **3 JUSTIFICATIVA**

O Município de Matinhos vem a muitos anos sofrendo com a erosão costeira. As soluções propostas não resolveram definitivamente o problema. Recursos públicos foram e ainda são utilizados em soluções mitigadoras do problema. Com este estudo, será possível propor uma solução eficiente para o problema evitando com que mais recursos sejam gastos em manutenções de projetos mal sucedidos. Além disto, projetos de RAM trazem benefícios sociais e econômicos para a cidade, bem como para as cidades adjacentes.

Um relatório de impactos sociais e econômicos preparado pelo Comitê de Recifes Artificiais de Opunake (2002) avaliou a proposta de implantação de dois RAM na Nova Zelândia relatou os efeitos benéficos que o projeto pode trazer. No relatório foram avaliados os projetos de RAM já construídos ao redor do mundo. Serão apresentados alguns resultados desta avaliação.

#### **3.1 Benefícios Sociais**

No caso de Lyall Bay, Wellington, Nova Zelândia, a proposta de um RAM tem provocado debates sobre a instalação. Até um importante grupo avaliador do projeto foi formado. Seus interesses chaves incluem: segurança na água, efeitos na praia, efeitos em outras praias, impactos ecológicos e planos de dias surfáveis.

#### **3.2 Benefícios Ambientais**

Os efeitos ambientais nos recifes artificiais são pontuais. Estudos no Recife Artificial de Cables Beach, Oeste da Austrália (feito de granito e rochas) indicaram grande colonização de organismos marinhos incrustantes. O efeito total ambiental foi considerado positivo (NSW, DEPARTMENT OF LAND AND WATER CONSERVATION, 2001 *apud* OPUNAKE ASR COMMITTEE, 2002).

### **3.3 Benefícios econômicos**

Projeto de RAM pode incrementar a economia do município em que é instalado. Empresas ligadas a esportes aquáticos tais como surfe, natação e mergulho, certamente terão impacto benéfico em suas vendas de equipamentos e vestuário. Outro fator que deve ser salientado aqui é o turismo local. Este tipo de projeto evidencia o município no cenário nacional de forma satisfatória, pois se trata de uma idéia inovadora e inteligente.

Dois projetos bem sucedidos economicamente na Austrália, serão exemplificados de acordo com relatório de Opunake (2002):

#### **3.3.1 Praia de Narrowneck, Austrália (estratégia de proteção de praia)**

Este projeto foi idealizado para gerar 60 vezes mais benefícios (em termos econômicos e de receita bruta) do que os custos. Isto significa um alto rendimento, pois para cada dólar australiano investido AU\$ 60 foram lucrados. A título de comparação, um RAM de pequeno porte projetado em Bouremouth, na Inglaterra, foi idealizado para gerar 20 vezes mais benefícios do que custos (KERRY BLACK, ASR LTD, 2001 *apud* OPUNAKE ASR COMMITTEE, 2002). Para Narrowneck, os benefícios são derivados diretamente da indústria do turismo em receita bruta (U\$ 1,6 milhões em taxas por ano) e economia de recursos antes utilizados em reparos na praia por problemas ocasionados pela erosão (RAYBOLD E MULES, 1998 *apud* OPUNAKE ASR COMMITTEE, 2002).

#### **3.3.2 Cables Beach, Costa Oeste, Austrália (estratégia de esportes aquáticos)**

As idéias de benefícios econômicos gerados deste projeto podem ser identificadas como: direitos autorais, propagandas e direitos de negócios, patrocinadores de eventos (como campeonatos) e gastos diretos com alimentação, hospedagem, vendas no varejo de roupas e equipamentos (REAK RESEARCH, 1996

*apud* OPUNAKE ASR COMMITTEE). Os impactos econômicos atuais não estão sendo monitorados, mas foram estimados entre AU\$ 75.000 e AU\$ 225.000 por ano. Estes valores podem ser gerados através de direitos de negócios. Para direitos autorais o retorno é AU\$ 300.000 por ano, no mínimo.

#### 4 METODOLOGIA

Para uma melhor visualização, a metodologia aplicada para o desenvolvimento do estudo se encontra sintetizada no diagrama de fluxo da figura 4.

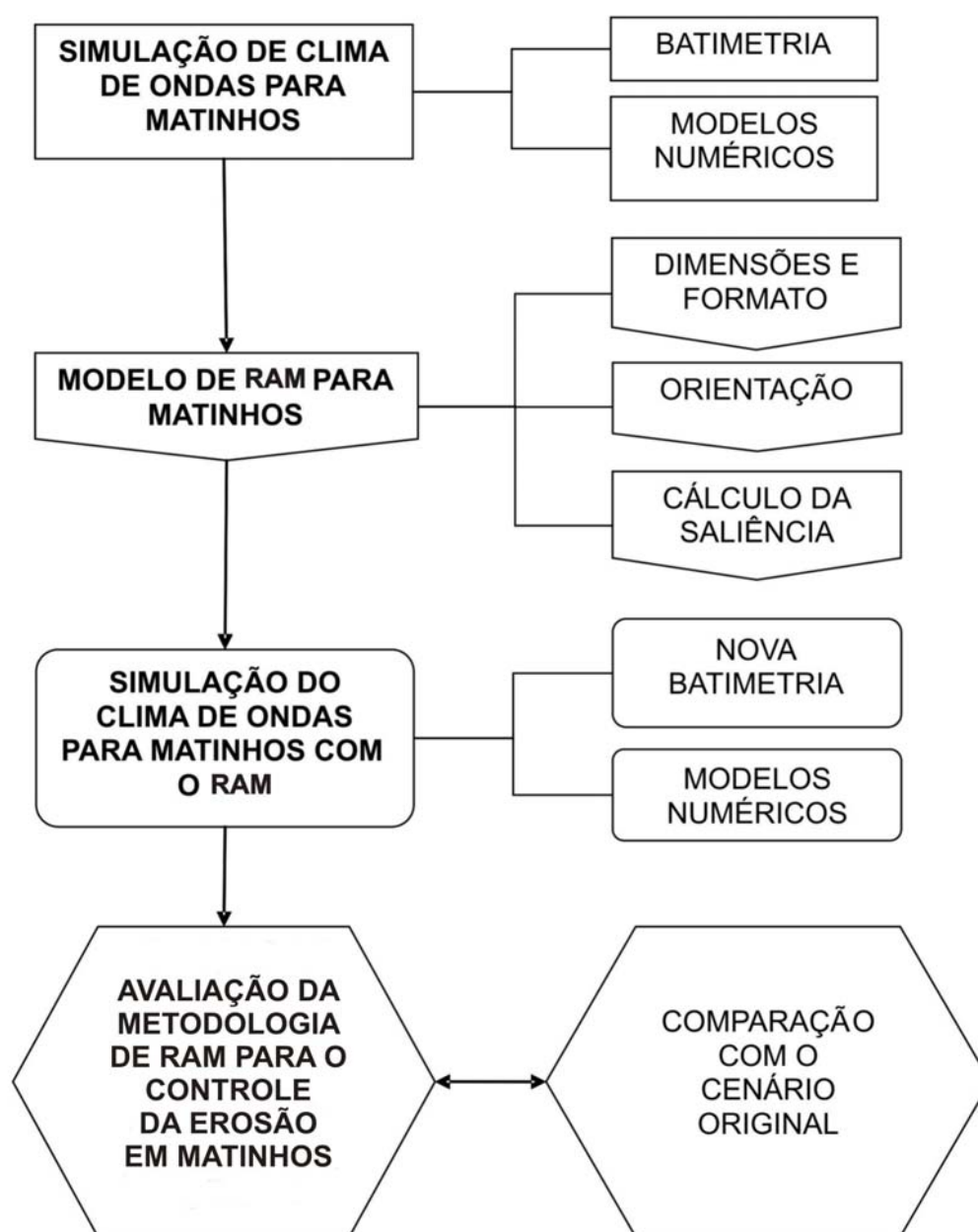


FIGURA 4 - Fluxograma dos procedimentos adotados no estudo.

#### 4.1 Simulação do Clima de Ondas

Determinar o clima de ondas de uma região é uma tarefa que requer uma quantidade elevada de dados de campo, coletados através de aparelhos específicos, e em um prolongado espaço de tempo. Para simulação do clima de ondas da Praia Brava de Matinhos, foram realizados cenários específicos a partir dos dados coletados por aparelho ondógrafo S4ADW<sup>2</sup>, sendo analisados durante o período de um ano juntamente com os dados de ondas provenientes do estudo publicado por Araújo *et al.* (2003). O S4ADW foi fundeado próximo a isóbata de 10 metros, entre os Balneários de Shangrilá e Ipanema do litoral do Paranaense (Fig. 5). Os cenários específicos foram selecionados, de acordo com uma situação extrema de ondas (eventos de tempestade), a qual é responsável por modificar gravemente a morfologia costeira. Os parâmetros de ondas utilizados nas simulações foram: Altura significativa ( $H_s$ ), período ( $T$ ) e direção de ondas ( $\theta$ ).

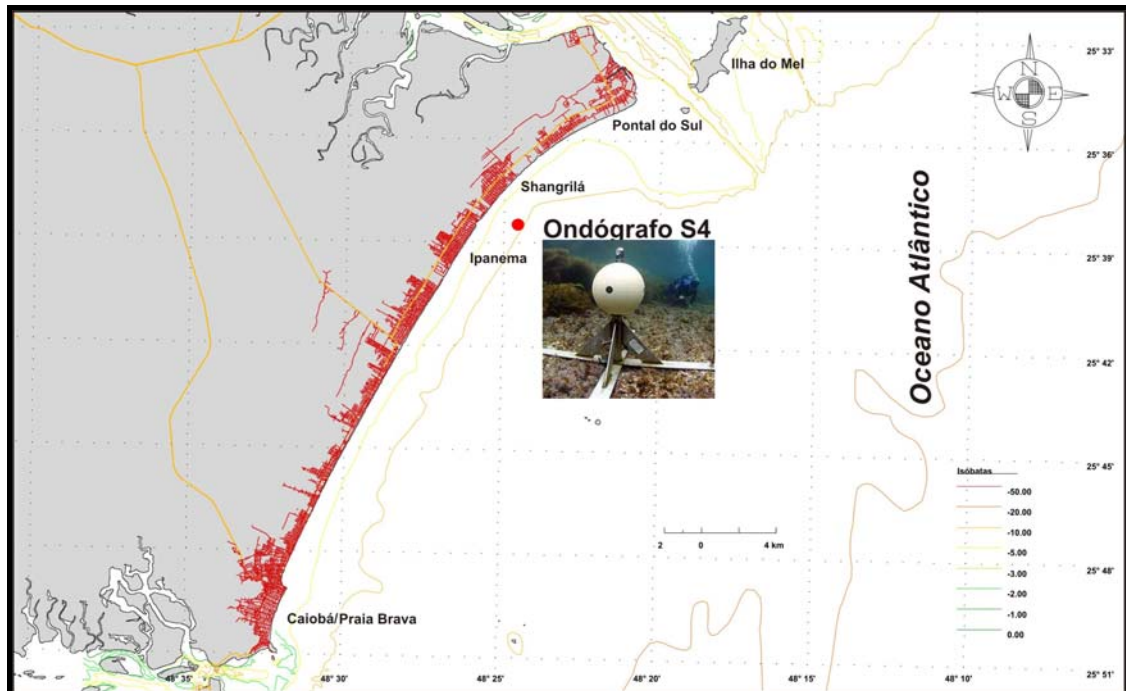


FIGURA 5 - Mapa de localização do ondógrafo S4 ADW utilizado no projeto.

<sup>2</sup> S4ADW (*Directional Wave Instrument*): Fornece dados capazes de determinar todas as características do espectro de ondas. Utiliza sensores de pressão e campo magnético para as medições.



## 4.2 Batimetria

A batimetria utilizada nas simulações numéricas foi realizada originalmente, pela Nateec Geologia e Saneamento Ltda em projeto requisitado pelo Governo do Estado do Paraná para o dimensionamento da recuperação da praia central de Matinhos. O levantamento possui 2.288 pontos batimétricos entre a entrada da Baía de Guaratuba, e o início da Avenida Beira-Mar que leva à Praia de Leste, alcançando uma distância de até 2,5 milhas da costa (Fig. 6). A área coberta tem aproximadamente 12 milhas quadradas, atingindo profundidades até 12 m (NATEEC – GEOLOGIA E SANEAMENTO LTDA, 1994).

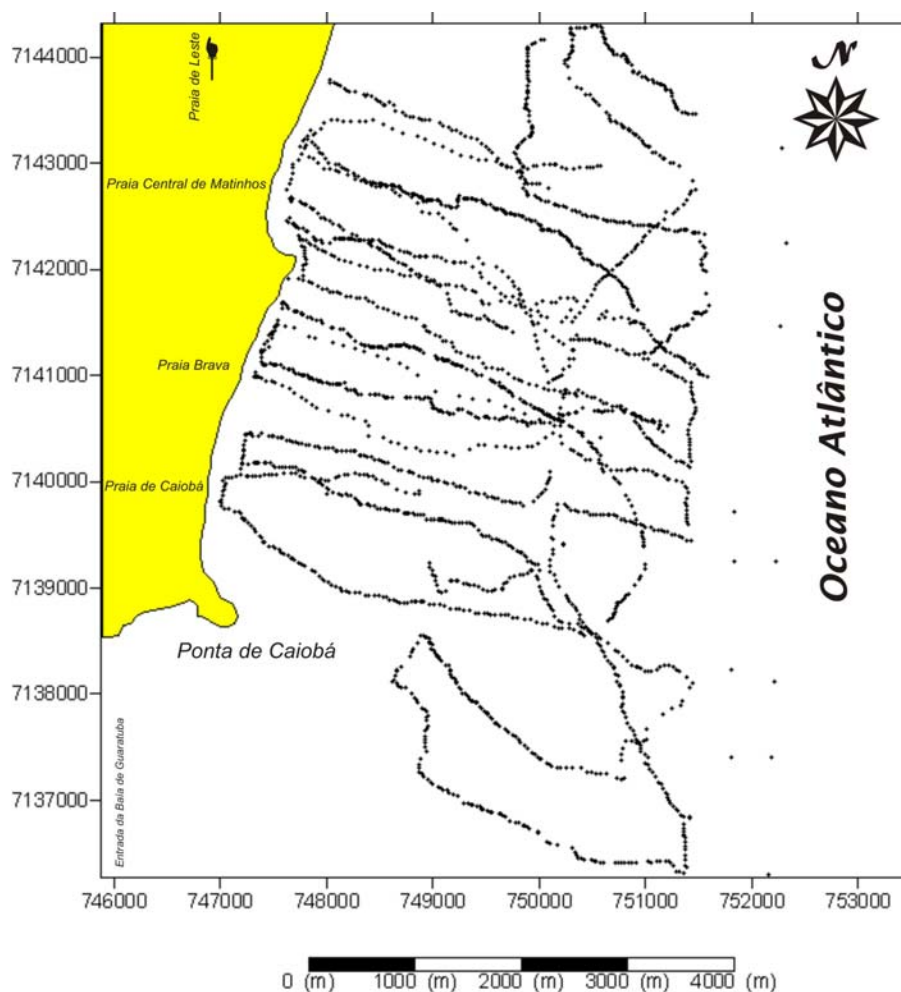


FIGURA 6 - Mapa contendo os pontos batimétricos do levantamento realizado pela Nateec Geologia e Saneamento LTDA.

### **4.3 Modelagem Numérica**

Nas simulações foram utilizados dois modelos numéricos de refração de ondas. Ambos são modelos utilizados para verificação do comportamento do trem de ondas próximas à costa. O SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) foi desenvolvido pelo grupo de modelagem numérica da Universidade Tecnológica de Delft na Holanda, sendo amplamente utilizados em trabalhos pelo mundo; e o WWM (*Wind Wave Model*), foi desenvolvido pela Universidade Nacional de Cheng Kung na China. Os modelos se diferem basicamente pelo esquema de integração numérica e pelo tipo de malha utilizada para as simulações, onde: SWAN – utiliza malha de diferenças finitas (quadrados); WWM – utiliza malha de elementos finitos (triângulos). O método de diferenças finitas em modelos espectrais de ondas, desenvolvido por Hsu *et al.* (2005), possui a vantagem de exibir com maior precisão, os resultados em batimetrias complicadas com limites irregulares em áreas de águas rasas. Este tipo de malha não estruturada pode resolver simulações onde são combinadas, ondas oceânicas de larga escala, e ondas costeiras de pequena escala no mesmo domínio discreto. A técnica de elementos finitos supera o de diferenças finitas, pois a medida local da malha e respectivo número de nós podem ser aperfeiçoados nas várias partes do domínio computacional. As áreas das águas costeiras são discretizadas com elementos triangulares, cujos tamanhos são variados de acordo com a resolução desejada. Esta característica permite a flexibilidade para ter um malha grossa, em uma área ampla, e uma malha acurada em uma área em pequena escala.

#### **4.3.1 Formulação dos modelos**

O SWAN e WWM são modelos fundamentados em simular o espectro de ondas, isto é, as ondas são descritas no modelo como a densidade do espectro bidimensional da ação de ondas, simulando seu comportamento mesmo quando os fenômenos não-lineares dominarem (e.g. na zona de surfe). A razão de se usar o espectro em condições altamente não lineares é que, em tais condições, o espectro

parece prever com precisão razoável a distribuição espectral de ondas de segunda ordem. O espectro que é considerado nos modelos é a densidade de ação do espectro  $N(\sigma, \theta)$ , tendo maior importância que a densidade de energia do espectro  $E(\sigma, \theta)$ , mas desde que, em presença de correntes ocorra a conservação da densidade de ação e não ocorra a conservação da densidade de energia. As variáveis independentes são a frequência relativa  $\sigma$  e a direção de ondas  $\theta$ . A densidade de ação é igual à densidade de energia, dividida pela frequência relativa:  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$ . Em ambos os modelos este espectro pode variar no tempo e no espaço.

#### 4.3.1.1 Equação de Equilíbrio de Ação

A equação de conservação, descrevendo a advecção e a refração da ação de ondas devido à profundidade e correntes, podem ser escritas num plano de coordenadas cartesianas como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

O primeiro termo a esquerda da equação, representa a razão local da mudança da densidade de ação no tempo, o segundo e o terceiro termos representam a propagação da ação no espaço geográfico (com velocidades  $c_x$  e  $c_y$  no espaço  $x$  e  $y$  respectivamente). O quarto termo representa mudança da frequência relativa devido à variação de profundidades e correntes (com velocidade de propagação  $c_\sigma$  no espaço  $\sigma$ ). O quinto termo representa a refração induzida pela profundidade e por correntes (com velocidade de propagação  $c_\theta$  no espaço  $\theta$ ). As expressões para estas velocidades de propagações são extraídas da teoria de ondas lineares (SWAN Manual, 2007). O termo  $S(= S(\sigma, \theta))$  a direita da equação é o termo fonte, sendo desta forma a densidade energia representando os efeitos da geração, dissipação e interações onda-onda não lineares.

#### 4.3.1.2 Termo de Introdução do Vento (*wind input*)

A transferência de energia do vento para as ondas é descrita nos modelos SWAN e WWM como mecanismo de ressonância (PHILIPS, 1957; *apud* SWAN Manual, 2007) e mecanismo de retro alimentação (MILES, 1957; *apud op cit.*). O termo fonte que corresponde estes mecanismos é comumente descrito como a soma do crescimento linear e exponencial:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (2)$$

sendo que  $A$  e  $B$  dependem da frequência e direção de ondas e direção e velocidade do vento. Os efeitos de correntes são considerados em SWAN e WWM usando a velocidade de vento e direção local aparente. A expressão do termo  $A$  é devido a Cavaleri e Malanotte-Rizzoli (1981 *apud op cit.*), que atua como um filtro para evitar crescimento em frequências mais baixas do que a frequência de Pierson-Moskowitz (TOLMAN, 1992 *apud op cit.*). Duas opções de expressão para o coeficiente  $B$  são utilizadas nos modelos. A primeira é retirada da primeira versão do modelo WAM (conhecido como WAM Ciclo 3, Grupo WANDI, 1988; *apud op cit.*), devido Snyder *et al.* (1981 *apud op cit.*), redimensionado em termos de velocidade de fricção  $U_*$  por Komen *et al.* (1984 *apud op cit.*). O coeficiente de fricção  $U_*$  relacionado à velocidade do vento a 10 m de altitude  $U_{10}$ , é retirado de Wu (1982 *apud op cit.*). A segunda expressão para  $B$  nos modelos SWAN e WWM é retirada da versão mais recente do modelo WAM (conhecido com WAM Ciclo 4, KOMEN *et al.* 1994 *apud op cit.*), onde devido a Jassen (1991 *apud op cit.*), é explicitamente demonstrada a interação entre vento e as ondas considerando os efeitos da camada limite atmosférico, e o comprimento de abrasivo da superfície do mar. O conjunto correspondente de equações foram resolvidas com procedimento iterativo de Mastenbroek *et al.* (1993 *apud op cit.*).

