

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**MODELAGEM NUMÉRICA DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA DAS PRAIAS
LOCALIZADAS A OESTE DA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ
TRECHO COMPREENDIDO ENTRE O RIO CEARÁ E A PRAIA DO CUMBUCO**

SÁVIO FREIRE LIMA

*Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito
parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.*

Orientador: Prof. Dr. Luiz Emilio S. B. Almeida

Co-orientador: Prof^ª. Dr^ª. Nara Maria Luzzi Rosauo

Banca Examinadora

Prof ^ª . Dr ^ª . Edith Beatriz Camaño Schettini	IPH/UFRGS
Prof. Dr. Elírio E. Toldo Junior	CECO/UFRGS
Prof. Dr. João Carlos da Silva Strauch	FURG

Porto Alegre, Março de 2002

Apresentação

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Luiz Emílio Sá Brito de Almeida da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e co-orientado pela Prof^ª. Dr^ª. Nara Maria Luzzi Rosauro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Gostaria de agradecer a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente:

Ao Prof. Dr. Luiz Emílio Sá Brito Almeida, que além de sua amizade me concedeu todas as condições para a concepção e execução deste trabalho;

A Prof^ª. Dr^ª. Nara Maria Luzzi Rosauro que foi decisiva nas investigações relativas aos modelos numéricos e esteve sempre disponível para debates e discussões ao longo deste trabalho;

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que contribuíram com a minha formação nesta casa;

Ao Prof. Dr. George Satander Sá Freire, que além de todo o incentivo e companheirismo que tive durante a graduação, foi responsável por meu desenvolvimento profissional na área da engenharia costeira e proporcionou todas as condições para a conclusão deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Luis Parente Maia pelos dados fornecidos e pela disponibilidade para debates técnicos;

Aos meus amigos de curso que, além do companheirismo, me concederam momentos impagáveis e ao mesmo tempo inesquecíveis durante minha estadia em Porto Alegre. Sendo eles: Paulo Augusto Ribeiro, Rutineia Burile, Rafael Manica, Daniel Allasia e todos os outros que estavam no mesmo barco;

Aos meus colegas de apartamento e contêrreos: Wellington Ferreira e Rodrigo Pinheiro e as minhas inesquecíveis amigas catarinenses: Graziela Miot e Carla D´aquino que tanto nas discussões técnicas quanto nas mais diversas possíveis proporcionaram momentos maravilhosos;

Aos meus grandes amigos gaúchos: Diogo e Diego Jucá e Cláudio Roberto, sem os quais minha estadia no Rio Grande do Sul não teria sido tão agradável e divertida.

A todos os funcionários e colegas do IPH, em especial ao meu grande parceiro Sérgio Nicolau e ao “Seu” Rodrigues;

Aos bolsistas do pavilhão fluvial, que me acompanharam nas eternas caminhadas ao R.U. e nas partidas de Ping Pong, sendo eles: Daniel U. de Brito, Diogo S. Medeiros, Richard E. Dücker e Rodrigo Sartor;

À Guria mais incrível de toda Porto Alegre, Aline Souto Silveira, pela companhia e acima de tudo pela parceria que encontrei durante incontáveis momentos de minha estadia no Rio Grande do Sul;

Ao pessoal do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada da Universidade Federal do Ceará, pela amizade e ajuda no levantamento de dados de campo para o desenvolvimento deste trabalho, em especial ao bolsista Leonardo Hislei Uchoa, às geólogas Angela Cristina e Silvania Helena Magalhães, à Samia Freire Lima pela ajuda incalculável no levantamento da última linha de costa que veio a ser fundamental para a conclusão deste trabalho;

À comissão examinadora, constituída pela Prof^a. Edith Beatriz Camaño Schettini, Prof. Elírio Ernestino Toldo Junior e Prof. João Carlos da Silva Strauch, por todas as contribuições ao trabalho;

Aos meus pais, pelo eterno apoio em todos os momentos e em todos os sentidos, e pelo constante estímulo na carreira profissional.

Aos meus pais

MODELAGEM NUMÉRICA DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA DAS PRAIAS LOCALIZADAS A OESTE DA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ

Resumo

Há aproximadamente meio século, as praias situadas a sotamar do Porto do Mucuripe, em Fortaleza, vem sofrendo intensos processos erosivos, creditados em grande parte à construção e ampliação deste porto. O fato é que o acentuado crescimento urbano da capital cearense ocasionou a fixação de dunas e a quebra do fluxo longitudinal de sedimentos em seu litoral, resultando no recuo da linha de costa e na necessidade de intervenção antrópica por meio de obras rígidas que viessem a garantir a preservação da infra-estrutura existente nos trechos mais afetados.

Como consequência da fixação das praias, o suprimento de material sedimentar passou a ficar retido, enquanto que o potencial de transporte das ondas se preservou. A quebra deste equilíbrio dinâmico acarretou a transferência dos processos erosivos para as praias adjacentes, o que tornou-se um problema cada vez maior, pois as soluções adotadas nestas praias eram idênticas às anteriores. As consequências deste processo para uma cidade como Fortaleza, onde o turismo é uma das principais fontes de renda, são graves, dado que como resultado final, encontramos longos trechos de praias com a balneabilidade comprometida e perda de qualidade visual.

O litoral situado a oeste da capital é limitado à direita pela foz do Rio Ceará e à esquerda por um promontório rochoso, onde situa-se a Ponta do Pecém. Este trecho compreende aproximadamente 30 km de praias arenosas, com granulometria média e fina, e com ondas incidindo sobre a costa de forma oblíqua, o que as torna o principal mecanismo de transporte de sedimentos. A ocupação urbana concentra-se principalmente nas praias mais próximas a Fortaleza, onde observa-se ainda, o afloramento de rochas de praia e grande perda de material sedimentar, fornecendo indícios da transferência dos processos erosivos da orla marítima da capital para estas praias.

Com a conclusão das obras do Porto do Pecém e de um pólo industrial que visa desfrutar da localização estratégica deste porto, é natural que ocorra uma intensificação nos processos de ocupação urbana das praias próximas à área. Tal constatação motivou um trabalho de modelagem da dinâmica desta zona com o objetivo de nortear um plano de uso e ocupação das áreas localizadas próximas à praia, de forma que se possa prever o comportamento da linha de costa e evitar que sejam repetidos certos equívocos como a

construção em zonas de forte dinâmica e a fixação das fontes primárias de fornecimento de sedimentos, que são as dunas frontais.

Dada a disponibilidade de dados, bons processadores e aos custos significativamente reduzidos da modelagem numérica, adotou-se o pacote GENESIS – RCPWAVE, que além de ser de domínio público, é a base do sistema de modelagem de linha de costa adotado pelo CERC (Coastal Engineering Research Center), U.S.A., para aplicações em costa aberta, em regiões sujeitas às intervenções humanas.

A calibração do modelo se fez considerando as linhas de praia medidas em 1974 pela DHN e em 2001 com o uso de GPS. Os dados de onda utilizados foram obtidos por um ondógrafo direcional do tipo *Waverider*, instalado a uma profundidade de 18 metros nas proximidades da Ponta do Pecém. Os dados relativos ao modelo conceitual dos processos predominantes na região, como: contribuições externas, variação granulométrica e variações sazonais de perfis foram obtidos de levantamentos bibliográficos de trabalhos anteriores. Por último, informações relativas às estruturas existentes e seu comportamento, ao afloramento de formações rochosas e o último levantamento da linha de praia, foram obtidas através de trabalhos de campo.

De uma forma geral, o comportamento previsto pelo modelo mostrou-se semelhante ao observado nos diferentes levantamentos. Considerando-se as limitações dos processos envolvidos no levantamento de dados, onde tanto a carta da DHN quanto o mapeamento por satélite estão sujeitos a imprecisões e ainda, que a série de dados confiáveis de ondas para a região possuía apenas dois anos, é importante notar que, em linhas gerais, a formulação matemática do modelo representou satisfatoriamente os processos envolvidos.

Os resultados fornecidos possibilitam a extrapolação da evolução da linha de costa e indicam pontos de provável recuo ou avanço da praia, norteando a sua ocupação. A ferramenta gerada proporciona ainda a avaliação do impacto de intervenções por meio de estruturas rígidas ou engordamento de praia ao longo do tempo e gera uma estimativa dos valores de deriva litorânea para os diferentes trechos de praia, possibilitando avaliar os efeitos das intervenções nas praias adjacentes.

NUMERICAL MODELLING OF THE SHORELINE EVOLUTION OF A STRETCH OF BEACH WEST OF THE CITY OF FORTALEZA, CEARÁ

Abstract

In the last half-century, beaches westward of Port of Mucuripe, in Fortaleza, have been subject to intensive erosive processes, largely credited to the construction and enlargement of this port. In fact the accentuated urban growth of the city, which is the capital of Ceará, caused fixation of dunes and interruption of the longitudinal sediment flow on its coast, resulting in retreat of the coast line and in the need of human intervention by means of construction of rigid structures that came to guarantee the preservation of the existent infrastructure in those most affected coastal zones.

As a consequence of beach fixation, the sediment supply was retained, while the wave transport potential was preserved. The interruption of this dynamic balance resulted in the transfer of the erosive processes to adjacent beaches, which became a problem, since the solutions adopted on these beaches were identical to the previous ones. The consequences of this process for a city such as Fortaleza, where tourism is one of the main sources of income, are serious, since the result is that nowadays long stretches of beach are used with inappropriate bathing conditions and great loss on visual quality.

The coast westward of the capital is limited to the right by Ceará's river mouth and to the left by a rocky promontory, called Ponta do Pecém. This coast line stretches for approximately 30 km of sandy beaches, with medium and fine grain size, and with waves reaching the coast in an very oblique direction, making them the main mechanism of sediment transport. The urban occupation concentrates mainly at the beaches closest to Fortaleza, where the emergence of beach rocks and great material loss can still be observed, indicating the transference of the erosive processes from the marine border of the capital to the adjacent beaches.

With the conclusion of the works on the Port of Pecém and of an industrial center that seeks to benefit from the strategic location of this port, an increase in the processes of urban occupation will naturally happen on the beaches near this area. Such situation motivated a work on modeling of the dynamics of this zone with the objective of guiding the use and occupation of the areas located close to the beach, by foreseeing the behavior of the coast line in order to avoid repeating mistakes as the construction in highly dynamic zones and the fixation of the primary sources of supply of sediments, that are the front dunes.

Given the availability of data, good processors and the significantly reduced costs of the numeric modeling, the software GENESIS - RCPWAVE, was chosen. Besides being of public domain, it is the base of the modeling system of coastlines adopted by CERC (Coastal Engineering Research Center), U.S.A., for applications in open coast, in areas subject to the human interventions.

The model was calibrated by considering the measured coastal lines of 1974, by DHN and of 2001, obtained with the use of a GPS. Wave data were registered by Waverider type directional wave meter, installed off the coast in the vicinity of the Ponta do Pecém, in a point 18 meters deep. Data used in the conceptual model of the predominant processes in the area, as: external contributions, grain size variation and seasonal variations of profiles were obtained from literature of previous works. At last, information concerning the existent structures and their behavior, the emergence of rocky formations and the last coastline, were obtained in field work.

In general, the behavior foreseen by the model was very similar to the observed in the different surveys. Considering the limitations of the processes involved in the data survey, like the digitalization of the DHN's chart and the satellite data, and the fact that the wave data series was only two years long, it is important to notice that, in general lines, the mathematical formulation of the model satisfactorily represented the involved processes.

The results allowed evolution of the coastline to be prescribed, and indicated points of probable retreat or enlargement of the beach, guiding in this way the desirable planning of its future occupation. The generated tool still provides means of evaluating the impact of human interventions, like building of rigid structures or beach fills along the time and it generates a good estimation of the values of littoral drift for the different beach spaces, helping to evaluate the effects of interventions in the adjacent beaches.

Lista de figuras.....	xii
Lista de tabelas.....	xvi
Lista de símbolos.....	xvii
Lista de acrônimos.....	xix
1 – Introdução.....	01
2 – Objetivos.....	04
3 – Revisão bibliográfica.....	05
3.1 – Características gerais da área em estudo.....	05
3.1.1 – Clima.....	07
3.1.2 – Formação geológica.....	08
3.1.3 – Características sedimentares.....	08
3.1.4 – Dinâmica local.....	09
Ondas.....	10
Marés.....	14
Balanço sedimentar.....	16
3.1.5 – Linha de costa e batimetria.....	18
3.1.6 – Ocupação urbana.....	20
3.2 – Técnicas de previsão da evolução de zonas costeiras.....	23
3.2.1 – Métodos empíricos.....	24
3.2.2 – Métodos numéricos.....	27
3.2.3 – O modelo SMS.....	31
3.3 – Estruturas de proteção costeira.....	38
3.3.1 – <i>Seawall</i> , conceitos básicos de projeto.....	40
3.3.2 - Representação de um <i>Seawall</i> no GENESIS.....	42
3.3.3 – Outras estruturas.....	43
4 – Metodologia.....	45
4.1 – Levantamento do estado atual da linha de costa.....	47
4.2 – Obtenção da linha de costa intermediária.....	49
4.3 – Obtenção da linha de costa e da batimetria iniciais.....	51
4.4 – Simulações e ajustes do modelo.....	53
4.4.1 – Série temporal de dados de onda.....	53
4.4.2 – Geração do gride.....	57
4.4.3 – Evolução das ondas sobre a batimetria.....	59

4.4.4 – Parâmetros gerais do modelo.....	61
4.4.5 – Hipóteses consideradas nas simulações.....	62
4.5 – Estimativa empírica do potencial de transporte de sedimentos.....	63
4.6 – Estimativa numérica do potencial de transporte de sedimentos.....	64
5 – Resultados e discussão.....	65
5.1 – A evolução da linha de costa.....	65
5.2 – Taxas potenciais de transporte longitudinal.....	71
5.3 – A resposta do modelo.....	72
5.4 – Verificação do comportamento a médio prazo.....	78
5.5 – Redução dos impactos a médio prazo.....	80
6 – Conclusões e recomendações.....	87
7 – Referências bibliográficas.....	90

Apêndice A - Rotina de interpolação dos dados de onda

Apêndice B - Rotina de classificação das ondas em categorias estabelecidas

Lista de figuras

1.1	Mapa de localização da área em estudo, onde são representadas as praias do litoral oeste da cidade de Fortaleza, e dentro do retângulo está o trecho modelado, que tem como limite inferior o Rio Ceará, e superior a localidade de Paracumbuca.....	2
3.1	Fotografias aéreas da área modelada indicando a denominação das praias e tendo em detalhe no canto superior direito a região mais atingida pela erosão.....	6
3.2	Distribuição granulométrica dos sedimentos de praia.....	9
3.3	Histograma das alturas significativas divididas em categorias de 10 cm.....	11
3.4	Histograma das alturas máximas de ondas divididas em categorias de 20 cm.	11
3.5	Histograma dos períodos das ondas (Tpeak) divididos em categorias de 1 segundo e identificando as diferentes fontes geradoras.....	12
3.6	Gráficos de rosas de ondas correlacionando altura significativa e período com a direção.....	13
3.7	Histograma das direções de pico das ondas divididas em categorias de 10 graus, evidenciando sua bimodalidade.....	13
3.8	Distribuição dos períodos de onda em função da direção de proveniência.....	14
3.9	Indicação do ângulo de incidência das ondas e do alinhamento médio da costa, que se altera a partir da Ponta do Mucuripe em Fortaleza.....	18
3.10	Representação em perspectiva da batimetria local obtida a partir das Folhas de Bordo da Série 700 da DHN de 1973.....	19
3.11	Caracterização do estado de degradação da linha de costa no trecho mais atingido pela erosão.....	20
3.12	Representação da metodologia utilizada pelo Método do Fluxo de Energia....	25
3.13	Representação do ajuste encontrado para relacionar o fator de transporte de sedimentos, K com as propriedades hidráulicas do meio e do sedimento.....	27
3.14	Esquema genérico da formulação matemática do modelo GENESIS..... (Fonte: Hanson e Kraus, 1989)	32
3.15	Representação da convenção estabelecida entre a representação dos dados no módulo RCPWAVE de forma a compatibilizar sua saída com o GENESIS.....	35
3.16	Representação das simplificações adotadas pelo modelo GENESIS na consideração do transporte na zona de surfe.....	37

3.17	Mapeamento das obras de proteção costeira executadas ao longo do terço inferior da área em estudo. (Fonte: Lima, 1999).....	39
3.18	Representação dos componentes básicos de projeto de um <i>seawall</i> de pedras (A), vertical (B) e de face curva (C).....	41
3.19	Esquema representativo da inserção de <i>seawalls</i> no modelo.....	42
4.1	Modelo conceitual representativo da dinâmica local.....	46
4.2	Plotagem do levantamento da linha de costa realizado no dia 19 de dezembro de 2001 para fins comparativos com os resultados gerados pelo modelo GENESIS.....	49
4.3	Fotografias aéreas de 1996 referenciadas a partir de coordenadas de pontos conhecidos (Fonte: VBA Consultoria)	50
4.4	Base de dados de linha de costa e morfologia de fundo disponível para o litoral oeste de Fortaleza. (Fonte: DHN, 1974, Série 700).....	52
4.5	Espectro de frequências encontradas nos registros de período, altura e direção obtidos por meio do ondógrafo do Pecém.....	54
4.6	Representação geral do período de medição de ondas na Ponta do Pecém e dos resultados do modelo ajustado para os parâmetros de período, altura significativa e direção.....	56
4.7	Malha de pontos gerada dentro das convenções do RCPWAVE para representar a batimetria local durante os cálculos de propagação de onda.....	58
4.8	Frequência relativa a cada categoria de discretização dos dados de onda com relação a período e direção.....	61
4.9	Dados de entrada no modelo. A esquerda a costa dividida em 29 trechos retos e a direita as duas estatísticas de onda ao largo.....	64
5.1	Vista em planta da posição da linha de costa nos diferentes períodos de tempo utilizados para a calibração do modelo.....	66
5.2	Fotografias da praia de Dois Coqueiros, ilustrando os extensos afloramentos de rochas presentes em todo o seu comprimento.....	67
5.3	Fotografias da praia de Iparana, ilustrando as medidas adotadas para fixação da linha de costa e suas conseqüências para os banhistas.....	67
5.4	Fotografias da praia do Pacheco, ilustrando as medidas adotadas para fixação da linha de costa presentes em quase toda a sua extensão.....	67

5.5	Fotografias do início da praia do Icarai, ilustrando o grande volume de material armazenado e sujeito a um gradual desmonte para suprir o material retirado pelas ondas.....	69
5.6	Fotografias da praia do Icarai, ilustrando a intensa dinâmica de retirada de sedimentos a que a área está submetida.....	69
5.7	Fotografias da praia do Cumbuco, ilustrando uma grande faixa de praia arenosa com afloramentos isolados de rochas de praia.....	69
5.8	Volume médio anual de material sedimentar acumulado/retirado para os diferentes trechos nos quais a costa foi discretizada. Valores obtidos por comparação de linhas de praia de 1974 e 2001.....	70
5.9	Taxas potenciais de deriva litorânea potencial obtidas pelo Método do Fluxo de Energia com dados de ondas ao largo e pela rotina NSTRAN, com informações de ondas próximas a arrebentação.....	71
5.10	Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K ₁ e K ₂ iguais a 0,1 e 0,1 respectivamente.....	73
5.11	Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K ₁ e K ₂ iguais a 0,1 e 0,05 respectivamente.....	73
5.12	Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K ₁ e K ₂ iguais a 0,1 e 0,15 respectivamente.....	74
5.13	Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K ₁ e K ₂ iguais a 0,3 e 0,3 respectivamente.....	74
5.14	Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K ₁ e K ₂ iguais a 0,3 e 0,15 respectivamente.....	74
5.15	Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K ₁ e K ₂ iguais a 0,3 e 0,45 respectivamente.....	75
5.16	Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001 para coeficientes de calibração K ₁ e K ₂ iguais a 0,1 e 0,1 respectivamente. Os afloramentos rochosos foram representados por espigões não difrativos.....	76
5.17	Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001 para coeficientes de calibração K ₁ e K ₂ iguais a 0,1. Os afloramentos rochosos foram representados por espigões não difrativos e o desmonte das dunas localizadas nos primeiros quilômetros da praia do Icarai foi representado por engorda de praia.....	77

5.18	Resultados gerados pelo modelo GENESIS representando a possível posição da linha de costa em 2021.....	79
5.19	Linha de costa calculada para cenários futuros de intervenção na praia do Icarai por meio da implantação de três quebra-mares destacados com 360 metros de comprimento e distanciados 540 metros.....	82
5.20	Linha de costa calculada para cenários futuros de intervenção na praia do Icarai por meio da implantação de três quebra-mares destacados com 360 metros de comprimento e distanciados 540 metros, transladados 1000 metros para a esquerda.....	82
5.21	Linha de costa calculada para cenários futuros de intervenção na praia do Icarai por meio da implantação de três quebra-mares destacados com 360 metros de comprimento e distanciados 720 metros.....	82
5.22	Linhas de costa calculadas para cenários futuros de intervenção na praia do Icarai por meio de engorda artificial. Resultado ilustrativo da posição da praia 5 anos depois da última operação de engorda.....	84
5.23	Linhas de costa calculadas para cenários futuros de intervenção na praia do Icarai por meio de engorda artificial. Resultado ilustrativo da posição da praia logo após uma operação de engorda.....	84
5.24	Disposição da área fonte e do local a ser realizada a engorda de praia.....	85

Lista de tabelas

3.1	Relações entre o parâmetro de escala e o diâmetro do sedimento.....	36
4.1	Pontos de referenciamento das fotografias aéreas de 1996, indicando as diferenças entre as coordenadas das estruturas na malha gerada e sua indicação na fotografia aérea.....	51
4.2	Constantes ajustadas para a equação 14 na modelagem das ondas ao longo do tempo a partir de dois anos de registros com o ondógrafo do Pecém.....	55
4.3	Indicação das simulações realizadas e os diferentes objetivos das hipóteses consideradas.....	63

Lista de símbolos

A	parâmetro de escala dependente da granulometria dos sedimentos	$L^{1/3}$
C_g	celeridade de grupo	Lt^{-1}
C_{n1}	coeficiente a ser determinado para o primeiro termo referente ao período p_n	adimensional
C_{n2}	coeficiente a ser determinado para o segundo termo referente ao período p_n	adimensional
d_{50}	diâmetro mediano do sedimento	L
D	Profundidade	L
D_B	altura da berma	L
D_C	profundidade de fechamento	L
D_{1t}	profundidade de arrebentação das 10% maiores ondas	L
$F_{(\alpha_0)}$	termo direcional do evento	adimensional
f	freqüência de ocorrência do evento	t^{-1}
g	aceleração da gravidade	Lt^{-2}
H_b	altura de onda significativa na arrebentação	L
\bar{H}_s	altura significativa média anual das ondas	
$\bar{H}_{s0,137}$	altura da onda significativa excedida somente 12 horas por ano (0,137%)	L
H_o	altura de onda significativa em águas profundas	L
K	coeficiente de calibração	adimensional
K_m	constante do modelo ajustado para cada parâmetro de onda (altura, direção ou período)	L, (grau), t
K_1	parâmetro de calibração	adimensional
K_2	parâmetro de calibração	adimensional
L	comprimento de onda relativo a profundidade de fechamento (D_c)	L
P	parâmetro da onda a ser representado (altura, direção ou período)	L, (grau), t
P_a	parâmetro adimensional da velocidade de queda do sedimento	Adimensional
p_n	período correspondente ao n-ésimo par de termos da equação ajustada para a representação dos parâmetros de onda	t
p	porosidade do sedimento no fundo	adimensional
q	taxa de transporte transversal	L^2t^{-1}
q_o	parâmetro de transporte transversal	L^2t^{-1}
Q	taxa de transporte longitudinal	L^3t^{-1}

t	Tempo	t
T	período da onda	t
\bar{T}_s	média anual do período significativo	t
V	volume de material sedimentar no interior da seção de controle	L ³
x	distância na direção longitudinal a praia	L
y	distância em direção ao oceano	L
W	velocidade de queda do sedimento	Lt ⁻¹
α_o	direção de proveniência da onda ao largo	grau
α_1	direção limite de uma certa faixa de incidência de ondas	grau
α_2	direção limite de uma certa faixa de incidência de ondas	grau
α_b	direção de arrebentação da onda	grau
β	ângulo representativo da declividade média da praia	grau
γ	Índice de arrebentação das ondas	adimensional
θ_{bs}	ângulo de ataque das ondas na arrebentação, em relação à linha de praia, sendo dado por $\theta_{bs} = \theta_b - \theta_s$	grau
θ_b	ângulo de ataque das ondas em relação ao eixo x do sistema de coordenadas utilizado pelo modelo	grau
θ_s	ângulo da linha de praia em relação ao eixo x	grau
ρ_s'	densidade relativa do sedimento	adimensional
ρ_s	massa específica do sedimento	M.L ⁻³
ρ	massa específica da água	M.L ⁻³
Ψ_1	parâmetro adimensional	adimensional
Ψ_2	parâmetro adimensional	adimensional
ϕ	termo de fase	grau
σ	desvio padrão das alturas significativas das ondas	L

Lista de acrônimos

APESC	Associação de Professores do Ensino Superior do Ceará
CERC	Coastal Engineering Research Center
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPH	Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias
UFC	Universidade Federal do Ceará

1. Introdução

O transporte de sedimentos costeiros, principalmente o transporte longitudinal, é algo que tem sido alvo de estudo de pesquisadores e profissionais das mais diversas áreas. A importância do fenômeno fica evidenciada no momento em que se observam as alterações da linha de costa ao longo do tempo, notadamente naquelas áreas que sofrem ações antrópicas. Sabe-se que as costas são áreas de grande concentração de energia, e que são raros os casos em que estes ambientes atingem um estado de equilíbrio estático, observando-se na realidade, características de um equilíbrio dinâmico, onde as formas e texturas alternam-se no curso do tempo. A medida que este equilíbrio é alterado pela implementação de obstáculos físicos aos transportes de material, instalam-se processos erosivos ou deposicionais.

Neste contexto, a ocupação de uma área costeira, que muitas vezes leva ao uso de obras de engenharia para manter a integridade das edificações, requer um bom conhecimento dos agentes dinâmicos e das características morfológicas locais, que possibilite uma previsão - pelo menos razoável - do comportamento da linha de praia ao longo da vida útil das estruturas. Ainda, quando a ocupação tem fins portuários, com implantação de estruturas de proteção e atracação, deve-se considerar a necessidade de conhecer a dinâmica local com precisão suficiente que possibilite uma boa estimativa dos custos com manutenção de profundidade e conservação dos ambientes circunvizinhos.

O problema com que se depara o pesquisador, na grande maioria dos casos em que pretende estudar a dinâmica de uma localidade, é a falta de séries representativas de dados locais. Em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, esta realidade é ainda pior, dada a escassez de recursos, tanto para a realização de campanhas de monitoramento de dados costeiros, quanto para a recuperação de infra-estruturas públicas ou privadas, que venham a ser afetadas por problemas relacionados com alterações da linha de praia. Sendo assim, a possibilidade de se antever a resposta de uma determinada zona de praia diante de uma intervenção humana, baseada nos dados disponíveis para a localidade passa a ser peça chave para o tomador de decisão optar por esta ou aquela solução, onde as conseqüências negativas possam ser minimizadas.

A observação do estado das praias situadas imediatamente a oeste da cidade de Fortaleza (Figura 1.1) evidencia um desconhecimento das tendências da dinâmica local e dos processos que regem o avanço ou o recuo da linha de costa. Considerando-se que a fixação da orla marítima de Fortaleza ocasionou a quebra do fluxo sedimentar trazido pela deriva litorânea e que o rio que limita este setor a barlar não contribui de forma significativa no abastecimento das praias, tem-se que as dunas frontais passaram a ser o principal mecanismo

de manutenção da posição da linha de costa desta região. Com o crescimento urbano desordenado, e a especulação imobiliária para a ocupação dos terrenos localizados próximos ao mar, ocorreu a fixação das dunas e conseqüentemente uma intensificação significativa dos processos erosivos.

A correlação entre densidade de ocupação humana e evidências da instauração dos processos erosivos é alta. As praias de Dois Coqueiros, Iparana e Pacheco, onde a ocupação teve início, registram em quase todos os seus trechos o afloramento de rochas de praia, a formação de pequenas falésias e a existência de ruínas de construções. Na segunda, por exemplo, o recuo da praia registrado por levantamentos aéreos realizados entre os anos de 1960 e 1996 chega a ser da ordem de 250 metros em alguns pontos. Em contrapartida, ao longo das praias compreendidas entre o Rio Ceará e a Ponta do Pecém, apenas o terço inferior apresenta altas taxas de ocupação urbana, sendo esta gradativamente reduzida nas praias localizadas mais a oeste.

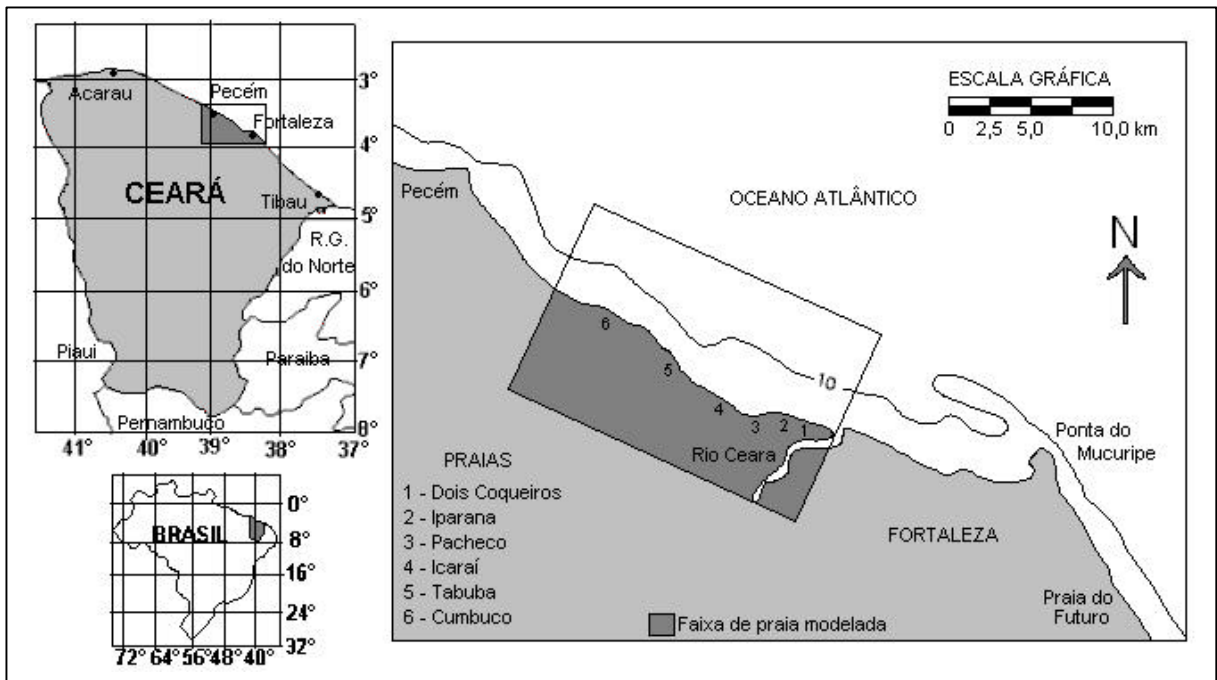


Figura 1.1. Mapa de localização da área em estudo, onde são representadas as praias do litoral oeste à cidade de Fortaleza e o trecho utilizado para modelagem.

A construção do Porto do Pecém no limite superior, juntamente com um complexo siderúrgico e industrial, tende a atrair a ocupação para o restante da área, exigindo um conhecimento mais aprofundado dos processos que envolvem sua dinâmica de forma que se possa evitar a repetição dos erros cometidos nas regiões ocupadas. Esta necessidade motivou o estudo de modelagem destas praias visando norteio de um plano de uso e ocupação para os futuros empreendimentos.