### 4.3.1.3 Dissipação

O termo de dissipação de energia é representado pela soma de três contribuições diferentes: cobertura branca (*whitecapping*)  $S_{ds,w}(\sigma, \theta)$ , fricção do fundo (*bottom friction*)  $S_{ds,b}(\sigma, \theta)$  e profundidade induzindo a quebra  $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$ . A cobertura branca (*whitecapping*) é primeiramente controlada pela declividade das ondas. Presentemente operando em modelos de ondas de terceira geração, as formulações de cobertura branca são baseadas no modelo de pulsação (HASSELMANN, 1974 *apud* SWAN Manual, 2007), adaptado pelo Grupo WANDI (1988 *apud op cit.*):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta) \quad (3)$$

onde  $\Gamma$  é o coeficiente de declividade dependente,  $k$  é o número de onda,  $\tilde{\sigma}$  e  $\tilde{k}$  denota uma frequência média e o número de onda médio respectivamente. Komen et al. (1984) estimou o valor de  $\Gamma$  pelo fechamento do balanço de energia das ondas em condições totalmente desenvolvidas. Isto implica que este valor depende da formulação do vento que é usada. A segunda expressão é uma adaptação desta expressão baseada em Janssen (1991; como no Ciclo 4 do modelo WAM; ver Janssen, 1991; Günter et al., 1992 *apud op cit.*). Isto é utilizado quando o termo de introdução do vento  $B$  de Janssen (1991 *apud op cit.*) também é utilizado. Young e Banner (1992 *apud op cit.*) e Banner e Young (1994 *apud op cit.*) mostram que os resultados do fechamento do equilíbrio de energia desta maneira dependem criticamente da escolha de uma frequência de corte de alta-energia, acima da qual um diagnóstico da ponta da curva espectral utilizada. No SWAN e WWM esta frequência de corte é diferente do usado no modelo WAM. Diferenças nas razões de crescimento entre os modelos WAM, SWAN e WWM são desta forma esperadas.

Uma formulação alternativa para a cobertura branca (*whitecapping*) é baseada no Método de Declividade Cumulativa, como descrito em Alkyon *et al.* (2002 *apud op cit.*). Este método de dissipação devido à cobertura branca, depende da declividade do espectro de onda e abaixo de uma frequência em particular. Isto é definido como:

$$S_{st}(\sigma, \theta) = \int_0^\sigma \int_0^{2\pi} k^2 |\cos(\theta - \theta')|^m E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (4)$$

Nesta expressão o coeficiente  $m$  controla a dependência direcional. É esperado que este coeficiente seja de ordem 1 se o mecanismo é dominante;  $m$  é mais que 10 se outro mecanismo atuar (instabilidade ocorre quando aceleração vertical das ondas se torna maior do que a gravidade). Valor *default* de  $m = 2$ .

O novo termo de cobertura branca é dado por

$$S_{wc}^{st}(\sigma, \theta) = -C_{wc}^{st} S_{st}(\sigma, \theta) E(\sigma, \theta) \quad (5)$$

com  $C_{wc}^{st}$  um coeficiente sintonizável (*tunable*)

Dissipação induzida pela profundidade pode ser causada pela fricção com o fundo, por movimento do fundo, por percolação ou por irregularidades do fundo (SWAN Manual, 2007). Para mares de plataforma continental com fundos de areia, o mecanismo dominante é a fricção com o fundo, a qual pode geralmente ser representada como:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (6)$$

no qual  $C_{bottom}$  é o coeficiente de fricção do fundo.

Um grande número de modelos tem sido proposto desde o pioneirismo do artigo de Putnam e Johnson (1949, *apud op cit.*). Hasselmann *et al.* (1973, *apud op cit.*) sugeriram utilizar uma constante obtida empiricamente. Isto parece executar bem em muitas condições diferentes, desde que um valor satisfatório seja escolhido (tipicamente diferente para ondulação e vaga; BOUWS e KOMEN, 1983 *apud SWAN Manual, 2007*). Uma formulação não-linear foi proposta por Hasselmann e Collins (1968 *apud op cit.*), a

qual foi mais tarde simplificada por Collins (1972 *apud op cit.*). Modelos mais complicados de viscosidade em redemoinhos (*eddy*) foram desenvolvidos por Madsen *et al.* (1988 *apud op cit.*) e por Weber (1989, 1991a, 1991b *apud op cit.*). Considerando a grande variação de condições do fundo em áreas costeiras (material do fundo, comprimento de aspereza, altura da marcas de ondulação etc.), não há evidência de dados de campo para dar preferência a um tipo particular de modelo de fricção (LUO e MONBALIU, 1994 *apud op cit.*). Por esta razão, uma simplificação de cada um destes modelos de fricção foram implementados em SWAN e, por conseqüência, em WWM: o modelo empírico JONSWAP de Hasselmann *et al.* (1973 *apud op cit.*), a lei de arrasto do modelo de Collins (1972 *apud op cit.*) e o modelo de viscosidade em redemoinhos de Madsen *et al.* (1988 *apud op cit.*). O efeito de uma corrente média dissipando a energia da onda devido à fricção com o fundo, não é levada em consideração nos modelos. As razões disto são dadas por Tolman (1992b *apud op cit.*), onde discute que as expressões do estado-da-arte, variam em demasia em seus efeitos para serem aceitáveis. Ele encontrou que, o erro em achar uma estimativa correta da escala de comprimento de aspereza (*roughness*) do fundo, tem um impacto muito maior na taxa de dissipação de energia do que no efeito de uma corrente média.

O processo da profundidade induzindo a quebra de ondas continua pobremente entendido, e ainda pouco se conhece disto em modelagem espectral. Em contraste disto, a dissipação total (i.e., integrado acima do espectro), devido a este tipo de quebra de ondas, pode ser bem modelada com a dissipação aplicada à quebra de ondas num campo randômico (BATJES e JANSSEN, 1978; THORTON e GUZA, 1983 *apud op cit.*). Observações de laboratório (BATTJES e BEJI, 1992; VINCENT *et al.* 1994; ARCILLA *et al.*, 1994; ELDEBERKY e BATTJES, 1996 *apud op cit.*) mostram que, o formato uni-modal inicial da propagação do espectro cruzando perfis simples de praia, é razoavelmente insensível à quebra de ondas induzida pela profundidade. Isto levou Eldeberky e Batjes (1995 *apud SWAN Manual 2007*) formularem uma versão espectral do modelo de Batjes e Janssen (1978 *apud op cit.*), o qual conserva o formato espectral. Expandindo esta expressão para incluir direções, a formulação utilizada em SWAN e WWM é:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (7)$$

no qual  $E_{tot}$  é a energia total de onda e  $D_{tot} < 0$  é a razão da dissipação total da energia devido a quebra de ondas, de acordo com Battjes e Janssen (1978 *apud op cit.*). Somando uma dependência quadrática na frequência sugerida por Mase e Kirby (1992 *apud op cit.*), e sustentada por Elgar *et al.* (1997 *apud op cit.*), parece haver nenhum efeito notável nos resultados dos modelos. Chen e Guza (1997 *apud op cit.*) deduziram a partir de observações e simulações com modelos Businessq<sup>3</sup>, que os níveis de alta frequência são insensíveis para tais dependências de frequência, pois uma dissipação incrementada nas altas frequências é compensada aproximadamente pelo incremento da transferência de energia não-linear (mas, eles encontraram a frequência de dependência para ser relevante no domínio do tempo). O valor de  $D_{tot}$  depende criticamente do parâmetro de quebra de ondas  $\gamma = H_{max}/d$  (no qual  $H_{max}$  é a altura máxima de onda possível na profundidade local  $d$ ). Em SWAN e WWM um valor constante e um valor variável são disponibilizados. O valor constante utilizado é  $\gamma = 0.78$  (BATTJES e STIVE, 1985 *apud op cit.*).

#### 4.3.1.4 Interações não lineares onda-onda

Em águas profundas, interações quádruplas onda-onda dominam a evolução do espectro. Elas transferem a energia de ondas do pico espectral para: baixas frequências, movendo frequências de pico para valores menores; e para altas frequências, onde a energia é dissipada pela cobertura branca. Em águas muito rasas, interações onda-onda triplas transferem energia a partir de baixas frequências para altas frequências muitas vezes resultando altas harmônicas (Beji e Battjes, 1993 *apud SWAN Manual*, 2007). A geração de energia de frequências baixas por interações triplas onda-onda não é considerada aqui.

---

<sup>3</sup> Modelos Businessq: Modelos idealizados em pequena escala e alta precisão nos resultados.



#### 4.3.1.5 Interações Quádruplas

Nesta seção dois métodos são descritos para a computação das interações não lineares em águas profundas. O primeiro método é denominado DIA, sendo relativamente uma versão rústica da integral de Boltzmann. O segundo é denominado enfoque XNL e foi implementado em SWAN por G. Ph. Van Vleeder.

No método DIA, as interações quádruplas onda-onda são computadas com Interação de Aproximação Discreta (*Discrete Interaction Approximation – DIA*), como proposto por Hasselmann *et al.* (1985 *apud op cit.*). Seu código fonte ligeiramente adaptado por Tolman (1993 *apud op cit.*), tem sido utilizado nos modelos SWAN e WWM. No DIA, duas interações quádruplas do número de ondas são consideradas, ambas com as frequências:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \sigma_3 = \sigma(1 - \lambda) = \sigma^+, \sigma_4 = \sigma(1 + \lambda) = \sigma^- \quad (8)$$

onde  $\lambda$  é um grupo de coeficiente constante igual a 0,25. Para satisfazer as condições de ressonância para a primeira interação quádrupla, os vetores de número de ondas com frequência  $\sigma_3$  e  $\sigma_4$ , ficam num ângulo de  $\theta_1 = -11.5^\circ$  e  $\theta_2 = 33.6^\circ$  para os dois vetores de número de ondas idênticos às frequências  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ . A segunda interação quádrupla, é um espelho da primeira interação, os vetores dos números de ondas com frequência  $\sigma_3$  e  $\sigma_4$  ficam como ângulos espelho de  $\theta_3 = -11.5^\circ$  e  $\theta_4 = 33.6^\circ$ .

Com esta aproximação de interação discreta, o termo fonte  $S_{nl4}(\sigma, \theta)$  é dado por:

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta) \quad (9)$$

onde  $S_{nl4}^*$  se refere a primeira interação quádrupla e  $S_{nl4}^{**}$  a segunda (As expressões para  $S_{nl4}^{**}$  são idênticas para aquelas  $S_{nl4}^*$  das direções de espelho) e:

$$S_{nl4}^* = 2\delta S_{nl4}(\alpha_1 \sigma, \theta) - \delta S_{nl4}(\alpha_2 \sigma, \theta) - \delta S_{nl4}(\alpha_3 \sigma, \theta) \quad (10)$$

no qual  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = (1 + \lambda)$  e  $\alpha_3 = (1 - \lambda)$ . Cada uma das contribuições  $i = 1, 2, 3$  é:

$$\delta S_{nl4}(\alpha_i \sigma, \theta) = C_{nl4} (2\pi)^2 g^{-4} \left( \frac{\sigma}{2\pi} \right)^{11} \left[ \begin{array}{l} E^2(\alpha_i \sigma, \theta) \left\{ \frac{E(\alpha_i \sigma^+, \theta)}{(1 + \lambda)^4} + \frac{E(\alpha_i \sigma^-, \theta)}{(1 - \lambda)^4} \right\} \\ - 2 \frac{E(\alpha_i \sigma, \theta) E(\alpha_i \sigma^+, \theta) E(\alpha_i \sigma^-, \theta)}{(1 - \lambda^2)^4} \end{array} \right] \quad (11)$$

com constante  $C_{nl4} = 3 * 10^7$ . Seguindo Hasselmann e Hasselmann (1981 *apud* SWAN Manual, 2007), as interações quádruplas em profundidades finitas são tomadas da mesma forma para a transferência quádrupla em águas profundas, multiplicada com o fator escalar:

$$S_{nl4}^{finite\ depth} = R(k_p d) S_{nl4}^{deep\ water} \quad (12)$$

com  $R$  dado por:

$$R(k_p d) = 1 + \frac{C_{sh1}}{k_p d} (1 - C_{sh2} k_p d) \text{EXP} C_{sh3} k_p d \quad (13)$$

no qual  $k_p$  é o número de ondas de pico do espectro JONSWAP para os quais as computações originais eram executadas. Os valores dos coeficientes são:  $C_{sh1} = 5.5$ ,  $C_{sh2} = 6/7$  and  $C_{sh3} = -1.25$ . No limite de águas rasas, i.e.,  $k_p \rightarrow 0$  a transferência não linear tende ao infinito. Desta forma, um limite baixo  $k_p = 0.5$  é aplicado (WAM Ciclo 4; KOMEN *et al.*, 1994 *apud* SWAN Manual, 2007), resultando

num valor máximo de  $R(k_p d) = 4.43$ . Para incrementar a robustez do modelo no caso de formato arbitrário do espectro, o número de ondas de pico  $k_p$  é substituído por  $k_p = 0.75 k$  (KOMEN *et al.*, 1994 *apud op cit.*).

O segundo método para cálculo das interações não lineares é denominado método Webb-Resio-Tracy (WRT), o qual é fundamentado na formulação integral original de seis dimensões Boltzmann de Hasselmann (1962, 1963a,b *apud op cit.*). Uma detalhada descrição do método WRT e sua implementação em modelos de espectro de ondas discretos como SWAN e WWM é dado em Van Vleeder (2006 *apud op cit.*). Uma revisão dos métodos computacionais para a simulação da razão de transferência não linear exata é dada em Benoit (2005 *apud op cit.*).

A integral de Boltzmann descreve a razão de mudança de densidade de ação de um número de onda particular, devido a interações ressonantes entre pares de quatro números de ondas. Para estes números de ondas interagirem, precisam satisfazer as seguintes condições ressonantes:

$$\left. \begin{aligned} \vec{k}_1 + \vec{k}_2 &= \vec{k}_3 + \vec{k}_4 \\ \sigma_1 + \sigma_2 &= \sigma_3 + \sigma_4 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

A razão de mudança na densidade de ação  $N_1$  no número de ondas  $\vec{k}_1$  devido a todas as interações quádruplas envolvendo  $\vec{k}_1$  é dada por:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \iiint G(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4) \delta(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 - \vec{k}_4) \delta(\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4) \times [N_1 N_3 (N_4 - N_2) + N_2 N_4 (N_3 - N_1)] d\vec{k}_2 d\vec{k}_3 d\vec{k}_4 \quad (15)$$

onde a densidade de ação  $N$  é definida em termos de vetores de número de ondas  $\vec{k}$ ,  $N = N(\vec{k})$ . O termo  $G$  é um complicado coeficiente de acoplamento para o qual uma expressão explícita foi dada por Herterich and Hasselmann (1980 *apud SWAN Manual*, 2007). No método WRT um número de transformações são feitas para remover as

funções delta. Um elemento chave no método WRT é considerar o espaço de integração para cada  $(\vec{k}_1, \vec{k}_3)$  combinação:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = 2 \int T(\vec{k}_1, \vec{k}_3) d\vec{k}_3 \quad (16)$$

na qual a função  $T$  é dada por

$$\begin{aligned} T(\vec{k}_1, \vec{k}_3) = & \iint G(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4) \delta(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 - \vec{k}_4) \\ & \times \delta(\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4) \theta(\vec{k}_1, \vec{k}_3, \vec{k}_4) \\ & \times [N_1 N_3 (N_4 - N_2) + N_2 N_4 (N_3 - N_1)] d\vec{k}_2 d\vec{k}_4 \end{aligned} \quad (17)$$

e

$$\theta(\vec{k}_1, \vec{k}_3, \vec{k}_4) = \begin{cases} 1 & \text{quando } |\vec{k}_1 - \vec{k}_3| \leq |\vec{k}_1 - \vec{k}_4| \\ 0 & \text{quando } |\vec{k}_1 - \vec{k}_3| > |\vec{k}_1 - \vec{k}_4| \end{cases} \quad (18)$$

As funções delta na equação 17 determinam uma região no espaço do número de ondas ao longo do qual a integração poderia ser realizada. A função  $\theta$  determina uma seção da integral a qual não é definida devida a suposição que  $\vec{k}_1$  está mais perto de  $\vec{k}_3$  do que  $\vec{k}_2$ . O ponto crucial do método de Webb consiste em usar um sistema de coordenada local ao longo de um lócus nomeado, isto é, a trajetória no espaço que satisfaz as condições de ressonância para uma combinação dada de  $\vec{k}_1$  e  $\vec{k}_3$ . Para tal fim o  $(k_x, k_y)$  sistema de coordenada é substituído por  $(s, n)$  sistema de coordenada, onde  $s(n)$  é a direção tangencial (normal) ao longo do lócus. Depois algumas transformações, as integrais de transferência podem então ser descritas como uma linha integral fechada ao longo do locus fechado.

$$T(\vec{k}_1, \vec{k}_3) = \iint G J \theta(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4) \times [N_1 N_3 (N_4 - N_2) + N_2 N_4 (N_3 - N_1)] ds \quad (19)$$

no qual  $G$  é o coeficiente de acoplamento e  $J$  é o termo Jacobiano de uma função representando as condições ressonantes. O termo Jacobiano é uma função do grupo de velocidades dos números de ondas interagidos.

$$J = |\vec{c}_{g,2} - \vec{c}_{g,4}|^{-1} \quad (20)$$

Numericamente, a integral de Boltzmann é computada como a soma finita de muitas linhas integrais  $T$  para todas as combinações discretas de  $\vec{k}_1$  e  $\vec{k}_3$ . A linha integral da equação 19 é resolvida pela divisão do lócus tipicamente em 40 partes, as quais sua versão discretizadas é dada por:

$$T(\vec{k}_1, \vec{k}_3) \approx \sum_{i=1}^{n_s} G(s_i) J(s_i) P(s_i) \Delta s_i \quad (21)$$

no qual  $P(s_i)$  é o termo produto para um dado ponto no lócus,  $n_s$  é o número de segmentos,  $s_i$  é a coordenada discreta ao longo do lócus, e  $\Delta s_i$  é o tamanho do passo. Finalmente, a razão de mudança para um dado número de onda  $\vec{k}_1$  é dado por:

$$\frac{\partial N(\vec{k}_1)}{\partial t} \approx \sum_{i_{k3}=1}^{n_n} \sum_{i_{\theta3}=1}^{n_\theta} T(\vec{k}_1, \vec{k}_3) \Delta k_{i_{k3}} \Delta \theta_{i_{\theta3}} \quad (22)$$

onde  $n_k$  e  $n_\theta$  são o número discreto dos números de ondas e direções no grid spectral computacional, respectivamente. Note que embora o espectro é definido em termos de vetores de número de ondas  $\vec{k}$ , o grid computacional em um modelo de ondas é convenientemente melhor definido em termos de número de ondas absoluto e direção de ondas  $(k, \theta)$  para assegurar a direção isotrópica dos cálculos. Tomando todos os

números de onda  $\vec{k}_1$  se produz o termo fonte completo devido às interações quádruplas não-lineares onda-onda. Os detalhes da computação de um lócus para uma combinação dada dos números de onda  $\vec{k}_1$  e  $\vec{k}_3$  podem ser encontrados em Van Vledder (2006 *apud* SWAN Manual, 2007).

Está notado que estes cálculos exatos de interação são extremamente custosos, requerendo tipicamente  $10^3$  a  $10^4$  mais tempo de esforço computacional do que o DIA. Presentemente, estes cálculos podem, portanto somente ser realizados para testes de caso envolvendo um grid espacial limitado. As interações não lineares de acordo com o método WRT tem sido implementado em modelos usando seqüências de dados portáteis. Nesta implementação, o grid computacional do método WRT é fundamentado no grid espacial discreto do modelo. O método WRT utiliza um  $(\vec{k}, \theta)$  grid, o qual é fundamentado no  $(\sigma, \theta)$  do modelo numérico. Além disso, as rotinas WRT herdaram o poder paramétrico da cauda da curva espectral como DIA. Escolher uma resolução maior do que o grid computacional do modelo para computar interações não lineares, é possível em teoria, mas isto não melhora os resultados e, portanto não é implementado.

Devido às interações não lineares quádruplas onda-onda em altas freqüências serem importantes, é recomendado escolher a freqüência máxima do modelo por volta de seis vezes a freqüência de pico do espectro que é esperada ocorrer no modelo rodando. Note que isto é importante, pois o grid espectral determina a extensão da integração na equação 22. O número recomendado e utilizado de freqüência é por volta de 40, com fator de incremento de freqüência 1,07. A resolução direcional utilizada e recomendada para computar interações não lineares é por volta de  $10^\circ$ . Para propostas específicas outras resoluções podem ser utilizadas, e alguns testes com outras resoluções podem ser necessários.

#### 4.3.1.6 Interações Triplas

A aproximação tripla aglomerada (*Lumped Triad Approximation* – LTA) de Eldeberky (1996 *apud* SWAN Manual, 2007), o qual é uma versão ligeiramente

adaptada da aproximação tripla discreta (*Discrete Triad Approximation – DTA*) de Eldeberky e Batjes (1995 *apud op cit.*) é utilizado em SWAN e WWM em cada direção espectral:

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (23)$$

com

$$S_{nl3}^+(\sigma, \theta) = \max\left[0, \alpha_{EB} 2\pi c c_g J^2 |\sin \beta| \left\{ E^2(\sigma/2, \theta) - 2E(\sigma/2, \theta)E(\sigma/2, \theta) \right\}\right] \quad (24)$$

e

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (25)$$

no qual  $\alpha_{EB}$  é um coeficiente de proporcionalidade melódica. A fase  $\beta$  é aproximada com

$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0.2}{Ur}\right) \quad (26)$$

e com número de Ursell ( $Ur$ ):

$$Ur = \frac{g}{8\sqrt{2\pi^2}} \frac{H_s T_{m01}^2}{d^2} \quad (27)$$

As interações triplas onda-onda são calculadas somente para  $0 \leq Ur \leq 1$ . O coeficiente de interação  $J$  é tomado de Madsed e Sorensen (1993 *apud SWAN Manual*, 2007):

$$J = \frac{k_{\sigma/2}^2 (g d + 2c_{\sigma/2}^2)}{k_{\sigma} d \left( g d + \frac{2}{15} g d^3 k_{\sigma}^2 - \frac{2}{5} \sigma^2 d^2 \right)} \quad (28)$$

#### 4.3.2 Considerações sobre os modelos

SWAN e WWM são modelos numéricos que permitem a aquisição de estimativas realísticas dos parâmetros de ondas em áreas costeiras, lagos e estuários, a partir de condições dadas de vento, de fundo e corrente. Os modelos são fundamentados na equação de equilíbrio da ação de ondas (ou equilíbrio de energia da ausência de correntes) com entradas e saídas.

##### 4.3.2.1 Funcionalidades

Com relação aos processos de propagação de ondas, são representados:

- Propagação através de espaço geográfico;
- Refração devido a variações espaciais no fundo e correntes;
- Empinamento devido a variações espaciais no fundo e correntes;
- Bloqueio e reflexão de ondas por correntes opostas;
- Transmissão através, ação de bloqueio por ou reflexão contra obstáculos;

Com relação aos processos de geração e dissipação de ondas, são representados:

- Geração causada por vento;
- Dissipação por cobertura branca (*whitecapping*);
- Dissipação pela quebra da onda induzida pela profundidade;
- Dissipação pela fricção com o fundo;



- Interações onda-onda (grupos de três e quatro).

Além disso, o arranjo da indução de ondas sobre a superfície média do mar pode também ser computado nos modelos.

#### 4.3.2.2 Limitações

A difração é modelada num senso restrito, pois os modelos podem ser utilizados em áreas onde variações na altura de ondas são extensas, com uma escala horizontal de poucos comprimentos de onda. Entretanto, a computação de difração em condições geofísicas arbitrárias é um tanto complicada e requer um empenho computacional considerável. Para evitar isto, um acesso fase binária (phase-decoupled) é utilizado, pois o mesmo comportamento qualitativo da redistribuição espacial e mudanças na direção de ondas é obtido. Simulações de padrões de ondas estacionárias em Portos podem orientar para resultados não acurados.

Os modelos não calculam correntes induzidas por ondas. Tais correntes relevantes podem ser proporcionadas como dados de entrada a partir de um modelo de circulação, o qual pode ser governado por ondas do SWAN ou WWM num procedimento de interação. Como uma opção os modelos calculam o *set-up* induzido por ondas. Em casos unidimensionais os cálculos são baseados numa equação exata. Nos casos bidimensionais, os cálculos são baseados numa equação aproximada (os efeitos das correntes induzidas por ondas são ignorados; nos casos unidimensionais elas simplesmente não existem).

A LTA, aproximação para interações onda-onda tríplas, depende da largura da distribuição do espectro de ondas. A sintonização (calibração) presente nos modelos (cenário padrão) parece trabalhar razoavelmente em muitos casos, mas isto tem sido obtido a partir de observações num canal estreito de ondas (ondas de cristas longas).

O DIA, aproximação para interações onda-onda quádruplas, depende da largura da distribuição do espectro de ondas, que também parece trabalhar razoavelmente em muitos casos, mas esta é uma aproximação pobre para ondas de

cristas longas (distribuição direcional estreita). Este depende de uma resolução de frequência que em muitos casos, parece trabalhar razoavelmente, mas, da mesma forma, é uma aproximação pobre para resoluções com proporção muito diferente de 10%. Este é um problema fundamental que o SWAN e WWM partilham com outros modelos de ondas de terceira geração, tais como WAM e WAVEWATCH III. Porém, os modelos podem ser utilizados em qualquer escala relevante para ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento.

#### ***4.4 Modelo de RAM para Matinhos***

Obtidos os valores dos parâmetros de ondas oriundos da simulação numérica, foi possível remodelar a batimetria no extremo norte da praia Brava. A metodologia utilizada foi a sugerida por Mead e Black (2001), a qual é fundamentada no comportamento do trem de ondas ao encontrar morfologias específicas de recife. Estas morfologias específicas foram denominadas pelos pesquisadores como componentes de fundo. A figura 7 mostra os tipos de componentes de fundo, e sua respectiva função no processo oceanográfico, quando atingidos pelo trem de ondas. A combinação destes componentes de fundo interage com o trem de ondas controlando o sentido de sua propagação, bem como seu ponto de quebra (MEAD e BLACK, 2001). Na figura 8 são expostos possíveis combinações de componentes de fundo, e respectivo comportamento do trem de ondas ao interagir com a morfologia submersa. O objetivo principal do RAM, neste caso, foi rotacionar o trem de ondas e proporcionar uma quebra de ondas pontual diminuindo a energia no local próximo a erosão.

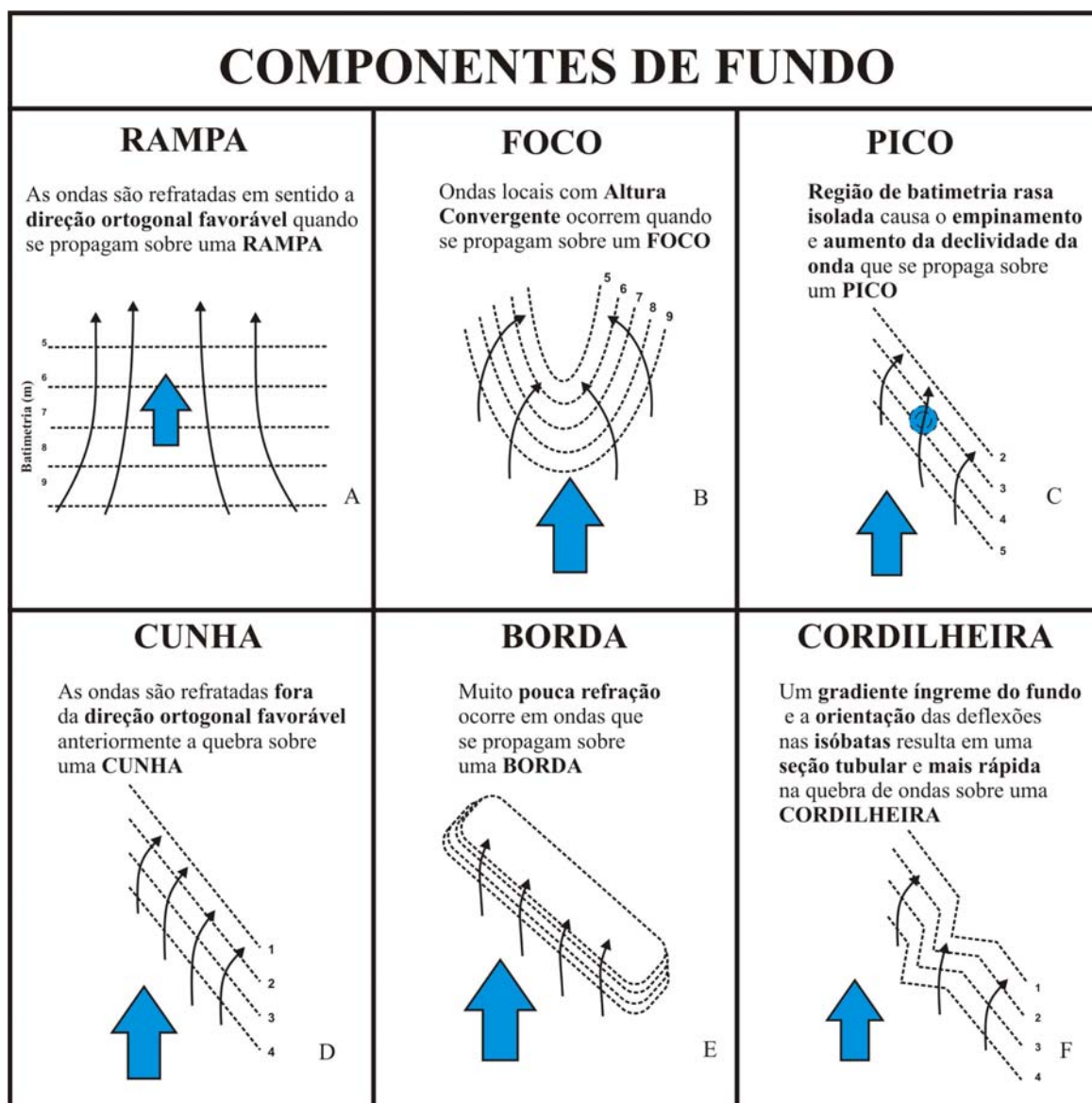


FIGURA 7 – Quadro representativo dos componentes de fundo definidos por Mead e Black (2001). As setas representam direção de ondas e as linhas tracejadas as isóbatas.

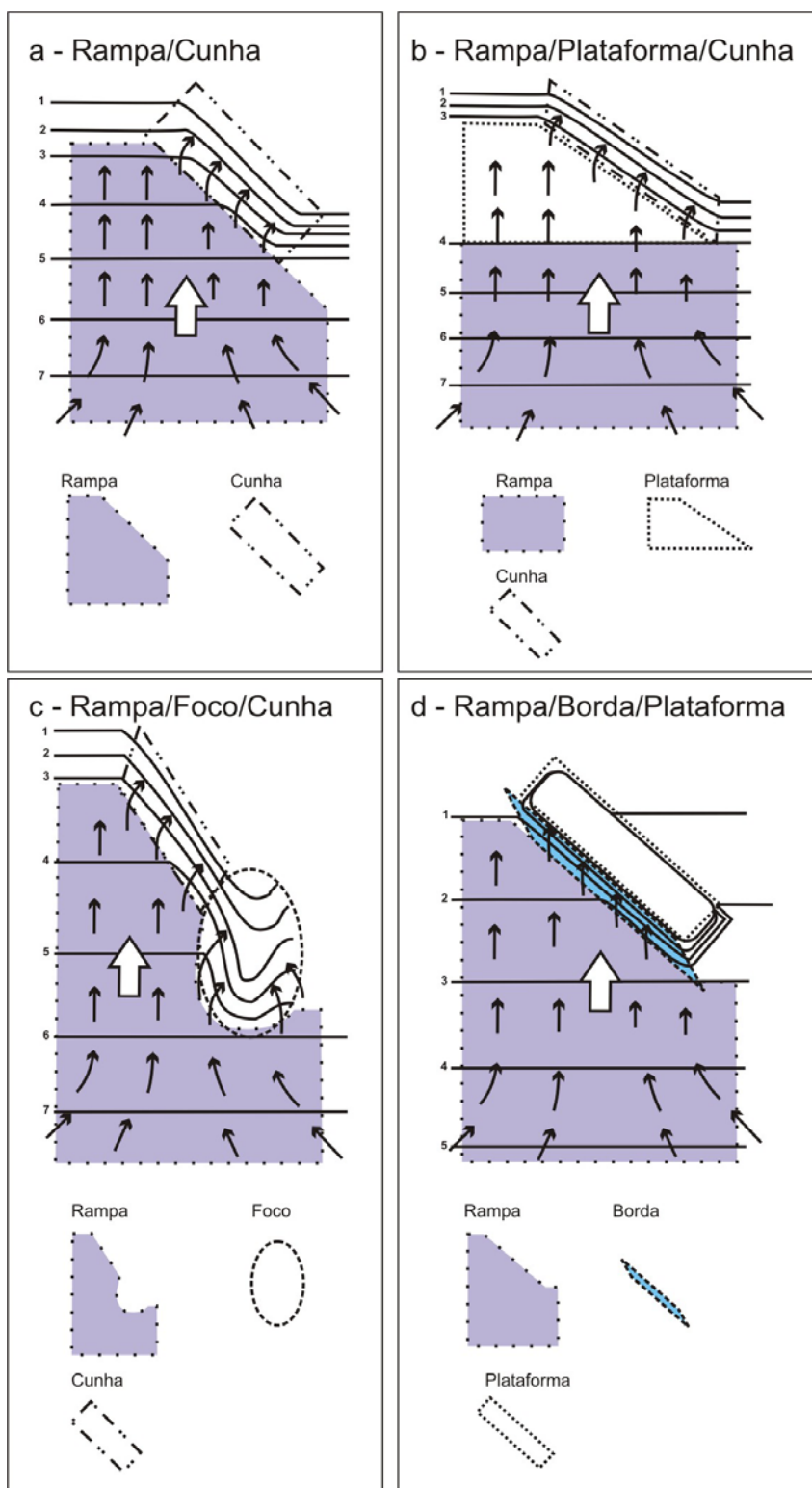


FIGURA 8 - Combinação de diferentes componentes de fundo e sua respectiva ação no comportamento do trem de ondas (MEAD E BLACK, 2001). As setas representam a direção de ondas e as linhas contínuas as isóbatas.

#### 4.4.1 Dimensões e Formato

O formato adotado para o RAM visou primeiramente atender as seguintes condições: (1) Diminuir a energia de ondas próxima ao ponto crítico de erosão; (2) Proporcionar uma quebra de ondas de alta qualidade, melhorando a surfabilidade<sup>4</sup> do local. A parte superior do RAM foi modelada com o critério de estar o mais próximo possível da superfície sem emergir, assegurando a altura mínima de quebra de onda ( $H_s = 0,5$  m) em uma maré baixa (MEAD e BLACK, 2001). O comprimento longitudinal, e a distância do RAM em relação a linha de costa, foram predeterminados de acordo com a metodologia para formação de saliência costeira proposta por Black e Andrews (2001). O critério estabelecido para o comprimento da estrutura está relacionado com a área afetada pela erosão, isto é, o comprimento teve como propósito a proteção apenas da área de interesse na costa. Já para a distância da estrutura em relação a linha de costa, o critério utilizado foi a distância mínima para a formação da saliência na costa. Este critério foi estabelecido para que não ocorra a formação de tómbolo na costa. Em ambos os parâmetros, comprimento longitudinal da estrutura e distância do RAM da costa, a metodologia aplicada sugere a minimização dos impactos.

#### 4.4.2 Orientação

A orientação do RAM foi definida seguindo a metodologia proposta por Mead e Black (2001), onde é observada a isóbata principal<sup>5</sup> próxima ao ponto de quebra das ondas. A estrutura deve ser orientada de acordo com a orientação da costa (MEAD e BLACK, 2001), sendo neste caso, o contorno costeiro no ponto crítico da erosão. Para isso, foram analisados: a batimetria, o comportamento das cristas de ondas que chegam a costa, e a direção favorável à quebra de ondas<sup>6</sup> em Matinhos.

---

<sup>4</sup> Surfabilidade: Qualidade de quebra da onda e números de dias por ano, ideais para o Surfe.

<sup>5</sup> Isóbata principal: Contorno que melhor descreve o formato subaquático da costa.

<sup>6</sup> Direção ortogonal favorável a quebra de ondas: Direção de ondas a qual produz condições ótimas para o Surfe.

#### 4.4.3 Cálculo da Saliência

Segundo Black 2003, saliências são sempre presentes na parte abrigada de recifes. Partindo deste pressuposto, foram calculadas possíveis dimensões relativas à saliência que, teoricamente, seria formada pela introdução do RAM em Matinhos. A metodologia utilizada está de acordo com Black e Andrews (2001) em estudos empíricos massivos de formação de saliências por recifes submersos. Os pesquisadores desenvolveram novos métodos para a previsão do tamanho e geometria das saliências, como uma função da posição e do tamanho da estrutura submersa a *offshore* (Fig.9). Black (2003) salienta ainda que as previsões do tamanho e do formato da saliência são necessárias anteriormente à idealização da estrutura para a avaliação dos impactos ambientais e gerenciamento costeiro. Projetos mal administrados podem levar a formação de tómbolo, o qual age como uma barreira para o transporte ao longo da costa. Ao contrário, nos projetos para formação de saliências, uma lacuna entre a estrutura e a costa é mantida, permitindo o transporte natural de sedimentos na costa. Após a formação da saliência, o limite costeiro continua oscilando, mas a posição média da linha de costa na saliência permanece mais distante em direção ao mar aberto do que as áreas costeiras adjacentes e desprotegidas pelo recife (BLACK, 2003).

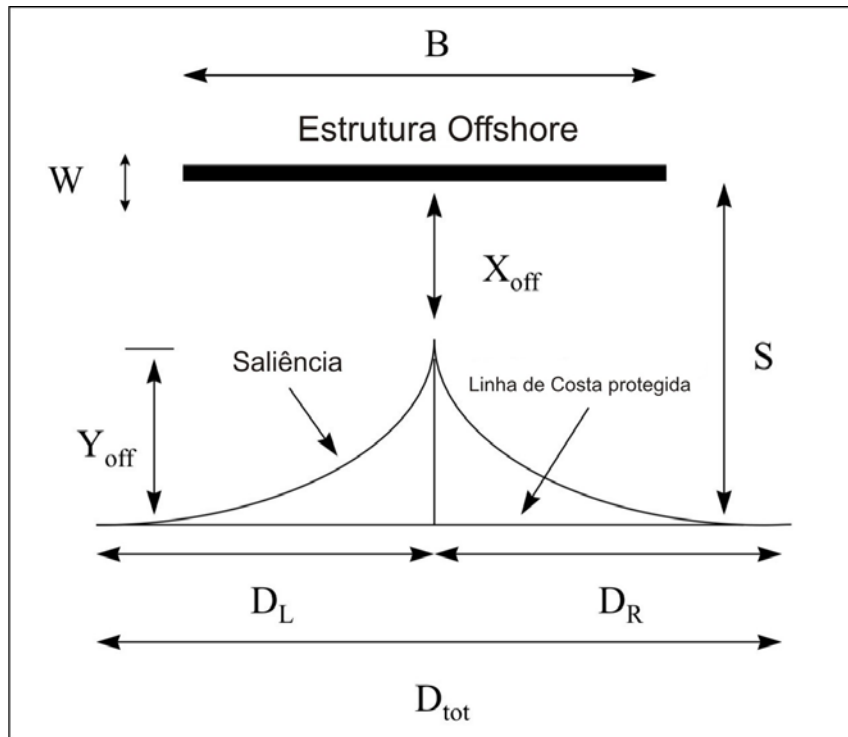


FIGURA 9 - Esquema dos parâmetros necessários para formação de saliência na costa (modificado de BLACK e ANDREWS, 2001).

Segundo Black e Andrews (2001) saliências são formadas quando:  $B/S < 2$ . Sendo  $B$  a extensão paralela a costa da estrutura e  $S$  é a distância entre a estrutura e a parte abrigada da costa. Os valores médios da amplitude da saliência para a estrutura *offshore* são dados por:

$$\frac{X}{B} = 0,498 \left( \frac{B}{S} \right)^{-1,286} \quad (29)$$

onde  $X$  é igual a  $S - Y_{off}$ , a qual é a distância entre a parte protegida da costa e a estrutura ( $S$ ), menos o comprimento entre a costa protegida e a extremidade da saliência ( $Y_{off}$ ). O comprimento da base da saliência é dado por:

$$\frac{Y_{off}}{D_{tot}} = 0,125 \pm 0,020 \quad (30)$$

no qual,  $D_{tot}$  é comprimento total da linha de costa afetada. Black e Andrews salientam ainda que, sobre condições de equilíbrio dinâmico, saliências costeiras possuem o formato aproximadamente simétrico melhor representado por uma curva sigmóide assimétrica (Fig.10).