Optou-se pela modelagem numérica dada, a redução considerável dos custos quando comparada à modelagem física, e levando-se em conta, ainda, a disponibilidade do pacote SMS (*Shoreline Modeling System*) para ser aplicado tanto na propagação das ondas sobre o fundo oceânico quanto na evolução da linha de praia ao longo do tempo. O modelo numérico SMS é composto por dois módulos, o GENESIS (*Generalized Model for Simulating Shoreline Change*) e o RCPWAVE (*Regional Coastal Processes WAVE model*). O primeiro consiste em um modelo genérico, determinístico e bi-dimensional com grande flexibilidade para ser adaptado a trechos de costa aberta com taxas importantes de transporte de sedimentos e onde exista uma grande variedade de estruturas costeiras ou atividade humana específica como engordamento artificial de praias. Já o segundo, tem a função de realizar a propagação das ondas monocromáticas ao largo da arrebentação até as proximidades da linha de arrebentação, gerando dados de entrada para o modelo GENESIS.

Objetivos e justificativa

Este trabalho visa a calibração do modelo computacional GENESIS para um trecho de aproximadamente 20 quilômetros de praias localizadas imediatamente a oeste da cidade de Fortaleza, no estado do Ceará. Além de validar as hipóteses levantadas sobre o comportamento dos diversos agentes envolvidos na dinâmica local, esta ferramenta proporcionará a previsão da evolução da linha de costa, indicando pontos de provável recuo ou avanço da praia.

Considerando-se que as áreas já intensamente urbanizadas tem registrado acentuação dos processos erosivos, e que inúmeras estruturas tem sido erguidas como uma última tentativa de preservar edificações particulares, entende-se que a possibilidade de antever o comportamento das praias a médio e longo prazo, diante de possíveis cenários de ocupação e intervenção passa a ser decisivo no norteamento do desenvolvimento local. A partir do momento em que se adote um modelo de urbanização condizente com a dinâmica da área, poder-se-á minimizar prejuízos e otimizar os investimentos nesta região onde os recursos já são consideravelmente escassos.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Características gerais da área em estudo

A história da evolução das praias que atualmente fazem parte da Região Metropolitana de Fortaleza passou a sofrer modificações significativas a partir das primeiras décadas do século passado. Com o crescimento da cidade, surgiu a necessidade da construção de um novo porto que atendesse a demanda comercial da região, logo, na década de 40 foram iniciadas as obras para a edificação do Molhe do Titã, situado na Ponta do Mucuripe (Figura 1.1). Segundo Moraes (1972) apud Valentini et al. (1992), ao final das obras – que duraram cerca de 5 anos - uma área de aproximadamente 128.000 m² de terrenos havia sido erodida nas praias localizadas a sotamar do porto, e o assoreamento junto ao quebramar principal havia inviabilizado o uso do cais de petroleiros.

Como consequência destes acontecimentos, na década de 50 foram conduzidos estudos no sentido de esclarecer as causas do problema e propor soluções. O procedimento adotado foi de se construir um espigão na Praia do Futuro – a barlar do porto - evitando o seu assoreamento. Foi sugerido, ainda, o transpasse artificial de sedimentos através da Ponta do Mucuripe para suprir a demanda gerada pelas ondas incidentes na orla de Fortaleza, obra esta que não chegou a se concretizar. Assim, os recuos da linha de costa continuaram a ocorrer ao longo das praias da cidade, para minimiza-los, na década de 70 foi construído um campo de espigões entre o molhe do Mucuripe e a embocadura do Rio Ceará.

Paralelamente a estes acontecimentos, a região metropolitana se desenvolvia, e residências de veraneio da população de Fortaleza passaram a situar-se a oeste da capital, exatamente após o Rio Ceará, em praias como: Dois coqueiros, Iparana, Pacheco e Icarai (Figura 3.1). Dada a inexistência de uma legislação específica e ao desconhecimento da dinâmica local, a ocupação urbana se deu sobre os campos de dunas, e em alguns casos, em pontos muito próximos ao limite da zona de estirâncio. A esta altura, os processos erosivos observados na orla marítima de Fortaleza, que haviam sido minimizados com a implantação de espigões, transferiram-se gradualmente para as praias próximas no sentido de leste para oeste. Valentini et al. (1992), relata que o fenômeno chega a estender-se por cerca de 30 Km a oeste de Mucuripe, atingindo um recuo da linha de costa de mais de 300 m em alguns trechos, e chegando a um total de terrenos erodidos da ordem de 6 milhões de m².

Com a impermeabilização das praias da capital cearense, seria intuitivo supor que com o tempo, o Rio Ceará passaria a ser a única fonte natural de sedimentos para as praias situadas a oeste da mesma. Todavia, estudos de salinidade realizados pelos mesmos autores supra

citados em estações ao longo do curso do rio, desde a foz até o interior do continente, identificaram que este se comporta como um braço de mar na maior parte do ano, e que mesmo nas estações chuvosas, sua contribuição não vem a ser considerável para somar-se à deriva litorânea. Sendo assim, as praias localizadas a sotamar de Fortaleza, principalmente as localizadas nos seus primeiros quilômetros, passaram a caracterizar-se pelas altas taxas erosivas que acarretaram um recuo significativo da linha de costa. Já em alguns dos trechos restantes, graças a uma ocupação mais branda, ainda detectam-se campos de dunas onde o transporte eólico hora carrega sedimento para a praia, hora age de forma contrária retirando o material sedimentar e o depositando no interior do continente.



Figura 3.1. Fotografias aéreas da área modelada indicando a denominação das praias e tendo em detalhe no canto superior direito a região mais densamente ocupadas.

De uma maneira geral, estes 20 km de costa situados à oeste de Fortaleza apresentam uma grande variedade de ambientes costeiros, que vão desde praias arenosas que atingem o seu perfil de equilíbrio naturalmente, à praias completamente alteradas pela intervenção humana, onde o preço pago pela preservação das edificações foi a perda da balneabilidade e da qualidade visual. A característica principal desta região pode ser resumida no desequilíbrio sedimentar, intensificado pelas construções em suas praias adjacentes, que graças a isto, tem acarretado uma intensa desvalorização ao longo dos anos.

A magnitude das modificações observadas indica a relevância econômica e social do problema, dada a importância do turismo para a receita do estado. O fato é que conhecendo as peculiaridades da região e os parâmetros que regem a sua dinâmica, gera-se subsídios para

aprender com os problemas passados e o evitar que eles tornem a ocorrer nas áreas que ainda serão ocupadas.

Neste capítulo serão abordadas as características físicas da região, bem como os seus processos dominantes.

3.1.1. Clima

De acordo com a classificação de Köppen (1948), apud Magalhães (2000), a região litorânea do Ceará, esta compreendida na zona tropical do tipo AW', logo possui um clima tropical chuvoso (quente e úmido com chuvas de verão). Desta forma definem-se duas estações anuais com características bem diferentes. Nos meses compreendidos entre agosto e dezembro, caracteriza-se uma estação sem chuvas, onde os ventos locais são mais intensos. Este é o período de inverno. Já entre os meses de janeiro e julho ocorre o verão, estação chuvosa onde os ventos locais são menos intensos e como pôde ser constatado por Melo (1995), incidem sobre a costa algumas ondas resultantes de eventos meteorológicos ocorridos no atlântico norte.

O regime térmico na região é relativamente uniforme e as temperaturas são elevadas ao longo de todo o ano, apresentando amplitudes reduzidas decorrentes da proximidade com o mar. Magalhães (2000) encontrou médias mensais de 27.6 °C, sendo que a média durante o dia foi de 31°C, com valores oscilando entre 29 e 34°C.

“O vento desempenha papel determinante na morfologia costeira, pela influência no clima de ondas e conseqüentemente no transporte litorâneo de sedimentos, e pela atuação sobre as dunas que bordejam grande parte do litoral cearense determinando o transporte eólico dos sedimentos. Além disso, devido à grande amplitude da maré que expõe uma larga faixa de estirâncio, o vento também atua sobre os sedimentos da praia promovendo o seu transporte.” (Pitombeira (1995) apud Salim (1998)).

Os dados de ventos disponíveis para a região foram levantados pela Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME) no período compreendido entre os anos de 1976 e 1985, e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH), que coletou dados durante os anos de 1995 e 1998 na região do Pecém. Conclui-se que os ventos predominantes originam-se de leste, seguidos pelos vindos de sudeste. A velocidade média ao longo do período de medição, obtida a 10 metros de altura, foi de 7,4 m/s, tendo como limite superior 16 m/s e inferior zero. Os máximos foram registrados nos períodos de agosto a dezembro, período onde as ondas locais apresentam maior altura.

3.1.2. Formação geológica

Segundo Maia (1998), as características geológicas e geomorfológicas da região são descritas desde o embasamento pré-cambriano, que aflora como promontório rochoso, seguido por sedimentos da formação Barreiras, os quais constituem os glaciais pré-litorâneos e o quaternário composto por sedimentos da planície litorânea formados por: depósitos flúvio-aluvionários, mangues, dunas móveis, paleodunas, depósitos praias e rochas de praia (*beach rocks*), que representam antigos níveis de praia, onde a ação de carbonato de cálcio, precipitando entre os grãos de areia, processa a cimentação desse material.

Os promontórios rochosos mais próximos localizam-se na Ponta do Mucuripe e na Ponta do Pecém, que por estarem além dos limites leste e oeste da área garantem às suas praias uma forma suavemente côncava, e coincidem com os pontos de locação dos dois portos do estado, graças a pouca profundidade do embasamento rochoso. As formações do quaternário compreendem a maior fração exposta na zona costeira propriamente dita, onde as rochas de praia afloram com maior frequência no terço inferior e em alguns pontos isolados dos setores restantes. Nestes, os sedimentos praias, flúvio-aluvionários e as dunas móveis dominam.

3.1.3 – Características sedimentares

O material que compõe as praias e suas proximidades possui uma grande diversidade no que diz respeito a tamanho, forma e composição. Em geral, as suas características particulares de composição e textura variam para cada localidade, e o que se observa é que mesmo ocorrendo variações temporais na composição das praias, estas ocorrem em uma escala bem menos significativa que a das variações geográficas.

Muitos são os fatores envolvidos no fornecimento de material para a formação de praias e conseqüentemente nas suas características. Na maioria dos casos, o sedimento é derivado de processos locais de intemperismo, podendo também ser transportado por longas distâncias. As praias da região apresentam um pacote sedimentar uniforme, tendo-se em alguns trechos o afloramento de rochas de praia, como resultado da cimentação do material ao longo dos anos. Numa análise geral, pode-se encontrar material arenoso médio a fino, caracterizando uma praia de perfil dissipativo.

Levantamentos realizados na região por Silva (1993), cobriram a área estudada com 7 pontos de amostragem (Figura 3.2). Os resultados obtidos fornecem uma estimativa dos valores de diâmetro médio dos sedimentos ao longo da zona de arrebenção. Valentini et al.

(1992), identificou ainda uma variação granulométrica ao longo do perfil praiial, onde as amostras localizadas na zona de arrebenção são sempre mais grosseiras que as demais. Esta informação fornece indícios do contínuo transporte de sedimento a que estão submetidas estas praias. Neste segundo trabalho, observou-se ainda, que os sedimentos da zona de estirâncio apresentaram uma diminuição gradual do diâmetro médio no sentido de leste para oeste, concordando com a direção preferencial da deriva litorânea, que tende a retirar inicialmente o sedimento mais fino graças a sua maior disponibilidade para ser posto em suspensão.

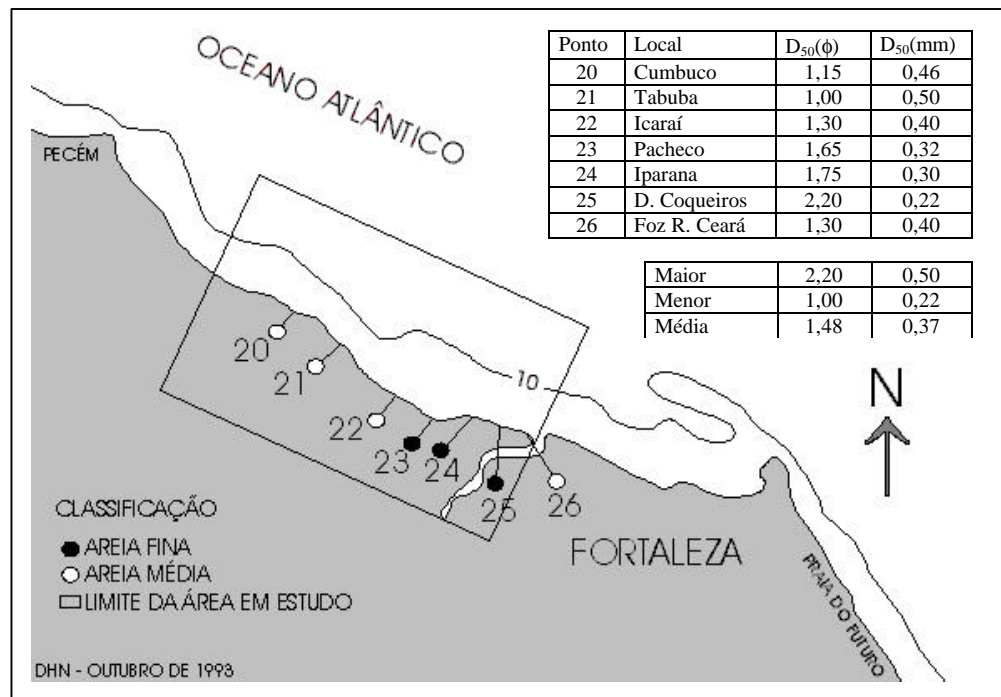


Figura 3.2. Distribuição granulométrica dos sedimentos de praia.

(Fonte: Silva, 1993)

3.1.4 – A dinâmica local

O encontro entre o continente e o oceano caracteriza uma zona de transição sujeita a um intenso dinamismo e influenciada por diferentes fatores. “Quando este contato se dá em uma praia arenosa, surgem mecanismos de defesa ao ataque das ondas, correntes e tempestades. Dentre estes podemos citar a declividade do fundo, que faz com que a quebra das ondas ocorra mais distante da praia e dissipe parte de sua energia na zona de surfe, a formação de barras e o afloramento de estruturas rochosas” (CERC, 1984). Em praias onde o equilíbrio não foi atingido, ou seja, onde as características dos agentes dinâmicos são incompatíveis com a morfologia e a granulometria locais, observa-se uma constante alternância de formas e materiais, que tendem a estabilizar as transformações que aquelas vêm sofrendo.

Inevitavelmente, por menor que seja, a intervenção humana tende a alterar um ou mais parâmetros da dinâmica costeira, gerando uma nova configuração das áreas próximas. Em resposta às modificações introduzidas, o sistema praiial, juntamente com seus agentes dinâmicos, tende a retrabalhar suas características até o momento em que a configuração atingida esteja em harmonia com a dinâmica imposta. Algumas vezes, este ponto pode nunca ser atingido, quer seja pela pouca flexibilidade do sistema, ou pela constante alteração dos parâmetros, como por exemplo um clima de ondas totalmente aleatório, em zonas sujeitas a grandes amplitudes meteorológicas. Já em outro extremo, podemos observar praias onde as características do material que a compõe e a magnitude das modificações a ela impostas possibilitam uma resposta em uma escala temporal horária.

Trabalhos anteriores como os de Maia (1998) e Valentini et al. (1992), identificaram uma forte dinâmica de transporte de sedimentos para a região, tanto no que diz respeito às ondas, quanto no que se relaciona ao transporte eólico. Desta forma, as modificações texturais e morfológicas impostas pela ocupação das praias e pelas alterações no fornecimento de sedimentos vêm a invalidar qualquer possibilidade de que o encontro de um ponto de equilíbrio venha a ocorrer naturalmente. Principalmente pelo fato de que este equilíbrio pode significar o retrocesso da linha de praia em pontos onde a densidade de edificações o torna indesejável. Diante do exposto, pode-se ter uma idéia da importância da atuação dos agentes dinâmicos sobre as praias do litoral oeste de Fortaleza e o significado de seu conhecimento para o estudo local. A seguir serão detalhadas as suas características.

Ondas

As ondas são responsáveis pela maior parcela de transporte de sedimentos, seja transversal ou longitudinal - este último sendo bem mais significativo que o primeiro. Apesar de existirem dados de cerca de mais de 5 anos de medições de ondas no porto do Mucuripe em Fortaleza, constatou-se que as medidas de direção de onda eram realizadas por observação visual e a uma frequência de aquisição diferente da dos demais parâmetros, o que põe em questão a sua confiabilidade. Por outro lado, devido ao fundeio de um ondógrafo direcional do tipo *Waverider* nas proximidades do Porto do Pecém, mais precisamente na isobata de 18 metros, medições mais confiáveis para um período de aproximadamente dois anos foram disponibilizadas. De posse destes dados, pode-se ter uma idéia do comportamento das ondas ao longo do ano e estimar suas características energéticas e o potencial de transporte.

Os dados foram coletados durante o período compreendido entre março de 1997 e janeiro de 1999, com intervalos de 3 horas de medição. As amostras contínuas totalizam 5718

pontos, com dados de altura significativa, período de pico, altura máxima, direção de pico e hora da coleta.

A altura significativa média das ondas foi de 1,45 metros (coincidindo também com a mais freqüente), tendo-se registrado um máximo de 2,48 e um mínimo de 0,60 metros o que indica uma amplitude de 1,88 metros. A Figura 3.3 ilustra o histograma das ondas, que apresentaram um desvio padrão de 29 centímetros.

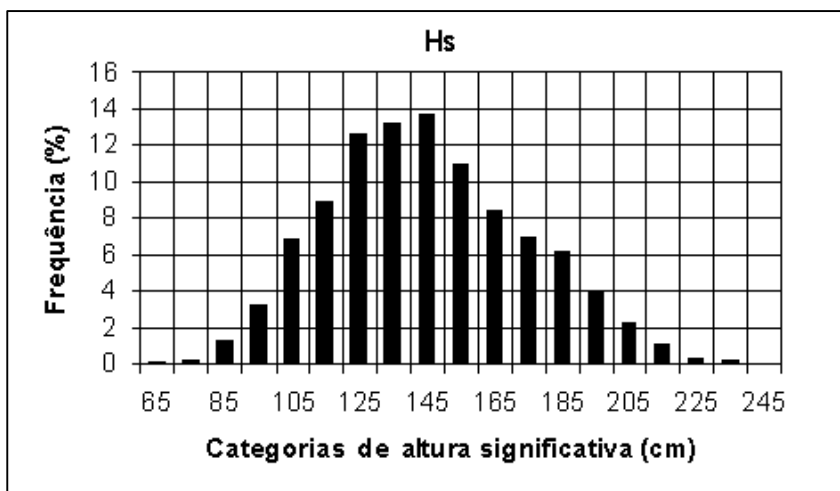


Figura 3.3. Histograma das alturas significativas divididas em categorias de 10 cm.

Os valores máximos registrados para altura das ondas tiveram uma média de 2,21 metros, com uma amplitude de 3,78 metros indo desde 90 centímetros até 4,68 metros. O desvio padrão destes valores foi de 51,6 centímetros e o mês de agosto foi o que registrou em média as maiores alturas de ondas. A altura máxima mais freqüente observada foi de 2 metros. O histograma de alturas máximas esta representado na Figura 3.4.

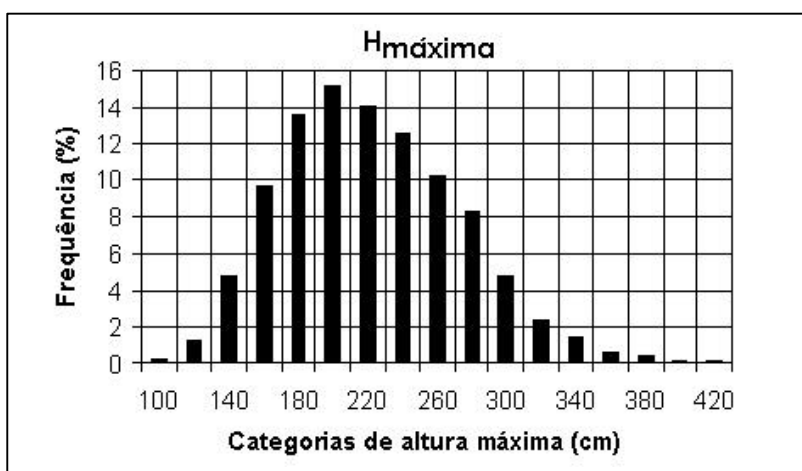


Figura 3.4. Histograma das alturas máximas de ondas divididas em categorias de 20 cm.

Com relação aos períodos de ondas, verificou-se uma média de 7,82 segundos, que indicou pouca representatividade, dada a bimodalidade da distribuição (Figura 3.5). Períodos entre 5 e 7 segundos agruparam cerca de 56% dos registros, enquanto que as ondas de maiores períodos, entre 10 e 12 segundos não representaram nem 10% da amostra. Ficou clara a forte relação entre período e direção das ondas. Através da observação de gráficos de rosa de ondas correlacionando direção e período, foi evidenciado o que já havia sido discutido por outros autores com diferentes registros de ondas para o nordeste brasileiro (Figura 3.6). Identificou-se que as ondas de grande período, ou “swell”, possuem uma única direção de proveniência, enquanto que as ondas locais, ou “sea”, são totalmente dependentes dos ventos da região e tem origem nas direções predominantes dos mesmos.

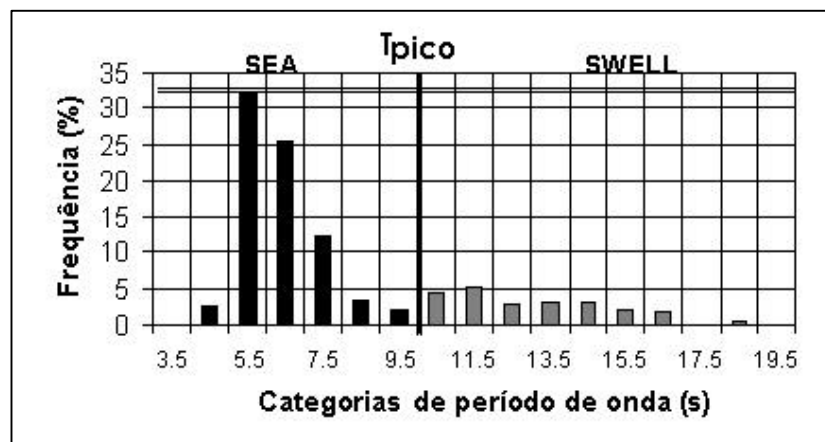


Figura 3.5. Histograma dos períodos das ondas (T_{peak}) divididos em categorias de 1 segundo e identificando as diferentes fontes geradoras.

Esta correlação encontrada entre as direções e os períodos, explica ainda o fato de se observar que o mês de agosto apresentou ondas mais esbeltas, com maiores alturas e pequenos períodos. O fato é que neste mês, que é um dos mais secos do ano, se registram as maiores velocidades de vento, logo as ondas locais passam a ser maiores. Na Figura 3.6 são mostrados dois gráficos de rosas, o primeiro correlaciona a direção de pico com a altura significativa e o segundo correlaciona a direção de pico com o período de pico. Observa-se que a quase totalidade dos períodos menores que 9 segundos vem das direções leste e leste-sudeste.

Melo (1995), correlacionou a incidência das ondas de grande período na costa cearense com eventos meteorológicos ocorridos no hemisfério norte. Em seu trabalho foram comparados registros de grandes tempestades ocorridas no Atlântico Norte e constatou-se que tais ondas chegavam a percorrer milhares quilômetros antes de sua quebra nas costas cearenses. Este autor constatou, ainda, que estes eventos só ocorrem durante os primeiros meses do ano, não sendo registrados nos demais.

As direções de onda concentraram-se na faixa de 3 a 125 graus com o norte, totalizando uma variação de 122 graus, com uma direção média de incidência de 85 graus. Considerando que o alinhamento médio da costa indica uma normal perfazendo 40 graus com o norte, para um observador posicionado de frente para o mar na origem desta reta, teremos ângulos máximos de 37 graus para a esquerda e 85 graus para a direita, indicando o quão obliquas são as ondas que incidem neste trecho de costa. Na figura 3.7, observa-se ainda, a bimodalidade das direções divididas em diferentes categorias, enquanto que a correlação encontrada entre os valores de período e direção está representada na figura 3.8.

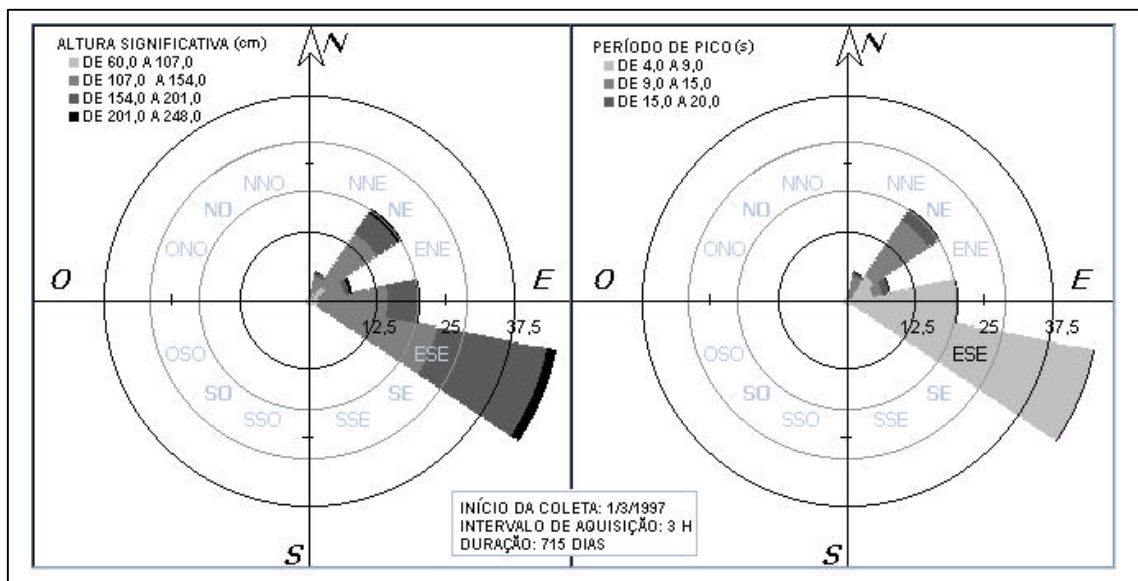


Figura 3.6. Gráficos de rosas de ondas correlacionando altura significativa e período com a direção.

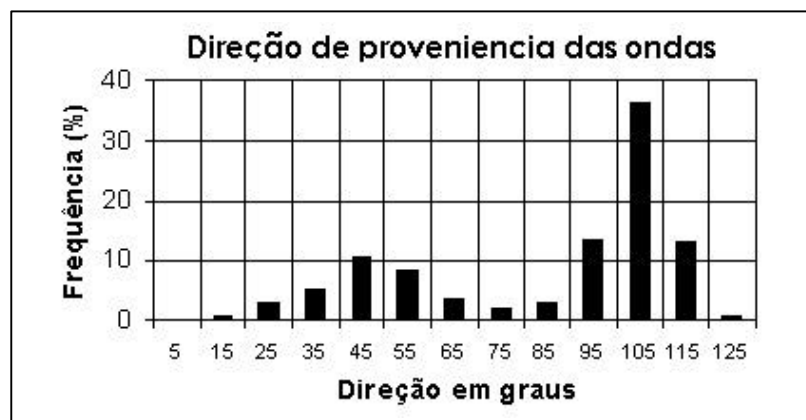


Figura 3.7. Histograma das direções de pico das ondas divididas em categorias de 10 graus, evidenciando sua bimodalidade.

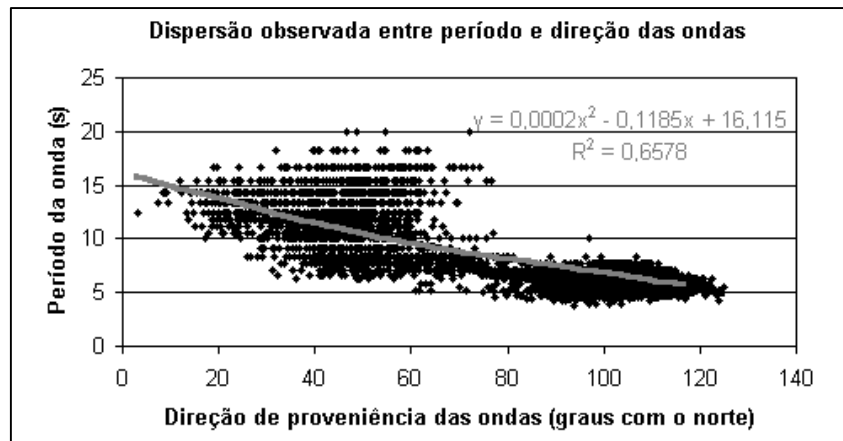


Figura 3.8. Distribuição dos períodos de onda em função da direção de proveniência.

Marés

As marés tem importância fundamental para o equilíbrio de sistemas costeiros como praias, estuários e manguezais, bem como para zonas portuárias. A morfologia da praia é influenciada diretamente pelas características da maré e seu potencial de transporte de sedimento quando comparado com o das ondas que atuam sobre a mesma. Heward (1981) apud Davis (1983), definiu que praias onde a ação da maré causa um significativo transporte de sedimentos, superando, inclusive, o ocasionado pelas ondas, são denominadas costas dominadas por marés. A mesma definição pode ser aplicada para situações contrárias, onde as costas são dominadas por ondas, realizando-se obviamente as substituições nos termos.

As características biológicas de uma praia também estão intimamente relacionadas com as marés. O ritmo, intensidade e duração do processo de subida e de descida da água determina a estrutura das comunidades animais e vegetais presentes neste meio. Os organismos marinhos expostos à atmosfera durante a maré seca precisam ter adaptações para sobreviver à insolação, dessecação, chuvas, falta de alimentos, e acúmulo de excretas.

As flutuações de maré são influenciadas em uma escala maior pelas resultantes da atração gravitacional do sistema Terra-Lua-Sol e a força centrífuga conseqüente da rotação da Terra e da translação em torno do centro de massa dos sistemas Terra-Lua e Terra-Sol, que consiste na parcela astronômica. Em menor escala, as alterações são observadas devido a variações de pressão causadas pelo aquecimento desigual dos diferentes pontos da terra e atuação dos grandes sistemas de ventos, esta é a parcela meteorológica da maré.

“As marés meteorológicas são mais difíceis de serem previstas e modeladas, dada a modificação aleatória dos fatores climáticos, como a pressão atmosférica e o vento” (Pugh, 1987 apud Truccolo, 1998). “As variações da pressão atmosférica e da troca de momento

entre a atmosfera e o oceano através da atuação do vento resultam em oscilações da ordem de dias do registro do nível do mar, denominadas de marés meteorológicas.” (Gill, 1982 apud Truccolo, 1998).

“A relação entre as duas varia de local para local, ou seja, podemos ter pontos onde a componente meteorológica tem maior importância que a astronômica, como no sul do Brasil, no Porto de Rio Grande, onde frequentemente o vento forte represa as águas de tal forma que a maré, de amplitude muito pequena, fica totalmente mascarada. Numa situação oposta observamos as costas do nordeste brasileiro, onde praticamente não se observa maré meteorológica significativa” (Franco, 1964). Tal observação leva-nos a deduzir que para efeito de simulação do fluxo hidrodinâmico em praias de baixa latitude, como é o caso do litoral cearense, o efeito da maré pode ser bem representado a partir da inserção das características astronômicas no modelo.

Davies (1964) apud Davis (1983), classificou as praias em função da sua amplitude de maré. Ele considerou três maiores categorias de marés: micromaré (amplitude menor que 2 metros), mesomaré (2 a 4 metros) e macromaré (maior que 4 metros). Estes limites não são tão rigorosos e dependem das características específicas de cada localidade. Hayes (1975) apud Davis (1983), aplicou a terminologia de Davies e caracterizou a morfologia de cada uma. As costas de micromaré são caracterizadas por barras longas, estreitas e relativamente inalteradas com enseadas (*inlets*) largamente espaçadas. Observa-se também estruturas resultantes do espraiamento e deltas de inundação da maré bem desenvolvidos, mas deltas de vazante são pequenos ou inexistentes. Nestas praias, as ondas são o processo físico dominante (Hayer, 1975, 1979 apud Davis, 1983).