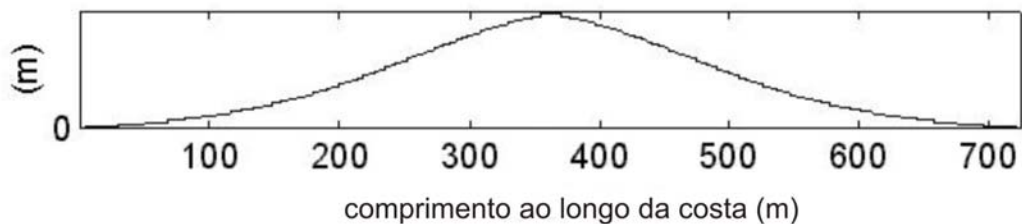


FIGURA 10 - Curva sigmóide assimétrica representando o formato teórico de desenvolvimento de saliências costeiras (BLACK e ANDREWS, 2001)

Assim, foram calculadas as dimensões da saliência teórica a ser formada, de acordo com as dimensões do RAM projetado.

#### **4.5 Avaliação de Estudo e Metodologia para a Redução de Erosão em Matinhos**

A avaliação foi realizada através da comparação entre os dados obtidos pelos dois modelos numéricos nas situações, antes e depois do RAM proposto em Matinhos. Para isto, foram observados parâmetros de ondas ao encontrar a costa sem a estrutura (cenário original), e após a introdução da estrutura.



## 5 RESULTADOS

### 5.1 Clima de ondas

O clima de ondas para Matinhos foi caracterizado através da análise dos dados coletados em gráficos de registro de ondas. Os parâmetros de ondas analisados nos gráficos foram: altura significativa ( $H_s$ ), altura máxima ( $H_{max}$ ), período significativo ( $T_s$ ), período de pico ( $T_p$ ), período máximo ( $T_{max}$ ) e direção de ondas ( $\Theta$ ). O período de registro de ondas analisado foi de outubro de 2006 a outubro de 2007.

Após a análise foi selecionado para as simulações numéricas, um momento no registro dos dados que caracterizou ondulação de tempestade atingindo a costa. Isto foi determinado, pois estas ondulações formadas em eventos extremos são as responsáveis verdadeiramente pelas modificações na zona costeira (SHORT, 1999). O mesmo autor salienta ainda que, a altura da onda é processo forçante de maior importância na mudança das praias. Segundo Komar (1998), as ondas de tempestades são caracterizadas por valores elevados de altura e período de ondas. Ondas com longos períodos desenvolvem-se em condições de fortes ventos soprando por uma extensa faixa de pista devido à, por exemplo, uma tempestade de longa duração em mar aberto. O fluxo de energia em ondas uniformes é proporcional ao período das ondas e ao quadrado de suas alturas. Por isso ocorre maior transferência de energia do vento para ondas com a duplicação da altura de longos períodos, do que para ondas com o dobro da altura de curtos períodos (KOMAR, 1998).

Portanto, foi considerado no registro o momento em que os parâmetros altura e período de ondas possuíram valores elevados, caracterizando uma condição de tempestade bem definida na costa. O período de registro utilizado para a escolha da condição de tempestade foi de 11/10/2006 a 10/12/2006. Os parâmetros e respectivos valores utilizados foram:  $H_{max}$  - 4,0 m; e  $T_{max}$  - 9 s. Foi considerada também a direção de ondas ( $\Theta$ ) 140° no momento máximo de altura e período de ondas (Fig.11).

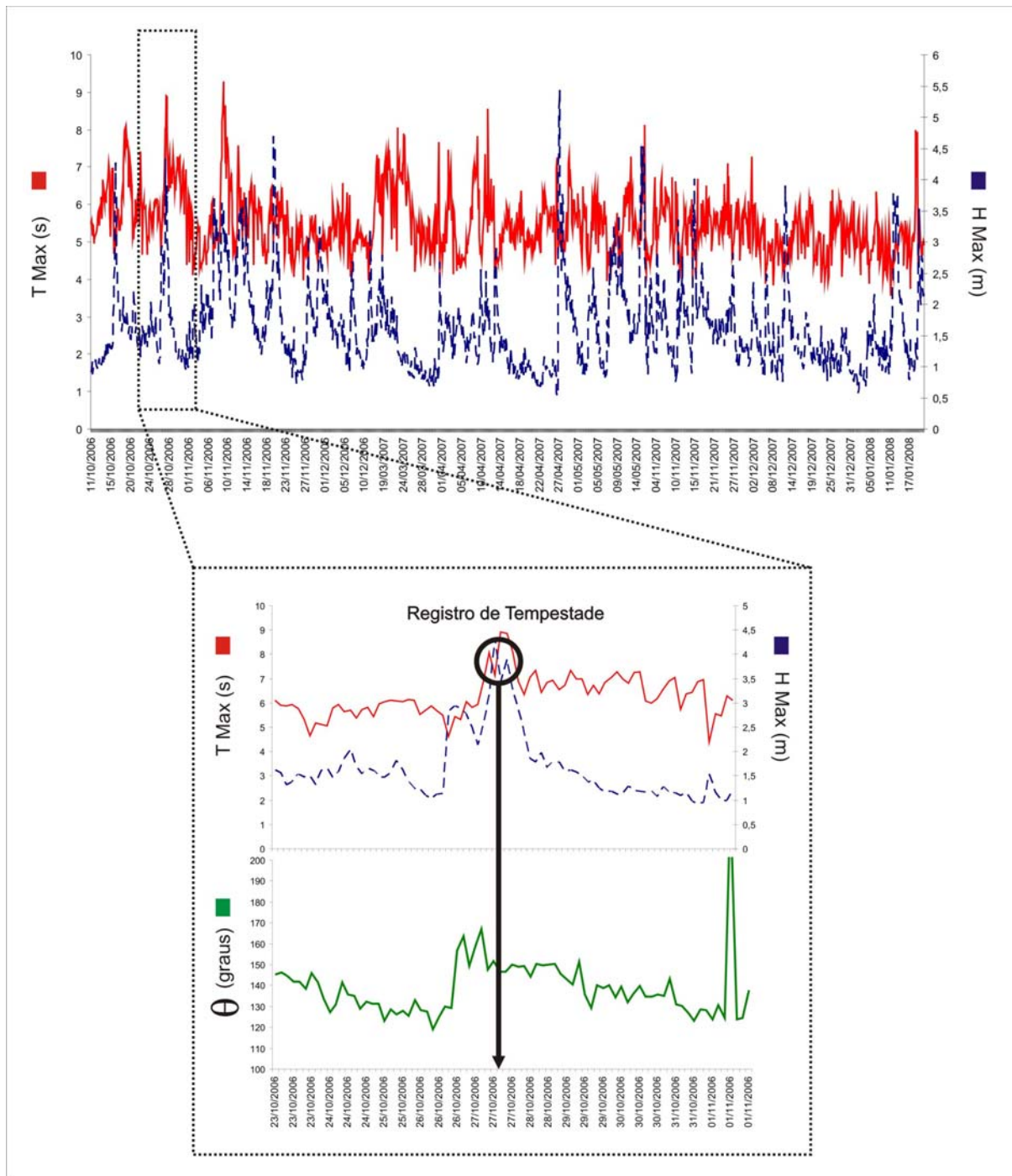


FIGURA 11 – Gráficos dos valores dos parâmetros de ondas  $H_{max}$ ,  $T_{max}$ ,  $\Theta$ , coletados durante o período de 11/10/2006 a 17/01/2008. Notar o momento no registro (zoom) onde foram obtidos valores elevados para  $H_{max}$  e  $T_{max}$ , caracterizando ondas de tempestade.

## **5.2 Modelagem numérica**

### **5.2.1 Testes para a Verificação dos Modelos**

Os modelos SWAN e WWM foram submetidos a uma série de testes (1D) para verificação dos resultados. Os testes foram realizados através da comparação entre resultados medidos em tanque de ondas e resultados modelados em SWAN e WWM. Os resultados medidos foram gerados pelo departamento de Hidráulica da Universidade Técnica de Delft em trabalho realizado para o Escritório de Pesquisa Naval da Marinha Americana (*Office Naval Research – ONR, US Navy*). O objetivo principal dos resultados gerados foi fornecer um banco geral de dados medidos para modelos de onda costeiras e oceânicas. Estes dados ONR permitem que a comunidade de modelagem de ondas possua um meio de comparar, qualitativamente e quantitativamente, dados medidos com resultados de modelos de onda (RIS *et al.*, 2002).

O procedimento utilizado neste estudo foi o de comparar os dados ONR medidos em três diferentes cenários com resultados modelados nas mesmas condições. Os cenários foram previamente escolhidos de acordo com os processos sofridos por ondas ao atingir a costa: (1) Dissipação pela quebra de ondas induzida pela profundidade; (2) Interações triplas onda-onda; (3) Quebra de ondas induzida pela profundidade e set-up induzido por ondas.

#### **5.2.1.1 Teste 1: Dissipação pela quebra de ondas induzida pela profundidade**

O primeiro teste de verificação utilizado foi o de dissipação de energia pela quebra de ondas induzida pela profundidade. Este provém do teste de laboratório realizado por Batjes e Janssen (1978), em um tanque no qual ondas unidirecionais foram propagadas por sobre um perfil de praia com banco submerso. Os dados

medidos foram comparados com os resultados obtidos nos modelos numéricos no mesmo cenário (Fig. 12).

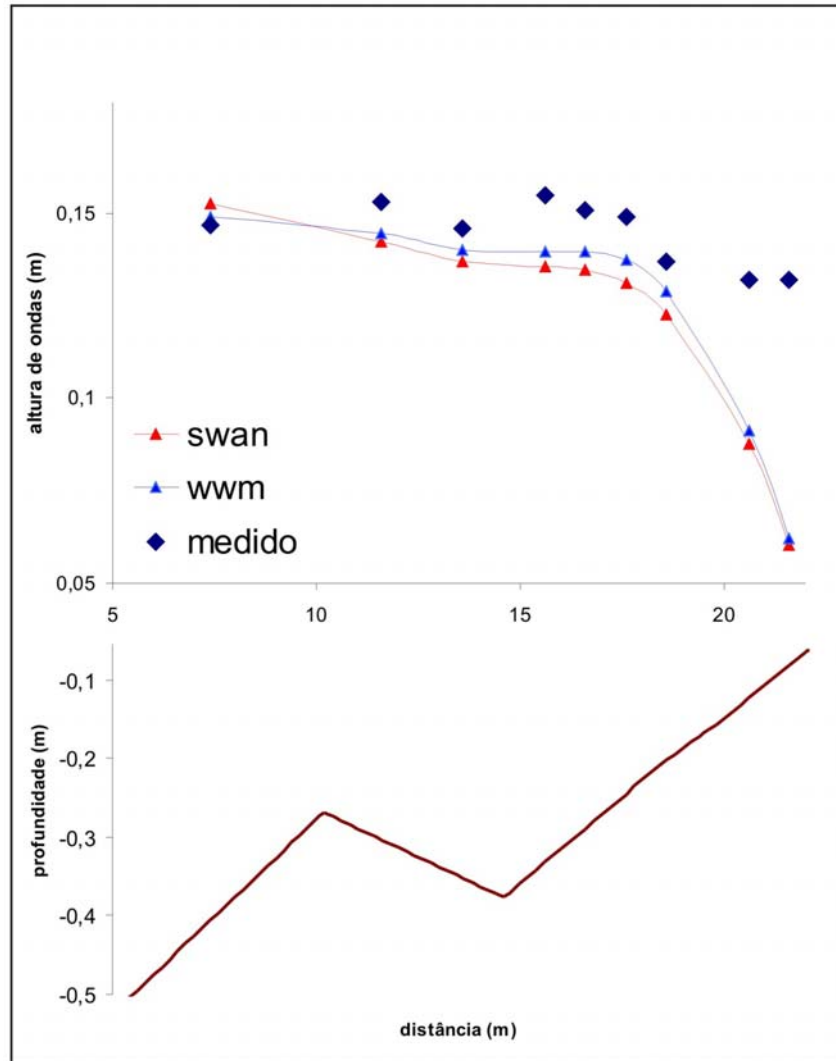


FIGURA 12 – Gráfico de altura de ondas e profundidade oriundas do teste para verificação dos modelos SWAN e WWM, no processo: “quebra de ondas induzida pela profundidade”. Comparação com dados medidos de Batjes e Janssen (1978).

Os resultados de altura de ondas demonstram, de uma maneira geral, uma concordância no comportamento da curva em ambos os modelos. De acordo com o avanço das ondas em direção a profundidades mais rasas, ocorre o decréscimo de sua altura. A aproximadamente 10 m de distância, após o banco submerso, a altura de ondas tende a diminuir pelo efeito da quebra induzida pela profundidade. Os dados

medidos comparados com os modelados, também demonstram o mesmo comportamento. Porém, o valor inicial de altura de ondas medido a 7 m de distância se iguala ao obtido por WWM ( $H = 0,147$  m) e se diferencia do valor obtido por SWAN ( $H = 0,152$  m). Outro ponto é que, após a distância de 18 m os valores medidos de altura de ondas se encontram estabilizados em 0,13 m, enquanto que nos modelos os valores obtidos tendem bruscamente a zero.

### 5.2.1.2 Teste 2: Interações triplas

A proposta deste teste foi verificar as interações triplas onda-onda do modelo. A capacidade de reproduzir interações triplas foi testada utilizando os resultados do experimento de laboratório de Beji e Batjes (1993). Neste experimento, ondas foram propagadas a partir da profundidade de águas intermediárias sobre um banco submerso. As profundidades variam entre 0,4 m na parte mais profunda, e 0,1 m acima do banco submerso reproduzido. Os dados medidos no experimento de Beji e Batjes (1993) foram comparados aos dados obtidos por ambos os modelos no mesmo cenário (Fig.13).

Os resultados de altura de ondas dos modelos demonstram, de uma maneira geral, concordância no comportamento da curva. Os dados de altura de ondas modelados apresentam valores crescentes de acordo com o avanço em direção ao banco submerso. O valor de altura ondas máximo de 0,25 m foi obtido sobre o banco submerso em ambos os modelos. Isto pode ser atribuído ao processo de empinamento sofrido pela onda ao encontrar profundidades mais rasas. Após a obtenção do valor máximo exatamente sobre o banco submerso, os valores de altura de ondas obtidos diminuem. Este, por sua vez, pode ser atribuído ao processo de quebra de ondas, pois logo após a obtenção do valor máximo ocorre a queda contínua nos valores de altura de ondas por sobre e após o banco submerso. Comparando com os resultados medidos de altura de ondas, também demonstram o mesmo comportamento. Porém, o valor máximo medido de altura de ondas (0,27 m) é superior ao modelado. Outro ponto a ser salientado é que este valor medido é obtido por duas vezes, logo após a distância de 10 m (antes do ápice do banco) e também por sobre o banco.

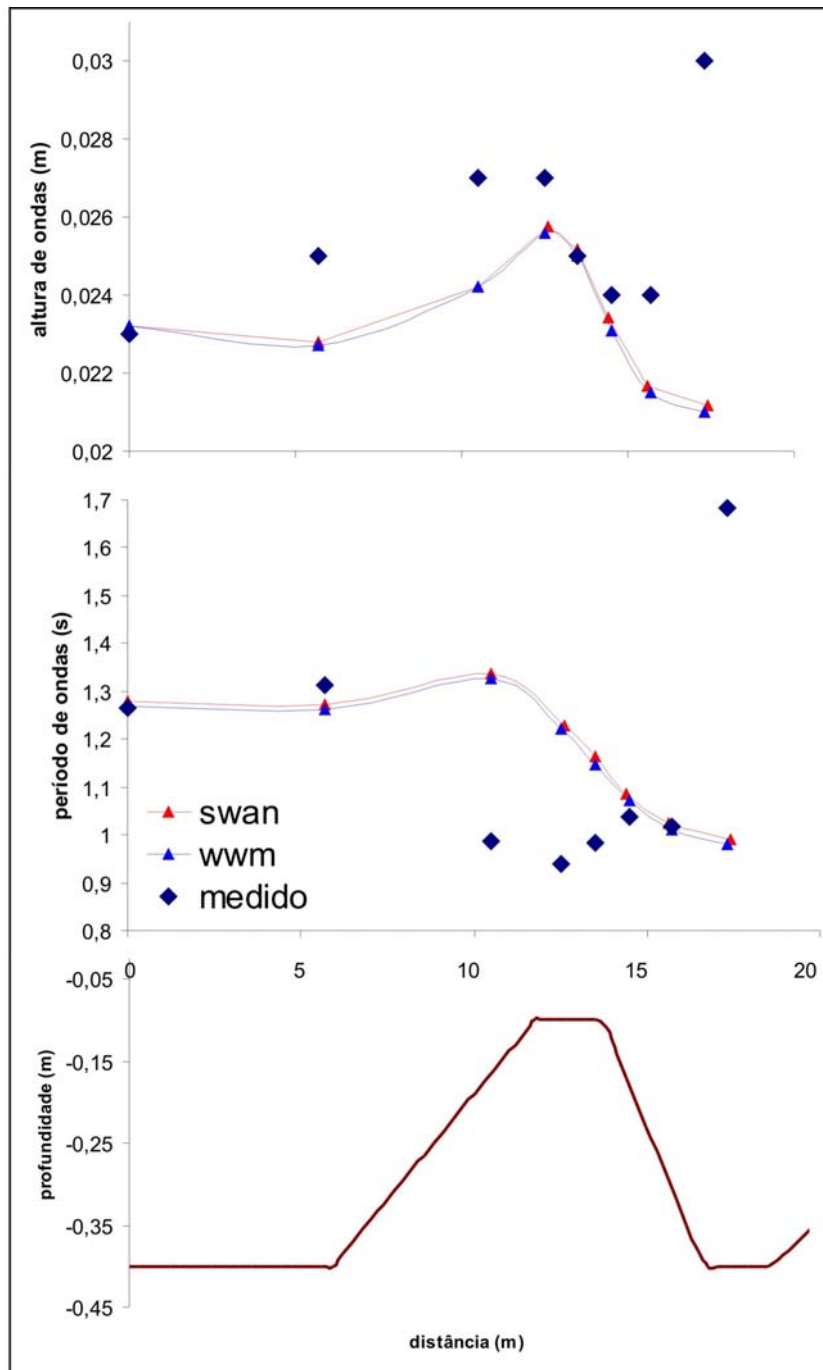


FIGURA 13 – Gráfico de altura de ondas, período de ondas e profundidade oriundas do teste para verificação dos modelos SWAN e WWM no processo: “Interações Triplas”. Comparação com dados medidos de Beji e Batjes (1993).

Os resultados de período de ondas dos modelos demonstram também, de uma maneira geral, concordância no comportamento da curva. Um ligeiro acréscimo nos valores de acordo com o avanço em direção ao banco, e decréscimo vertiginoso dos valores ao encontrar seu ápice. Os dados modelados apresentaram valor mínimo de 0,93 na distância de 17 m. Porém, quando comparados aos valores medidos de período de ondas, as curvas apresentam diferença notável. Os valores medidos apresentam decréscimo logo ao encontrar o banco submerso, chegando ao valor mínimo de 0,94 a uma distância de 12 m. Isto implica que ainda existe deficiência na modelagem de período de ondas, necessitando desta forma mais estudos para melhorar os resultados.

#### *5.2.1.3 Teste 3: Quebra de ondas induzida pela profundidade e set-up induzido por ondas*

Para a verificação da quebra de ondas induzida pela profundidade e set-up induzido por ondas, foi utilizado o resultado do teste de laboratório em tanque de ondas realizado por Boers (1996). Em seu experimento, Boers realizou a propagação de ondas unidirecionais sobre um perfil de praia com banco submerso. Neste caso, um elevado número de sensores foram disponibilizados para a coleta de dados de altura significativa de ondas ( $H_s$ ) e período médio ( $T_{m1}$ ).

Neste caso, foram testados em WWM, dois parâmetros de interação tripla com o objetivo de obter valores mais confiáveis para período de ondas. Visto que, no teste anterior, os valores de período de ondas obtidos nos modelos se diferenciaram dos valores medidos. Os parâmetros dos modelos testados são denominados TRIRA e TRICO. No parâmetro TRIRA é possível escolher a faixa de frequência em que os efeitos da interação onda-onda não linear tripla são estimados. Isto significa a escolha da frequência média de atuação das interações triplas no modelo. Já o parâmetro TRICO, é somente um coeficiente de proporcionalidade, no qual é possível definir quão fortes são as interações triplas no modelo. Os resultados obtidos nos modelos para período de ondas, apresentaram de uma maneira geral, concordância no comportamento da curva, ou seja, um ligeiro acréscimo nos valores até a distância de 5 m e diminuição dos valores de acordo com o avanço em direção a profundidades mais

baixas. Porém, os valores dos modelos quando comparados aos valores medidos apresentam algumas diferenças. Para SWAN, os resultados da comparação demonstraram uma diminuição não tão acentuada, obtendo valores mínimos de 1,6 s a aproximadamente 20 m de distância. Por outro lado, para WWM os resultados obtidos de acordo com o teste dos parâmetros  $TRICO = 0,1$  e  $TRIRA = 5,0$ , obtiveram valores semelhantes aos medidos por Boers (1996) em toda a extensão do experimento. Isto demonstra que as interações triplas são de extrema importância nas simulações numéricas de período de ondas. O estudo destas interações pode contribuir para obtenção de resultados mais confiáveis nas simulações numéricas, sendo desta forma indispensável para o avanço de pesquisas com modelos de ondas (POLNIKOV, 1999).