Áreas submetidas a regimes de mesomaré, como as praias do litoral cearense, apresentam barras pequenas e um pouco largas com enseadas mais próximas. As barras tem uma configuração que lembra uma coxa de ave, com uma ponta mais larga que a outra devido a progradação da linha de costa. Os estuários possuem deltas de vazante bem desenvolvidos, indicando uma influência das correntes de maré.

As praias de macromarés não desenvolvem barras devido a predominância de fortes correntes de maré numa orientação normal à praia. Baías em forma de funil podem estar presentes contendo bancos de areia lineares e de orientação paralela às correntes de maré (Hayes, 1975, 1979 apud Davis, 1983).

Maia (1998), analisou 14 registros analógicos mensais do marégrafo instalado no Porto do Mucuripe coletados desde abril de 1995 a julho de 1996. Observou-se uma amplitude máxima da maré de 3,23 metros, durante a sizigia de dezembro de 1995, enquanto que a amplitude mínima registrada foi de 75 cm, durante a quadratura de março de 1996. A cota

máxima do nível do mar foi de 3,41 cm, e a mínima de -15 cm em relação a cota “zero” do porto, que se encontra 5 cm abaixo do nível de referência da DHN. Assim sendo, a cota mínima da maré passa a estar -20 cm da linha de costa adotada no trabalho, enquanto que a máxima se encontra 3,18 cm acima.

O balanço sedimentar

Pode-se dizer que a característica mais marcante das praias mencionadas é o desequilíbrio sedimentar, onde a quantidade de material que entra nas fronteiras do sistema não é compatível com a que sai. O estudo do balanço sedimentar consiste na quantificação das diferentes fontes, tanto de entrada quanto de saída, e da grandeza de suas contribuições, constituindo-se assim, em uma peça chave na identificação das causas do problema e na determinação das possíveis soluções.

Os principais mecanismos de retirada natural de sedimentos são o transporte eólico e o transporte transversal e longitudinal das ondas. O primeiro, se encarrega de deslocar tanto o material das dunas, quanto o sedimento exposto durante os períodos de maré baixa. Os dois últimos dependem do clima de ondas, e conseqüentemente vêm a ser influenciados pelo vento, pois parte das ondas incidentes na costa também são geradas pelos ventos locais.

Segundo Maia (1998), o transporte eólico representa um dos processos mais importantes para a formação, desenvolvimento e manutenção da linha costeira na porção norte do nordeste brasileiro e em particular no estado do Ceará. A evolução geológica mostra ainda, que a formação e migração das dunas está presente no litoral desde o pleistoceno até a atualidade. Durante este período, constituiu-se um dos fatores responsáveis pela modelagem costeira, já que, dependendo do trecho considerado, pode atuar como agente erosivo ou deposicional.

As dunas apresentam uma distribuição contínua ao longo do litoral da costa cearense, com uma limitada penetração para o interior, restringindo-se aos seis primeiros quilômetros. Especificamente na área de interesse, observa-se que a metade inferior possui uma acentuada fixação das dunas, limitando o transporte de sedimentos pelo vento. Desde 1973 as dunas da margem direita do Rio Ceará encontram-se fixadas, e sua contribuição no balanço sedimentar da região pode ser negligenciada. Por outro lado, no trecho de praias compreendido entre o Cumbuco e as proximidades da Ponta do Pecém às encontramos em processo de migração.

Nesta região, Maia (1998) estimou taxas potenciais de transporte eólico da ordem de 79 m³/m/ano, enquanto que Valentini et al. (1992), encontrou valores médios anuais variando de 14.4 a 18 m³/m/ano. Considerando-se que dos 20 km de costa, aproximadamente dois terços

possuam boas áreas de exposição de praias para o transporte de sedimentos, teremos um transporte da ordem de $240.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ para a taxa de $18 \text{ m}^3/\text{m}/\text{ano}$.

O transporte transversal ocasionado pelas ondas, ocorre de forma normal a praia, ou seja, é aquele que ocasiona as alterações de perfil ao longo do tempo. Este transporte resulta de alterações sazonais do clima de ondas e sua interação com o fundo móvel, acabando por promover a formação e migração de barras. Estas estruturas, em geral, estocam o material da praia durante períodos de tempestades e o devolvem gradualmente em épocas mais calmas.

Ao longo do litoral nordestino, e conseqüentemente do cearense, podemos encontrar duas configurações de perfis de praia que se alternam ao longo de um ano típico. Durante o inverno - que ocorre entre os meses de agosto e dezembro - a maior intensidade dos ventos ocasiona ondas de grandes alturas e, conseqüentemente, observa-se um perfil de praia mais erodido, com uma declividade mais acentuada. Nos outros meses do ano, durante o verão, os ventos são mais fracos e a incidência de ondas menores acarreta um transporte transversal no sentido do continente. Desta forma, durante este período, principalmente nos meses de fevereiro, março e abril, observa-se um perfil de praia com característica deposicional, e declividade mais suave. Como foi dito, estas modificações apresentam um caráter sazonal, ou seja, as modificações impostas pelo transporte transversal acabam por se anular a longo prazo.

O transporte longitudinal de sedimentos, também denominado de deriva litorânea, corresponde à parcela de sedimento que é deslocada paralelamente a praia para as áreas adjacentes. Este transporte se origina da componente longitudinal da direção de propagação das ondas sobre a costa. Em outras palavras, quanto maior o ângulo formado pela crista das ondas e o alinhamento médio da praia, maior será esta parcela de transporte. O promontório rochoso do Mucuripe, marca um ponto de mudança de alinhamento na costa cearense, desta forma, uma tendência que vinha predominantemente de sudeste para noroeste passa a ser de leste-sudeste para oeste-noroeste (Figura 3.9), intensificando a deriva.

Dada a pouca representatividade do aporte sedimentar do Rio Ceará e o caráter cíclico do transporte transversal, a deriva litorânea e o transporte eólico (este representando aproximadamente $1/3$ daquele) são os principais responsáveis pela entrada ou saída de sedimentos nestas praias. Valentini et al. (1992), estimou taxas de transporte longitudinal da ordem de $600.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ usando dados de ondas ao largo, enquanto que Lima (2001), encontrou para os dados de onda do Porto do Pecém, grandezas de $1.000.000 \text{ m}^3/\text{ano}$. Comparando os volumes retidos pelo espigão do Mucuripe, Salim (1998) achou valores de deriva da ordem de $915.000 \text{ m}^3/\text{ano}$. Em todos os trabalhos, o sentido do transporte foi de leste para oeste.

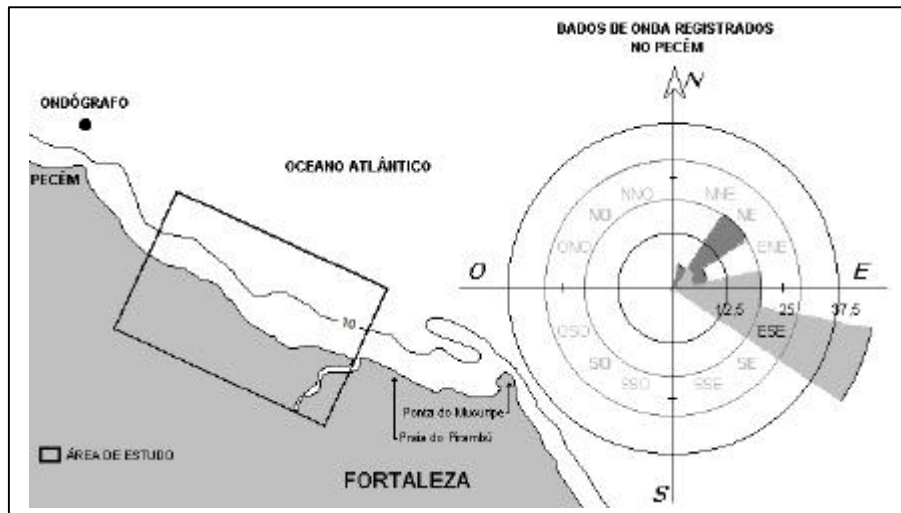


Figura 3.9. Indicação do ângulo de incidência das ondas e do alinhamento médio da costa, que se altera a partir da Ponta do Mucuripe em Fortaleza.

Com relação ao despejo de sedimentos nas proximidades das praias, Salim (1998) relata que entre os anos de 1981 e 1992 ocorreram cinco lançamentos de material dragado do porto do Mucuripe nas proximidades da praia do Pirambú, na orla marítima da capital. O fato de existir uma seqüência de 11 espigões limitando o início desta praia e o Rio Ceará sugere a consideração de que dificilmente estes sedimentos viriam a suprir às praias situadas na margem esquerda do rio, podendo esta contribuição ser negligenciada sem comprometimento dos resultados.

Sendo assim, as ondas são o principal agente local de transporte de sedimentos, e o fato de possuírem uma direção predominante e compatível com a de incidência dos ventos, indica que o fluxo de sedimentos é unidirecional e no sentido de leste para oeste. Fechando o balanço, deve-se observar que a quebra de suprimento na fronteira mais ao leste do sistema acarreta a constante retirada de material e o recuo da linha de costa.

3.1.5. Linha de costa e batimetria

A linha de costa representa uma cota imaginária escolhida para representar o limite entre a área submersa e a emersa da zona costeira. Como este nível varia com o tempo, deve-se ter em mente que o valor indicado serve apenas como uma referência. Alguns trabalhos de mapeamento batimétrico, voltados principalmente para a navegação, utilizam o nível de redução como base para atribuir os valores às suas isolinhas. Este parâmetro atribui o nível “zero” à cota relativa à média dos níveis mínimos da maré. Desta forma, exceto durante os períodos de baixamar, o navegador estará a favor da segurança, dado que as profundidades

serão sempre maiores do que as que estão indicadas nas cartas. Porém, de uma maneira geral, o nível “zero”, utilizado para representar a linha de costa, é o nível zero das tábuas de marés. Este referencial coincide com o *datum* das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação.

Os mais abrangentes levantamentos de linha de costa e batimetria disponíveis para a região foram executados pela própria DHN, nas escalas de 1:25.000 e 1:150.000. O primeiro, compreende as Folhas de Bordo da série 710-2, detalhando desde a margem esquerda do Rio Ceará até a localidade de Paracumbuca. O segundo consiste na Folha de Bordo 700-2, que embora com menor precisão, possui uma maior zona de cobertura, detalhando inclusive, a Ponta do Pecém.

De uma forma geral, no trecho compreendido entre o Rio Ceará e a Ponta do Pecém, não se observam grandes alterações direcionais ao longo da linha de praia. A sua forma levemente côncava, sugere a percepção de uma área mais recuada na parte central e zonas mais expostas nas duas extremidades. O alinhamento das curvas batimétricas segue quase que paralelamente à linha de costa até a profundidade de aproximadamente 10 metros. A partir desta cota observa-se a ausência de uma tendência predominante. Outra característica importante da morfologia de fundo, é a declividade. Observa-se a aproximação entre as curvas batimétricas e a linha de costa no setor mais a oeste da área, tanto que nas proximidades da Ponta do Pecém, a profundidade de 15 metros esta a apenas 2 quilômetros da praia. A figura 3.9 fornece uma visão geral da morfologia submarina e da representação da linha de costa.

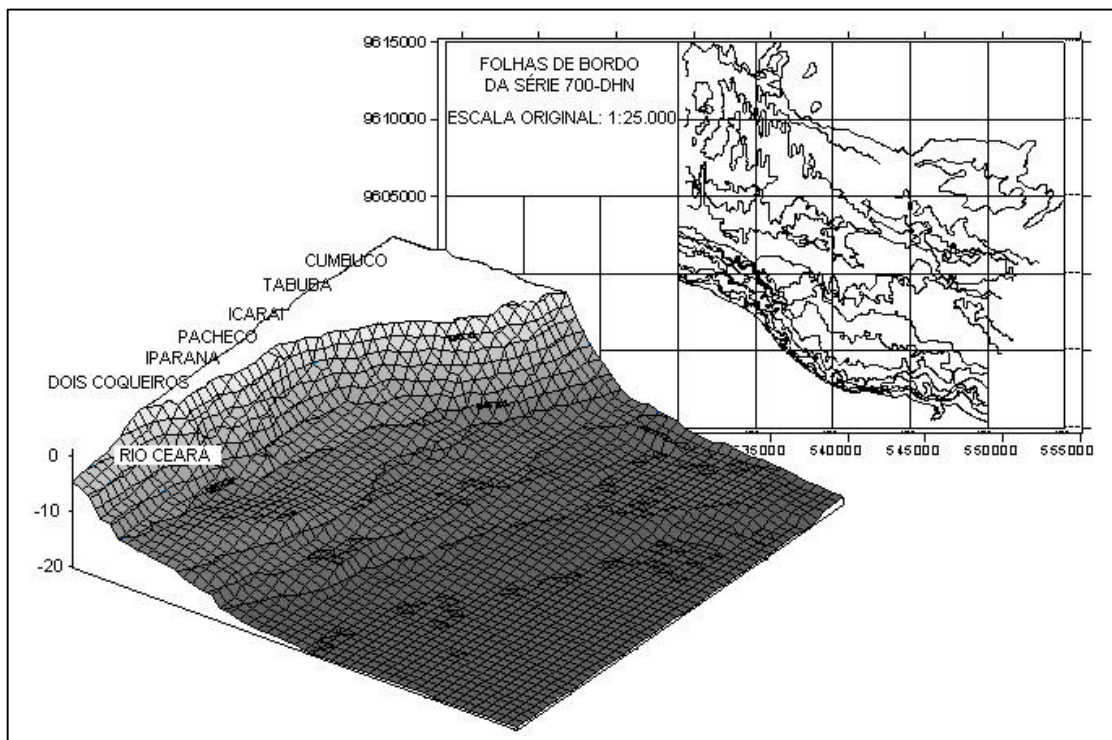


Figura 3.10. Representação em perspectiva da batimetria local obtida a partir das Folhas de Bordo da Série 700 da DHN de 1973.

Accetta (1997), relata ainda a existência de formações rochosas ao longo da batimetria. Provavelmente esta constatação justifica a proximidade e configuração das isóbatas em determinados setores do fundo oceânico.

3.1.6. Ocupação urbana

O afloramento de rochas de praia (*beachrocks*), somado à construção de estruturas verticais de proteção, tem feito com que o comprometimento das praias se dê de forma contínua no sentido de leste para oeste. Com a perda da balneabilidade e do valor paisagístico, estas vêm sendo abandonadas gradualmente, ao passo que o litoral leste de Fortaleza se afirma como alvo para especulação das grandes imobiliárias.

As alterações induzidas nas dunas pelo uso e ocupação do solo passam inicialmente pela degradação da cobertura vegetal, gerando uma instabilidade das dunas antigas e que, diante das condições climáticas atuais, passam a migrar sobre as casas e estruturas urbanas. Uma segunda consequência é a aceleração do processo de recuo das linhas de costa sujeitas a processos erosivos pela quebra do processo de realimentação. O recuo experimentado por estas praias nos últimos 50 anos foi de uma magnitude considerável. Através da comparação de levantamentos aéreos realizados entre 1960 e 1996, pôde-se constatar a escala deste fenômeno, bem como avaliar a quantidade de sedimento que está sendo retida anualmente por não ser capaz de ultrapassar a orla de Fortaleza. Em praias como Iparana, observa-se um recuo da ordem de 250 metros nestes 36 anos, o que indica uma perda média de aproximadamente 7 metros de praia por ano.

A figura 3.11 ilustra a situação atual das praias mais severamente atingidas pela erosão. Inicialmente são mostrados levantamentos comparativos da posição da linha de costa durante a maré alta para os anos de 1960 e 1996 indicando afloramentos de rochas de praia com os círculos vermelhos. A escala gráfica fornece uma idéia da magnitude dos recuos experimentados por estas praias. A fotografia da esquerda, indicada com a letra B, mostra a posição de uma estrutura de revestimento de pedras de aproximadamente 1 Km de extensão, também conhecido como Muro de Iparana, construído com o objetivo de fixar a linha de praia. Na fotografia indicada pela letra C temos pequenos muros de proteção erguidos diante das edificações. A última foto (Figura 3.11D), mostra a dimensão dos terraços de dissipação de energia de onda formadas pela exposição de material rochoso.

Aparentemente, o que estabilizou o recuo na grande maioria dos trechos foi o próprio afloramento das rochas de praia, que por sua vez acabaram agindo como uma proteção natural contra o potencial de transporte longitudinal das ondas.

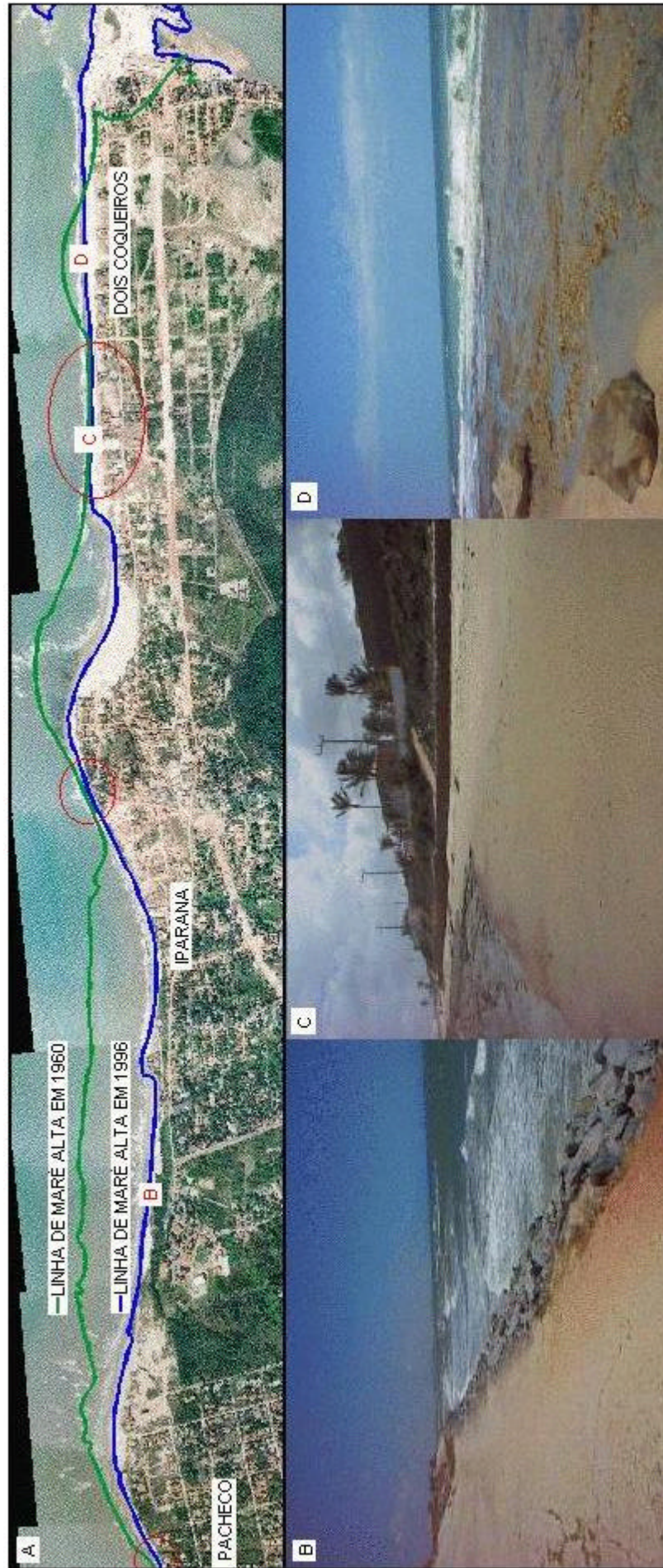


Figura 3.11. Caracterização do estado de degradação da linha de costa no trecho mais atingido pela erosão.

Em determinados pontos, a extensão destas plataformas rochosas chega a superar os 50 metros, o que garante que nem o espraiamento das ondas atinja o pacote sedimentar restante. Este artifício torna-se eficiente durante o regime normal de ondas e marés, onde sua rugosidade e rigidez dissipam toda a energia, mas mostra-se completamente obsoleto durante períodos de tempestade e/ou marés de sizígia, onde as rochas são encobertas pela água enquanto as ondas carregam o sedimento que estava sob sua proteção. Por este motivo, é comum encontrarmos muros de pequeno porte próximos a edificações (Figura 3.11C) que aparentemente não teriam finalidade nenhuma, dado que normalmente as ondas arrebentam sobre as rochas e não chegam nem a lava-los.

Dadas as características de ocupação e o estado de degradação da linha de costa, as praias estudadas podem ser divididas em três setores principais. O primeiro foi ilustrado na figura 3.11 tendo início na margem esquerda do Rio Ceará e se estendendo até o final da praia do Pacheco, onde dificilmente se observa a formação de praias arenosas. Um diagnóstico da frequência e do estado de conservação das estruturas de proteção aí construídas foi realizado por Lima (1999), onde além de registros fotográficos, realizou-se a classificação do seu estado de conservação e eficiência. Assim sendo, pode-se resumir a configuração destes primeiros sete quilômetros e meio de praias como uma alternância sucessiva entre formações rochosas e estruturas verticais construídas nos trechos onde os primeiros não garantem a proteção ao ataque das ondas.

Além deste setor inicial, as praias adjacentes praticamente não apresentam indícios de afloramento rochoso, conservando um pacote sedimentar que alimenta o transporte longitudinal. Coincidente com esta mudança de característica, temos a presença de dunas frontais de maior porte e um grande número de edificações construídas com maiores recuos em relação à linha de costa. A observação do estado de algumas destas edificações, indica uma região de grande concentração energética, dado que apesar de a linha de costa não ter sofrido alterações significativas, estruturas consideravelmente robustas não tem resistido ao ataque das ondas, quando construídas próximo à zona de estirâncio. Ao mesmo tempo pode-se constatar um gradual desmonte das dunas ali localizadas.

Este segundo setor compreende o final da praia do Pacheco e os primeiros quilômetros da praia do Icarai. A partir deste ponto, tem-se o terceiro setor, onde a ocupação vai se reduzindo gradualmente, e um extenso campo de pequenas dunas frontais garante a manutenção do equilíbrio dinâmico do balanço sedimentar. É graças a esta larga faixa de exposição de praia, que dependendo do alinhamento da costa, observa-se a remoção de sedimento para o interior do continente por ação dos ventos. A partir deste ponto, a ocupação urbana só vem a ser importante nas imediações do Pecém.

3.2 Técnicas de previsão da evolução de zonas costeiras

A evolução de zonas costeiras envolve tanto mudanças composicionais quanto morfológicas. Dada a complexidade dos agentes envolvidos na alteração destas áreas, a variação da linha de costa resume, em um parâmetro, a resposta que o ambiente praiial apresenta diante da dinâmica imposta. Logo, a comparação entre levantamentos aéreos, cartas náuticas e topográficas obtidas em diferentes épocas fornece uma base para o conhecimento das tendências evolutivas de uma região. Por outro lado, quando estes dados não estão disponíveis e deseja-se antever o comportamento de uma praia ao longo do tempo, surge a necessidade do uso de técnicas de previsão.

As alterações ocorridas na posição da linha de costa são consequência direta do balanço sedimentar da região. Em locais onde o suprimento de sedimentos é continuamente reforçado, será observado um avanço da posição da linha de costa. Em um cenário contrário, onde o volume de sedimento que deixa a praia vem a ser superior ao que lhe é fornecido, será observado um recuo da linha de costa, caracterizando o processo erosivo. Podemos ainda, ter situações onde o afloramento ou a construção de estruturas rígidas mantém fixa a posição da linha de praia em regiões sujeitas a intensa erosão, causando o rebaixamento do nível localizado logo a sua face voltada para o mar, acarretando a transferência dos processos erosivos para as praias adjacentes.

Muitos modelos empíricos e numéricos foram propostos para se representar a evolução das zonas costeiras a partir de dados relativos a seus parâmetros dinâmicos e composicionais, mas nem sempre todas as informações necessárias para o estudo estão disponíveis, e a adoção de um ou outro acaba sendo limitada. Detalharemos apenas alguns dos métodos empíricos preconizados pelo *Shore Protection Manual*, CERC (1984), que sugere quatro metodologias para previsão das taxas de transporte longitudinal, e consequentemente da variação da linha de costa.

A primeira delas é o ajuste de taxas observadas em áreas semelhantes. Esta metodologia se enquadra muito bem em situações onde se conhece o comportamento de uma área com características condizentes com as da região que se pretende estudar. Muitas vezes acontece de se dispor de informações relativas às taxas de transporte em áreas próximas, e considerando as condições locais, o ajuste das tendências gerais de comportamento fornece uma boa idéia de como a praia deve vir a se comportar ao longo do tempo.

Caso as taxas de transporte de regiões próximas não estejam disponíveis, a segunda melhor forma de se estimar tendências evolutivas é a partir de modificações de topografia que se tenha registrado ao longo do tempo. Alguns dos indicadores das taxas de transporte são o

crescimento de pontais, bancos e taxas deposicionais em deltas e a barlamar de estruturas como espigões. Este trabalho consiste na comparação e medição de volumes que tenham sido retirados ou depositados em diferentes pontos das praias, e fornece bons resultados quando os dados disponíveis possuem uma precisão satisfatória.

Para as situações onde a prática das metodologias anteriores não é possível, e os dados de onda estão disponibilizados, utiliza-se uma metodologia empírica para estimar o transporte longitudinal de sedimentos denominada Método do Fluxo de Energia das Ondas, desenvolvido por Galvin et al, (1980) apud CERC, (1984), esta metodologia será descrita em detalhe no próximo tópico.

A quarta e última opção consistem em outro método empírico, que estima o volume anual bruto de transporte de sedimentos, desenvolvida por Galvin, (1972). O parâmetro de entrada é a altura média anual de arrebentação das ondas locais, e o valor obtido é a deriva bruta, que fornece um limite superior para as taxas de transporte, o que pode servir como uma primeira estimativa para estudos mais genéricos.

3.2.1. Método empírico

O Método do Fluxo de Energia (CERC, 1984), consiste em se estimar o potencial de transporte longitudinal sobre uma costa conhecendo-se a altura das ondas, seu ângulo de incidência e as respectivas frequências ao longo de um ano típico. As principais vantagens desta metodologia são:

- Aplicabilidade a trechos de costa, e não a pontos isolados;
- Pode ser usada para diversos alinhamentos de praia dentro da área em estudo;
- Não requer levantamentos detalhados das características locais, apenas um conjunto de dados estatísticos das ondas e o(s) alinhamento(s) da costa.

O primeiro passo a ser dado para a utilização do método consiste em se determinar uma direção principal para o alinhamento do litoral. Tal procedimento requer a discretização da linha de costa em trechos que possam ser representados por retas sem grandes distorções. O parâmetro a ser utilizado será o azimute da reta traçada. A obtenção destes valores é feita através da digitalização de cartas ou a inserção direta das medidas de campo por meio de GPS ou bússola.

A partir das estatísticas de onda para a região, determina-se a frequência de atuação de cada evento de onda incidente sobre a costa, ao longo do período de observação. As alturas da onda ao largo (H_o) são transformadas em altura de arrebentação (H_b), que juntamente com o seu ângulo de incidência com a costa (α_o) transformado em ângulo de arrebentação (α_b)

forneem a energia que esta sendo transportada por metro de crista de onda na zona de quebra, e conseqüentemente por metro de linha de costa (Figura 3.12). Assumindo-se uma relação linear entre a componente longitudinal do fluxo de energia e o volume de sedimento por ele transportado, pode-se calcular as taxas anuais de deriva litorânea e as tendências evolutivas para os diferentes trechos de praia.

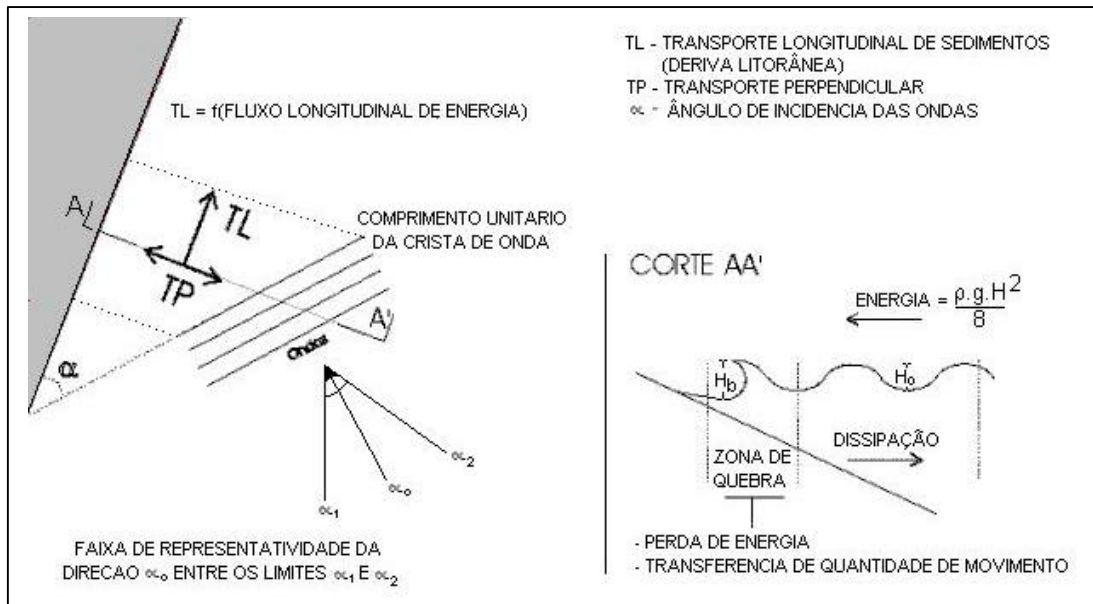


Figura 3.12. Representação da metodologia utilizada pelo Método do Fluxo de Energia.

Assim, cada evento é multiplicado pela sua frequência de ocorrência e por último todos os eventos são somados, resultando no transporte total anual. O transporte ocasionado por cada evento é dado pela fórmula:

$$Q_{\alpha_0, H_0} = \frac{K}{\rho \cdot (\rho_s - \rho)} \cdot 0,05 \rho g^{1/2} f H_0^{5/2} F(\alpha_0) \quad (1)$$

$$F(\alpha_0) = \frac{1}{\Delta\alpha} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^{1/4}(\alpha) \sin(2\alpha) d\alpha \quad (2)$$

Onde:

Q_{α_0, H_0} – Taxa de transporte de sedimentos (em peso imerso);

α_0 – Ângulo central de uma faixa de incidência de ondas, que tem como limites as direções α_1 e α_2 em águas profundas (ver Figura 3.12);

$\Delta\alpha$ – Abertura de cada categoria de direção das ondas ($\alpha_2 - \alpha_1$)

H_0 – Altura da onda no evento considerado também ao largo;

K – Coeficiente adimensional de calibração;

p – Porosidade do sedimento (0,4);

ρ_s – massa específica do sedimento (2650 kg/m^3 para a areia);

ρ – massa específica da água (1030 kg/m^3 para água do mar);

g – Aceleração da gravidade ($9,806 \text{ m/s}^2$);

f – Frequência de ocorrência do evento (onda com altura H_o e direção α_o);

$F(\alpha_o)$ – Termo direcional do evento.

Convencionou-se, um transporte positivo e um negativo, adotando para o primeiro o sentido da esquerda para a direita de um observador posicionado de frente para o mar. É importante ressaltar ainda, que para uma correta aplicação do método descrito, os dados de entrada no modelo devem estar referidos a águas profundas.

O coeficiente adimensional K relaciona diretamente a taxa longitudinal de transporte de sedimentos não coesivos com o fluxo de energia de ondas. A aplicação de uma relação constante para praias diferentes, negligencia as propriedades hidráulicas do sedimento e do meio onde o transporte está ocorrendo. Alguns estudos (Thornton 1972, Dean 1973, Walton e Chiu 1979, Bailard 1981, Dean *et al* 1982 e Dean 1983 apud CETN, 1985) resultaram em expressões analíticas que indicam que K não é constante, mas dependente do tamanho do sedimento e de sua densidade, sendo ambos os parâmetros representados pela velocidade de decantação do grão. Adimensionalizando-se esta variável, através da expressão abaixo, tem-se um coeficiente que considera as propriedades hidráulicas do meio e do sedimento:

$$P_a = g \cdot \frac{H_b}{w^2} \quad (3)$$

Onde

P_a = Parâmetro adimensional dependente do tamanho do sedimento e de sua densidade (representados pela velocidade de queda);

H_b = Altura de arrebentação das ondas;

w = Velocidade de queda do sedimento no meio.

A plotagem dos parâmetro K e P_a em escala logarítmica indica uma relação linear de boa qualidade para os dois parâmetros (Figura 3.13), de acordo com a seguinte equação:

$$K = 6,1637 \cdot \text{Log} \left(\frac{g \cdot H_b}{w^2} \right) - 0,0773 \quad (4)$$

Desta forma, pode-se obter o K específico para cada praia a partir dos dados de velocidade de queda do grão com diâmetro mediano (w) e altura de arrebentação das ondas (H_b). Bruno et al. (1981) apud CERC (1984), sugeriu um K de 0,39, baseado em estudo estatístico de praias americanas. Já Maia (1998), sugere para aplicação do Método do Fluxo de Energia, um valor de K da ordem de 0,17, como mais adequado para as praias cearenses em geral.

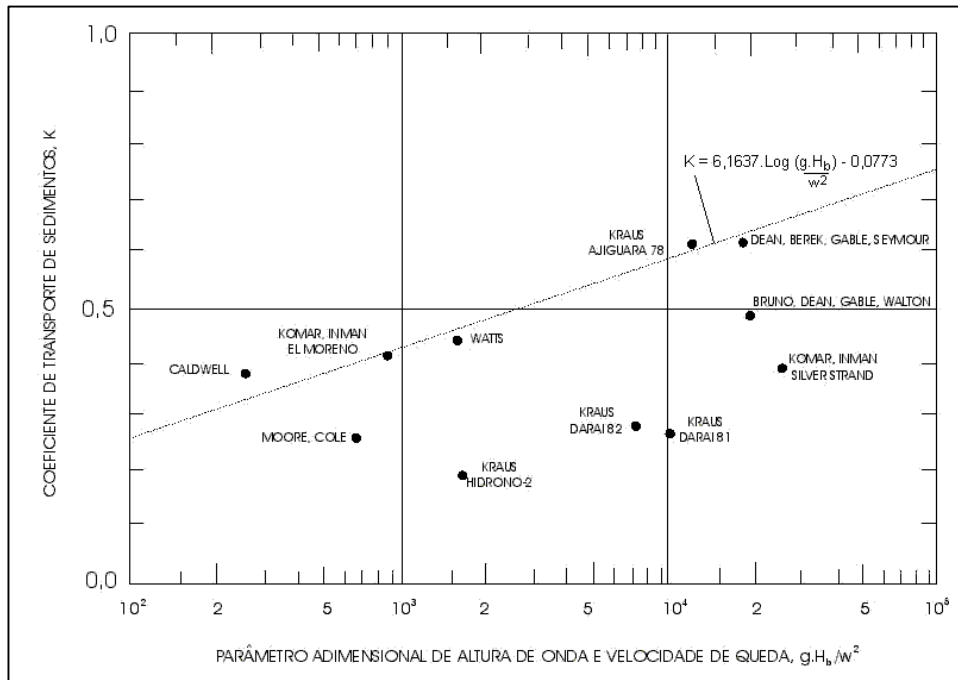


Figura 3.13. Representação do ajuste encontrado para relacionar o fator de transporte de sedimentos, K com as propriedades hidráulicas do meio e do sedimento.

(Fonte: CETN, 1985)

3.2.2. Métodos numéricos

Os fenômenos de erosão e acreção das praias, nem sempre possuem respostas lineares, e apresentam uma grande variabilidade espacial e temporal. Desta forma, a previsão por meio de modelos numéricos constitui uma ferramenta poderosa na hora de projetar e ocupar áreas próximas à costa. Na última década, a modelagem numérica para simulação dos processos relacionados com a evolução à longo prazo da linha de costa, se desenvolveu significativamente, permitindo o refinamento das soluções e interpretações, considerando diferentes configurações de estruturas e morfologias.

O desenvolvimento de um modelo de simulação numérica de evolução de praias, é realizado a partir da definição clara do processo físico dominante, de onde são realizadas as simplificações necessárias para a inserção da formulação matemática que melhor o representa.

Por último, assume-se que a resposta da variável dependente, como resultado da ação dos diferentes processos representados, é conhecida. Assim, o método consiste em simular a formação de uma configuração particular, a partir de uma inicial e da representação dos principais fenômenos ocorridos neste intervalo, os quais geralmente possuem uma componente aleatória, que torna estes modelos, de certa forma, estocásticos.

As equações básicas utilizadas, geralmente, são a da conservação da massa aplicada à um volume de controle e a da taxa de transporte longitudinal de sedimentos. “As muitas expressões existentes para a determinação deste último processo, na maioria das vezes possuem uma grande componente empírica, onde são introduzidos fatores de proporcionalidade, ou parâmetros que devem ser calibrados para a localidade a ser estudada.” (Prestil, 1994). Por outro lado, estes modelos exigem o conhecimento de um amplo número de condições iniciais de contorno, e uma distribuição longitudinal das alturas e direções de arrebentação da onda.

Geralmente, a falta de informação sobre as condições naturais, faz com que alguns aspectos da mesma sejam arbitrados, ou sejam obtidos a partir de ensaios de laboratório ou de estudos realizados em localidades semelhantes. Assim, a qualidade dos resultados pode ser comprometida.

Kraus (1983 e 1989) e Hanson et al. (1989) apud Prestil (1994), classificaram os modelos de previsão de evolução da linha de costa de acordo com suas faixas e critérios de aplicação relacionados com as escalas temporal e espacial. Os quatro tipos básicos são: os modelos analíticos, os de evolução da linha de costa, os de erosão de perfil e os de evolução tri-dimensional.

Os modelos analíticos fornecem soluções simplificadas da equação diferencial para as modificações da linha de costa. As respostas analíticas, fornecem instrumentos para a identificação das tendências principais de comportamento da linha de costa ao longo do tempo. São muitos os trabalhos realizados com o objetivo de estabelecer expressões analíticas da equação de variação da linha para diversas condições, tais como presença de estruturas e alimentação de praias.

Os modelos de evolução da linha de costa são uma generalização dos analíticos. Nos modelos de uma linha, a evolução da praia é representada pela alteração da posição da linha de costa, que é estimada a partir da taxa de transporte longitudinal de sedimentos. “A principal característica do modelo de 1-linha, além de ser o mais adequado para simulação de grandes extensões de praia, é de ser mais apropriado para situações onde as alterações sazonais da linha de praia podem ser desprezadas em comparação com as mudanças de longo prazo. Em resumo, considera-se que os efeitos do transporte transversal, como a erosão

provocada por tempestades e as variações cíclicas da posição da linha de praia devido a variações sazonais do clima de ondas, se anulem a longo prazo.” Salim (1998). Os modelos de linhas múltiplas são uma extensão dos de uma linha, e com eles pode-se avaliar o movimento de dois ou mais contornos batimétricos em direção ao oceano.

Os modelos de erosão de perfil são indicados para a predição das mudanças ocorridas na parte superior do perfil de praia, produzidas por tempestades. Sendo assim, estão associados a processos de curto prazo. Por último, os modelos de evolução tri-dimensionais, predizem as alterações na topografia de fundo, a partir de uma distribuição espacial das taxas de transporte de sedimentos. Estas são obtidas em função das ondas e correntes, resolvendo-se a equação da conservação da massa para as três direções.

Os modelos de evolução de uma linha

Pelnard-Considère (1956), formulou as primeiras teorias de evolução da linha de praia. Tendo como consideração básica o fato de que as variações de perfil a longo prazo seriam pouco significativas, derivou um modelo analítico de uma linha para evolução e acúmulo provocado pela obstrução do transporte de sedimento ocasionado com a implantação de um espigão. Baseado na continuidade do fluxo longitudinal de sedimentos, as alterações da linha de praia foram relacionadas às taxas de transporte litorâneo, que por sua vez foram calculadas proporcionalmente ao ângulo de incidência das ondas. A verificação dos resultados foi posteriormente realizada em um modelo físico reduzido, apresentando considerável similaridade.

Após estes trabalhos iniciais, outros pesquisadores dedicaram-se a aprimorar modelos de uma linha com o objetivo de representar as mais variadas estruturas, tais como espigões extensos, estruturas longitudinais ou obras de regeneração de praias. Nos últimos anos, numerosas aplicações dos modelos de uma linha foram realizadas em casos reais. Baseado nestes estudos, foram realizadas recomendações que melhoraram a interpretação das soluções propostas.

As hipóteses básicas dos modelos de uma linha levam à consideração de que o perfil de praia se desloca paralelamente a si mesmo e sem alterar sua forma, movendo-se em direção ao mar ou à costa, e produzindo erosão ou engorda da praia. A suposição da existência de uma tendência central da modificação da linha, implica no fato de que o transporte longitudinal de sedimentos induzido pelas ondas, e as condições de contorno, são os principais fatores que controlam as mudanças a longo prazo. A importância das condições de contorno se deve ao

fato de estas regularem a quantidade de sedimento que pode entrar ou sair da área modelada, e assim condicionam a posição da linha de costa resultante.

Os elementos mais significativos a serem considerados nos modelos de uma linha são: o perfil da praia, a profundidade de fechamento, a profundidade e altura de arrebentação das ondas, o clima de ondas e sua propagação, a presença de estruturas, o nível do mar e a granulometria.

Dada a consideração de um perfil de praia constante, o modelo necessita da indicação de sua declividade média e limites, sendo um costeiro e outro oceânico. Na maioria dos casos, o limite costeiro vem a ser a altura da berma ativa, enquanto que o outro é a profundidade a partir da qual não ocorre transporte de sedimentos suficiente para alterar o nível do fundo. Embora estes parâmetros variem ao longo da costa, sua consideração no modelo é uniforme, logo deve-se atentar para indicar um valor representativo para toda a área.

A profundidade a partir da qual praticamente não ocorre transporte de sedimentos, é chamada de profundidade de fechamento. Já a profundidade ativa, marca o fim do trecho onde ocorre o maior transporte longitudinal. Este parâmetro indica aproximadamente o fim da zona de surfe, e depende das ondas incidentes e fundamentalmente da altura destas na sua arrebentação. Sendo assim, a profundidade de fechamento é um pouco maior que a ativa.

De todos os fatores que influenciam os processos da zona costeira, a arrebentação das ondas vem a ser o mais dinâmico e responde pelas mudanças de perfil e de transporte de sedimento. O cálculo da onda em águas rasas e particularmente na zona de surfe, com a localização da linha de arrebentação e das alturas de onda sobre a mesma, é absolutamente necessário para se obter um modelo de boa qualidade.

Na grande maioria das aplicações, os dados de onda na linha de arrebentação são obtidos através da propagação de parâmetros medidos ao largo sobre a batimetria real. Por isso, tanto uma boa qualidade de dados relativos ao clima de ondas local quanto metodologias satisfatórias, vão condicionar a representatividade da modelagem.

As estruturas que se estendem além da zona de surfe interceptam as ondas incidentes antes que estas arrebentem, logo produzem uma redução da energia e a formação de uma zona de sombra a sotamar das mesmas. Cada tipo de estrutura possui um padrão de distorção, quase circular, onde a energia é transferida lateralmente ao longo das cristas curvas das ondas, desde as zonas de altura máxima até as menores. Este fenômeno de difração vem a ser responsável pela acumulação de sedimentos dentro da zona de sombra da estrutura. Por este motivo, torna-se fundamental o conhecimento dos padrões de transformação das ondas diante da presença de diferentes configurações estruturais, para representá-los na sua propagação.

Apesar de sua importância para determinados sistemas, a maior parte dos modelos de uma linha não contempla o efeito da maré. Em zonas costeiras onde a maré apresenta amplitudes pequenas a médias, se considera que o uso do nível médio de baixamar fornece uma precisão suficiente para indicar a variação da posição da linha de costa, assim como para os processos de refração e arrebentação das ondas. Em locais onde as marés são consideráveis, os modelos só podem representar as alterações que ocorrem nos processos de refração por meio de simulações com diferentes posições do nível do mar.

Como último parâmetro de entrada, temos a granulometria dos sedimentos a serem transportados. Em alguns modelos, este parâmetro indicará a conformação do perfil praial, que é estimado a partir do diâmetro médio do material que o compõe, utilizando-se parâmetros empíricos. Por este motivo, a área modelada deve ser amostrada em diferentes pontos de forma que o diâmetro utilizado seja representativo para todos os trechos.

3.2.3. O modelo SMS

O modelo SMS (*Shoreline Modeling System*) é constituído por dois modelos numéricos principais, o GENESIS (*Generalized Model for Simulating Shoreline Change*) e o RCPWAVE (*Regional Coastal Processes WAVE model*). O primeiro módulo consiste no modelo de uma linha propriamente dito, enquanto que o segundo realiza a propagação dos dados de onda ao longo da batimetria real do terreno até as proximidades da linha de arrebentação, possibilitando maior precisão de dados para as simulações.

Os modelos numéricos de uma linha apresentados por Kraus e Harikai (1983), Kraus et al. (1984) e Hanson et al. (1986) foram os precursores do modelo genérico GENESIS, que foi desenvolvido por Hanson (1987), para aplicações em costa aberta, e posteriormente otimizado por Hanson e Kraus (1989). O que motivou os primeiros trabalhos de desenvolvimento foi a necessidade de se representar as respostas da linha de costa situada nas proximidades de estruturas costeiras, e desenvolver um modelo numérico para simular essas mudanças. Assim sendo, o trabalho de Kraus e Harikai (1983) introduziu a maioria dos algoritmos básicos de cálculo usados pelo GENESIS.

A idéia principal de se ter um perfil de praia fixo, que apenas pode ser transladado para frente ou para trás, cria a idéia de uma volume de controle em forma de cunha, que corresponde ao sedimento bruto que entra ou que sai do sistema, tendo como limites superior e inferior a crista da berma ativa e a profundidade de fechamento (Figura 3.14).

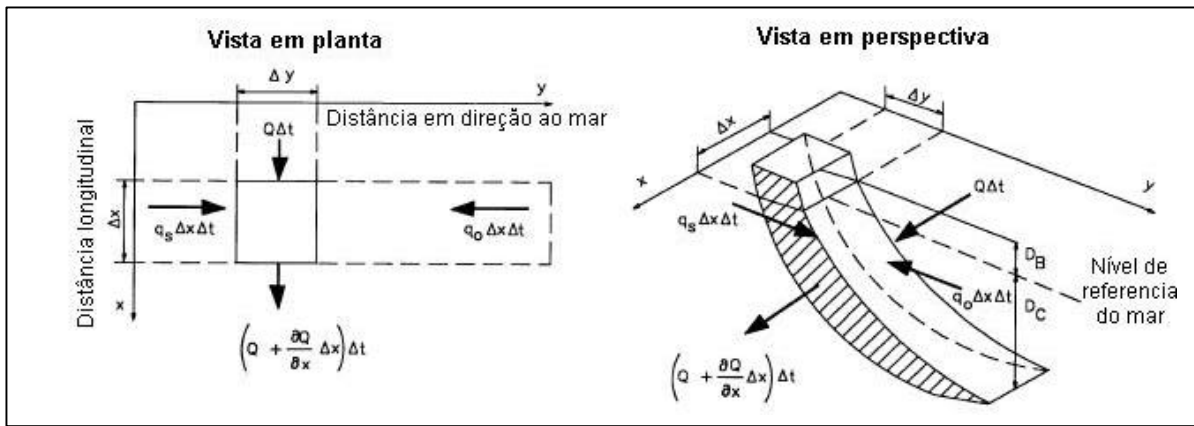


Figura 3.14. Esquema genérico da formulação matemática do modelo GENESIS.

(Fonte: Hanson e Kraus, 1989)

As taxas de transporte litorâneo, em volume de areia por unidade de tempo, nas duas laterais da célula são representadas por Q e $Q + (\partial Q/\partial x).\Delta x$, indicando a alteração da taxa de transporte. Os valores q_s e q_o representam respectivamente a entrada e saída transversal de sedimentos, em volume de areia por comprimento de praia, possibilitando a representação de engordamento de praias, extração de material ou a influência de transporte eólico. Desta forma, tem-se a mudança sofrida pelo trecho Δx representada pelo volume ΔV :

$$\Delta V = \Delta x.\Delta y.(D_B + D_C) \quad (5)$$

Onde:

x – Coordenada do ponto ao longo da praia;

y – Distância em direção ao mar da linha de costa até a linha de referência;

D_B – Altura da crista do berma ativo;

D_C – Profundidade de fechamento.

Pela lei da conservação da massa, assumindo-se a taxa de transporte transversal $q = q_s + q_o$, obtêm-se a equação governante do GENESIS através do desenvolvimento seguinte:

$$\left\{ Q + \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \cdot \Delta x \right\} \cdot \Delta t - Q \cdot \Delta t + q \cdot \Delta x \cdot \Delta t = \Delta V \quad (6)$$

$$\left\{ Q + \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \Delta x \right\} \cdot \Delta t - Q \cdot \Delta t + q \cdot \Delta x \cdot \Delta t = \Delta x \cdot \Delta y \cdot (D_B + D_C) \quad (7)$$

Onde:

t – tempo,

Q – Taxa de transporte longitudinal.

Rearranjando os termos e levando ao limite onde $\Delta t \rightarrow 0$ teremos:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \left\{ \frac{1}{Dc + Db} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) \right\} = 0 \quad (8)$$

Onde a taxa de transporte longitudinal é dada pela equação:

$$Q = (H_b^2 C_g) \cdot \left(\Psi_1 \cdot \text{sen} \theta_{bs} - \Psi_2 \cdot \text{cos} \theta_{bs} \cdot \frac{\partial H_b}{\partial x} \right) \quad (9)$$

H_b – Altura da onda significativa na arrebentação;

C_g – Celeridade do grupo de ondas, extraída da teoria linear das ondas;

θ_{bs} – Ângulo de ataque das ondas na arrebentação, em relação à linha de praia e dado por $\theta_{bs} = \theta_b - \theta_s$ sendo $\theta_s = \tan^{-1}(\partial y / \partial x)$, o ângulo da linha de praia em relação ao eixo x do sistema de coordenadas utilizado pelo modelo e θ_b é o ângulo de ataque das ondas em relação ao eixo x .

Sendo os parâmetros adimensionais Ψ_1 e Ψ_2 são obtidos através das equações:

$$\Psi_1 = \frac{K_1}{16 \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot (1-p) \cdot (1,416)^{5/2}} \quad (10)$$

$$\Psi_2 = \frac{K_2}{8 \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot (1-p) \cdot (\tan \beta) (1,416)^{7/2}} \quad (11)$$

K_1 e K_2 – Coeficientes empíricos, denominados parâmetros de calibração;

ρ_s – massa específica do sedimento (2650 kg/m³ para a areia);

ρ – massa específica da água (1030 kg/m³ para água do mar);

p – porosidade da areia no fundo (considerada 0,4);

$\tan \beta$ - declividade média do fundo, considerando a partir da linha de praia até a profundidade limite do transporte litorâneo.

Os fatores que têm como argumento o número 1,416 são utilizados para fazer a conversão da altura significativa da onda em altura de onda obtida pela raiz média quadrática - RMS.

O primeiro termo da equação da taxa de transporte de sedimento (Equação 9) corresponde à fórmula do CERC, que recomenda um valor de K_1 igual a 0,77. Essa equação é baseada no fluxo longitudinal de energia, o qual considera o transporte litorâneo produzido pelo ataque oblíquo das ondas à linha de praia. Segundo Gourlay (1982), dependendo das hipóteses formuladas, o termo K_2 pode assumir diferentes valores. As experiências realizadas por Kraus et al. (1984) na área de modelagem de linha de praia, os resultados dos testes com traçadores realizados por Kraus et al. (1982) e outros experimentos realizados por Gourlay (1982), indicaram que o valor de K_1 pode variar de 0,1 a 0,6. As experiências também indicam que a relação K_2/K_1 se situa na faixa de 0,5 a 1,5. De qualquer forma, Kraus et al. (1984), sugerem que devido às incertezas dos valores de K_1 e K_2 e às aproximações e simplificações adotadas na modelagem é mais apropriado considerar esses parâmetros como específicos para cada região, e sua determinação deve ser feita na calibração.

O segundo termo, introduzido por Ozasa e Brampton (1980), considera a variação longitudinal da altura de onda devido a difração produzida pelas estruturas costeiras ou às irregularidades do fundo. A diferença de sinal entre os dois termos da equação implica que deve existir um ponto de transporte litorâneo nulo a partir do qual ocorrerá o transporte de sedimentos em direção oposta ao ataque de ondas.

A extensão dos trechos de praia utilizados para a aplicação do GENESIS situa-se aproximadamente entre 1 e algumas dezenas de quilômetros, com resolução espacial variando de 15 a 90 m e períodos de simulação variando de 1 mês a pouco mais de 20 anos.

Já as rotinas do RCPWAVE, desenvolvidas por Ebersole et al. (1986) apud Salim (1998), além de realizarem a transformação das ondas entre o ponto de medição e as proximidades da linha de arrebentação, fornecem as saídas no formato de processamento do GENESIS. Este módulo possui ainda, aplicativos gráficos que representam os cálculos desenvolvidos e possibilitam a detecção de erros grosseiros.

A figura 3.15, ilustra as convenções para a geração do gride do GENESIS a partir da malha escolhida para a representação da batimetria do RCPWAVE. O retângulo indicado como linha de referência para os dados de onda próximos a arrebentação é arbitrado pelo usuário, de forma a representar uma série de pontos onde, a profundidade representa o ponto de arrebentação das maiores ondas. As informações de direção e transformação de altura assim geradas para estes pontos, servirão de entrada para o GENESIS que deste limite inferior até a arrebentação calculará internamente as alterações da onda sobre o perfil de equilíbrio.

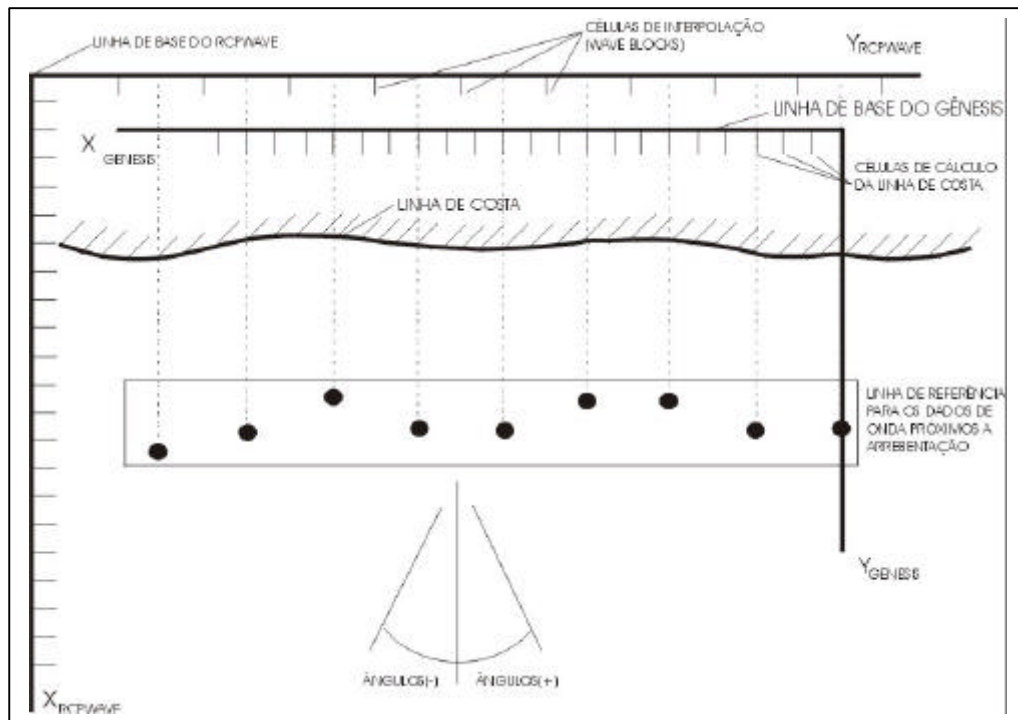


Figura 3.15. Representação da convenção estabelecida entre a representação dos dados no módulo RCPWAVE de forma a compatibilizar sua saída com o GENESIS.

A determinação da linha de referencia é realizada em duas etapas. Inicialmente calcula-se a profundidade em que as maiores ondas tendem a arrebentar e em seguida, baseado na batimetria liga-se estes pontos em planta, obtendo-se uma série de retas que constituirão a linha. A obtenção desta profundidade é feita a partir das maiores alturas de onda registradas. Assim, de posse da altura de arrebentação utiliza-se a relação entre esta e a profundidade de ocorrência.

$$D_{lt} = \frac{1,27}{\gamma} \cdot H_b \quad (12)$$

Onde:

D_{lt} – Profundidade ativa, onde arrebentam as maiores ondas;

1,27 – Fator de conversão entre as 10% maiores ondas e a altura significativa;

γ - Índice de arrebentação. Coeficiente que relaciona a altura da onda e a profundidade de quebra (0,78);

H_b – Altura significativa na arrebentação.

A obtenção do perfil médio da praia ao longo da zona de simulação do GENESIS é obtido a partir do perfil de equilíbrio deduzido por Bruun (1954) apud Hanson et al. (1989) e aprimorado por Dean (1977). Estes autores demonstraram que o perfil médio de uma grande variedade de praias pode ser representado por uma função matemática simples, do tipo:

$$D = A \cdot y^{2/3} \quad (13)$$

Onde:

D - Profundidade da água;

A – Um parâmetro empírico de escala, que depende do diâmetro do sedimento;

y – Distância do ponto em direção ao oceano.

Os melhores ajustes de A para diferentes diâmetros médios de sedimento de praia (d_{50}) citados por Hanson et al. (1989), estão indicados na tabela 3.1.

Tabela 3.1. Relações entre o parâmetro de escala e o diâmetro do sedimento	
A ($m^{1/3}$)	d_{50} (mm)
$0,41 \cdot d_{50}^{0,84}$	$<0,4$
$0,23 \cdot d_{50}^{0,32}$	$0,4 < d_{50} < 10,0$
$0,23 \cdot d_{50}^{0,28}$	$10,0 < d_{50} < 40,0$
$0,46 \cdot d_{50}^{0,11}$	$> 40,0$

Assim, de posse da linha de costa inicial, dos dados da praia (granulometria, altura do berma, profundidade de fechamento), dos parâmetros das ondas na linha de arrebentação e das estruturas existentes, é criado o cenário assumido para a execução do modelo. A figura 3.16 ilustra em uma seção transversal o resumo do esquema básico de funcionamento do SMS, onde a partir dos dados de transporte longitudinal e das entradas ou saídas transversais, é estimado o volume resultante para cada célula após um determinado intervalo de tempo, e consequentemente o recuo ou o avanço que o perfil de praia tende a sofrer.

O esquema de solução do GENESIS utiliza diferenças finitas para a resolução da equação diferencial parcial, empregando simultaneamente as formas implícita e explícita. Desta forma, as rotinas unem a rapidez de uma com a estabilidade numérica da outra.

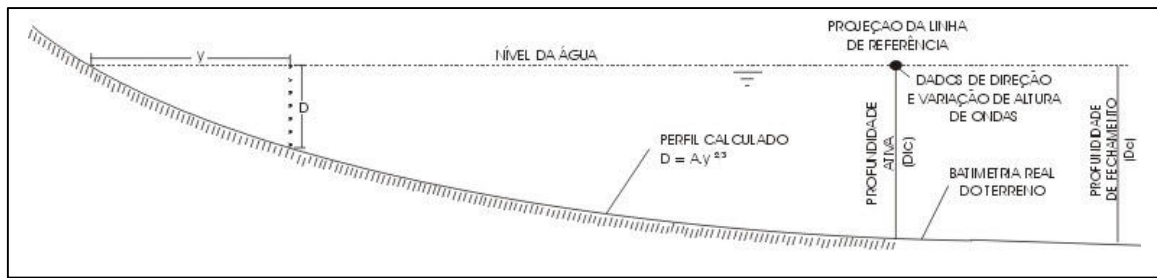


Figura 3.16. Representação das simplificações adotadas pelo modelo GENESIS na consideração do transporte na zona de surfe.

É importante ter em mente que para cada localidade, o GENESIS deve ser calibrado, logo levantamentos da posição da linha de costa em diferentes períodos também são necessários, assim como as datas das implantações de estruturas ou modificações na praia. Graças aos ajustes realizados para a inclusão de diferentes tipos de estruturas com as mais diversas configurações, este pacote possui uma larga faixa de aplicação, se adequando satisfatoriamente a diversos casos reais.

Salim (1998), aplicou o modelo para a orla de Fortaleza no trecho compreendido entre a Ponta do Mucuripe e o Rio Ceará. Diante da significativa presença de estruturas como espigões e quebra-mares, o seu trabalho procurou testar a representatividade das simplificações consideradas, numa região onde ainda havia o agravante de a maré possuir amplitudes da ordem de 3 metros. Logo, se considerarmos que para uma declividade média da praia de 1:25, a variação de 3 metros no nível da água percorre uma distância de quase 75 metros em aproximadamente 12 horas, logo, pode-se considerar este comprimento como limite superior para a precisão do modelo. Os resultados daquele autor obtiveram erros máximos de 60 metros, entre a linha de costa calculada e a observada, e forneceram indícios de que a desconsideração da maré – inerente a este tipo de modelo – não causou perdas representativas da qualidade das simulações.

Dada a densidade e diversidade de estruturas costeiras observadas nos primeiros quilômetros das praias estudadas, torna-se relevante um breve comentário sobre suas características e formas de representação nos modelos de evolução de linhas de costa.

3.3. Estruturas de proteção costeira

Segundo o *Shore Protection Manual*, CERC (1984), os problemas relacionados com a engenharia costeira podem ser classificados em quatro categorias gerais: estabilização da linha de praia, proteção de terrenos contra o ataque das ondas ou tempestades, estabilização de embocaduras e projetos portuários. Na maioria dos casos, a solução adotada para estes problemas opta por intervenções estruturais, embora outras técnicas possam ser empregadas, como por exemplo a criação de planos de ocupação que norteiem o uso e a urbanização das áreas situadas próximas ao mar.

Geralmente, os problemas de erosão só são detectados quando o desenvolvimento urbano local já se encontra bastante avançado, logo a implementação de estruturas costeiras apresenta-se como uma das poucas alternativas disponíveis. Daí vem a importância de se conhecer o seu comportamento e as implicações que a implantação trará para o balanço sedimentar local e para as praias adjacentes.

Das soluções procuradas para a estabilização da linha de costa, alguns exemplos podem ser citados, como a implantação de estruturas que dissipem a energia da onda, como um quebra-mar submerso; que quebrem o fluxo de sedimentos, como espigões que cruzem a zona de surfe; ou estruturas de proteção do sedimento praial, assim como revestimentos de pedra. As estruturas costeiras que cortam a zona de surfe bloqueiam uma parte ou a totalidade do transporte longitudinal de sedimentos, acumulando-o em sua face voltada à barlar e reduzindo o suprimento à sotamar. Este bloqueio pode ser direto, como o ocasionado por um espigão, ou indireto, como o causado pela calmaria na zona de sombra de um quebra-mar destacado. Um outro fator resultante da implementação de quebra-mares, ou estruturas onde a face externa situa-se dentro da zona de surfe é a difração das ondas, pois os diferentes padrões de difração acarretam alterações na altura e direção das ondas, influenciando na deriva litorânea.

Existem ainda estruturas, geralmente de menor porte, construídas na própria praia que visam estabilizar as alterações da linha de costa, protegendo a área localizada na sua face posterior. Estas, podem ser rígidas, como muros verticais de concreto, ou flexíveis, tais como os revestimentos de pedra colocados sobre aterros ou estruturas de gabiões. A arrebatção das ondas diante destas, cria uma zona de grande concentração energética, que tende a mobilizar o sedimento de fundo, aumentando a profundidade da água.

Tais fenômenos indicam a importância de se conhecer a localização e as características das estruturas costeiras existentes na área que se pretende modelar, para a correta representação da sua presença e inserção das condições de contorno impostas. O mapeamento das praias do litoral oeste de Fortaleza realizado por Lima (1999), indicou a predominância de construções nas próprias praias, não havendo registros de espigões ou quebra-mares destacados. Todas as estruturas observadas tinham a única finalidade de proteger as residências situadas na sua face posterior, possuindo os mais variados portes e concepções de projeto. A figura 3.17 indica a localização e o tipo correspondente às construções existentes na área.