Os resultados de altura de ondas, neste caso, apresentaram concordância no comportamento da curva tanto para os dados medidos quanto para os dados da simulação numérica. Acréscimo nos valores de acordo com o avanço em direção ao banco submerso, e decréscimo nos valores após o banco de acordo com o avanço em direção a profundidades reduzidas (Fig. 14).



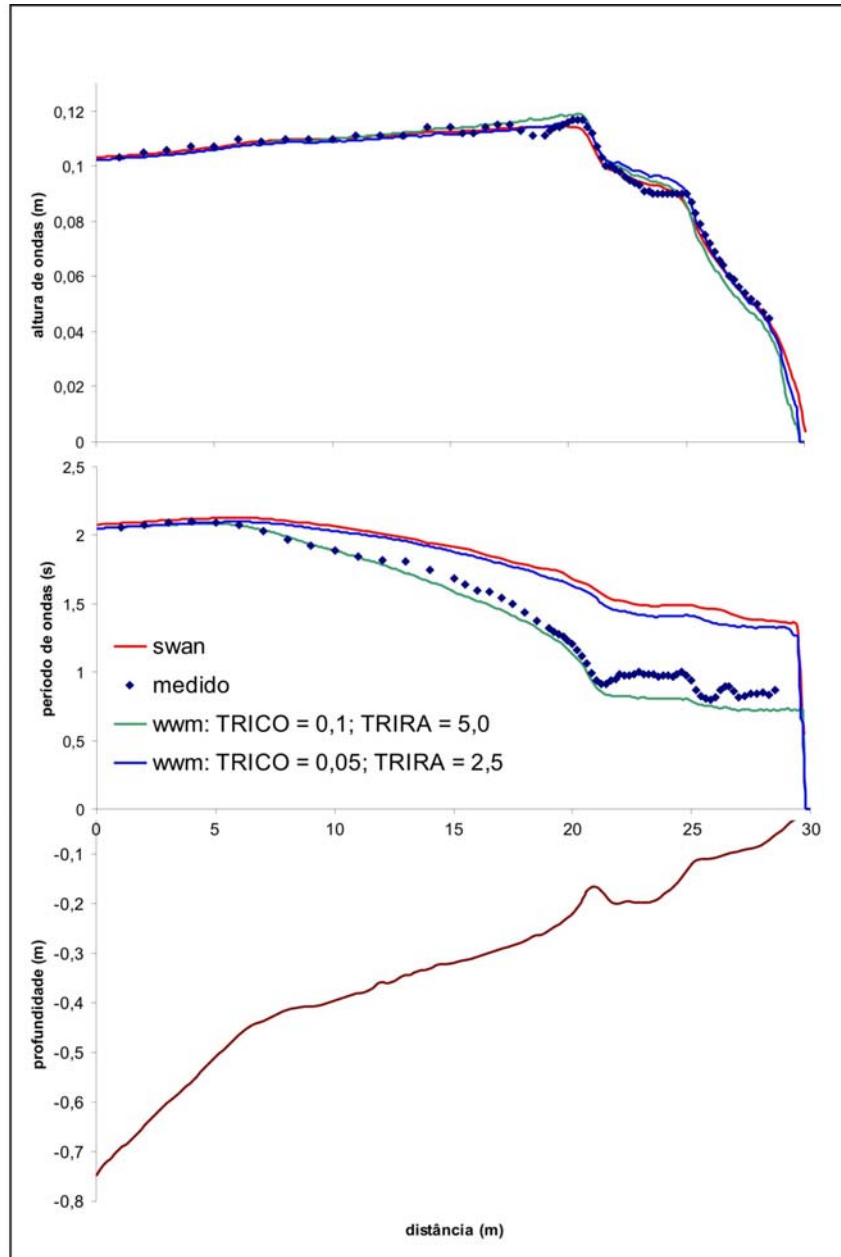


FIGURA 14 - Gráfico de altura de ondas, período de ondas e profundidade oriundas do teste para verificação dos modelos SWAN e WWM no processo: "quebra de ondas induzida pela profundidade e set-up induzido por ondas". Comparação com dados medidos de Boers (1996). Notar a diferença dos resultados obtidos para WWM com a manipulação dos parâmetros TRICO e TRIRA.

## *5.2.2 Grade numérica e definição do domínio*

Para a as simulações numéricas alguns procedimentos de pré-processamento são fundamentais. A geração da grade numérica (malha) sobre um determinado domínio e a interpolação dos dados batimétricos são de grande importância, e determinantes para a qualidade dos resultados. Os modelos SWAN e WWM, devido ao fato de utilizarem malhas de tipo diferente nas simulações (ver metodologia), tiveram o processo de construção diferenciado.

### *5.2.2.1 Definição do domínio*

O primeiro procedimento adotado para construção da grade computacional é a definição dos limites externos do domínio a ser modelado. A área do domínio deve ter a dimensão suficiente para satisfazer os processos oceanográficos relacionados à área de interesse. Portanto, foram utilizados para a definição em ambos os modelos, o levantamento batimétrico realizado pela Nateec Geologia e Saneamento Ltda e também a profundidade onde foram coletados os dados de onda (10 m). Este último foi determinante para a escolha do limite externo em direção ao mar aberto. A área do domínio possui comprimento, ao longo da costa 4,5 km, e em direção a mar aberto de 2,6 km (Fig. 15). A área de interesse no domínio se localiza no extremo norte da praia Brava, se estendendo até a profundidade de aproximadamente 6,5m.

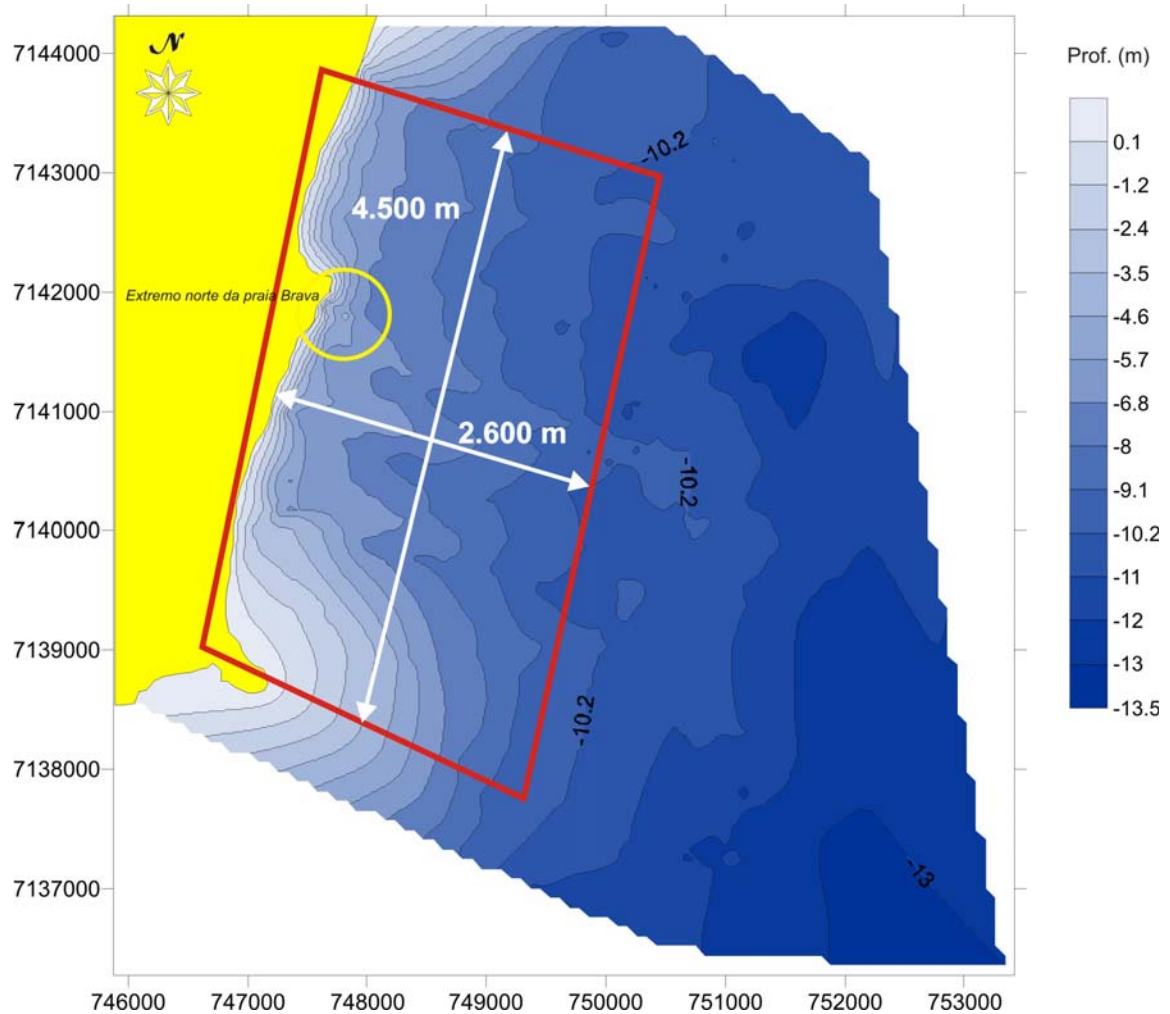


FIGURA 15 – Área do domínio (retângulo) extraída do levantamento batimétrico realizado pela Nateec Geologia e Saneamento Ltda. Notar área de interesse representada pelo círculo.

### 5.2.2.2 Grades numéricas

As grades computacionais foram construídas para cada modelo separadamente. Após isto, foram aplicadas técnicas de refinamento da malha na área de interesse. O objetivo do refinamento é obter melhor representatividade dos dados em ambos os modelos na região de interesse. Para SWAN, que utiliza grade computacional de diferenças finitas, foi construída grade curvilínea com 156.866 elementos e 8000 nós (Fig. 16). A resolução da malha em SWAN foi de 68 m na parte próxima ao contorno externo a 6 m na região de interesse.

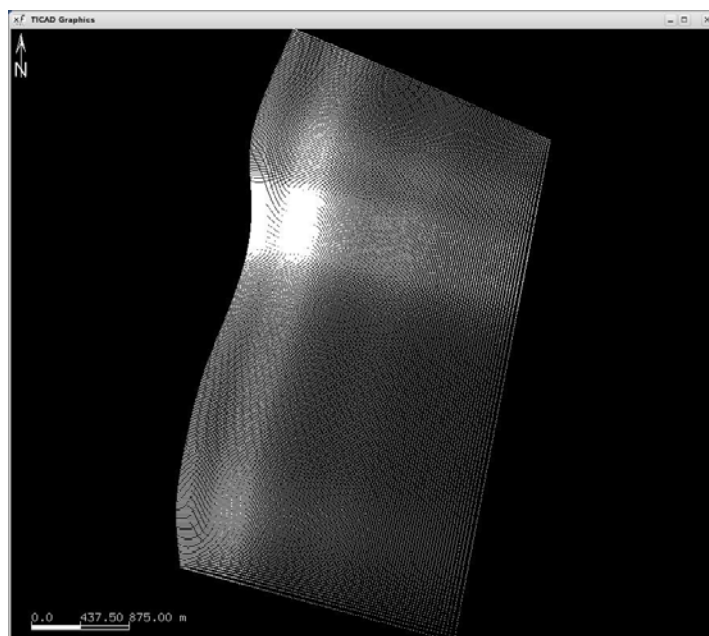


FIGURA 16 – Grade computacional utilizada em SWAN.

Para WWM, que utiliza grade de elementos finitos, foi construída malha desestruturada com 27673 elementos e 14044 nós (Fig.17). A resolução utilizada em WWM foi 100 m no contorno externo a 0,5 m na área de interesse.

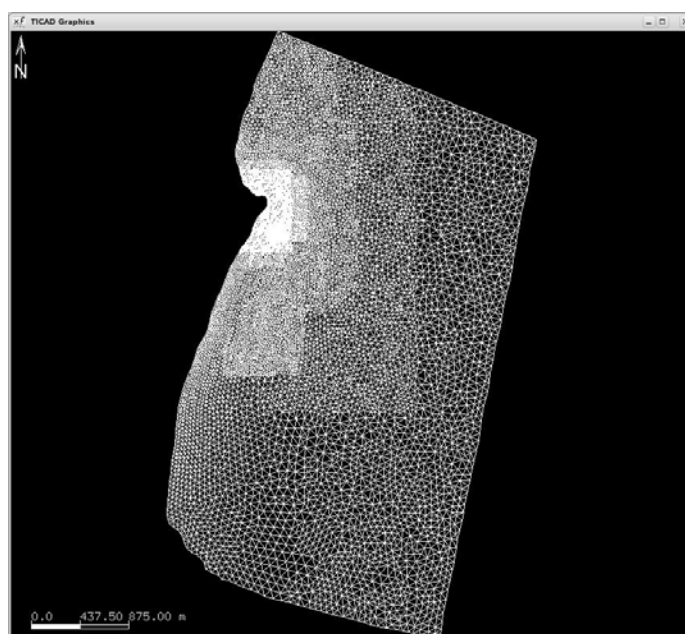


FIGURA 17 – Grade computacional utilizada em WWM.

### 5.2.2.3 Interpolação com a batimetria

Finalmente, após os processos de refinamento da malha e correção das linhas da grade, a batimetria foi interpolada. O processo de interpolação foi realizado através do método de triangulação, com a definição de um polígono englobando todo o domínio. A figura 18 apresenta a batimetria final na área de interesse após interpolação na grade numérica.

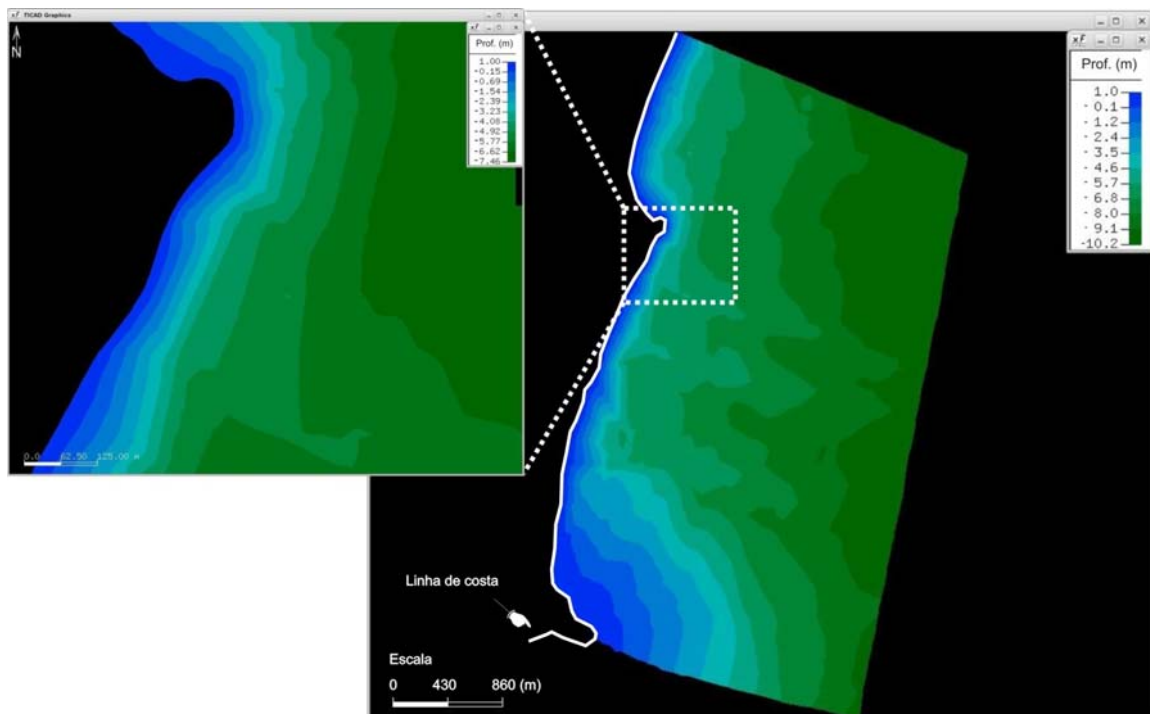


FIGURA 18 - Distribuição da profundidade na área de domínio utilizada em ambos os modelos. Notar área de interesse representada no detalhe.

### 5.2.3 Condições de contorno

A qualidade dos resultados dos modelos depende dos valores utilizados como condição de contorno, sendo que quanto mais corretamente estes valores representarem o fenômeno real melhores serão os resultados produzidos. As condições de contorno são as forças geradoras do movimento dentro do modelo. A definição das

condições de contorno no limite aberto determina a influência das condições hidrodinâmicas da área adjacente nos processos regentes dentro do domínio modelado.

O extremo norte da praia Brava de Matinhos (área de interesse) é uma praia aberta, desprotegida das ondulações provenientes das direções leste (E) e sul (S). A erosão na área de interesse ocorre basicamente quando ondulações de eventos extremos provenientes da direção S ou do quadrante SE atingem a costa. Portanto, foi utilizado um cenário específico de ondas de tempestade como forçante nas simulações de ambos os modelos. Como a questão a ser abordada não é geração de ondas pelo vento local, não foi utilizada nas simulações a forçante vento. Assim, o cenário utilizado nas simulações numéricas ( $H_s = 4,0$  m;  $T = 9$  s e  $\Theta = 140^\circ$ ) foi definido a partir da análise dos dados de ondas coletados pelo ondógrafo S4. O limite aberto do domínio foi determinado na isóbata de 10 m, profundidade na qual foram coletados os dados de ondas. As simulações foram realizadas considerando o tempo total de 20 minutos, com um intervalo de discretização (*time step*) de 5 segundos. As correntes de maré foram negligenciadas neste caso, e o nível de água foi assumido constante em todo o domínio.

#### 5.2.4 Modelo de RAM para Matinhos

O desenho de recife para Matinhos compreende a combinação dos componentes de fundo: rampa, foco e cunha (Fig. 19). Esta combinação particular dos componentes foi escolhida para pré-condicionar o trem de ondas para quebra ao atingir a estrutura (rampa). Após o pré-condicionamento proporcionado pela rampa, o componente foco concentra a energia da onda para quebra pontualmente. Após a quebra pontual no foco, a componente cunha fornece a condição para que o movimento de quebra se desenvolva de forma linear até o término da estrutura. A estrutura possui origem na isóbata principal de 6 m de profundidade, e se estende até a isóbata de 5 m. Com comprimento total de 100 m, largura de 80 m e altura máxima de 3,5 m, o RAM foi disposto na área de interesse a 200 m da costa (Fig. 20). A porção mais rasa do recife (crista) foi modelada para estar a 1,5 m de profundidade nas simulações numéricas. A

orientação foi definida de acordo com a isóbata principal, análise do clima de ondas e respectivas cristas de ondas que chegam ao recife. Isto significa que o RAM foi projetado de acordo com a direção favorável a quebra de ondas. A estrutura modelada foi desenvolvida com o objetivo de dissipar a energia de ondas em eventos de tempestade, e desenvolver a formação de saliência na costa.