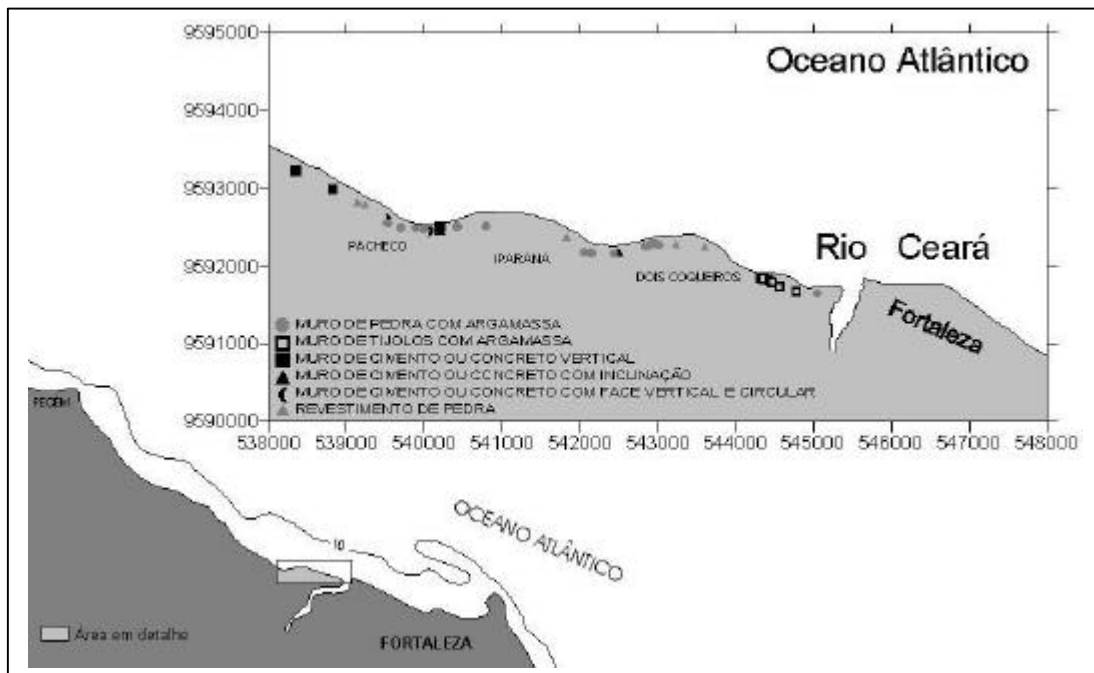


Figura 3.17. Mapeamento das obras de proteção costeira executadas ao longo do trecho inferior da área em estudo.

(Fonte: Lima, 1999)

Este trecho torna-se bem particular a partir do momento que a exposição de longas plataformas rochosas dissipa parte considerável da energia das ondas, e faz com que estas só venham a atingir as residências durante as tempestades, como comentado no item 3.1.6. Sendo assim, a solução adotada para a proteção de muitas destas praias consiste na construção de pequenos muros de alvenaria que tem a função de represar a água resultante do espraiamento das ondas. Na figura 3.17, estas construções estão representadas pelos dois primeiros itens da legenda: muro de pedra com argamassa e muro de tijolos com argamassa.

Nos pontos onde a proteção natural das rochas de praia não está presente, aparecem alguns muros verticais de grande porte (principalmente na praia do Pacheco) e revestimentos de pedra, como por exemplo o de Iparana, com aproximadamente 1Km de extensão e 3 metros de altura. De forma geral, observa-se que a maior parte dos projetos não contempla os

aspectos básicos de prevenção de erosão do pé da estrutura e de drenagem do aterro protegido, constatando-se uma freqüente necessidade de manutenção.

Ao todo, Lima (1999), cadastrou 37 estruturas, onde 27 ou 73 % corresponderam a muros de pedra, sendo que destas aproximadamente 45% eram pequenos muros com até 1.5 metros de altura e com fundações rasas. Na outra fração dos muros de pedra (55% restante) pudemos encontrar estruturas mais elaboradas tais como *seawalls* com face mista, ou seja, vertical e curva, que por suas características físicas minimizam a passagem de água sobre a estrutura, reduzindo a necessidade da instalação de drenos. Já os revestimentos compreenderam 14 % do total das estruturas. Estas obras consistem de estruturas de pedras soltas postas sobre um aterro e mantidas estáveis pela ação de seu próprio peso. Todos revestimentos de pedra cadastrados apresentaram-se em bom estado, enquanto que uma boa parcela das estruturas verticais foi encontrada deteriorada, ou em estado de ruína.

O restante da área não apresentou estruturas, apenas alguns afloramentos rochosos isolados e de pequeno porte, que não justificaram a inserção no modelo. Dadas as características observadas, a resposta do sistema praial diante das intervenções estruturais, e a as construções mais freqüentes ao longo das praias, concluiu-se que o elemento que melhor representaria as estruturas no escopo do GENESIS, seria o *seawall*. A seguir serão tratadas algumas questões gerais do projeto destas estruturas e considerações inerentes ao modelo matemático para sua representação.

3.3.1 - *Seawall, conceitos básicos de projeto*

Os *seawalls* ou muros verticais são estruturas usadas para proteger áreas de antepraia contra a ação das ondas. Eles podem até dissipar uma certa quantidade de movimento, mas são projetados principalmente para resistir e refletir a energia das ondas. Diferentemente dos revestimentos de pedra, estas estruturas são auto-sustentáveis. Suas características de projeto variam com o clima de ondas a que serão submetidos. Em lugares expostos, principalmente a pequenas ondas, estacas-pranchas emparelhadas podem ser usadas como *seawalls*; porém, onde ocorre a exposição à ondas moderadas a muito severas, deve-se prever uma proteção de pé que evite o carreamento do material e conseqüente tombamento da estrutura. Em climas de onda moderados a severos faz-se necessária uma maior proteção para as estruturas, e muitas vezes utilizam-se paredes de concreto maciço ou pedras, pois elas podem ser projetadas para dissipar a força das ondas e absorver grandes impactos sem danos.

Antes de se optar pela implantação deste tipo de proteção, deve-se ter em mente que os *seawalls* protegem somente a zona localizada imediatamente atrás deles, e não oferecem

nenhuma segurança às praias localizadas à frente da estrutura. Ao se executar uma destas estruturas em uma linha de praia sujeita a processo de erosão, será observada a transferência desta para as zonas adjacentes, podendo até mesmo ser acelerada, caso estas áreas estejam sendo providas com areia oriunda da erosão da faixa de praia, agora protegida. A reflexão da energia da onda causa um grande atrito imediatamente na frente da parede e passagem de água por sobre a estrutura, podendo ainda carrear material localizado de traz da mesma. Estruturas de pilares finos com a face vertical impermeável ou paredes de concreto volumosas, criam uma maior reflexão e produzem dano para a praia localizada à sua frente. Como as estruturas de pedra são mais permeáveis e significativamente menos reflectivas, muitas vezes são usadas como “absorvedores” de ondas na frente de anteparos verticais.

Um último ponto a ser considerado, é que um *seawall* só deve ser implantado para uma contorno de costa onde a perda da praia frontal é uma consequência aceitável, ou onde este será localizado tão alto na praia, que só será exposto a ondas durante tempestade extremas e raras. A figura 3.18 ilustra os principais componentes de projeto para as diferentes conformações que este tipo de estrutura pode ter.

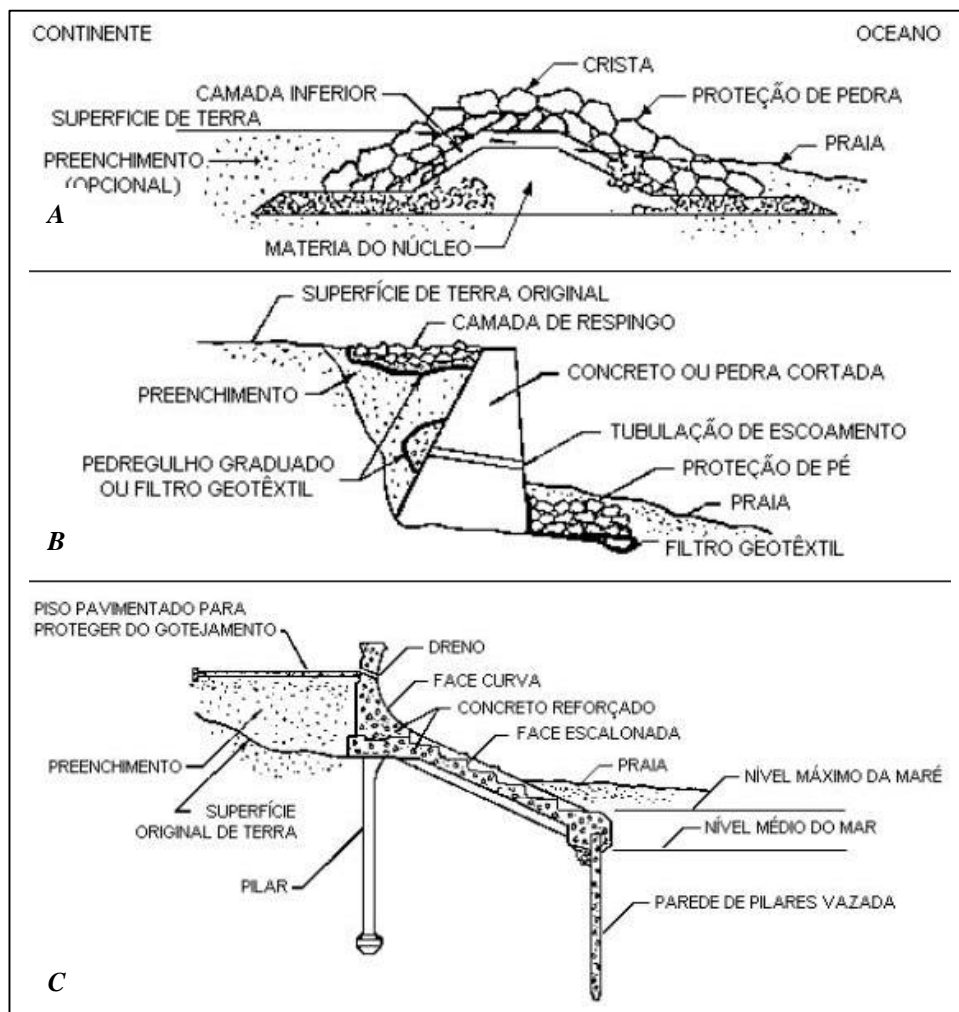


Figura 3.18. Representação dos componentes básicos de projeto de um *seawall* de pedras (A), vertical (B) e de face curva (C).

3.3.2 - Representação de um Seawall no GENESIS

Hanson e Kraus (1985, 1986b), desenvolveram uma rotina para calcular a posição da linha de costa protegida por um *seawall*. Esta rotina é compatível com a teoria de resposta da linha de costa, e tem as seguintes propriedades:

- A linha de praia em frente a estrutura não pode retroceder em direção ao continente;
- O volume de sedimento se conserva;
- A direção do transporte longitudinal no muro é a mesma da taxa potencial de transporte local.

Inicialmente, o GENESIS calcula as taxas de transporte de sedimento ao longo da praia baseado na idéia de que o volume de areia está disponível para o transporte. Nas células do gride onde o recuo da costa deveria superar a posição do *seawall*, a taxa de transporte é ajustada. Estes valores também são ajustados para as células vizinhas, de forma a preservar o volume de sedimento na direção do transporte.

As seções de *seawalls* podem ser definidas em qualquer ponto do gride. Se existem muitos seguimentos ao longo da praia, eles serão representados por um único *seawall*, intercalado por seções abertas. A figura 3.19 demonstra o esquema de locação destas estruturas e as diferentes configurações que elas podem assumir seguindo, inclusive, o contorno da praia. Esta conformação possibilita a representação de estruturas de *seawalls* construídos com pedras (Figura 3.18a), para representar, inclusive, revestimentos.

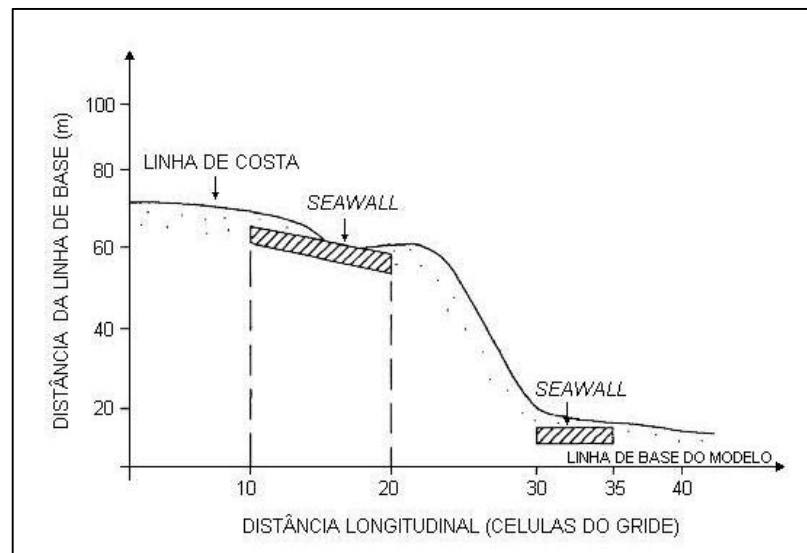


Figura 3.19. Esquema representativo da inserção de *seawalls* no gride do GENESIS.

Em muitos projetos de modelagem, as estruturas são construídas, modificadas, removidas ou destruídas ao longo da evolução da linha de costa no período de simulação.

Logo, para estes casos a simulação deve ser realizada em etapas, que tem início e fim no momento em que tais modificações ocorrem. O modelo GENESIS possibilita a inserção direta da conformação final da linha de costa resultante de uma simulação como dado de entrada para o início de outra. Desta forma, as simulações em etapas podem ser realizadas de forma rápida e simples.

3.3.3 – Outras estruturas

As outras estruturas que podem ser representadas no modelo são os quebra-mares, espigões e molhes, com as mais variadas conformações. Os quebra-mares, consistem em estruturas destacadas que tem a função de dissipar a energia das ondas que devem incidir nas praias situadas na sua zona de sombra. Os espigões e molhes consistem em estruturas perpendiculares à linha de costa, que como já foi mencionado, quebram o fluxo longitudinal de sedimento funcionando como um regularizador, com um certo coeficiente de permeabilidade. O que diferencia basicamente estas duas estruturas é o fato de os molhes (*Jetties*) serem voltados à fixação de embocaduras de rios, enquanto que os espigões (*groins*) são projetados com objetivo de contenção de processos erosivos.

Deve ser observado que as estruturas são representadas como objetos infinitesimalmente finos, desta forma, um espigão ou um molhe, será locado sobre a linha de uma única célula, perpendicular a linha de referencia, não podendo ocupar mais de uma célula. A locação das estruturas segue quatro princípios básicos:

- A posição da estrutura é definida pela locação de seus extremos, e estas posições são feitas sobre as linhas das células;
- mesmo que não seja especificada a existência de espigões em quaisquer dos limites laterais da área simulada, automaticamente será aplicada uma condição de contorno de praia fechada;
- devem existir, pelo menos, duas células entre espigões. Um caso particular deste requisito implica no fato de estas estruturas não poderem ser locadas nas célula adjacentes às bordas do modelo;
- as coordenadas das extremidades das estruturas difratantes, podem coincidir, estando na mesma célula longitudinal, mas elas não podem ser sobrepostas.

Dada a metodologia de cálculo de difração, tem-se que espigões não-difratantes podem ser colocados atrás de um quebra-mar que cause difração, mas espigões difratantes não. Os cálculos considerando tais estruturas, são realizados pelo GENESIS, logo é fundamental que a

linha de referência para o cálculo dos parâmetros de onda no RCPWAVE (indicada na figura 3.15 do item 3.2.3) se localize a profundidades maiores que a de locação das construções.

Em geral, para estruturas como espigões ou quebra-mares, é recomendado que se tenha, pelo menos, nove pontos do gride sobre a mesma. Para representação de elementos mais simples, em costas extensas, pode-se representa-los com pelo menos quatro pontos sem comprometimento dos resultados. A escolha do gride baseada na presença de estruturas deve considerar os seguintes aspectos: resolução desejada, precisão das medições da posição da linha de costa e outros dados, representatividade desejada das previsões e o tempo computacional envolvido.

Detalhes sobre as condições de locação das estruturas e da metodologia implícita no cálculo da refração e da difração sofridas pelas ondas ao cruzarem com estas são fornecidos em Hanson et al. (1989).

4. METODOLOGIA

Antes de se iniciar o processo de calibração do modelo numérico, duas etapas preliminares são necessárias: a formulação do modelo conceitual e a preparação dos dados para o formato de leitura do programa. A primeira etapa consiste em formular uma idéia geral de todos os parâmetros e agentes envolvidos na dinâmica local que serão representados. Desta forma, cria-se uma visão mais abrangente do comportamento conjunto dos elementos e de sua influência no resultado final. A segunda etapa consiste na formatação de todos os parâmetros selecionados para a entrada do modelo de forma que possam ser compreendidos pelas rotinas de leitura de dados. Esta fase requer um tempo considerável, principalmente para que se possa realizar as transformações entre as diferentes formas de armazenamento de informações sem que haja comprometimento da sua qualidade.

Para a elaboração do modelo conceitual, são considerados todos os elementos que venham a influenciar de forma significativa o balanço sedimentar, e conseqüentemente, as alterações da linha de costa. A figura 4.1 representa o esquema formulado, onde de todos os processos atuantes, o transporte longitudinal causado pelas ondas vem a ser o mais importante, seguido pelo transporte eólico que supre as praias erodidas com material arenoso em alguns pontos e retira em outros. A deriva litorânea ocorre na região delimitada como zona de transporte efetivo, que têm início na linha de referência onde as maiores ondas vêm a arrebentar e acaba na linha de costa. Ao longo do primeiro limite, os dados de altura e direção das ondas, resultantes de seu contato com o fundo oceânico, servem de base para estimar o potencial de transporte.

Com o intuito de representar a borda direita do sistema como uma fronteira fechada, foi introduzida uma linha virtual na figura 4.1, que barra a entrada de sedimentos. Isto se deve ao fato de os trabalhos anteriormente realizados na região indicarem a pequena contribuição sedimentar do Rio Ceará e a impermeabilização da orla marítima de Fortaleza, que não permite a continuidade da deriva litorânea. Assim sendo, como o transporte longitudinal ocorre da direita para a esquerda, o modelo considerará que o material disponível para o abastecimento das praias adjacentes se limita ao que está presente no instante inicial da simulação, não havendo contribuições externas. A última consideração assumida, foi a de que nos pontos onde houvessem estruturas de fixação da linha de costa, ou afloramentos rochosos, seria considerado que a linha de praia se manteria fixa ao longo do tempo, o que acarreta, ainda, na redução do fornecimento de material para as áreas seguintes.

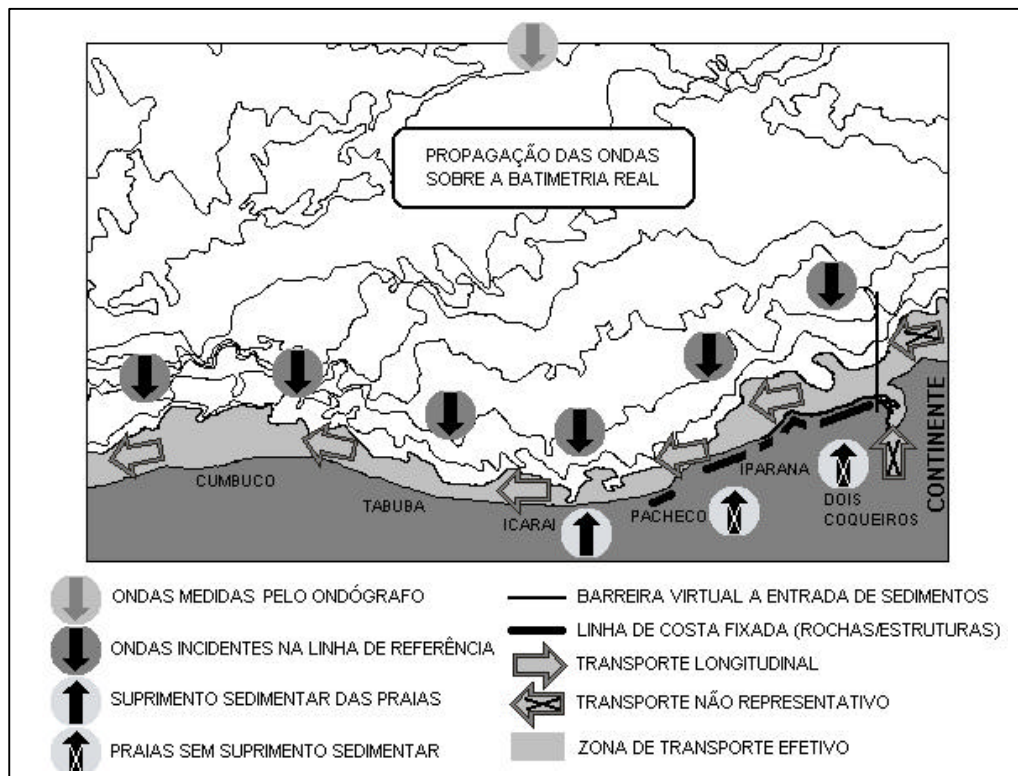


Figura 4.1. Modelo conceitual representativo da dinâmica local.

Na segunda etapa, a preparação dos dados requer inicialmente a sua coleta e organização, para finalmente se determinar a malha a ser utilizada no modelo de forma que todas as informações passem a ter um mesmo referencial. Os dados utilizados foram: registros de ondas, batimetria local, posição inicial, intermediária e final da linha de costa, posição das estruturas de contenção e granulometria representativa dos sedimentos das praias. Os dados de onda foram disponibilizados pelo Prof. Dr. Luiz Parente Maia, através do convênio existente com Universidade Federal do Ceará para monitoramento do Porto do Pecém. A posição final da linha de costa veio a ser obtida por meio de dois levantamentos de campo utilizando GPS, onde se pôde confirmar, ainda, a locação das estruturas. Os dados de batimetria local e linha de costa inicial foram extraídos das folhas de bordo da série 700 da DHN. A posição intermediária da linha de costa foi obtida através da digitalização das fotografias aéreas disponíveis para a região, e os dados de granulometria foram obtidos de levantamentos realizados em trabalhos anteriores.

Apesar de sua amplitude significativa, a maré não foi considerada na modelagem. O motivo principal da exclusão deste parâmetro foi o fato do modelo GENESIS não contemplar variações do nível da água ao longo do período das simulações. Salim (1998) utilizou este mesmo modelo para outro trecho da costa cearense e, com o objetivo de representar os efeitos da maré semi-diurna, considerou que só ocorreria transporte longitudinal na praia durante metade do ciclo da maré. A comparação entre os resultados destas simulações e os obtidos

com simulações de ciclo completo, indicaram pouca diferença na conformação final da praia. Após várias simulações, o mesmo autor constatou que a desconsideração da maré não invalidaria os resultados de seu trabalho, que obtiveram um bom ajuste com a linha de costa medida para a data final dos estudos. Desta forma, as variações temporais do nível do mar não foram consideradas no modelo conceitual proposto para as simulações.

A seguir serão descritos detalhadamente os procedimentos adotados para a aquisição e o tratamento de cada conjunto de dados.

4.1. Levantamento do estado atual da linha de costa

Diante da necessidade de se obter uma linha de costa medida no período final das simulações para comparação com os resultados gerados pelo modelo, optou-se pela realização de uma campanha de reconhecimento nas praias estudadas, onde além de um diagnóstico geral da validade dos conceitos assumidos, seria possível obter a posição atual da linha de costa. Para este levantamento utilizou-se um GPS modelo *Garmin 38*.

O GPS (*Global Positioning System*) consiste em um conjunto de 24 satélites que circulam a terra duas vezes por dia em órbitas pré-determinadas e enviam sinais para a sua superfície. Estas informações são captadas por aparelhos receptores que fazem a triangulação do sinal para obter a sua posição dentro do sistema de coordenadas desejado. Essencialmente, os receptores comparam o tempo decorrido entre o envio e a recepção do sinal, de forma a obter a distância entre o satélite e o aparelho. Com o sinal de pelo menos três satélites, pode-se calcular a posição em duas dimensões (latitude e longitude), já com quatro satélites, o equipamento fornece ainda a altitude do ponto.

Os fatores que podem interferir na qualidade de mapeamentos feitos com o uso destes aparelhos relacionam-se principalmente com as condições atmosféricas e a reflexão ou bloqueio de sinais, causados pela proximidade de centros urbanos. Por outro lado, as especificações técnicas dos receptores citam que suas atuais características de projeto têm proporcionado um eficiente rastreamento dos sinais, garantindo erros médios dentro da faixa de 15 metros em áreas abertas e em boas condições climáticas. Ao longo da área em estudo, a possibilidade de reflexão ou bloqueio dos sinais é mínima, dada a ausência de grandes edificações. Assim sendo, para garantir uma mínima interferência na qualidade dos dados obtidos, o levantamento foi realizado em dia de baixa nebulosidade.

Para efeito de comparação com os dados obtidos pelas cartas da Diretoria de Hidrografia e Navegação, os pontos deveriam ser medidos a um nível de maré que estivesse o mais próximo possível de zero. Infelizmente, o menor nível previsto pelas tábuas de maré no

período das campanhas, foi de 80 centímetros positivos. Logo, para fins comparativos, a linha de costa obtida da união dos pontos deveria ser posteriormente transladada em direção ao mar de uma distância equivalente ao trecho que separava a cota de 80 centímetros da cota zero, sobre o perfil de praia.

Nos trechos iniciais, onde o excesso de estruturas impossibilitou o acesso de veículos, a tomada dos pontos foi feita a pé, o que proporcionou, ainda, uma observação mais detalhada das características estruturais das construções e da morfologia da praia. Para as obras retilíneas, independentemente de seu comprimento, foram obtidas as coordenadas das duas extremidades. Já para os trechos restantes, livres de estruturas rígidas e com uma extensão de cerca de 15 quilômetros, o aparelho receptor foi configurado para uma aquisição seqüencial de pontos a cada 9 segundos. Desta forma, com o veículo se deslocando a uma velocidade que não superou os 40 km/h, as coordenadas foram sendo armazenadas a cada 100 metros, ou menos.

O trajeto tomou cerca de 30 minutos, e após sua conclusão, o caminho foi refeito no sentido contrário. A tábua de maré para este dia (19 de dezembro de 2001), indicava que a baixamar de 80 centímetros ocorreria as 13:30. Desta forma, o primeiro levantamento teve início as 13:00 e o segundo as 13:30. Assim, todo o trabalho foi realizado tendo-se uma diferença máxima 30 minutos do instante de maré mínima. Com os dois conjuntos de pontos relativos à mesma linha de costa, procurou-se avaliar os possíveis erros de variação de posição ao longo do tempo, inerentes aos dados obtidos por meio de satélite.

O levantamento dos pontos onde o nível da água mantinha contato direto com as estruturas ou com as rochas de praia foi realizado independentemente do nível da maré, pois considerou-se que a profundidade registrada na frente destes elementos, devido principalmente à grande concentração de energia e processos de reflexão das ondas, fazia com que a posição da linha de costa não variasse significativamente com a maré.

Os resultados obtidos estão representados na figura 4.2, onde pode-se observar a coincidência entre as linhas obtidas nas duas passagens pelo mesmo trecho. Como as duas séries de pontos foram adquiridas em instantes diferentes, não seria possível fazer com que o aparelho adquirisse as coordenadas exatamente no mesmo local onde o havia feito anteriormente. Desta forma, a comparação efetiva da existência de distorções foi desenvolvida plotando-se as duas linhas finais resultantes da ligação entre os pontos adjacentes para cada levantamento. Este resultado forneceu uma diferença média entre as retas, inferior a 10 metros, que está dentro da margem de variação de 15 metros.

A qualidade destes dados mostrou-se bastante satisfatória para os objetivos de comparação a longo prazo, e isto pode dever-se, em parte, às boas condições atmosféricas

existentes durante o período de aquisição, e a distância de centros urbanos, o que impediu a interferência da chegada de sinais nos receptores.

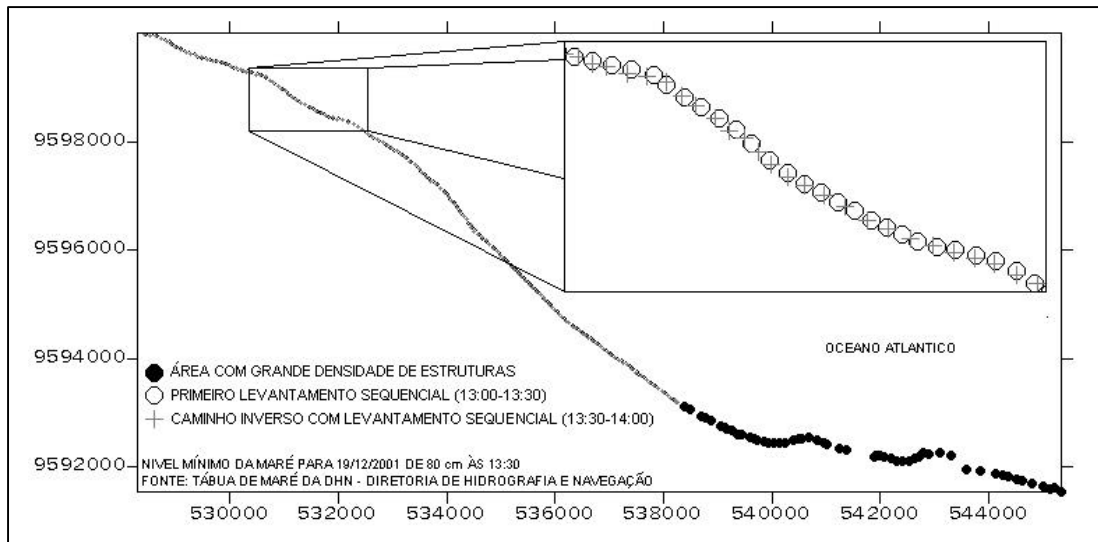


Figura 4.2. Plotagem do levantamento da linha de costa realizado no dia 19 de dezembro de 2001 para fins comparativos com os resultados gerados pelo modelo GENESIS.

Esta metodologia vislumbra uma técnica simples, prática, consideravelmente rápida e de baixo custo, para monitoramento das modificações em planta ocorridas ao longo de praias arenosas. Deve ficar claro que para estudos de variações sazonais, é preferível recorrer-se a metodologias mais precisas, dado que as modificações temporais vêm a ser menores. O receptor utilizado para armazenar os sinais dos satélites possui preço acessível, e a possibilidade de transferir todas as informações do armazenamento sequencial para um computador pessoal através da porta serial. Desta forma, logo ao final do levantamento, pode-se ter o mapa dos pontos gerado - no sistema de coordenadas desejado - para identificação *in loco* de possíveis falhas, ou áreas onde seja necessário um maior detalhamento.

4.2. Obtenção da linha de costa intermediária

A disponibilidade de um estado intermediário da linha de costa - entre o período inicial e o final da modelagem - possibilita a formulação de uma idéia mais clara da seqüência evolutiva da região antes de atingir sua conformação final. Logo, procurou-se referenciar as fotografias aéreas disponíveis para o ano de 1996 e assim digitalizar a linha de praia nelas representada.

O referenciamento foi realizado com base em coordenadas de pontos de fácil localização, sendo elas: o início da CE-085, o trevo que liga a praia do Pacheco à estrada para a ponte sobre o Rio Ceará, o pedágio desta ponte, o seu início na margem esquerda, uma casa

de praia conhecida e a sede de praia da APESC (Associação de Professores do Ensino Superior do Ceará). Com estas coordenadas, gerou-se uma malha plana referenciada, e em seguida ajustou-se a escala e a rotação das fotografias para que houvesse o melhor encaixe entre as duas.

A figura 4.3 indica o resultado da superposição dos dados. Mesmo para o melhor ajuste, obteve-se uma diferença entre a observação da estrutura na foto e a malha de coordenadas obtida em campo. A maior variação apresentou-se para o ponto no início da CE-085, situado aproximadamente a 4 km da praia. O fato deste ponto estar tão distante da linha de costa minimiza as conseqüências desta constatação, dado que o objetivo do referenciamento é a obtenção da mesma. Já as diferenças para os pontos localizados próximos à praia foram de 30 metros, em média (Tabela 4.1).

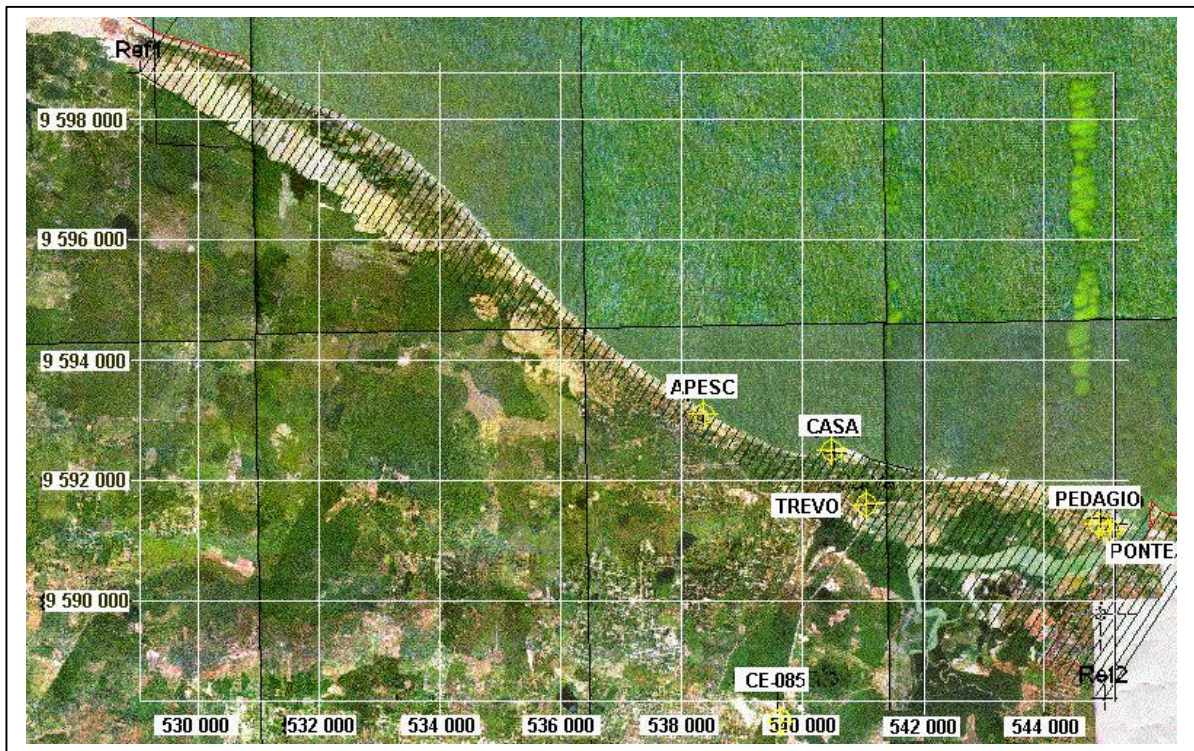


Figura 4.3. Fotografias aéreas de 1996 referenciadas a partir de coordenadas de pontos conhecidos.

(Fonte: VBA Consultoria)

Com a foto aérea aparentemente referenciada, vetorizou-se a linha de praia. Este levantamento foi realizado na maré alta, logo considerando-se uma declividade média do perfil praial de 1:25 e uma amplitude média de maré de 2 metros, tem-se que a linha para efeito de comparação com a carta da DHN deveria ser transladada de 50 metros em direção ao mar.

A sobreposição desta linha final obtida e a linha digitalizada para 1974 indicou incoerências em alguns pontos que, devido ao afloramento de rochas na praia, não haviam

mudado de posição ao longo do tempo. A correção de tais diferenças exigiria uma translação dos eixos de 333 metros nas abscissas e -165,2 metros nas ordenadas, o que acabaria por alterar os erros já estimados para o levantamento dos pontos fixos. Diante desta incompatibilidade, concluiu-se que tanto as fotografias quanto o conjunto de coordenadas disponíveis para os pontos utilizados como referenciais poderiam conter distorções, e que, apesar das exaustivas tentativas, ao compatibilizar as linhas de costa seriam acumulados erros que não representariam a real posição daquela. Assim, optou-se por tomar os levantamentos de 1996 como um dado auxiliar do ponto de vista qualitativo, possibilitando a identificação, apenas, de características gerais como ocupação urbana, localização de campos de dunas, faixa de praia exposta à atuação dos ventos, e outros.

Tabela 4.1 – Pontos de referenciamento das fotografias aéreas de 1996, indicando as diferenças entre as coordenadas das estruturas na malha e sua indicação na fotografia.

Ponto	Latitude (Sul)			Longitude (Oeste)			UTM (N)	UTM (E)	Dif. (X)	Dif. (Y)	Dif. Total
	CE-085	3	43	27.48	38	38	36.12	9588352	539605	-28	349
Trevo	3	41	40.68	38	37	48.96	9591606	541056	-9	-7	12
Pedágio	3	41	48.48	38	35	42.54	9591389	544942	15	108	109
Ponte	3	41	51.36	38	35	35.16	9591297	545189	76	121	143
Casa	3	41	13.26	38	38	5.52	9592466	540532	40	-47	61
Apesc	3	41	13.26	38	38	5.52	9593115	538378	-14	12	19

* Como a obra ainda não estava concluída durante o levantamento fotográfico, as posições nas fotografias haviam sido estimadas, e não apresentaram precisão suficiente para auxiliar o referenciamento, sendo então descartados.

4.3. Obtenção da linha de costa e da batimetria iniciais

A linha de base da costa, bem como os dados batimétricos disponíveis foram retirados das duas folhas de bordo da série 710-2 da Diretoria de Hidrografia e Navegação, na escala 1:25.000. Estes levantamentos foram realizados ao longo do ano de 1973 pela própria DHN. A área de abrangência destas cartas e das fotografias aéreas norteou a delimitação da cobertura das simulações, dado que não estava disponível material na mesma escala que atingissem as proximidades da Ponta do Pecém. Diante desta limitação, o trecho de linha de costa tomado como entrada do modelo estendeu-se desde a margem esquerda do Rio Ceará até o final da praia do Cumbuco (Figura 4.4).

Combinando as informações referenciadas das cartas com as imagens aéreas e por último com o diagnóstico da linha de costa realizado por Lima (1999), tornou-se possível representar em detalhe tanto a posição da linha de costa quanto a sua morfologia e

composição numa escala mais aprofundada. Com o objetivo de representar a forma do fundo oceânico gerou-se o modelo numérico do terreno, fornecendo uma descrição precisa da batimetria local a partir da digitalização das folhas de bordo, disponibilizando assim, um ponto de partida para representação da morfologia da costa. A grande dificuldade que se encontra durante o processo de levantamento dos dados de profundidade, está no casamento das medições realizadas em águas intermediárias (com o uso de equipamentos de emissão sonora a bordo de embarcações) com as medições realizadas em terra, por meio de trabalhos topográficos. Neste aspecto, o modelo GENESIS requer um detalhamento preciso da morfologia de fundo somente até as proximidades da zona de arrebenção. A partir deste ponto, considera-se o perfil como sendo o de equilíbrio da praia a partir da equação aprimorada por Dean (1977), que relaciona o perfil da praia com a sua granulometria (Equação 13).

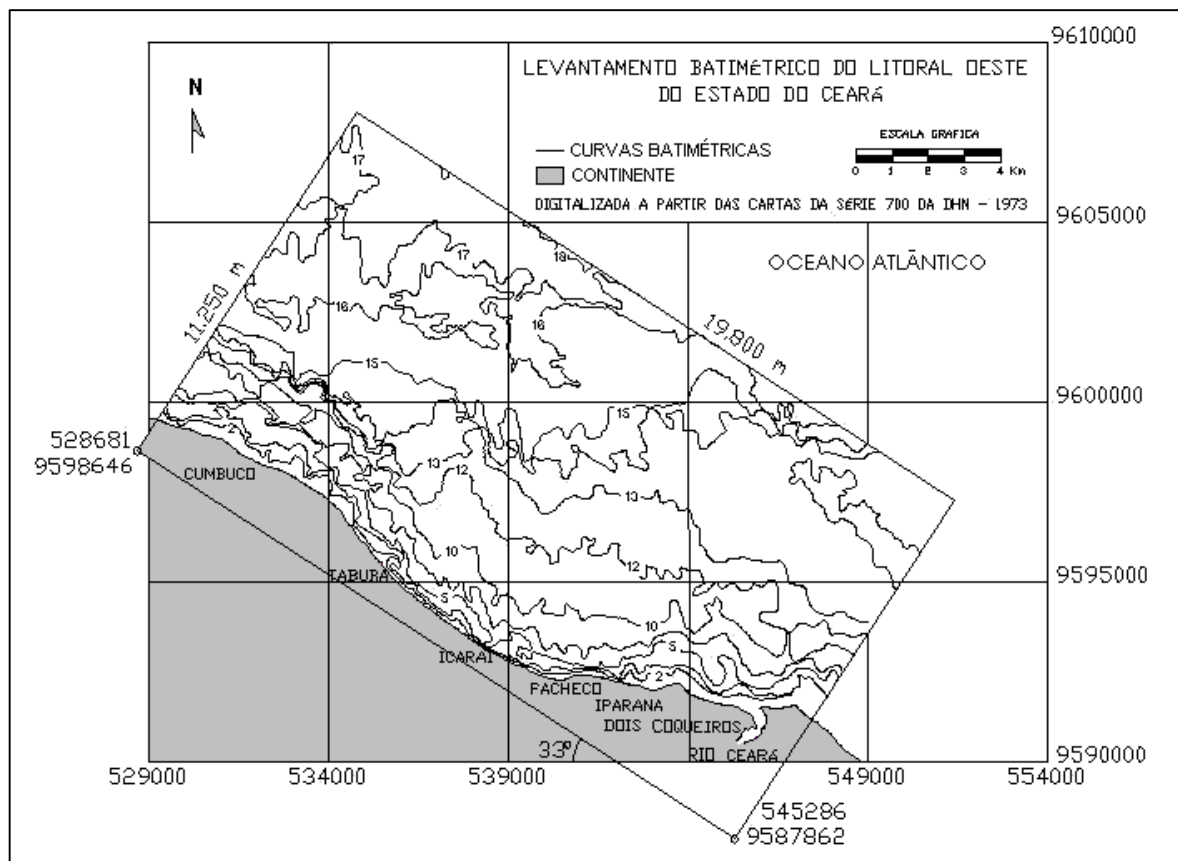


Figura 4.4. Base de dados de linha de costa e morfologia de fundo disponível para o litoral oeste de Fortaleza.

(Fonte: DHN, 1974, FB 710-2)

Este princípio se ajusta satisfatoriamente para praias arenosas, mas quando estruturas de proteção ou formações rochosas tornam-se frequentes, alguns artifícios devem ser introduzidos de forma que o modelo de propagação de ondas considere a morfologia real da praia e não a estimada matematicamente. Desta forma, considerou-se que o fato de as folhas

de bordo da DHN representarem profundidades até pouco menos de 2 metros seria satisfatório para a utilização do modelo de propagação de ondas RCPWAVE até a linha de referência próxima à arrebentação. A partir das características de onda locais, a Equação 12 indicou que esta linha situa-se a uma profundidade aproximada de 4 metros. Os procedimentos de cálculo serão indicados no item 4.4.3.

4.4. Simulações e ajuste do modelo

Dadas as características internas de cálculo do pacote SMS, a preparação dos dados para a simulação seguiu a seguinte seqüência:

4.4.1. Série temporal de dados de onda

A série original dos registros de onda possuía algumas falhas na sua seqüência de dados, o que ocasionava variações no intervalo de aquisição dos parâmetros. Assim sendo, optou-se por realizar a interpolação linear entre registros consecutivos, de forma a manter o período de aquisição constante de 3 horas. Para tal, foi desenvolvido um algoritmo de leitura, identificação de lacunas, preenchimento do valor interpolado e gravação do novo arquivo contendo a série final (Apêndice A). O registro inicial, com 5719 pontos, passou para o calculado com 5443 pontos igualmente espaçados.

A série obtida, representava as medições realizadas entre 13 de março de 1997 e 26 de janeiro de 1999, o que corresponde a aproximadamente 1 ano e 11 meses. Para o período de simulação estipulado entre as duas linhas de costa disponíveis, esta série corresponderia a aproximadamente 7 % do tempo total. A partir desta constatação, procurou-se gerar uma série sintética baseada nos dados disponíveis. Foi desenvolvido um estudo dos espectros de cada um dos três parâmetros (período de pico, altura significativa e direção de pico) com o objetivo de ajustar estes valores a equações do tipo:

$$P = K_m + C_{11} \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{p_1}\right) + C_{12} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{p_1}\right) + \dots + C_{n1} \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{p_n}\right) + C_{n2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{p_n}\right) \quad (14)$$

Onde,

P = Variável a ser representado pela formulação (altura, direção ou período);

K_m = Constante do modelo ajustado;

p_n = Período correspondente ao n-ésimo par de termos da equação. Este valor é obtido a partir de uma determinada frequência (f_n) importante da amostra da forma $p_n = 1/f_n$;

C_{n1} = Coeficiente a ser determinado para o primeiro termo referente ao período p_n ;

C_{n2} = Coeficiente a ser determinado para o segundo termo referente ao período p_n ;

t = Instante de tempo para o qual o valor P está sendo determinado.

A obtenção da equação que melhor representa o comportamento do parâmetro estudado é realizada em duas etapas. Na primeira se estuda o espectro das medições dos dados de onda com o objetivo de identificar as frequências mais importantes dentro do sinal gravado, segundo metodologia indicada em Bendat (1986). A segunda fase do trabalho consiste em determinar os coeficientes C_{n1} e C_{n2} que melhor ajustam à formulação desejada. É interessante ressaltar ainda, que a divisão de cada período em um termo de seno e outro de cosseno se deve ao fato de eliminar o termo de fase dentro do parênteses na Equação 14. Dado que:

$$\cos\left(\frac{2p.t}{p_1} + f\right) = \cos\left(\frac{2p.t}{p_1}\right)\cos(f) - \sin\left(\frac{2p.t}{p_1}\right)\sin(f) \quad (15)$$

Temos que os valores $\cos(\phi)$ e $-\sin(\phi)$ correspondem a c_{n1} e c_{n2} .

As frequências mais importantes para cada uma das variáveis foram obtidas através do programa GENSTAT, que a partir do registro do ondógrafo gera os espectros ilustrados na figura 4.5.

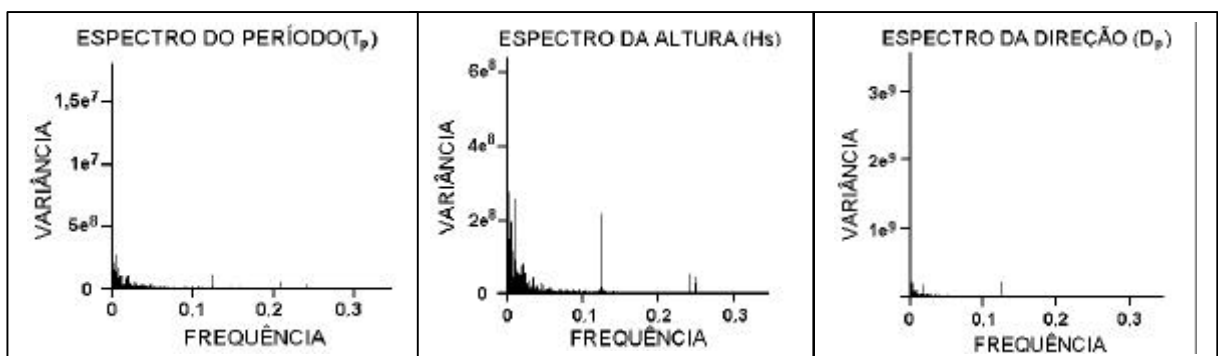


Figura 4.5. Espectro de frequências encontradas nos registros de período, altura e direção obtidos por meio do ondógrafo do Pecém.

A digitalização das frequências de pico, indicou cerca de 19 componentes importantes para cada um dos três parâmetros. Para todos eles ficou evidenciada a importância de uma

componente diurna e outra semi-diurna, representada pelos picos nas frequências de 0,125 e 0,250, que correspondem a períodos de 8 e 4 aquisições, ou seja, 24 e 12 horas, onde este último corresponde ao mesmo período da maré. As componentes de maior período que obtiveram representatividade foram as anuais, semestrais e trimestrais, que correspondem a 2920, 1460 e 730 aquisições. As constantes C_{n1} e C_{n2} para as principais componentes de cada parâmetro estão indicadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2. Constantes ajustadas pelo aplicativo GENSTAT para a equação 14, na modelagem das ondas ao longo do tempo a partir de dois anos de registros com o ondógrafo do Pecém.

Constante (K)		Período de pico (T)		Altura significativa(Hs)		Direção de pico(D)	
n		7,923		138,975		81,475	
Período(p _n)	C _{n1}	C _{n2}	C _{n1}	C _{n2}	C _{n1}	C _{n2}	
1	365,0	1,732	-1,385	-11,224	-0,173	-25,083	13,177
2	182,5	0,035	-0,410	2,319	-5,835	-2,164	1,667
3	91,3	0,045	0,265	1,378	0,027	0,056	-2,866
4	45,6	0,033	-0,059	-1,926	-3,219	-2,284	-0,076
5	35,0	-0,330	-0,278	2,180	-0,420	3,662	1,443
6	23,8	0,272	-0,127	3,626	-2,207	-0,306	-0,895
7	17,5	0,055	0,092	0,078	0,124	-0,163	0,218
8	12,5	-0,113	0,352	0,908	-1,507	1,375	-1,364
9	8,8	0,070	-0,048	0,682	2,309	-0,573	0,595
10	6,3	-0,161	0,063	-1,494	0,597	-0,889	-0,347
11	5,0	0,003	-0,068	-0,613	1,310	-0,625	-0,060
12	4,4	0,060	-0,044	-0,108	0,150	0,358	0,079
13	2,5	0,048	-0,069	-0,407	-0,145	-0,784	0,812
14	2,4	0,043	-0,098	-0,280	0,117	-0,132	0,179
15	2,1	-0,035	0,010	0,272	-0,816	0,286	-0,234
16	1,9	0,034	0,001	-0,671	-0,189	0,532	-0,610
17	1,3	0,086	-0,024	0,042	0,038	-0,799	-0,116
18	1,0	0,076	0,013	-5,333	0,008	-1,428	-1,482
19	0,5	0,042	0,039	-0,581	-2,409	0,110	-0,732

Graficamente pode ser ilustrada a resposta do modelo diante das medições do aparelho. Na figura 4.6, estão representados: os registros do ondógrafo, os valores previstos pelas equações e os resíduos para os três parâmetros das ondas incidentes no litoral cearense. Estes resíduos consistem na subtração da série sintética a partir da série observada, ou seja, são a parcela dos eventos não explicada pelo modelo. A priori, o modelo se mostrou de pouca representatividade, principalmente para as grandes amplitudes. O fato é que a sazonalidade inerente à ocorrência de ondas de maior período oriundas do hemisfério norte, causa uma grande dispersão dos dados de período e direção nas medições realizadas nos primeiros meses dos anos. Nos outros meses, as ondas geradas pelos ventos locais passam a ser imperativas, e sem a interferência de outras fontes geradoras, o modelo conseguiu responder melhor ao comportamento dos parâmetros. Uma limitação do estudo está relacionada com a extensão da série, que abrange 1 ano e 11 meses de medições. Dada as escalas de modificação da

morfologia costeira, temos uma série pequena, e provavelmente registros de maior duração poderiam fornecer resultados mais precisos no ajuste de formulações matemáticas.

De uma forma geral, temos que o parâmetro direção foi o que apresentou melhor ajuste a este tipo de modelagem, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,48. As componentes de períodos mais importantes em ordem decrescente foram: a anual, aproximadamente mensal (35 dias), semestral, trimestral, diária e uma de aproximadamente 15 dias. Observa-se pelo gráfico, que o equacionamento tende a representar uma tendência central, que se aproxima da observação nos períodos de maior monotonia, ou seja, direções mais homogêneas. Esta redução na amplitude de variação das direções possibilita a representação mais fiel do fenômeno. Uma possível solução para estudos com períodos de medições maiores seria dividir a série em dois conjuntos principais. Um relativo aos meses mais centrais do ano, onde as ondas tem origem predominante de leste e leste-sudeste. O outro englobaria os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, onde as ondas de *swell* se misturam com as locais (*sea*). Desta forma, os conjuntos poderiam ser estudados separadamente.

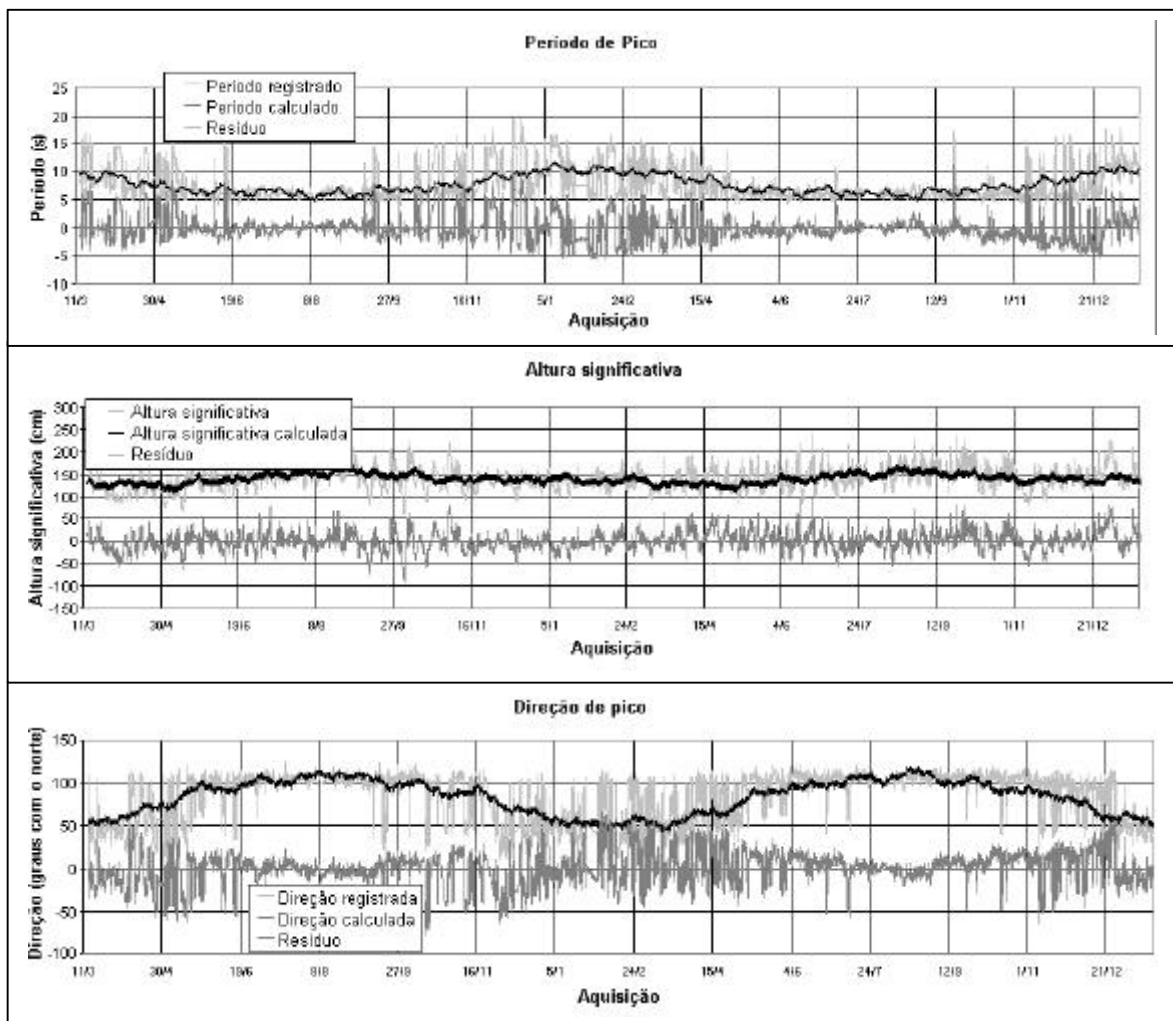


Figura 4.6. Representação geral do período de medição de ondas no Pecém e dos resultados do modelo ajustado para os parâmetros de período, altura e direção.

Para os dados de período de onda, que por sinal estão correlacionados com a direção observou-se um R^2 de 0,30. As componentes de período mais importantes em ordem decrescente foram: anual, mensal, de aproximadamente meio mês, semestral, de 24 dias e trimestral. Mais uma vez a possibilidade de se isolar os dois períodos onde diferentes fontes geradoras atuam na região seria uma forma de se tentar obter ajustes mais expressivos, desde que se disponha de uma série temporal maior. Por último, temos o modelo para altura, que apresentou a menor variância explicada, de 0,22. Destacando-se os períodos de recorrência anual, semestral, de aproximadamente 24 dias, diário, uma componente de um mês e meio (45 dias) e a componente semi-diurna.

Diante das amplitudes residuais não explicadas pelo modelo proposto, e ao fato destas não se apresentarem aleatórias, concluiu-se que a previsão do comportamento ondulatório da região através da formulação sugerida não fornecerá a precisão necessária para as simulações ao longo do tempo. O modelo identificou os períodos mais importantes para cada parâmetro e representou a tendência central deste ao longo do tempo, mas com o objetivo de simular os quase 28 anos de evolução da linha de costa, optou-se por tão somente repetir a série interpolada de registros a fim de completar o tempo necessário.

Um maior detalhamento dos processos envolvidos para a obtenção das frequências mais importantes para as séries de registros pode ser obtido em Bendat (1986).

4.4.2. Geração do Gride

Como foi indicado na figura 3.15, os grides do RCPWAVE e do GENESIS devem obedecer um padrão para que os dados obtidos pelo primeiro possam ser transferidos diretamente para o último. Assim, a determinação da malha utilizada no modelo de propagação de ondas norteará a escolha da linha de referência relativa ao modelo de evolução de praias.

O maior limitante para a escolha do gride do RCPWAVE foi o número de nós a serem calculados, que constatou-se ser da ordem de 3500. Outro parâmetro importante é a relação entre as dimensões das células retangulares, que por questões de estabilidade numérica deve estar entre 2 e 3. Desta forma, considerando-se um trecho de aproximadamente 20 Km de praias, e os requisitos acima citados, estipulou-se uma malha de 75 nós no sentido perpendicular a linha de referencia da costa e 44 nós no sentido longitudinal, espaçados de 150 e 450 metros respectivamente, totalizando 3300 pontos. Para esta relação de comprimento

de célula, o ângulo máximo de incidência de onda sobre o gride do RCPWAVE fica limitado em 71,57 graus para a esquerda ou para a direita da normal à linha de referência.

A figura 4.7 ilustra a malha final selecionada para as simulações de propagação de onda, com uma normal perfazendo 40° com o norte. Dentro das limitações de ângulo de incidência do modelo mencionados por Hanson et al. (1989), esta conformação possibilita a inserção de uma faixa de ondas que vai desde -31.57° até 111.57° , o que abrange 94,2 % de todas as ondas registradas. As dimensões totais da área coberta foram de 19.800 por 11.250 m, o que representou 223 Km². Uma grande vantagem da adoção desta dimensões se refletiu na profundidade relativa a seu limite mais distante da costa, que ficou sobreposto em boa parte pela batimétrica de -18 m. Assim, os dados de onda obtidos exatamente a esta profundidade puderam ser inseridos da forma que foram registrados pelo ondógrafo, sem necessitar de qualquer transformação para a profundidade inicial da malha de cálculos.

Escolhida a configuração do gride, passou-se à etapa de inserir a batimetria no programa. A entrada dos dados é feita a partir da profundidade relativa a cada nó. Desta forma foi utilizada uma rotina de interpolação bi-linear incluída no pacote Mike21 do *Danish Hydraulic Institute* (DHI, 1997), que realiza este processo a partir do fornecimento da batimetria do terreno e das características da malha que se deseja utilizar. A saída dos dados é fornecida em arquivo do tipo ASCII que pode ser alterado para o formato de leitura do próprio RCPWAVE.

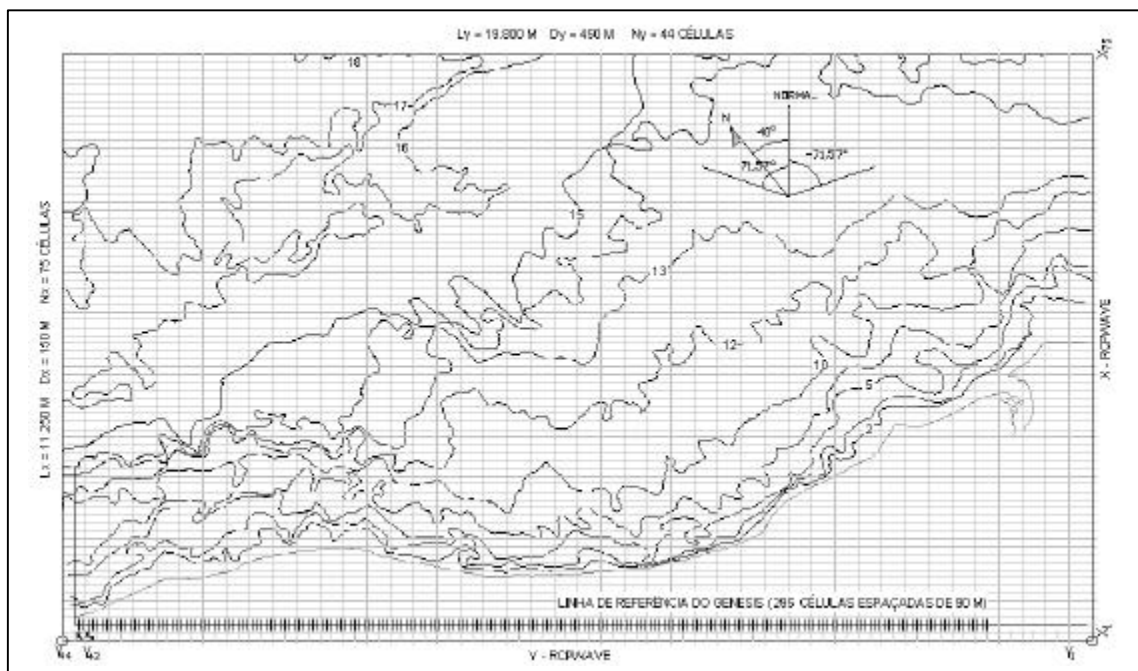


Figura 4.7. Malha de pontos gerada dentro das convenções do RCPWAVE para representar a batimetria local durante os cálculos de propagação de onda.

O gride do GENESIS foi então determinado de forma que a dimensão das células na direção Y do RCPWAVE fosse múltiplo inteiro das suas. Assim, constatou-se que células de 90 metros, além de serem divisores inteiros das de 450 metros do modelo de propagação, cobririam um comprimento de 18 quilômetros com o limite de 200 células imposto pelo programa. Desta forma, para cada linha vertical indicada na figura 4.7, estariam englobadas 5 células de cálculo do GENESIS, iniciando da esquerda para a direita (Figura 3.15). Esta discretização da linha de costa indica a precisão dos resultados a serem apresentados.

4.4.3. Evolução das ondas sobre a batimetria

A propagação das ondas deve ser feita desde o limite externo da malha até uma linha de referencia que represente as proximidades do ponto de arrebentação das maiores ondas. Os coeficientes de transformação para esta profundidade – calculados pelo RCPWAVE - são então utilizados pelo GENESIS para determinar a arrebentação e o conseqüente transporte longitudinal ocasionado pelas ondas.

Baseando-se na altura máxima de onda registrada para o período de medições, que foi de 4,68 metros, e em um índice de arrebentação de 0,78, tem-se que uma onda desta altura arrebentaria à profundidade de 3,65 metros. Por outro lado, a profundidade na qual esta altura de onda foi registrada é de 18 m, o que faz com que a altura de quebra e, conseqüentemente, a profundidade onde esta ocorre sejam ligeiramente superiores. Desta forma, com o objetivo de delimitar a linha correspondente à profundidade na qual os dados de saída do RCPWAVE seriam fornecidos, seguiu-se a curva batimétrica de 4 m por meio da união dos nós da malha que se encontravam mais próximos a ela. Para estas células é que serão determinados os coeficientes de transformação das ondas.