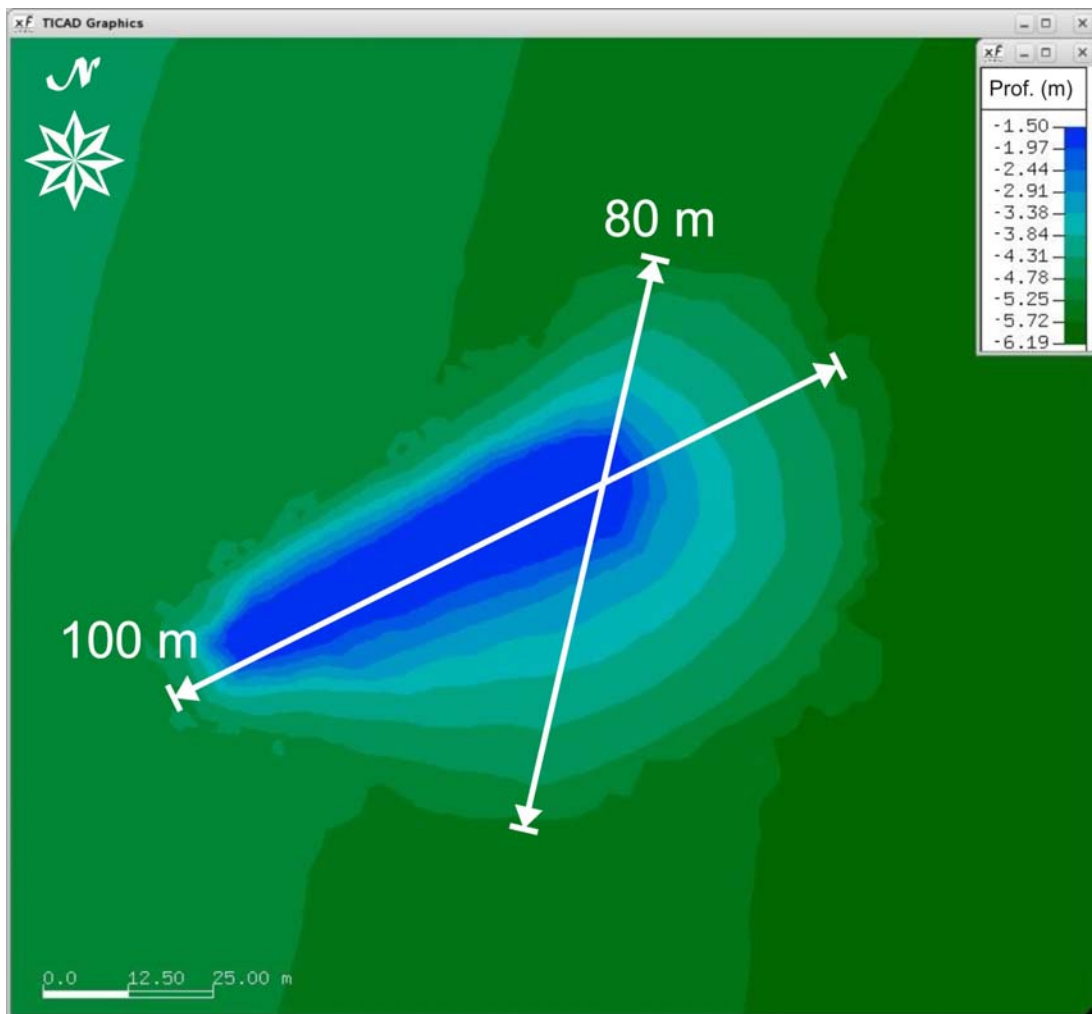


FIGURA 19 – Batimetria do modelo de RAM desenvolvido para Matinhos. Notar dimensões de comprimento total e largura do recife.

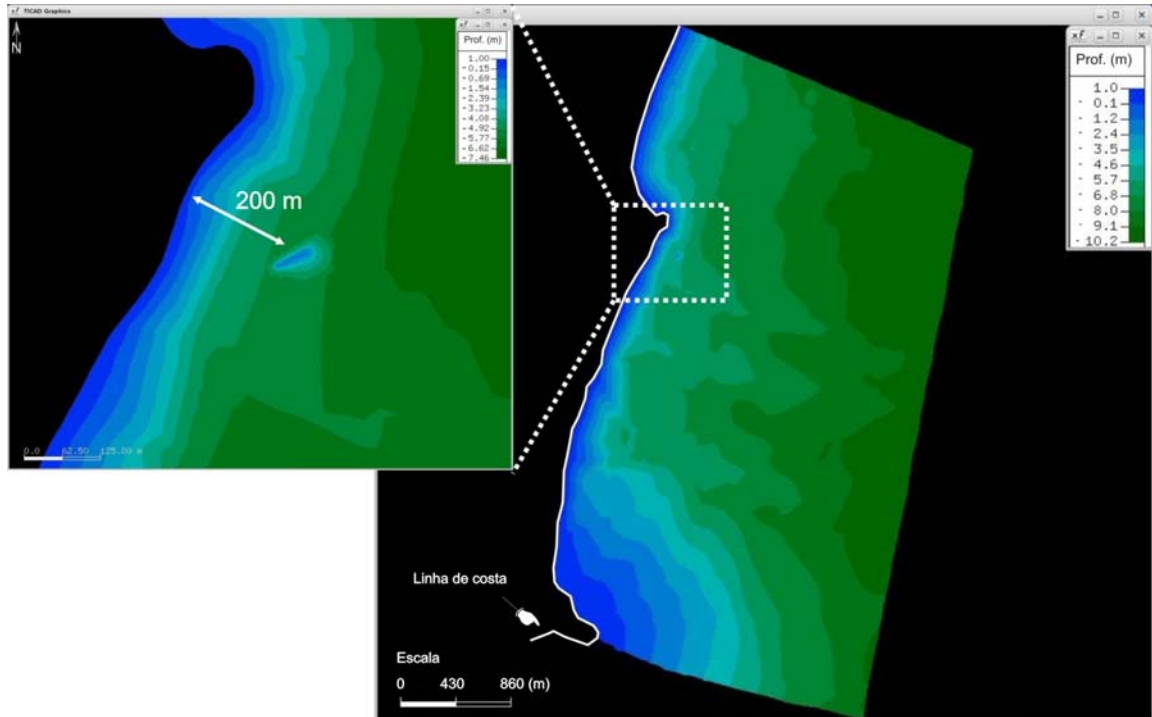


FIGURA 20 – Distribuição da profundidade na área de domínio modificada de acordo com o RAM. Notar área de interesse representada no detalhe e respectiva distância do RAM para a linha de costa.

### 5.2.5 Avaliação do modelo de RAM para Matinhos

Para a avaliação do RAM foi realizada a simulação de um evento de tempestade atingindo a costa de Matinhos. O evento simula a condição extrema de ondas observada no registro dos dados, com altura significativa ( $H_s$ ) de 4 m, período ( $T$ ) de 9 s e direção ( $\Theta$ ) sudeste (condição de contorno). Os modelos numéricos SWAN e WWM forneceram parâmetros de ondas nas duas situações: (1) batimetria original da área de interesse (batimetria original); (2) batimetria da área de interesse modificada de acordo com o RAM (batimetria RAM). Serão apresentados os resultados de ambos os modelos de acordo com as duas situações.



### 5.2.5.1 *Altura de ondas*

Em SWAN, os resultados de altura de ondas estão representados em diagramas realizados para a área de interesse (Fig. 21). Para uma melhor visualização dos resultados nos diagramas, foram traçados perfis transversais à linha de costa e realizados respectivos gráficos de altura de ondas e profundidade. As situações batimetria original e batimetria RAM estão representadas nos gráficos por perfil 1 e perfil 2 respectivamente.

A análise dos gráficos demonstrou o decréscimo da altura de ondas na situação batimetria RAM (perfil 2) a uma distância da costa superior do que na situação batimetria original (perfil 1). Os valores de altura de ondas encontrados em ambos os perfis, a uma distância de 220 m, foi de 2,4 m. Porém, ao nos aproximarmos da costa a uma distância de 150 m, os valores encontrados foram 2,3 m para perfil 1 e 1,4 m para o perfil 2. Isto significa uma queda de 1 m de altura para perfil 2, e 10 cm de altura para perfil 1, em 70 m de distância no perfil. Analisando o gráfico de profundidade do perfil 2, se pode observar que a 150 m da costa está localizada a região abrigada pelo RAM, e, portanto, se pode atribuir esta queda vertiginosa na altura devido à quebra de ondas sobre o RAM. Segundo Black (2003), a energia de ondas é dissipada no recife, resultando em menos energia na parte abrigada e conseqüente deposição de sedimento na praia.

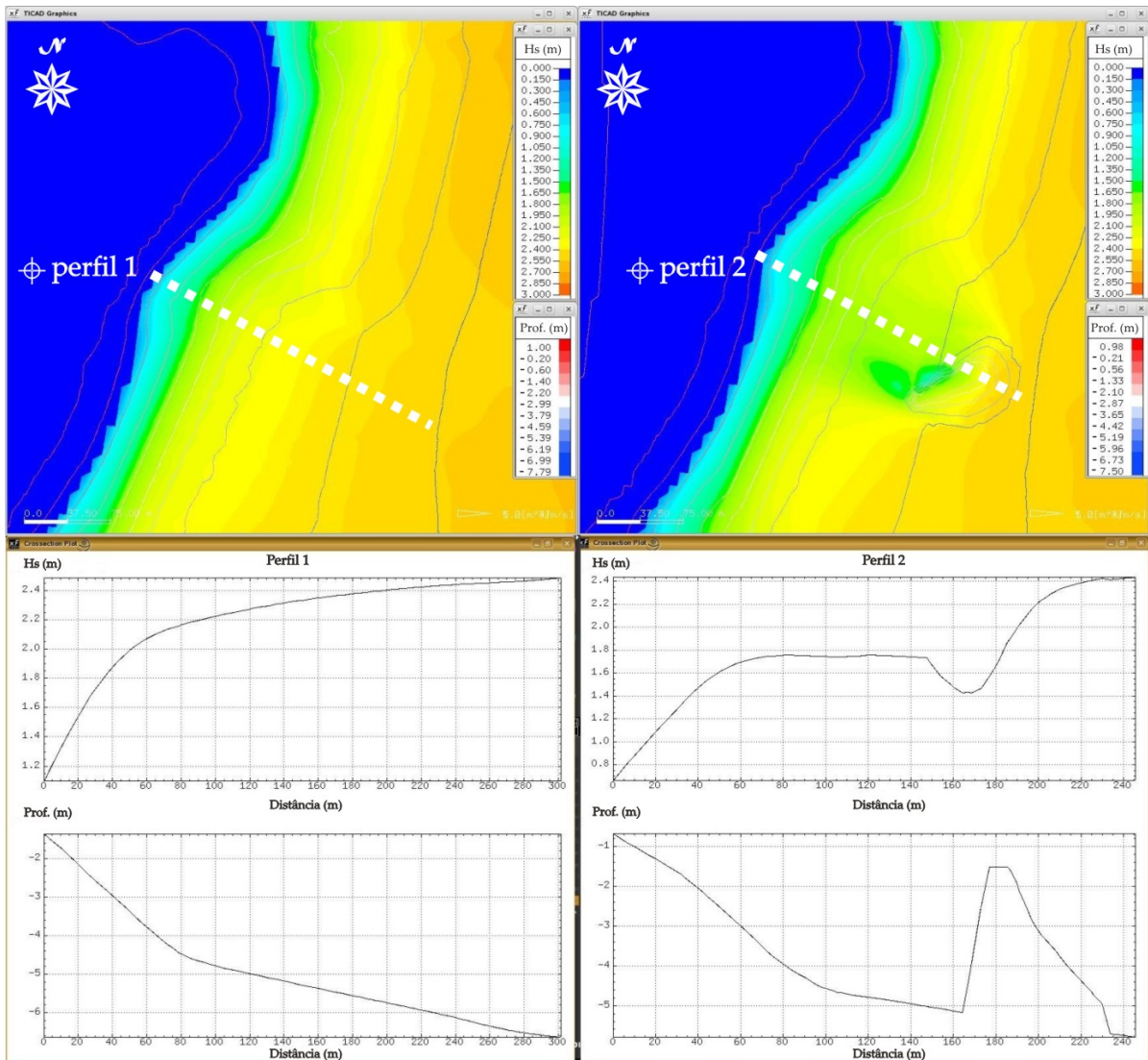


FIGURA 21 – Diagramas dos resultados de altura de ondas para as situações da batimetria original (perfil 1) e batimetria RAM (perfil 2) em SWAN; e respectivos gráficos de altura de ondas e profundidade.

Da mesma forma, foram gerados diagramas representativos da altura de ondas a partir dos resultados obtidos em WWM (Fig. 22). Os valores encontrados também demonstram uma queda vertiginosa da altura de ondas na situação batimetria RAM (perfil 2) na região onde está localizado o recife. O valor de altura de ondas encontrado a 220 m de distância da costa foi de 2,5 m para ambos os perfis. Por outro lado, em concordância com os resultados obtidos em SWAN, de acordo com que avançamos em direção a costa, os valores de altura de ondas encontrados a 200 m de distância em

WWM foram de 2,5 m e 1,2 m para perfil 1 e perfil 2 respectivamente. Porém em WWM, a altura de ondas diminui 1,3 m em 20 m de distância para perfil 2 (batimetria RAM). Observando a profundidade em perfil 2 a uma distância de 200 m, se pode concluir que o decréscimo da altura é devido a quebra de ondas sobre o RAM.

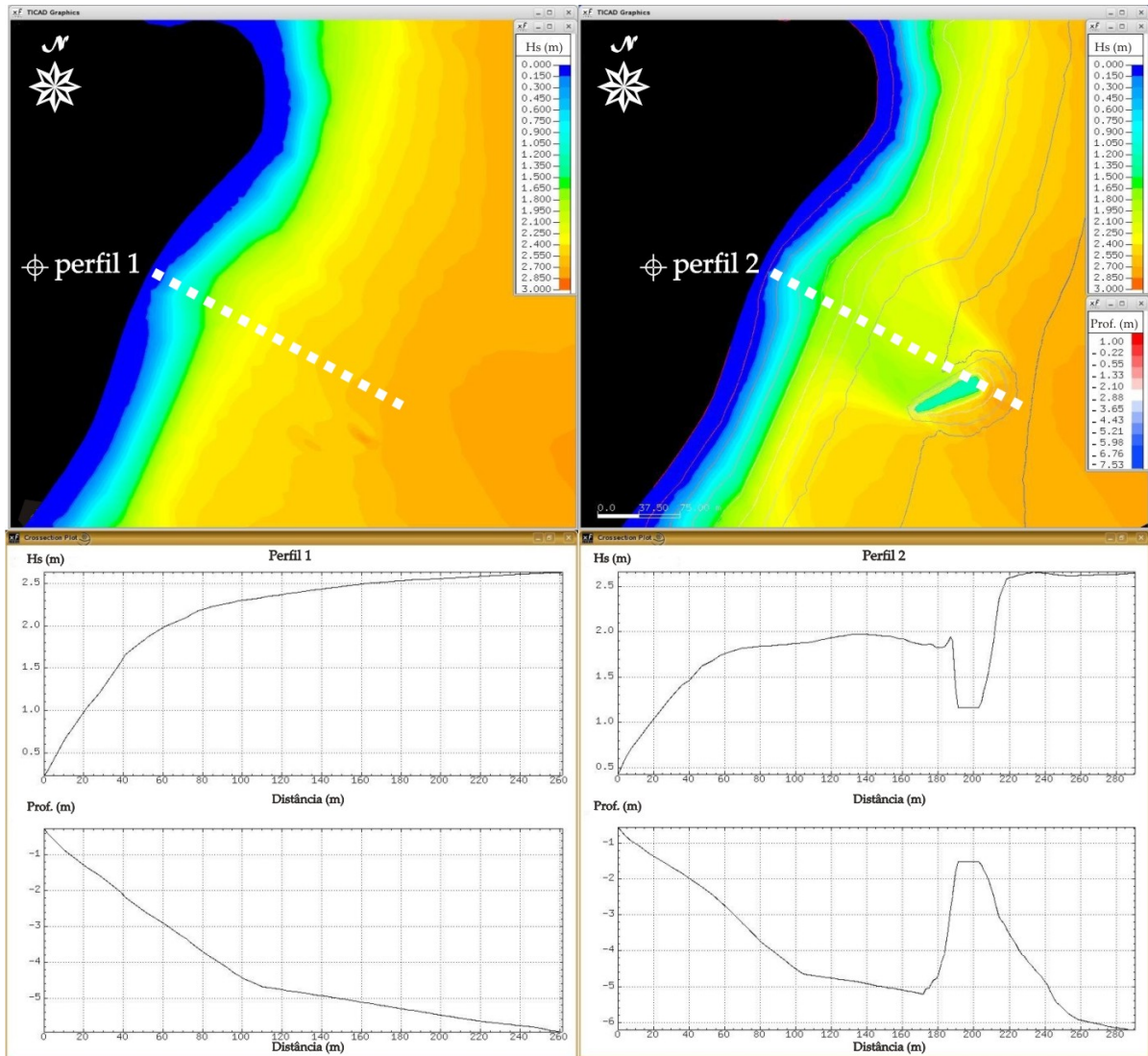


FIGURA 22 – Diagramas dos resultados de altura de ondas para as situações da batimetria original (perfil 1) e batimetria RAM (perfil 2) em WWM; e respectivos gráficos de altura de ondas e profundidade.

Os resultados de ambos os modelos demonstram a diminuição brusca da altura de ondas, na região localizada a aproximadamente 200 m da costa, devido à mudança da batimetria de acordo com o RAM. Outra maneira de visualização foi realizada

através da subtração dos valores obtidos na área de interesse nas duas situações. O método consiste em diminuir os valores de altura de ondas na situação batimetria original, pelos valores obtidos na situação batimetria RAM. Desta forma, é possível observar os locais onde ocorre, e também onde não ocorre diferença entre as situações. Da mesma forma, este método foi aplicado para os dois modelos de ondas (Fig. 23).

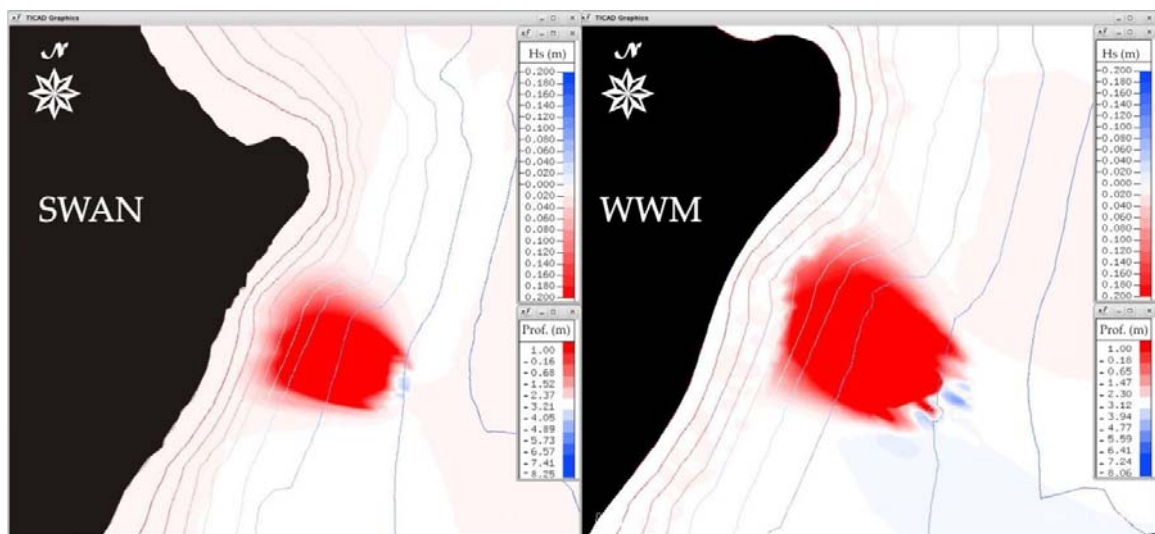


FIGURA 23 – Diagramas da subtração dos resultados de altura de ondas nas duas situações simuladas nos modelos SWAN e WWM. Notar as áreas onde são representadas: (1) diferença máxima de altura de ondas (mancha vermelha), (2) diferença zero na altura de ondas (área branca).

A área clara nos diagramas representa os locais onde não ocorreu diferença nos resultados de altura de ondas entre as duas situações. Ao contrário, a mancha vermelha em ambos os diagramas, representa a região onde houve diferença máxima de altura de ondas entre as duas situações. A região onde ocorre a quebra de ondas devido ao RAM em ambos os modelos numéricos pode ser visualizada neste método.

### 5.2.5.2 Propagação do trem de ondas

Os processos relacionados à propagação de ondas também foram observados nos modelos. Para visualização foi gerado diagrama de refração de ondas na área de interesse, onde os processos relacionados à convergência do trem de ondas são representados para SWAN e WWM (Fig. 24). Nos diagramas, a legenda representa à altura de ondas e as setas vermelhas indicam os vetores de direção de ondas. Analisando os diagramas é possível observar, em ambos os resultados, a convergência dos vetores de direção de ondas na parte abrigada do recife (parte voltada para o continente). Segundo Komar (1998), quando um grupo de ondas se depara com um promontório os raios de ondas irão convergir, aumentando sua altura no ponto de incidência do obstáculo, e vão divergir nas porções marginais, onde às profundidades são maiores. O maior número de vetores no diagrama dos resultados de WWM se deve ao fato da maior resolução da malha utilizada nas simulações.