Estipulou-se ainda, uma segunda linha de transformação para a profundidade de 7 metros, para ser utilizada nas simulações do GENESIS que venham a considerar a presença de espigões ou quebra-mares destacados. O fato é que devido às modificações que estes vêm a causar nas características das ondas, é recomendável que os parâmetros de transformação do modelo de propagação sejam calculados para profundidades superiores às quais se encontram os limites das estruturas. Desta forma, as alterações impostas ao clima de ondas podem ser estimadas pelas rotinas internas do GENESIS.

As direções de onda foram então referenciadas à normal à linha de referência do gride (40° em relação ao norte), sendo que para os ângulos à sua direita são atribuídos valores negativos, enquanto que aos da esquerda considera-se valores positivos, ambos tendo o zero coincidindo com a própria normal. Esta convenção está indicada nas figuras 3.15 e 4.7.

O próximo passo consistiu em se discretizar os registros das ondas em categorias de período e direção, considerando para todas uma altura unitária. Esta etapa torna-se necessária pela própria característica de cálculo do modelo de propagação, que realiza as transformações sobre o fundo para todas as categorias obtidas e fornece para o GENESIS apenas os coeficientes finais de transformação. Assim, durante as simulações neste último, quando a série original obtida pelo ondógrafo estiver sendo lida, os valores de direção e altura serão diretamente multiplicados pelos coeficientes relativos à categoria em que se enquadram, resultando nas características da onda próxima a sua arrebentação para o cálculo do potencial de transporte longitudinal. Fica evidente que, caso os dados não fossem separados por categorias, tornaria-se inviável calcular todas as combinações possíveis de direção e período armazenadas pelo ondógrafo, devido ao considerável esforço computacional e espaço de armazenamento requerido.

Com o intuito de não comprometer a qualidade dos dados, as ondas foram discretizadas em pequenas categorias. A separação dos dados fez-se a partir da elaboração de um algoritmo (Apêndice B) que extrai os valores da série original de 5443 conjuntos de dados de ondas, e os transforma em categorias específicas com precisão de 1 s para o período e de 2 graus para a direção. Este procedimento foi adotado após algumas tentativas com diversos tipos de precisão, e mostrou-se o mais adequado pela boa representatividade dos dados originais e menor número de combinações.

A figura 4.8 ilustra as categorias finais obtidas de período e direção, e o percentual dos registros originais que foi representado por cada uma delas. Observamos a importância das ondas com períodos entre 5 e 7 segundos, oriundas das direções compreendidas entre -40 e -80 graus com relação à normal do sistema de coordenadas, correspondendo a 80 e 120 graus em relação ao norte. Foram então criadas 21 categorias de período, variando de 2 a 20 segundos e 91 categorias de direção, variando de -90° a 90° . Logo seriam possíveis 1911 combinações de dados, representando uma redução de 65 % do número de registros originais. Como nem todas as combinações possíveis vieram a ocorrer nos registros, o número final de conjuntos de dados se reduziu a 411 categorias, ou seja, apenas 8 % da quantidade de cálculos que seriam realizados caso se utilizasse a série bruta de dados, reduzindo em 92% o esforço computacional requerido.

O procedimento de separação em classes atribuiu valores médios entre os limites em que se encontravam os dados para formar a nova série temporal a ser entrada do GENESIS. Desta forma, um registro de onda de período, direção e altura iguais a 8,33 s, $-11,12^\circ$ e 1,46 m, passaria a ser 8,5 s, $-11,00^\circ$ e 1,46 m, correspondendo a categoria de períodos entre 8 e 9 segundos e de direção entre -10 e -12 graus.

Como cada arquivo de propagação do RCPWAVE só comporta 10 categorias de ondas, foram gerados 42 arquivos a serem executados neste programa e seus resultados foram organizados em um único, a ser lido pelo GENESIS.

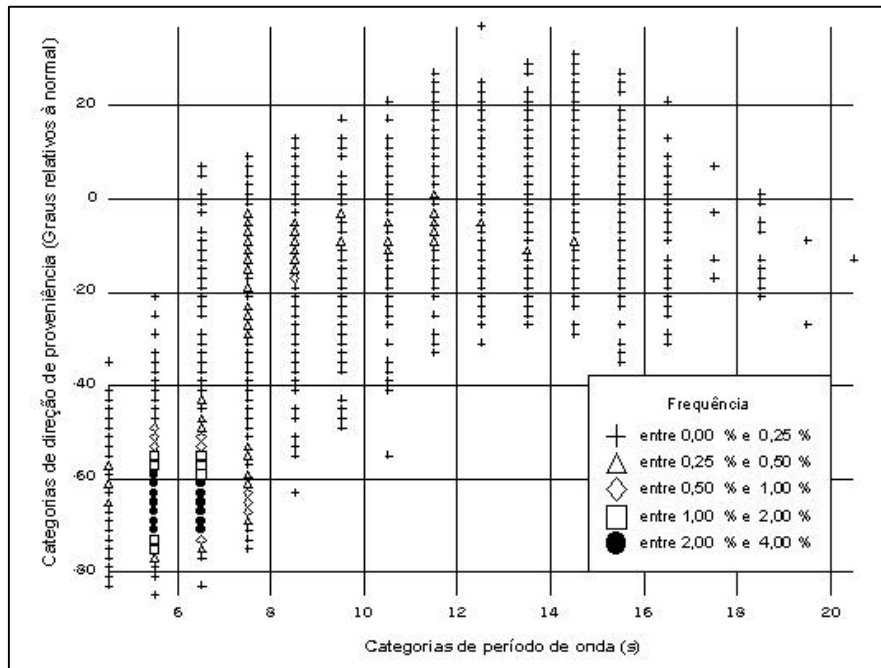


Figura 4.8. Frequência relativa a cada categoria de discretização dos dados de onda com relação a período e direção.

4.4.4. Parâmetros gerais do modelo

O período de simulação foi assim estipulado entre as datas de 01 de janeiro de 1974 e 19 de dezembro de 2001, perfazendo 27 anos, 11 meses e 19 dias. Considerou-se uma altura da berma ativa igual a 2 metros. Nos pontos onde a fixação das dunas e o afloramento de rochas de praia ou a construção de estruturas fixaram a costa foram inseridos *seawalls*.

O limite inferior do perfil, ou seja, a profundidade de fechamento foi calculada com base no equacionamento sugerido por Hallermeier (1981a) apud Almeida et al.(1999). Segundo este autor, o valor da profundidade a partir da qual não ocorrem alterações significativas da cota do fundo pode ser dado pela equação:

$$\left(\frac{2\pi D_c}{L}\right) \sinh\left(\frac{2\pi D_c}{L}\right)^2 \cdot \operatorname{tgh}\left(\frac{2\pi D_c}{L}\right) = \frac{\pi^2 \cdot \bar{H}_{s0,137}^2}{0,03 \cdot \rho' \cdot \left(\frac{g \cdot \bar{T}_s^2}{2\pi}\right)^2} \quad (16)$$

Onde:

D_c = Profundidade de fechamento;

L = Comprimento de onda relativo à profundidade D_c ;

$\rho' = (\rho_s - \rho) / \rho$ = densidade do material submerso;

ρ_s = massa específica da areia (2650 Kg/m³);

ρ = massa específica da água salgada (1026 Kg/m³);

g = aceleração da gravidade;

\bar{T}_s = média anual do período significativo;

$\bar{H}_{s0,137} = \bar{H}_s + 5,6\sigma$ = altura da onda significativa excedida somente 12 horas por ano (0,137%);

\bar{H}_s = altura significativa média anual das ondas;

σ = desvio padrão das alturas significativas das ondas.

Duas formas simplificadas da equação acima, e apresentadas pelo mesmo autor são:

$$D_c = 2,28 \cdot \bar{H}_{s0,137} - 68,9 \cdot \left(\frac{\bar{H}_{s0,137}^2}{g \cdot \bar{T}_s^2} \right) \quad (17)$$

$$D_c = 2 \cdot \bar{H}_s + 11 \cdot \sigma \quad (18)$$

Utilizando as estatísticas dos registros de onda disponíveis foram obtidos os seguintes valores para cada uma das equações: 6,15, 5,97 e 6,12. Como as Equações 17 e 18 correspondem a simplificações da Equação 16, e esta forneceu o maior valor, a profundidade de fechamento adotada nos cálculos foi de 6,15 m.

A granulometria adotada foi a média indicada na Figura 3.2 da seção 3.1.3, de 0,37 mm. Finalmente os parâmetros de calibração K_1 e K_2 adotados inicialmente nas simulações foram os mesmos sugeridos por Salim (1998) para as praias da cidade de Fortaleza, sendo ambos iguais a 0,1. Este procedimento foi adotado dada a similaridade das características meteorológicas, sedimentológicas, das feições costeiras, e sobretudo, do regime de ondas.

4.4.5. Hipóteses consideradas nas simulações

A seqüência de simulações compreendeu, além das necessárias ao ajuste e calibração do modelo, a realização de uma segunda série visando analisar o comportamento destas praias diante de outras situações. Para a primeira série de simulações considerou-se as condições reais observadas nas praias, tais como: afloramentos rochosos e locação de obras rígidas, fronteira direita impermeável à entrada de sedimentos, características normais de ondas,

enfim, o modelo conceitual inicialmente proposto. Na segunda fase, foram testadas diferentes hipóteses de configuração estrutural, de fornecimento de sedimentos e parâmetros das praias.

Com o modelo devidamente calibrado para as condições locais, foram realizadas simulações para previsão da posição da linha de costa a médio prazo. Assim, a linha de praia resultante do levantamento de 2001 foi introduzida como condição inicial e simulada para 20 anos de evolução. Desta forma, procurou-se identificar pontos de maior probabilidade de retração da linha de costa e nortear uma ocupação mais adequada à área.

Finalmente, a última hipótese considerada para modelagem, foi a eventual intervenção estrutural sobre estas praias ao longo dos pontos de maior recuo para os próximos 20 anos, com o objetivo de nortear a melhor forma de intervir na linha de costa minimizando os danos sobre as áreas adjacentes. A Tabela 4.3 resume os principais objetivos da seqüência de simulações realizadas.

Tabela 4.3. Indicação das simulações realizadas e os diferentes objetivos das hipóteses consideradas.

Simulação	Objetivo	Data inicial	Data final
1	Calibrar o modelo GENESIS para as praias estudadas	01/01/1974	19/12/2001
2	Realizar testes de sensibilidade do modelo	01/01/1974	19/12/2001
3	Verificar a posição da linha de costa a médio prazo	19/12/2001	19/12/2021
4	Verificar possível intervenção estrutural a médio prazo	19/12/2001	19/12/2021

4.5. Estimativa empírica do potencial de transporte de sedimentos

Utilizou-se nesta aplicação, dois conjuntos de dados de ondas de origem distinta, um fornecido por Hogben e Lumb (1967) – *Ocean Waves Statistics* (OWS), organizado a partir de observações de navios em águas profundas; outro obtido do ondógrafo direcional *Datawell*, instalado na Ponta do Pecém. Para uma correta aplicação do método descrito no item 3.2.1, os dados de entrada no modelo devem estar referidos a águas profundas. Esta exigência confirma-se para as estatísticas do OWS, que se baseiam em observações visuais de navios em suas rotas comerciais ao largo. Entretanto, para os dados obtidos pelo ondógrafo instalado na Ponta do Pecém, as características das ondas referem-se à profundidade de 18 metros. Com o objetivo de validar estas medições, foi realizado o transporte das ondas para águas profundas segundo a teoria linear, ou teoria das ondas de pequena amplitude, considerando os efeitos de refração e modificação de altura.

O trecho do litoral cearense foi recortado em 40 sub-trechos coincidentes com as células da malha do RCPWAVE (Figura 4.9). Sobre estes diferentes alinhamentos, e para cada um

dos dois conjuntos de dados de onda foi então calculado o potencial de transporte longitudinal de sedimentos, conforme indicado no item 3.2.1 a partir da Equação 1.

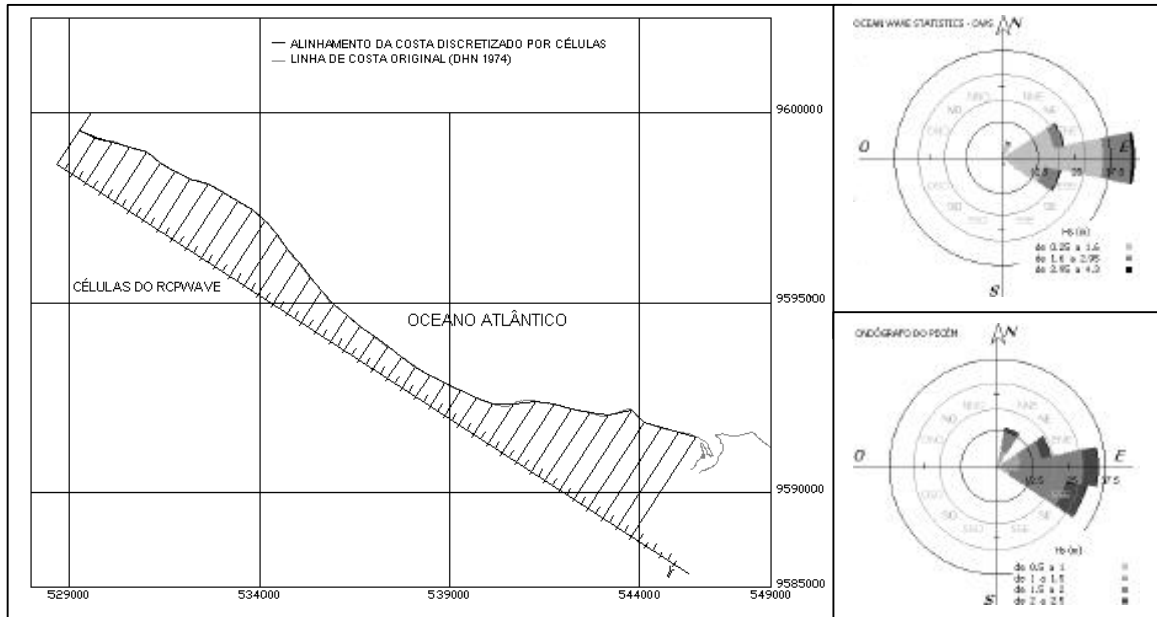


Figura 4.9. Dados de entrada no modelo. A esquerda a costa dividida em 29 trechos retos e a direita as duas estatísticas de onda ao largo.

O GENESIS possibilita ainda, o cálculo do potencial de transporte de sedimento para os dados de onda fornecidos para cada trecho calculado. Desta forma, o programa *NSTRAN* calcula as taxas potenciais de transporte longitudinal a partir dos dados de saída do RCPWAVE (coeficientes de transformação para altura, período e direção das ondas próximas da arrebentação) e da série de dados de ondas em águas profundas. Uma vez relacionadas às características de transformação entre as ondas ao longo da batimetria, as condições de arrebentação fornecem a estimativa do potencial de transporte em cada célula de cálculo do RCPWAVE baseando-se no mesmo princípio do Método do Fluxo de Energia das Ondas.

Este procedimento calcula o transporte para um evento de onda registrado pelo ondógrafo, que soma-se aos seguintes totalizando o transporte final de toda a série temporal de registros. Os resultados são armazenados em arquivos contendo os valores em cada direção e o valor resultante. A vantagem é que as modificações sofridas pelas ondas não são obtidas por formulação genérica, mas sim calculadas sobre a batimetria real, o que confere uma maior precisão.

Diante desta possibilidade, aproveitou-se a discretização e propagação das ondas registradas no Pecém para avaliar as diferenças encontradas mediante a aplicação da Equação 1 com dados de ondas ao largo, e a aplicação de um modelo de refração de ondas.

5. Resultados e discussões

Diante das características locais e da metodologia previamente apresentada, os estudos resultaram em uma série de informações sobre o comportamento das praias e das tendências gerais de evolução observadas e esperadas ao longo do tempo.

5.1. A evolução da linha de costa

O levantamento da posição da linha de costa para dezembro de 2001 possibilitou a identificação de quais foram os trechos mais críticos sob o ponto de vista da erosão costeira durante as últimas três décadas. A figura 5.1 ilustra as áreas modificadas e o grau destas alterações, onde observa-se a predominância de áreas erodidas sobre as que registraram acréscimo no volume sedimentar. No total, dos 17.550 m de praias projetados sobre a linha de referência, cerca de 9.770 m (56%) apresentaram recuo da posição da linha de costa, enquanto que 6.140 m (35%) sofreram avanço e apenas 1.640 m (9%) não registraram alteração significativa. Algumas peculiaridades devem ser comentadas. Numa escala maior, constata-se a migração gradual da linha de costa no sentido da deriva litorânea. Este processo só veio a ser interrompido, ou minimizado, em pontos onde ocorreu o afloramento de material mais rígido ou a construção de obras de fixação da linha de costa.

Os trabalhos de campo forneceram ainda, uma idéia geral da distribuição morfológica das praias e de seu estado atual de evolução. Uma série de registros fotográficos possibilitaram a ilustração das diferentes características destas que apesar de próximas, possuem grandes diferenças. Heterogeneidade esta, que se deve a fatores como: o grau de ocupação urbana, estoque sedimentar e o alinhamento da costa.

É no setor mais a direita, ou mais a leste, que os processos de estabilização ocorrem com maior representatividade. A praia de Dois Coqueiros esta totalmente marcada pela presença de plataformas rochosas que dissipam a energia das ondas (Figura 5.2). Já na sua praia vizinha, a de Iparana, a migração do grande volume de sedimento da conformação mais protuberante só veio a ser estabilizada pelas rochas de praia. Como consequência, as praias imediatamente a sua esquerda são alvo de um intenso déficit de material, o que levou à construção de um revestimento de pedras, conhecido como Muro de Iparana (Figura 5.3), e transferiu o problema para a praia adjacente, a do Pacheco. Nesta última, a presença de estruturas de proteção natural é menor, logo a solução encontrada foi a de se construir muros robustos para a preservação das residências construídas próximas ao mar (Figura 5.4), e mais uma vez a erosão se agravou nas praias seguintes.

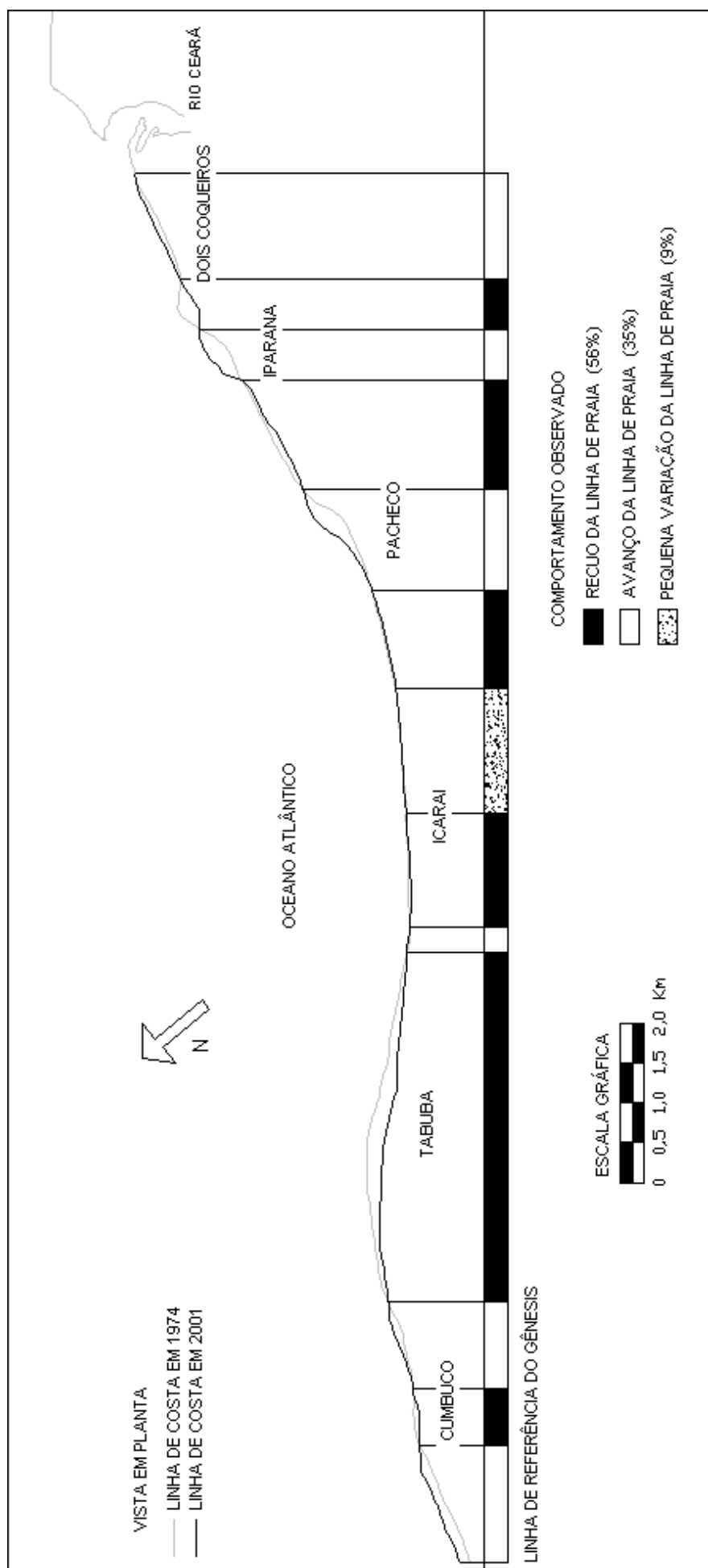


Figura 5.1. Vista em planta da posição da linha de costa nos diferentes períodos de tempo utilizados para a calibração do modelo.



Figura 5.2. Fotografias da praia de Dois Coqueiros, ilustrando os extensos afloramentos de rochas presentes em todo o seu comprimento.



Figura 5.3. Fotografias da praia de Iparana, ilustrando as medidas adotadas para fixação da linha de costa e suas conseqüências para os banhistas.



Figura 5.4. Fotografias da praia do Pacheco, ilustrando as medidas adotadas para fixação da linha de costa presentes em quase toda a sua extensão.

No trecho central da Figura 5.1, onde situa-se a praia do Icaraí e o início da praia da Tabuba constatou-se que, apesar da pouca modificação observada na linha de praia, as taxas de transporte não se mostraram tão insignificantes. Esta aparente incoerência, é explicada pela disponibilidade de material para reabastecimento destas praias. As construções mais recuadas e dunas vegetadas consideravelmente altas e íngremes no início deste trecho fornecem sedimento para as praias vizinhas e mantêm o equilíbrio do balanço sedimentar local. De fato, durante a última década, a quantidade de material armazenado diminuiu bastante (Figura 5.5), e a perspectiva a médio prazo é que este trecho venha a experimentar recuos de praia semelhantes aos anteriores.

Na figura 5.6, a fotografia da esquerda mostra uma antiga construção erguida neste setor por sobre a zona de estirâncio. O empreendimento consistia em um restaurante sobre um aterro retangular com muros de aproximadamente 4 metros de altura. Esta estrutura foi executada na década de 90 e não durou mais que 5 anos. Atualmente, só uma parte dos escombros pode ser observada no local. Este caso ilustra o que vem a ser o equilíbrio dinâmico destas praias, onde apesar da linha de costa não sofrer grandes alterações, existe uma constante retirada de sedimentos por parte das ondas, que é suprida pelas dunas frontais. A outra fotografia, também registrada na praia do Icaraí (um pouco mais a oeste), ilustra a redução do estoque de sedimentos de praia em um ponto onde as dunas foram fixadas e pararam de complementar a demanda.

No último terço, localizado mais à esquerda da Figura 5.1, tem-se a identificação de uma extensa faixa de praias arenosas com menor densidade de ocupação urbana (Figura 5.7), onde a comparação das linhas indicou um considerável recuo ao longo do tempo. Apesar de as dunas locais não estarem fixadas, a observação deste recuo leva a crer que as taxas de transporte litorâneo vêm a ser bastante elevadas neste trecho, e que mesmo as dunas, não possuem uma parcela significativa na realimentação destas praias.

Com o objetivo de se gerar valores comparativos entre as taxas de transporte de sedimentos potenciais e reais, toda a faixa de praia estudada foi discretizada em células de 450 metros de resolução (mesma dimensão do RCPWAVE) e a taxa média anual de acreção ou erosão de sedimentos foi estimada a partir do avanço ou recuo de cada trecho ao longo dos mais de 27 anos decorridos. Como os dados comparativos fornecem apenas valores bidimensionais do comportamento da praia, a obtenção do volume é feita multiplicando-se a área acrescida ou retirada pela soma da altura da berma ativa e a profundidade de fechamento. Esta metodologia parte do mesmo princípio assumido pelo GENESIS, de que o perfil da praia se move paralelamente, sem alterar sua forma original de equilíbrio (Equação 5).



Figura 5.5. Fotografias do início da praia do Icarai, ilustrando o grande volume de material armazenado e sujeito a um gradual desmonte para suprir o que é retirado pelas ondas.



Figura 5.6. Fotografias da praia do Icarai, ilustrando a intensa dinâmica de retirada de sedimentos a que a área está submetida.



Figura 5.7. Fotografias da praia do Cumbuco, ilustrando uma grande faixa de praia arenosa com afloramentos isolados de rochas de praia.

Os resultados obtidos para cada célula estão indicados na figura 5.8. Observa-se que as altas taxas de acúmulo de material registradas nas células 30 e 35 devem-se à retenção de sedimento vindo das células localizadas logo à sua direita, que são aprisionados pelas formações rochosas. Isto acontece graças à migração de material no sentido do transporte. Afora estes dois pontos mencionados, registrou-se algum acúmulo de material em pontos isolados das praias de Dois Coqueiros e Icarai, e em maior grau no final da praia do Cumbuco, onde o crescimento estimado chegou a ser da ordem de 20.000 m³/ano, para a célula dois, com 450 metros de largura, correspondendo a 5 metros de praia por ano.

Já a maior perda de material registrada foi para a célula 13, localizada na praia do Cumbuco, com uma taxa média de retirada de 29.000 m³/ano, o que corresponde a um recuo anual médio de 8 m de praia. Detectou-se ainda, perdas da ordem de 10.000 m³/ano nas células 32 e 33, situadas na praia do Pacheco e 36 e 37, em Iparana. Embora de pequena magnitude, o início da praia do Icarai também mostrou indícios de erosão, assim como os primeiros metros da praia da Tabuba. O valor obtido através da média dos volumes calculados para todas as células foi de 1.130 m³/ano negativos, ou seja, uma perda total de material entre as fronteiras do sistema - aqui representado por 40 células - de 45.000 m³ a cada ano.

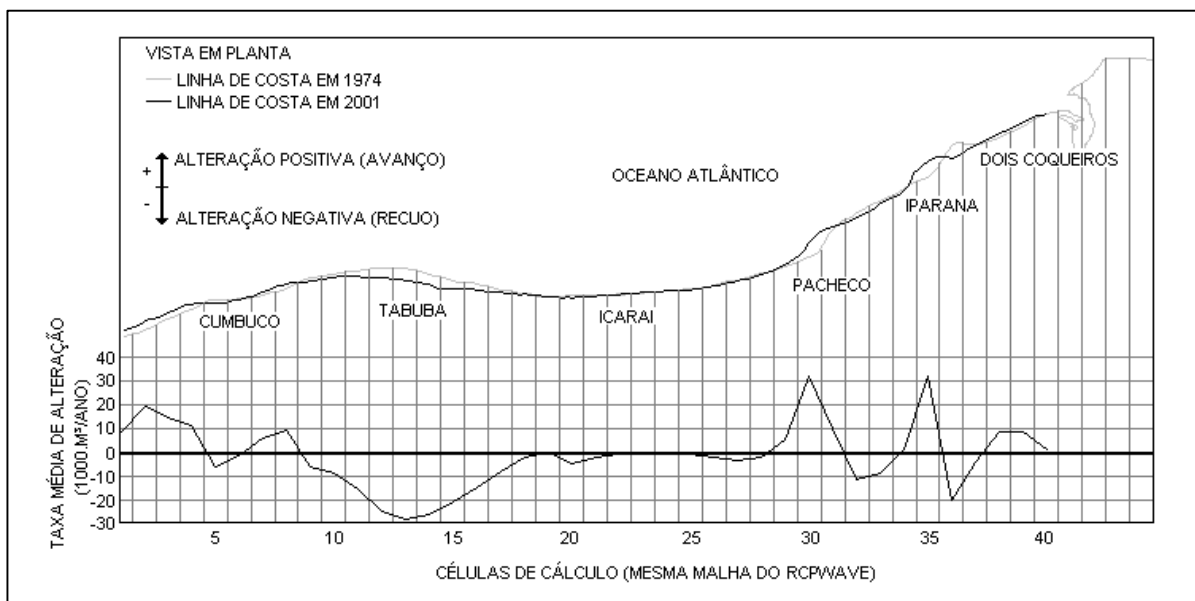


Figura 5.8. Volume médio anual de material sedimentar acumulado/retirado para os diferentes trechos nos quais a costa foi discretizada. Valores obtidos por comparação de linhas de praia de 1974 e 2001.

5.2. Taxas potenciais de transporte longitudinal

Como foi apresentado no item 4.6, a rotina NSTRAN do SMS calcula as taxas potenciais de transporte longitudinal das ondas. Estes valores são obtidos para cada célula horizontal do RCPWAVE, por este motivo, a estimativa por meio do Método do Fluxo de Energia utilizando ondas de águas profundas também foi calculada para estas divisões. Os resultados encontrados para estas diferentes metodologias estão ilustrados na Figura 5.9.

Deve-se notar que os dados de onda ao largo utilizados no cálculo do fluxo de energia corresponderam a dois conjuntos diferentes: do ondógrafo do Pecém e do OWS (como mencionado no item 4.5). Desta forma, a coerência entre os resultados viria ainda por validar a representatividade dos dados do ondógrafo, que estava sendo questionada por sua pequena duração. Em linhas gerais, ambos os conjuntos de informações seguiram as mesmas tendências, apresentando apenas, algumas modificações de magnitude, principalmente para as células mais centrais.

Apesar de sua conhecida tendência de superestimar os valores, o Método do Fluxo de Energia apresentou taxas inferiores às fornecidas pelo modelo de propagação, graças a antecipada redução do coeficiente linear K indicada no item 3.2.1 (Equação 1), que neste trabalho foi de 0,17, ou seja, 56 % menor do que o valor inicialmente proposto de 0,39.

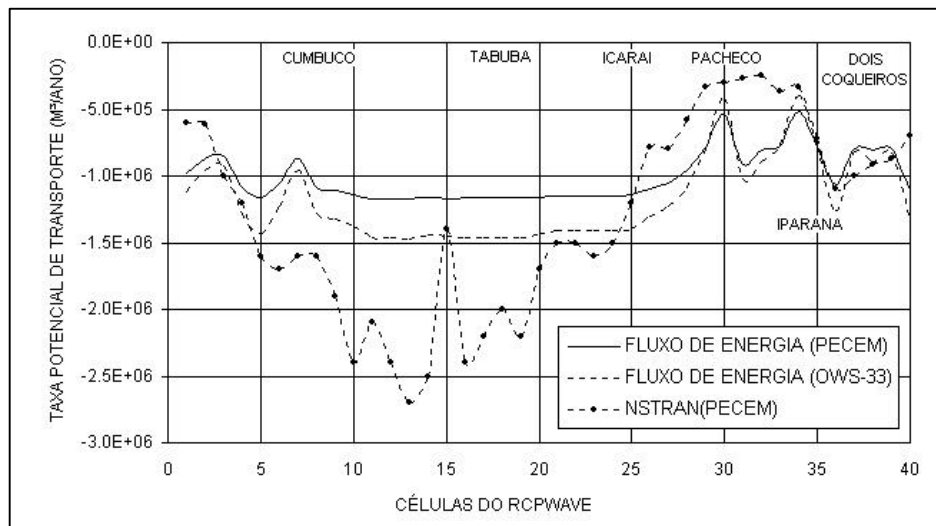


Figura 5.9. Taxas potenciais de deriva litorânea obtidas pelo Método do Fluxo de Energia com dados de ondas ao largo e pela rotina NSTRAN, com informações de ondas próximas à arrebentação.