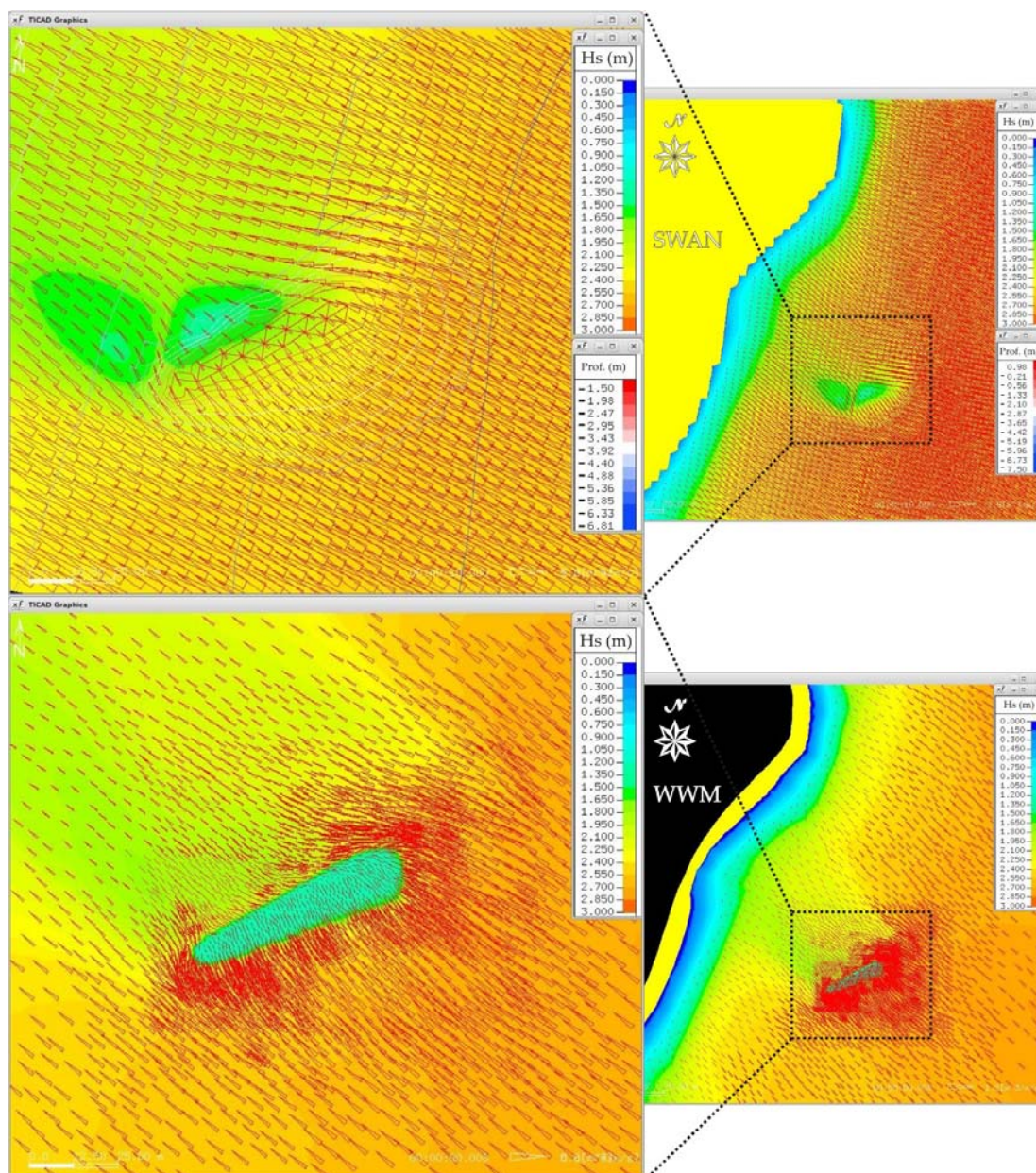


FIGURA 24 – Diagramas de refração de ondas na área de interesse e área do RAM (zoom) para SWAN e WWM. As setas representam os vetores de direção de ondas e a legenda a altura de ondas em metros. Notar maior número de setas em WWM devido maior refinamento na grade computacional no local.

### 5.2.5.3 Período de ondas

Os resultados relativos ao período de ondas em ambos os modelos estão representados na figura 25. As situações batimetria original e batimetria RAM estão dispostas à esquerda e a direita da figura, respectivamente, para ambos os modelos.

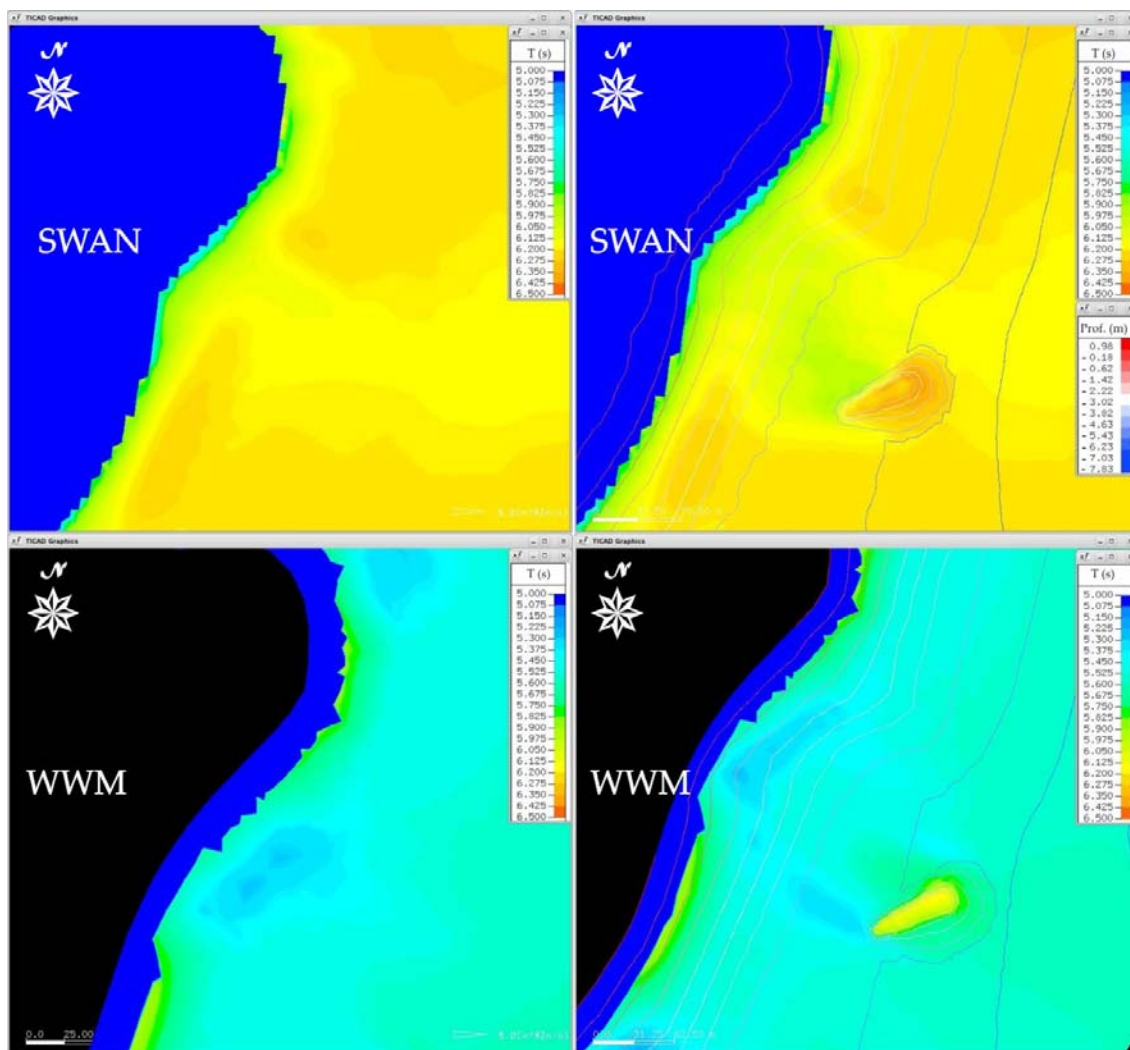


FIGURA 25 – Diagramas dos resultados relativos ao período de ondas em SWAN e WWM. As situações batimetria original e batimetria RAM foram dispostas à esquerda e a direita respectivamente.

Os resultados demonstram em ambos os modelos na situação batimetria RAM, uma ligeira elevação do período sobre o obstáculo submerso e conseqüente decréscimo na parte abrigada. Este resultado está em concordância com o teste de interações triplas realizado para verificação dos modelos. Porém em WWM, ocorre uma suavização dos resultados, enquanto que em SWAN os valores encontrados na região sobre, e na parte abrigada do RAM, possuem maior amplitude. Assim, para uma melhor visualização dos resultados de período foram realizados diagramas de diferença entre as situações batimetria original e batimetria RAM para os dois modelos (Fig. 26).

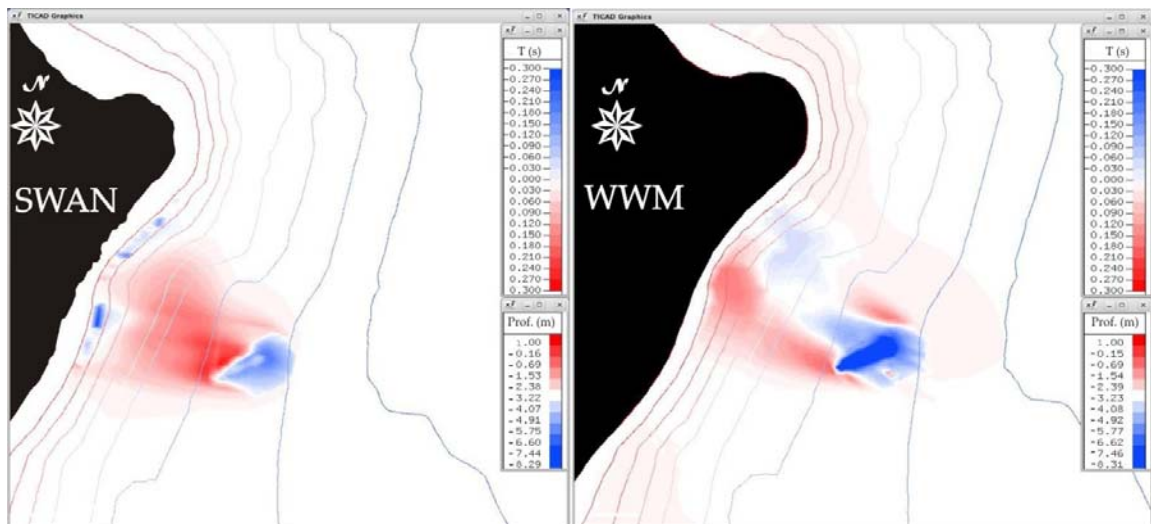


FIGURA 26 - Diagramas da subtração dos resultados de período de ondas nas duas situações simuladas nos modelos SWAN e WWM. Notar as áreas onde são representadas: (1) diferença negativa de período de ondas (mancha azul), (2) diferença zero na altura de ondas (área branca), (3) diferença positiva no período de ondas (mancha vermelha) e suas respectivas feições.

Os resultados de diferença nos períodos de ambos os modelos apresentam feição similar, isto é, diferença negativa sobre o RAM e positiva ao nos aproximarmos da costa. Porém em WWM, a diferença negativa abrange área maior na parte abrigada pela estrutura do que em SWAN. Isto pode ser explicado pela escolha dos coeficientes para interações triplas no modelo. Segundo Polnikov (2000), de acordo com a diminuição da profundidade, as rápidas interações triplas aumentam em amplitude. Em WWM, os valores dos coeficientes referente às interações triplas, TRICO e TRIRA, foram 0,1 e 5 respectivamente. Estes valores de TRICO e TRIRA foram determinados



através dos testes para verificação dos modelos. Porém em SWAN, não foi possível identificar os coeficientes responsáveis pelas interações triplas no código. Polnikov (2000) salienta que o problema da modelagem numérica da evolução da onda em profundidades próximas à costa é significativo sobre o ponto de vista de solucionar numerosos problemas práticos e acadêmicos. Isto é ilustrado pelo fato de que a descrição espectral das interações não lineares das ondas de gravidade em águas rasas permanece como assunto de intensos estudos e discussões teórico-experimentais (POLNIKOV, 2000).

#### 5.2.5.4 Cálculo da Saliência

Os valores referentes à dimensão da saliência que teoricamente seria formada pela introdução RAM na costa de Matinhos foram calculados. De acordo com a relação empírica proposta por Black e Andrews (2001), os resultados foram obtidos de acordo com os seguintes cálculos:

(1) Formação da Saliência –  $B / S < 2$ :

$$B = 100$$

$$S = 200$$

∴

$$100/200 = 0,5 \Rightarrow \therefore < 2$$

(2) Média da amplitude da Saliência formada (eq. 29)  $X_{off} = S - Y_{off}$ .

$$\frac{X_{off}}{100} = 0,498 \left( \frac{100}{200} \right)^{-1,268}$$

∴

$$\frac{X_{off}}{100} = 0,498 * 2,4$$

∴

$$X_{off} = 1,2 * 100 = 120$$

...

$$Y_{off} = S - X_{off}$$

$$Y_{off} = 80$$

(3) Comprimento da base da Saliência -  $D_{tot}$  (eq. 30):

$$\frac{Y_{off}}{D_{tot}} = 0,125$$

$$D_{tot} = \frac{80}{1,25}$$

$$D_{tot} = 640$$

Calculadas as dimensões, foi possível plotar os valores nos gráficos representativos das variáveis, e, conseqüentemente, ilustrar o formato da saliência proposta para Matinhos (Fig. 27 e 28).

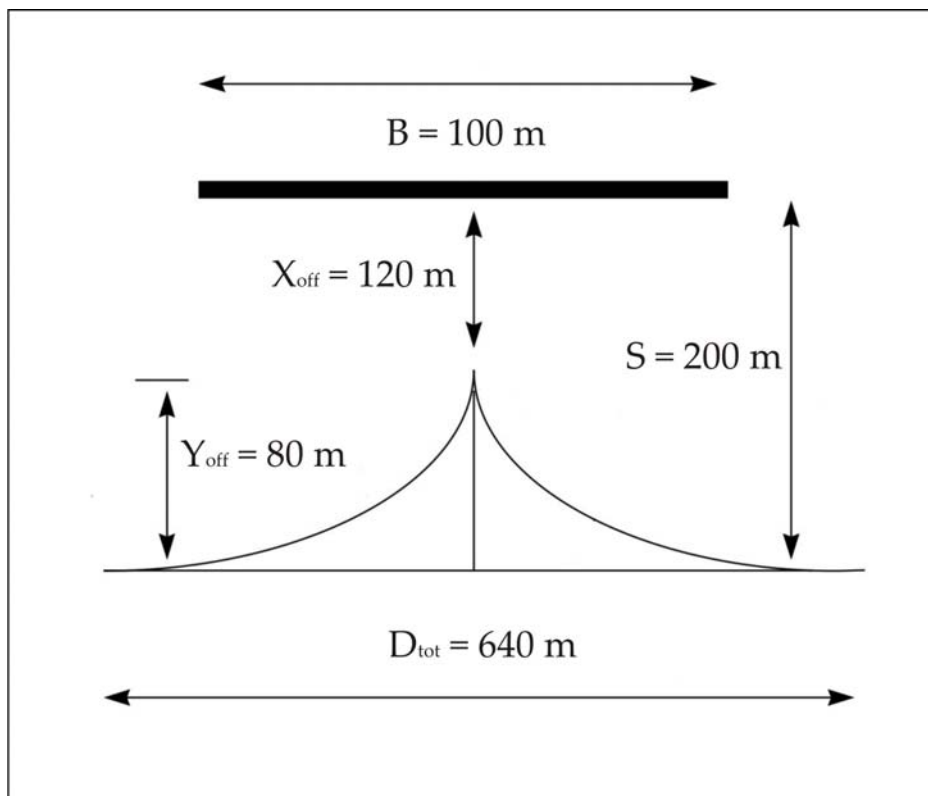


FIGURA 27 – Desenho esquemático representando as dimensões obtidas através de metodologia proposta por Black e Andrews (2001) para o RAM de Matinhos.

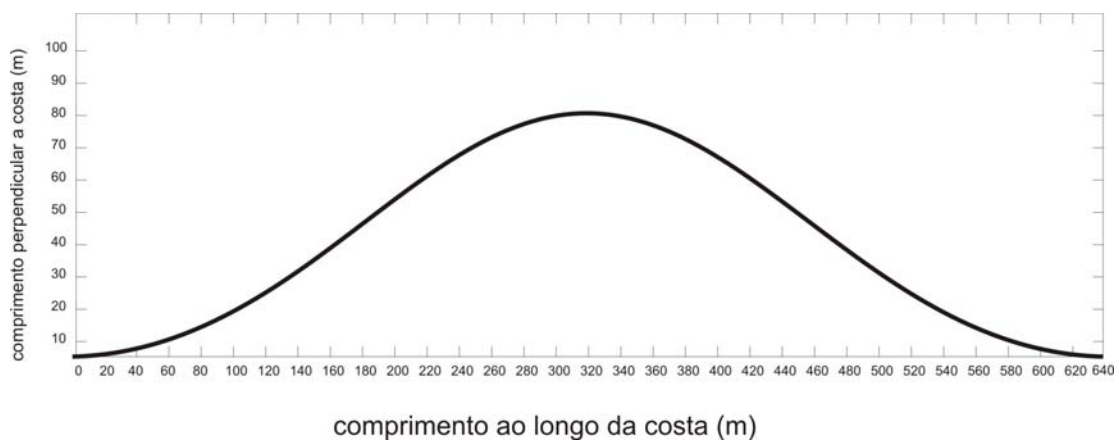


FIGURA 28 – Possível formato e dimensões teóricas da saliência formada na costa pelo RAM de acordo com Black e Andrews (2001).

Para ilustrar o resultado teórico da formação da saliência foi realizada a comparação da área de interesse nas duas situações: batimetria original e batimetria RAM (Fig. 29). A linha pontilhada, no diagrama representativo da batimetria na situação batimetria RAM (a direita), representa o formato de desenvolvimento e a dimensão aproximada da amplitude média da saliência. A dimensão da ilustração da amplitude da saliência foi tomada através da utilização da escala dos diagramas, a qual foi fornecida pelo modelo numérico. A existência de uma lacuna, entre o RAM e a extremidade da saliência, permite o transporte natural de sedimentos na costa (BLACK, 2003).

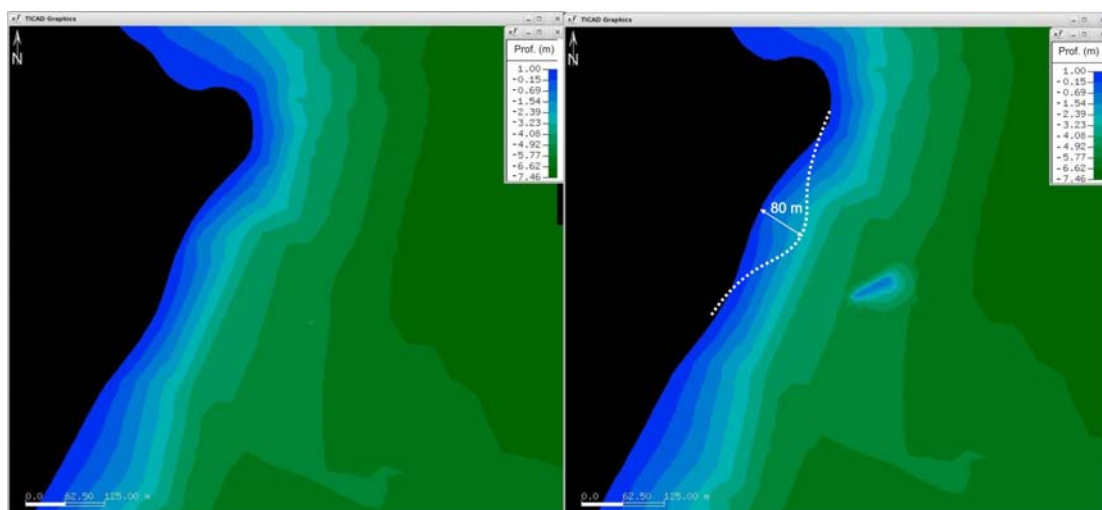


FIGURA 29 – Diagramas batimétricos da área de interesse nas duas situações analisadas. Notar a amplitude média aproximada da saliência na situação batimétrica com o RAM.

## 6 DISCUSSÃO

A Praia Brava de Matinhos há muito tempo sofre com a erosão e respectivas tentativas ineficientes de resolver o problema. Segundo relatório de Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) de 2007 realizado pelo governo do Paraná, o primeiro efeito da erosão costeira na praia Brava ocorreu em 1979, quando uma ressaca causou a destruição de parte da calçada da praia (LINDROTH, 1982 *apud* PERH, 2007). Cerca de 1000 metros de calçada na parte central da praia Brava foi completamente destruída. Nas partes mais críticas não só a calçada, mas a avenida também foi destruída (Fig. 30). Lindroth (1982 *op. cit.*) salienta ainda que, após a destruição de 1979 o Governo do estado do Paraná colocou pedras para a proteção da avenida contra a força do mar sem nenhum estudo prévio.



FIGURA 30 - Erosão na Praia Brava de Matinhos após o evento de tempestade em 1979 (Foto disponível em: <http://www.netpar.com.br/lindroth/bravapor.htm>).

Após várias destruições dos muros de pedra, o Governo do Paraná solicitou ao Engenheiro Guilherme Lindroth (devido ao seu relativo sucesso com a recuperação da faixa de areia da praia Mansa) um plano de contenção da erosão do trecho Caiobá - Praia Brava. Na figura 31 pode ser notada a existência de dois esporões já soterrados na faixa de areia. Tentativa realizada por Lindroth em 1981 com gabiões para o aumento da faixa de areia na praia de Caiobá.



FIGURA 31 - Praia de Caiobá em 1983. Notar setas vermelhas (gabiões já soterrados), tentativa de recuperação da faixa de areia (Foto disponível em: <http://www.netpar.com.br/lindroth/bravapor.htm>).

Em 1985 ocorreu uma nova ressaca que retirou grande parte da areia da praia Brava e colocou em risco inclusive bares situados junto ao mar na parte sul da praia. Mais uma vez o método escolhido de proteção não surtiu o efeito desejado no local. Assim, juntamente com o Engenheiro Mario Forcadell, Lindroth elaborou outro projeto de proteção e tentativa de recuperação da praia, cujas obras foram iniciadas ao final do mesmo ano com recursos do Governo do Estado. Foram executados 750 m de revestimento aderente em gabião a partir do morro de Caiobá. Também foram executados pequenos espigões em gabião para acelerar a deposição de areia. Em 1986 foram executados mais 750 m até atingir o canal do DNOS no centro da praia (Fig. 32). Além de pequenos espigões, também foi executado um pequeno guia-corrente em gabiões na saída do canal para reduzir as perdas de sedimento provocadas pelas suas alterações de curso. Foi executado também um muro de proteção na região norte da praia Brava (área de interesse do presente estudo), junto à ponta de Matinhos e na saída norte do canal do DNOS.



FIGURA 32 - Arco praial Caiobá-Praia Brava e respectivas localizações do Canal do DNOS e extremo norte da Praia Brava (área de interesse). Notar fotografia do canal do DNOS em 1986 (canto superior direito) com o guia-corrente construído (Imagem: Google Earth ®; Foto histórica disponível em: <http://www.netpar.com.br/lindroth/bravapor.htm>).

Os resultados, segundo Lindroth, foram os esperados com a recuperação quase completa do trecho Caiobá - Praia Brava. Porém, os resultados na região norte da Praia Brava, não são observados nas fotografias realizadas pelo mesmo Lindroth para exemplificar a recuperação do trecho Caiobá – Praia Brava em sua página na internet (Fig. 33). As fotografias evidenciam os resultados apenas na praia de Caiobá.

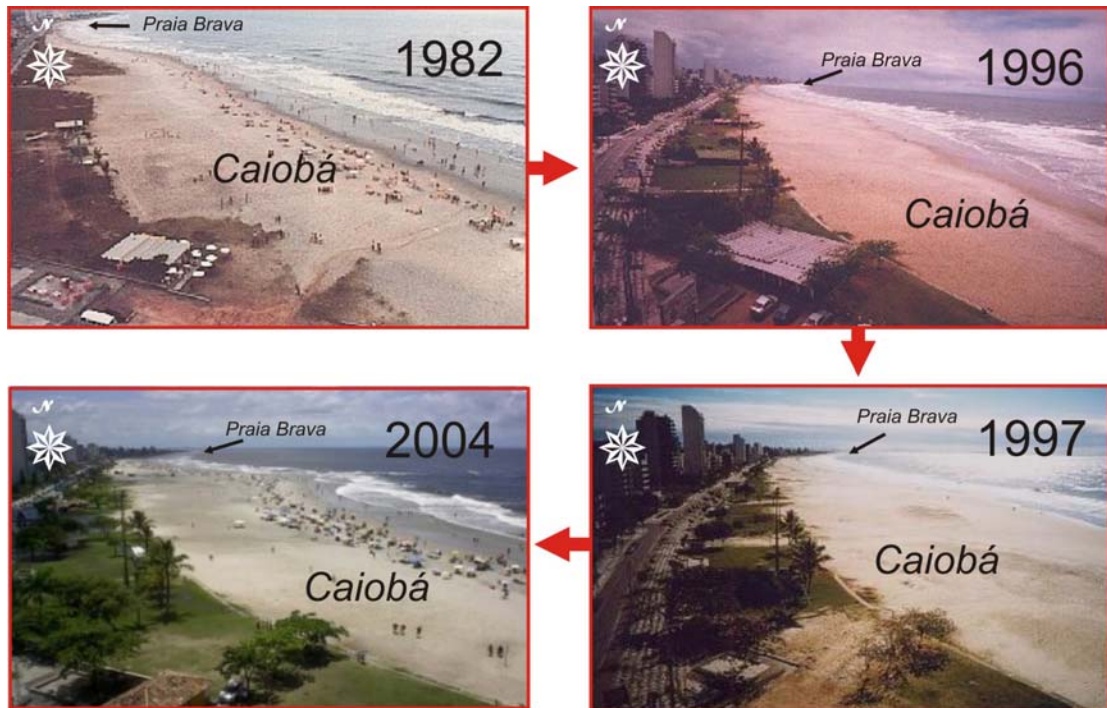


FIGURA 33 - Seqüência de fotografias históricas do trecho Caiobá (canto inferior) Praia Brava (canto superior). Notar faixa de areia nas duas praias nas fotografias que evidencia os resultados apenas na Praia de Caiobá (Fotos disponíveis em: <http://www.netpar.com.br/lindroth/bravapor.htm>).

Diferentemente da praia de Caiobá que é protegida pelo delta de maré vazante da Baía de Guaratuba e por seu promontório, a praia Brava de Matinhos (área de interesse) é uma praia aberta desprotegida das ondulações de tempestades. A erosão na área de interesse ocorre basicamente quando ondulações de eventos extremos (ressacas) provenientes das direções leste (E) e sudeste (S) ou do quadrante sudeste (SE) atingem a costa. A energia das ondas somada com a elevação (empilhamento) do nível da água na costa proporciona o avanço do mar ocasionando a erosão. Os muros de proteção executados por Lindroth não impediram o avanço do mar sobre a calçada de pedestres nos eventos extremos posteriores, o que evidenciou a ineficiência do método. De acordo com PERH (2007), no dia 18 de agosto de 1993, ocorreu uma forte ressaca que causou grandes estragos em Matinhos. Nas figuras 34 e 35 se pode observar a cobertura dos jornais sobre a ressaca de 1993.





FIGURA 34 - Matéria no jornal Gazeta do Povo sobre a ressaca de 1993 (Fonte: PERH, 2007).



FIGURA 35 - Matéria sobre a ressaca no Jornal do Estado do Paraná em 1993 (Fonte: PERH, 2007).

No ano seguinte, no dia 8 de abril, ocorreu uma outra forte ressaca. Na época, a ressaca foi considerada por muitos moradores que já viviam no litoral há muitos anos como a pior ressaca já vista. Alguns diziam ser a “pior ressaca dos últimos 40 anos”. Os estragos em Matinhos foram enormes, principalmente na praia Central (Fig. 36).



FIGURA 36 - Matéria do Jornal do Estado do Paraná sobre a ressaca de 1994 (Fonte: PERH, 2007).

No final de maio de 1997 um ciclone aproximou-se do litoral paranaense. Este ciclone ganhou força, e até o dia 10 de junho uma seqüência de ressacas trouxe enormes prejuízos ao município. Segundo o PERH (2007), talvez esta ressaca tenha superado a de 1994. Na figura 37, se pode observar a destruição causada pela força das águas.



FIGURA 37 - Foto da ressaca de 1997 na praia central de Matinhos no momento do avanço da onda sobre a Avenida (Fonte: PERH, 2007).

Por fim, no início de maio de 2001, ocorreram seqüências de grandes ressacas no litoral paranaense, sendo dia 6 o mais crítico, talvez a pior ressaca no litoral paranaense que se tem notícia. Esta ressaca agravou a situação de destruição por todo o município de Matinhos. De acordo com matéria escrita pelo Jornalista Renato Luiz Adami (2002), para tentar abrandar os efeitos relativos a esta ressaca na praia Brava, o Governo do Estado juntamente com a Prefeitura de Matinhos iniciou as obras de escadarias a beira-mar. O objetivo seria dar acesso à praia aos banhistas e conter a força das águas. No final de 2002, escadas com 10 metros de comprimento foram construídas em trechos intercalados nas saídas das ruas transversais. Foram cinco escadas no trecho norte da Praia Brava e mais cinco na Praia Central. As obras das escadarias custaram R\$ 1,04 milhão financiado pelo Ministério da Integração Nacional, e só foram iniciadas após acordo entre a prefeitura de Matinhos e o Ministério Público com diversas outras entidades que defendiam o uso de gabiões, engordamento com a dragagem dos bancos de areia, ou uma solução mista para o problema. Ao final, prevaleceu a sugestão da construção das escadarias. Mais uma vez, obras costeiras foram realizadas para tentar interromper a energia de ondas na costa sem nenhum tipo de estudo prévio oceanográfico da região.

Desde a última ressaca de 2001, muitas outras ressacas ocorreram. Principalmente no inverno de 2006, onde muitas situações atmosféricas propícias à formação de ressacas se estabeleceram. Deve-se enfatizar que a situação de destruição na Praia Brava ainda permanece. As obras até agora realizadas, de nada adiantaram para o controle da erosão costeira no extremo norte da praia Brava (Fig. 38).



FIGURA 38 - Extremo Norte da Praia Brava de Matinhos em 2006. Notar a calçada destruída e pedras colocadas para tentar conter a força das águas (Fotos: Marcos Gândor).

A maneira com que o problema veio sendo abordado durante anos não impediu que a energia das ondas de tempestade avançasse sobre a costa. Por outro lado, a metodologia de RAM apresentada neste estudo propõe uma maneira eficiente para o caso específico da Praia Brava. A diminuição da energia das ondas de tempestades antes de atingir a costa proporciona a conseqüente diminuição das correntes costeiras e a possibilidade de formação de uma saliência no local. Ondas que anteriormente atingiam a costa com extrema violência, irão quebrar sobre a estrutura a 200 m da costa. A construção de um RAM, juntamente com a alimentação artificial da faixa de areia, pode resolver o problema erosivo da Praia Brava de Matinhos. O RAM servirá como proteção para a faixa de areia da praia, possibilitando a manutenção de sua largura. Além disto, o RAM pode agregar funções como atração para o turismo, disponibilizando mais recursos sócio-econômicos para o município. Portanto, o problema erosivo do extremo norte da praia Brava precisa ser tratado cientificamente,

pois, soluções desesperadas podem agravar ainda mais o problema e se tornam ao final um desperdício de dinheiro público.

Os dados de ondas utilizados para as simulações numéricas deste estudo foram coletados por aparelho ondógrafo durante o período de aproximadamente 1 ano e 6 meses. As simulações numéricas foram realizadas por modelos de ondas amplamente utilizados em estudos e projetos científicos no mundo inteiro. Dentre os quais é possível citar: as aplicações do WWM nas águas costeiras alemãs e chinesas (Hsu *et al.* 2006) e o modelo SWAN utilizado em estudos de evolução de ondas (WOOD *et al.* 2001).

A utilização de dois modelos de ondas diferentes neste estudo teve o objetivo de comparação entre os resultados obtidos. Ambos demonstraram que a metodologia de RAM é efetiva para a diminuição da altura de ondas.

## 7 CONCLUSÕES

A metodologia de Recife Artificial Multifuncional para o estudo de redução da erosão da Praia Brava de Matinhos foi realizada com sucesso, sendo possível apresentar algumas conclusões das diversas análises realizadas:

- Ambos os modelos numéricos de ondas nos testes laboratoriais mostraram resultados razoáveis;
- Para o caso natural de Matinhos foi possível a obtenção de resultados com resolução espacial muito maior em WWM (grid bem refinado) do que em SWAN (grid menos refinado);
- Em WWM foi possível determinar os coeficientes TRICO e TRIRA para a aproximação do período;
- Para o cenário simulado ( $H_s = 4,0$  m;  $T = 9$  s e  $\Theta = 140^\circ$ ), os modelos numéricos demonstraram uma queda na altura de ondas sobre o RAM de 1 m em SWAN e 1,3 m em WWM;
- Os resultados de ambos os modelos demonstram, devido à mudança da batimetria de acordo com o RAM, a diminuição brusca da altura de ondas a aproximadamente 200 m da costa e a convergência dos vetores de ondas para a parte abrigada pela estrutura;
- Os valores referentes ao tamanho do RAM e distância da costa permitiram, segundo a relação empírica, a formação de uma saliência costeira na região afetada pela erosão na praia Brava;
- Os valores de amplitude da saliência calculados nas direções ao longo e perpendicular à costa foram de 640 m e 80 m, respectivamente;
- A metodologia apresentada neste estudo obedece a procedimentos técnicos e científicos comprovados por estudos publicados e projetos realizados;
- A construção de um RAM associada a um projeto de engordamento pode resolver o problema erosivo da Praia Brava de Matinhos.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações realizadas pelos modelos numéricos de ondas tiveram como base, apenas o período de maré relacionado a maré baixa corrigida segundo o nível da DHN para o porto de Paranaguá. Portanto, para uma melhor caracterização dos dados obtidos são necessárias também simulações utilizando variação de maré para o período de maré alta e maré média.

O ângulo de isóbata principal do RAM proposto pode ser mudado de acordo com a preferência de quebras de onda desejada. Por exemplo, se for desejada quebra de ondas rápidas, o ângulo do segmento da estrutura relacionado à direção de ondas favorável ao surfe deve ser diminuído. O mesmo pode ser considerado para o tipo de quebra, ou seja, podem ser realizadas modificações no formato da estrutura que por sua vez irão modificar as características da quebra da onda de acordo com a preferência desejada. Outro ponto a ser salientado aqui é que o modelo escolhido neste estudo teve como critério o menor impacto relacionado à modificação morfológica da costa.

## 9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Projetos de proteção costeira pelo uso de recifes submersos envolvem uma série de estudos detalhados como foi observado no presente estudo. Porém, para a fase seguinte relacionada à viabilidade da obra, existem ainda análises e experimentos que devem ser considerados. Neste capítulo são recomendados os procedimentos que devem ser realizados para o estudo de viabilidade do projeto:

- Novo levantamento batimétrico do arco praiial Caiobá-Praia Brava de Matinhos;
- Coleta de dados de ondas no local de implantação;
- Coleta de dados de correntes costeiras no local de implantação;
- Coleta de dados de morfodinâmica costeira do local de implantação (com análise da deriva litorânea);
- Calibração dos modelos hidrodinâmicos e morfodinâmicos com dados de campo;
- Nova série de simulações e comparação entre resultados deste estudo com os novos dados obtidos;
- Simulação em modelos numéricos para observação da hidrodinâmica local;
- Caracterização das correntes de retorno geradas pela implantação do RAM;
- Simulação em modelos morfodinâmicos para observação do comportamento da costa após a implantação do RAM;
- Simulação numérica para diferentes alturas, períodos e direções de ondas;
- Simulação numérica para observação do clima de ondas com a variação da maré e das correntes locais;
- Simulação numérica para observação do clima de ondas com a influência do vento local.
- Análise da difração de ondas gerada pela estrutura;
- Acoplamento dos modelos de ondas, correntes e morfodinâmico;
- Avaliação dos impactos ambientais e socioeconômicos derivados da implantação do RAM;



- Mergulho submarino para relevamento do local onde seria implantada a estrutura.

## 10 REFERÊNCIAS

ANGULO, R. J. **As Praias do Paraná: Problemas Decorrentes de uma Ocupação Desordenada.** Revista Paranaense de Desenvolvimento, Curitiba, n. 99, p. 97-103, jul./dez. 2000.

ARAÚJO, C. E. S., FRANCO, D., MELO, E., PIMENTA, F. **Wave Regime Characteristics of The Southern Brazilian Coast.** Proceedings of the Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper n° 097; pp 15, 2003.

BENDER, C. J., DEAN, R. G. **Wave Field Modification by Bathymetric Anomalies and Resulting Shoreline Changes: A Review With Recent Results.** Coastal Engineering n 49, 2003.

BLACK, K. **Numerical Prediction of Salient Formation in the Lee of Offshore Reefs.** Proceedings of The 3º International Surfing Reef Symposium, 2003.

BLACK, K. P., ANDREWS, C. J. **Sandy Shoreline Response to Offshore Obstacles Part 2: Discussion of Formative Mechanisms.** Journal of Coastal Research, SI29, 94-101, 2001.

BLACK, K., ANDREWS, C. J. **Sandy Shoreline Response to Offshore Obstacles Part 1: Salient and Tombolo Geometry and Shape.** Journal of Coastal Research, SI29, 82-93, 2001.

BLACK, K., MEAD, S. **Design of the Gold Coast Reef for Surfing, Public Amenity and Coastal Protection: Surfing Aspects.** Journal of Coastal Research, SI29, 115-130, 2001.

BOOIJ, N., HAAGSMA, I. J. G., HOLTHUIJSEN, L. H., KIEFTENBURG, A. T. M. M., RIS, R. C., VAN DER WESTHUYSEN, A. J., ZIJLEMA, M. **User Manual SWAN Cycle III version 40.41**. Disponível em: [http:// fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm](http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm), acesso em Julho de 2006.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. Ed. Edgard Blucher LTDA. 1ª edição 1999, São Paulo – SP, 3ª edição 2004.

GRAAF, J. V. **Dune and Beach Erosion and Nourishment**. Coastal Protection, Pilarczyk (ed.) Balkema, Rotterdam, 1990.

HSU, T. W., OU, S. H., LIAU, J. M., ROLAND, A. **An Application of WWM in Taiwan and German Coastal Waters**. Proceedings of Symposium on Advances of Mechanics In Honor of President Robert R. Hwang, Keelung, Taiwan, May 12, 2006.

HSU, T. W., OU, S. H., LIAU, J. M., ROLAND, A., ZANKE, U. **Spectral wave Modelling on Unstructured Grids with The WWM (Wind Wave Model) I: The Deep Water Case**. Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering National Cheng Kung University, Taiwan November 8-16, 2006.

HSU, T-W., OU S-H., LIAU J-M., ZANKE, U., ROLAND, A., MEWIS, P. **Development and Implement of a Spectral Finite Element Wave Model**. ASCE/COPRI, The fifth International Symposium on Wave Measurement and analysis. Ed. Billy Edge, Madrid, Spain, 2005.

KOMAR, P. D. **Beach Processes and Sedimentation**. 2nd ed. Prentice Hall, Inc. New Jersey, USA, 1998.

MEAD, S., BLACK, K. **Wave Rotation for Coastal Protection**. ASR Limited, New Zealand, Disponível em: [http://www.asrltd.co.nz/downloads\\_reef.htm](http://www.asrltd.co.nz/downloads_reef.htm), acesso em abril de 2006.

NAATEC GEOLOGIA E SANEAMENTO LTDA. **Levantamentos Básicos para o Dimensionamento da Recuperação da Praia Central de Matinhos.** Relatório Técnico, Curitiba, Paraná, Novembro de 1994.

OPUNAKE ASR COMMITTEE. **Proposed Artificial Surf Reef, Opunake, South Tanaki. Draft Economic Impact Report and Feasibility Study.** New Zealand, March, 2002.

POLNIKOV, V. G. **Numerical Experiments Based on a Three-Wave Quasi-Kinetic Model for Describing the Evolution of the Spectrum of Shallow-Water Waves.** Atmospheric and Oceanic Physics, Vol. 36, No. 4, pp. 510–521, 2000.

RIS, R., KUIPER, C., VAN DONGEREN, A., JANSSEN, T. T., WALLAST, I., DOORN, N., HOLTHUIJSEN, L. H., BOOIJ, N. **Test ONR Test bed for Coastal and Oceanic Wave Models.** Manual Version 2.0 - WL/Delft Hydraulics, Marine, Coastal and Industrial Infrastructure, 2002.

SHORT, A. D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics.** Book Ed. John Wiley & Sons Ltd, England, 1999.

SWAN TEAM. **SWAN User Manual Cycle III version 40.51A.** Available in: <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>, access: July, 2007.

SWANP GROUP. **Ocean Wave Modeling.** Ed. Plenum Press. New York, USA, 1985.

TURNER, I. L. **Analysis of Shoreline Change: February 2004 to July 2004. Report 10: Northern Gold Coast Coastal Imaging System.** WRL Technical Report 2004/07, Water Research Laboratory, University of New South Wales, 2004.

WOOD, D. J., MUTTRAY, M., OUMERACI, H. **The SWAN model used to study wave evolution in a flume.** Ocean Engineering n 28, 2001.