Os dados de onda utilizados no cálculo da rotina NSTRAN foram os mesmos inseridos no modelo de propagação, logo, por motivo de estabilidade numérica deste último, direções de proveniência que indicassem uma inclinação superior a $71,57^{\circ}$ com a normal do sistema de coordenadas foram descartadas.

É interessante notar que a magnitude do potencial calculado pela rotina NSTRAN chega a ser quase 3 vezes maior que os valores obtidos pela aplicação direta do Método do Fluxo de Energia com as ondas do ondógrafo do Pecem (célula 13). De qualquer forma, estes valores são potenciais, e apesar de o programa fazer praticamente as mesmas considerações que o GENESIS para o cálculo da deriva, neste último o transporte só será representado se houver disponibilidade de material.

Mesmo tendo-se em mente que as taxas de acréscimo e retirada de material obtidas através da comparação das posições da linha de costa contemplam alterações resultantes de todos os processos atuantes nas praias, e não só a parcela longitudinal das ondas, é importante observar a coerência entre as figuras 5.8 e 5.9, indicando a importância da deriva litorânea como agente principal de modificação da costa. Entre as células 10 e 15 foram encontrados os maiores potenciais de transporte, e o fato de estas terem registrado, também, as maiores taxas de retirada de material indica que os dados teóricos estão condizentes com os obtidos pela observação direta do local.

Para o início da praia do Icarai, mais uma vez fica evidenciada a intensa transferência de sedimentos das dunas para o fluxo longitudinal da deriva litorânea, dado que embora o potencial de transporte não tenha sido nulo, como indicado nas proximidades da célula 25, as taxas líquidas de remoção de material foram muito baixas, chegando próximo de zero nas células 22, 23 e 24 da figura 5.8. Uma outra constatação, é o reduzido potencial de transporte observado em alguns pontos das praias do Pacheco e de Iparana, podendo evidenciar que nem todos os processos de estabilização do transporte nestas praias se devem a estruturas rígidas, mas sim às próprias características de incidência das ondas sobre o alinhamento atingido pela costa ao longo do tempo.

5.3. A resposta do modelo

A fase de calibração do modelo consumiu um bom tempo da pesquisa, onde foram necessárias várias simulações sob a consideração de diferentes hipóteses. O tempo médio de cada execução em um processador do tipo AMD K6-2 com 400 MHz de velocidade e 32 MB de memória RAM foi de 25 minutos. Após as simulações com o GENESIS, os dados de saída foram armazenados em arquivos no formato ASCII, de onde puderam ser manipulados para processamento em diferentes aplicativos gráficos.

A fase de calibração contou com a seguinte sistemática: inicialmente, com todos os dados necessários disponibilizados, foram realizadas as simulações para os coeficientes propostos de K_1 e K_2 iguais a 0,1. A figura 5.10 ilustra os primeiros resultados, onde os

seawalls representaram os muros verticais e os afloramentos rochosos. Em seguida, considerando-se que para estas praias, os coeficientes de calibração poderiam ser diferentes, foram realizadas outras simulações para diferentes combinações destes parâmetros, seguindo as relações indicadas no item 3.2.3, onde K_1 pode variar entre 0,1 e 0,6 e K_2 entre $0,5.K_1$ e $1,5.K_2$. As figuras 5.11 a 5.15 ilustram alguns dos resultados obtidos nesta etapa. Constatou-se que o aumento de K_1 acentuava consideravelmente as modificações observadas, e que variações para K_2 dentro dos limites previamente estabelecidos não chegaram a influir significativamente nos resultados. Assim sendo, concluiu-se que os coeficientes inicialmente propostos por Salim (1998), se mostraram os mais representativos.

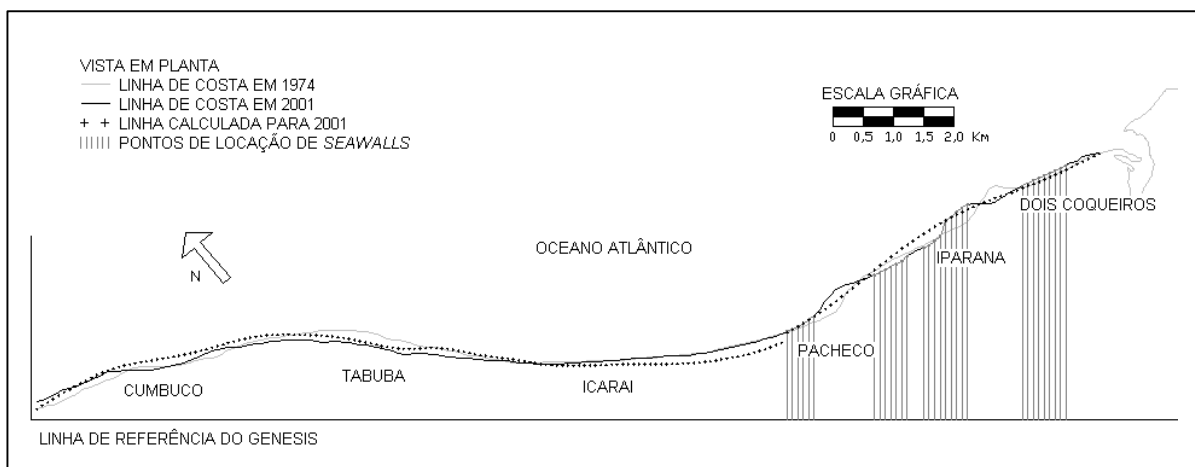


Figura 5.10. Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K_1 e K_2 iguais a 0,1 e 0,1 respectivamente.

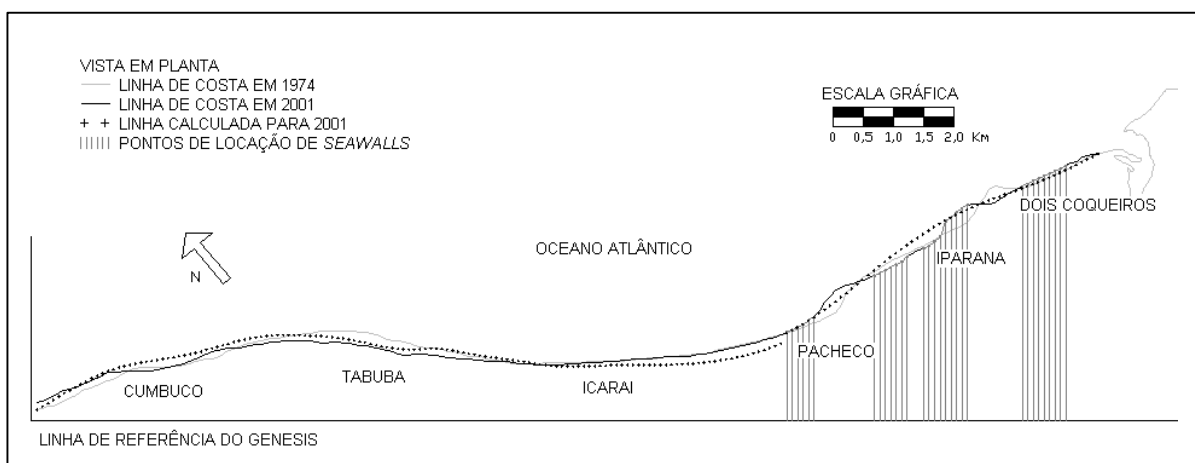


Figura 5.11. Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K_1 e K_2 iguais a 0,1 e 0,05 respectivamente.

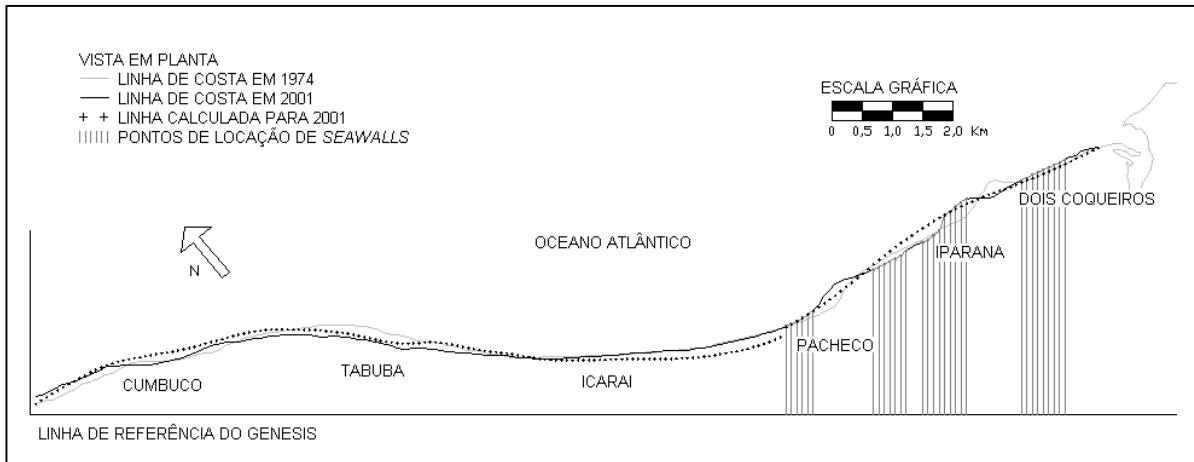


Figura 5.12. Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K_1 e K_2 iguais a 0,1 e 0,15 respectivamente.

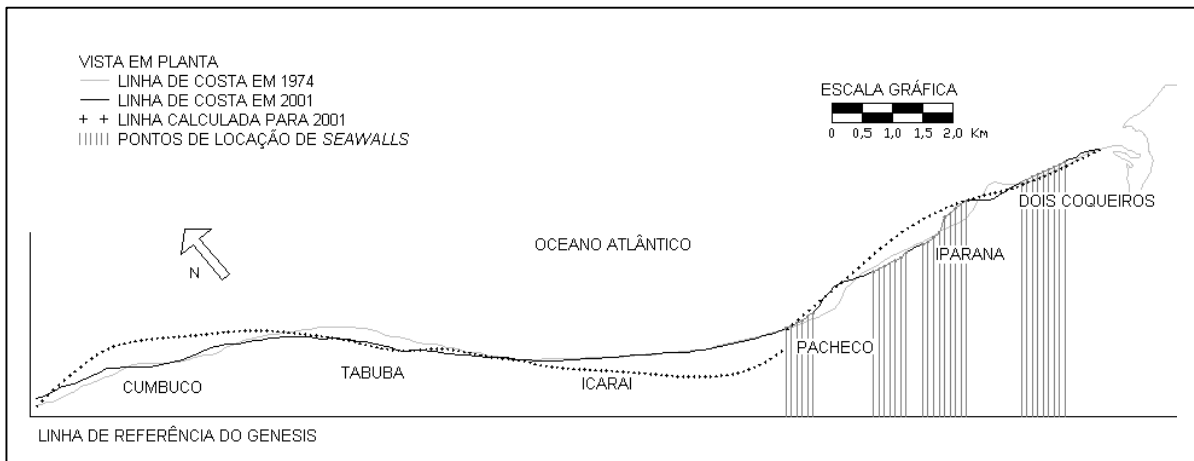


Figura 5.13. Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K_1 e K_2 iguais a 0,3 e 0,3 respectivamente.

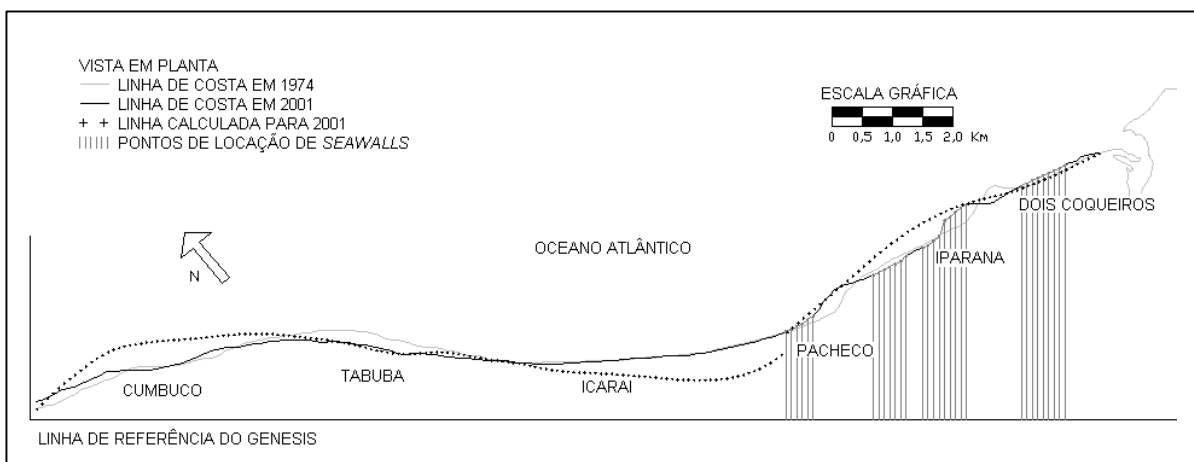


Figura 5.14. Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K_1 e K_2 iguais a 0,3 e 0,15 respectivamente.

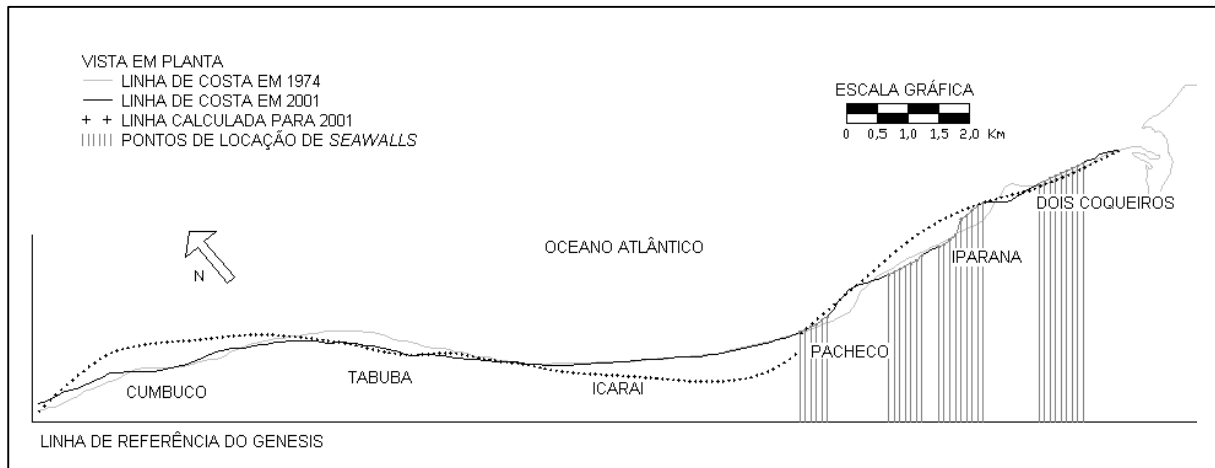


Figura 5.15. Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001, para coeficientes de calibração K_1 e K_2 iguais a 0,3 e 0,45 respectivamente.

Apesar de os coeficientes de calibração terem representado as tendências principais de evolução das praias nos trechos exclusivamente arenosos, observou-se que nos pontos onde os afloramentos rochosos aprisionaram parte do material (praias do Pacheco e de Iparana) o comportamento denotado na figura 5.10 não foi condizente com o observado. Dada a conformação variada das rochas, e a falta de conhecimento de sua extensão nas zonas submersas, as características de absorção de energia e retenção de material não poderiam ser determinadas com precisão. Assim, a sua representação através das estruturas lineares com as quais o modelo trabalha, deveria envolver a consideração de diferentes configurações e permeabilidades.

Desta forma, foram testadas algumas combinações de estruturas, até a constatação de que a inserção de espigões não-difrativos no limite a sotamar dos afloramentos representaria razoavelmente bem a influência destes na evolução da linha de costa. O melhor ajuste ocorreu com a representação de dois espigões de 3321,5 e 1952,8 metros de extensão a partir da linha de referência do modelo e situados nas células 167 e 146 e com permeabilidade nula. Este resultado está ilustrado na Figura 5.16.

É interessante salientar o recuo registrado na praia do Icarai após a retenção dos sedimentos nas praias do Pacheco e Iparana. Embora a observação dos resultados anteriores indique uma tendência do modelo a apresentar recuos neste trecho – o que pode fazer com que os valores estejam superestimados – deve-se ter em mente que a taxa de entrada de material fornecido pelas dunas não está sendo considerada nas simulações. Os recuos indicados foram da ordem de 200 metros, e com o objetivo de representar o comportamento real da área, foram introduzidas contribuições sedimentares nas células localizadas no início da praia do Icarai, justamente onde situam-se os campos de dunas indicadas na figura 5.5.

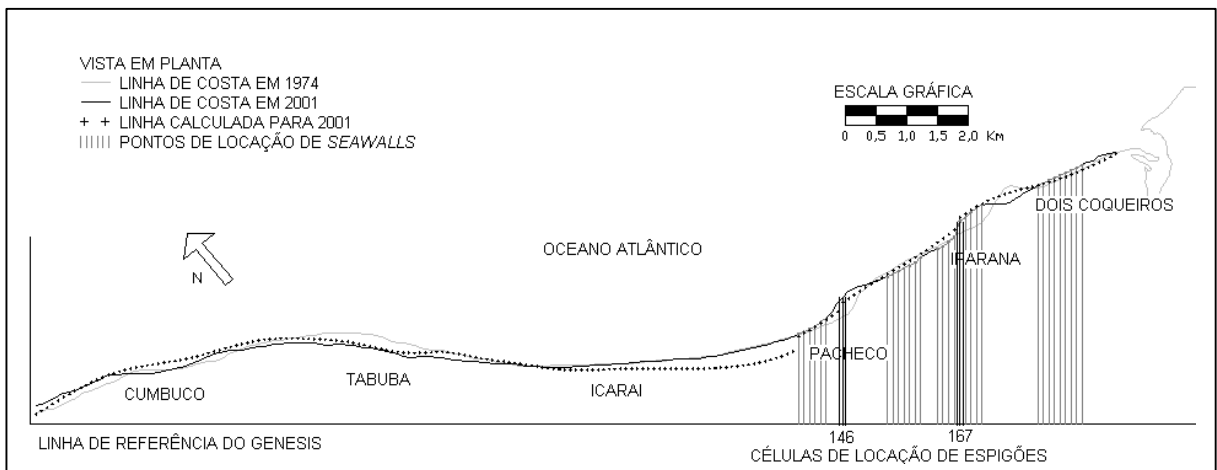


Figura 5.16. Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001 para coeficientes de calibração K_1 e K_2 iguais a 0,1 e 0,1 respectivamente. Os afloramentos rochosos foram representados por espigões não difrativos.

Diante desta condição e da falta de valores indicativos, a taxa de entrada de sedimentos foi sendo arbitrada de forma interativa até que a posição da linha de praia calculada não sofresse variação significativa em relação a posição inicial. Os valores encontrados foram da ordem de $92 \text{ m}^3/\text{m}/\text{ano}$ em média, considerando-se que o desmonte tenha se iniciado nos últimos 15 anos. Este valor pode variar um pouco para mais ou para menos, dependendo do período exato onde as ondas iniciaram a retirada de sedimentos das dunas. A Figura 5.17 traz a linha de costa gerada pelo modelo calibrado para dezembro de 2001 a partir da repetição da série temporal dos registros de onda do Pecém obtidos entre março de 1997 e janeiro de 1999 partindo da posição inicial da costa em 1974 e incluindo as considerações aqui comentadas.

As simulações revelaram ainda, a peculiaridade de um trecho de aproximadamente 1800 metros de extensão localizado na seção mais a oeste da área estudada (Praia do Cumbuco). Neste setor, todas as simulações realizadas considerando diferentes valores para os parâmetros de calibração, e até mesmo para as características físicas das praias, indicaram uma posição mais avançada do que a indicada pelo levantamento de GPS. Logo, concluiu-se que esta diferença só se justificaria diante da atuação de algum agente mobilizador de sedimentos que não estivesse sendo considerado nas hipóteses assumidas. De onde se supõe que a orientação da linha de praia neste setor faz com que o vento transporte o material sedimentar da zona de estirâncio em direção ao continente.

Para verificar a viabilidade desta hipótese, foi considerado que a linha final calculada pelo modelo seria a observada na prática, caso o transporte eólico não estivesse presente. Desta forma, a partir da comparação desta com a linha real observada em campo, seria possível estimar quantos metros de praia foram perdidos devido unicamente, à ação do vento, e conseqüentemente, o volume transportado.

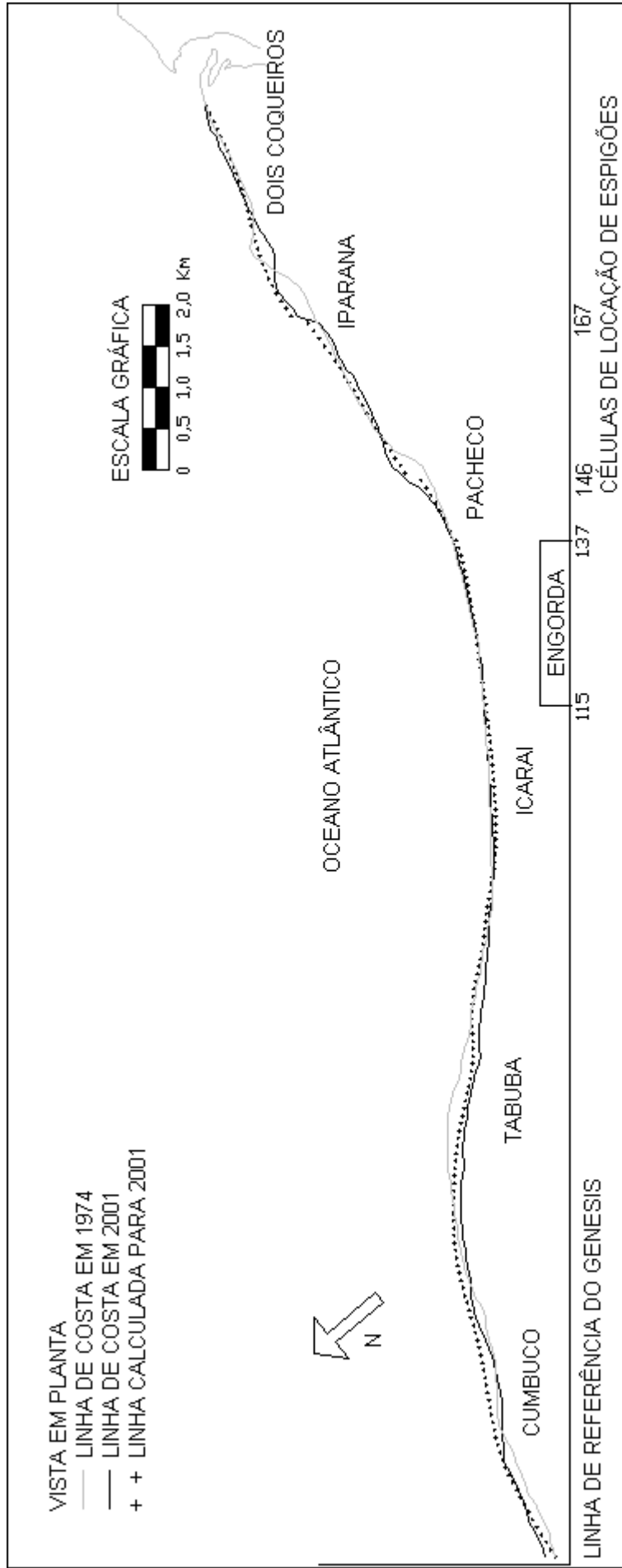


Figura 5.17. Resultado gerado pelo modelo GENESIS representando a posição da linha de costa para dezembro de 2001 para os coeficientes de calibração K_1 e K_2 iguais a 0,1. Os afloramentos rochosos foram representados por espigões não difrativos e o desmonte das dunas localizada nos primeiros quilômetros da praia do Icarai foi representado por engorda de praia.

O cálculo das áreas erodidas e a consideração de um perfil de praia constante, forneceram valores médios de transporte eólico de 32,4 m³/m/ano, variando de 6,8 a 49,2 m³/m/ano ao longo do trecho. Estes valores são compatíveis com as taxas de transporte eólico encontradas em trabalhos anteriormente realizados na área, comentado na seção 3.1.4 referente ao balanço sedimentar local. Logo, os resultados obtidos validam a possibilidade de que o recuo da linha de costa que o modelo não representou fielmente se deva, em parte, às características do alinhamento da praia que, faz com que o vento seja um agente consideravelmente importante para estes trechos.

Apesar das diferenças acima comentadas, o modelo calibrado gerou resultados que representaram as tendências gerais de evolução da linha de costa para estes 17,5 quilômetros de praias. A diferença média entre os resultados e as medições de campo foi de 68 metros, onde em 60 % do trecho total, as diferenças foram inferiores a 100 metros, e destes, 42 % foram inferiores a 50 metros. Deve-se ter em mente que diante das escalas temporal e espacial consideradas, e das limitações inerentes a representatividade dos dados de onda, e dos levantamentos da linha de costa, os resultados obtidos para o período de calibração foram satisfatórios e forneceram uma boa idéia dos diversos agentes envolvidos na área, bem como da magnitude de suas influências. Se considerarmos que somente a maré acarreta uma variação da posição de linha de costa de aproximadamente 75 metros, e que o levantamento da linha final da praia possui uma precisão de cerca de 15 metros, vemos que o modelo se mostrou consideravelmente representativo das tendências evolutivas locais.

Partindo-se dos valores obtidos para os diferentes parâmetros que caracterizariam as praias em questão durante os processos de modelagem, foi realizado, ainda, um teste de sensibilidade do modelo diante da alteração de alguns destes. O GENESIS não se mostrou sensível a pequenas variações de parâmetros como a altura da berma, a profundidade de fechamento e o diâmetro médio do material da praia.

5.4. Verificação do comportamento a médio prazo

Diante da ferramenta gerada a partir da calibração do código do GENESIS, foi realizada a extrapolação das tendências evolutivas destas praias para um horizonte de 20 anos. É claro que as considerações feitas e as limitações da metodologia devem ser consideradas e encaradas cuidadosamente na interpretação dos resultados.

O procedimento seguiu os mesmos passos descritos na metodologia, exceto para a linha de costa inicial, que ao invés da obtida para o ano de 1974, adotou-se a conformação para

2001. Os dados de onda foram então repetidos continuamente até completarem o período de 20 anos, ou seja, até se obter a linha de costa para o ano de 2021.

Os resultados estão ilustrados na figura 5.18. Dada a extensão da área e as diferentes características de alguns setores especiais, a faixa de modelagem foi dividida em 4 setores distintos, cabendo a cada um, um comentário especial.

O setor 1, que abrange a praia do Cumbuco e apresenta uma extensão de 3,5 quilômetros, representa justamente as células onde o GENESIS apresentou tendências de avanço superiores às observadas entre os anos de 1974 e 2001. Desta forma, os resultados não são plenamente confiáveis. Caso esta diferença se deva realmente às taxas observadas de transporte eólico, pode-se estimar a conformação real mais provável para 2021 considerando a linha calculada pelo modelo (que se deve exclusivamente ao transporte longitudinal) e diante das taxas estimadas para o transporte realizado pelo vento no sentido da praia para o continente, calcular o recuo médio anual destas praias.

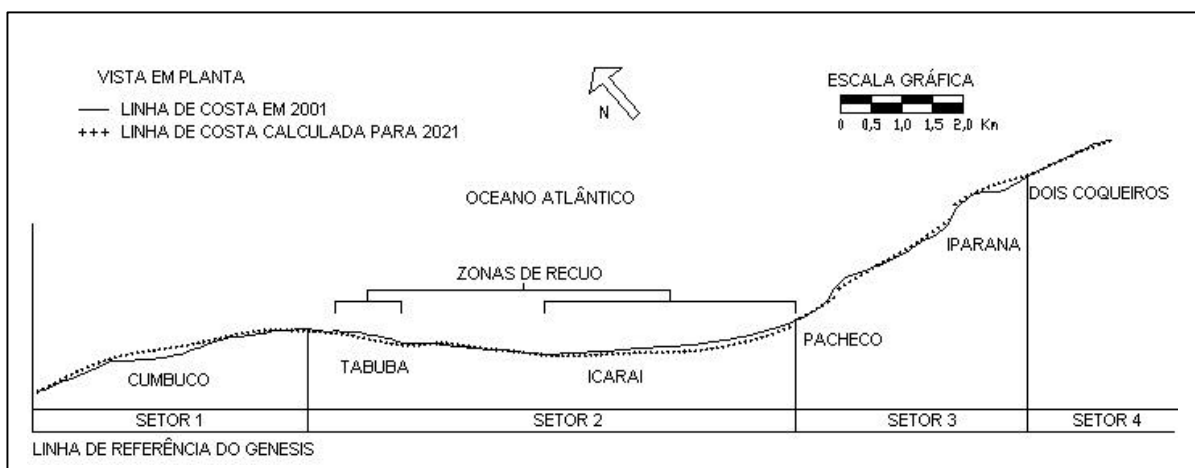


Figura 5.18. Resultados gerados pelo modelo GENESIS representando a possível posição da linha de costa em 2021.

Já o setor 2, que compreende as praias da Tabuba e do Icarai com aproximadamente 9 quilômetros de extensão, a simulação não contemplou o abastecimento de sedimentos. Dado o desconhecimento do volume de material disponível nas dunas situadas no início da praia do Icarai para os próximos 20 anos, procurou-se então criar uma envoltória para a situação mais crítica, de forma a estimar os maiores recuos aos quais as praias estariam sujeitas. Os resultados indicaram perdas da ordem de 100 metros na praia do Icarai, particularmente na área onde situa-se a sede de praia da APESC (latitude $3^{\circ}40.859'$ e longitude $38^{\circ}39.273'$), totalizando uma perda de 297.000 m² de praias. Recuos estes que se reduziram gradualmente até o início da praia da Tabuba. Esta última não sofreria modificações significativas na maior

parte de sua extensão, sendo registrado um recuo máximo de 70 metros em um trecho de aproximadamente 1,5 quilômetros no seu final.

Conhecidas as limitações do modelo para a representação dos afloramentos rochosos, os resultados relacionados ao setor 3 devem ser encarados com maior cautela. Diferentemente das simulações compreendidas entre as datas de 1974 e 2001, na de 2001 a 2021 se conhece perfeitamente a localização das estruturas rochosas e artificiais, que foram obtidas em campo. Desta forma, procurou-se representá-las como *seawalls* e espigões da mesma forma indicada na figura 5.16 afim de analisar o seu comportamento.

A observação do setor 3 – que possui uma extensão de aproximadamente 3,5 quilômetros - na figura 5.18 indica um acúmulo de material na primeira baía de Iparana, trecho localizado no limite entre esta praia e a de Dois Coqueiros. No trecho seguinte, graças à consideração dos *seawalls* nos pontos rochosos o modelo manteve a posição da linha de costa. Já no limite entre os setores 2 e 3, o modelo considerou a distribuição do material sedimentar para as praias seguintes, desfazendo parte da protuberância que ali se encontrava. É necessário considerar que a presença de afloramentos, e mesmo estruturas artificiais de proteção é bem menor nesta última fronteira, logo, existe uma real possibilidade de que nos próximos anos esta proeminência venha a ser suavizada em detrimento da transferência de seu material para as praias localizadas mais a oeste.

O último trecho, que também é o menor, com aproximadamente 1,5 quilômetros de extensão, abrange toda a praia de Dois Coqueiros. Dadas as características observadas e a significativa extensão das plataformas rochosas ilustradas na figura 5.2, o comportamento previsto pelo modelo se mostrou realista. A questão mais crítica para as edificações construídas nestas praias vem a ser a incidência das ondas em períodos de tempestade, e não um provável recuo da costa a médio prazo.

É importante salientar que esta hipótese não considera variações do nível médio do mar durante este período de 20 anos.

5.5. Redução dos impactos a médio prazo

Diante das tendências erosivas identificadas na Praia do Icarai, e que atualmente são minimizadas pelo suprimento de material estocado nos seus primeiros trechos, partiu-se para o estudo das possibilidades de intervenção para um cenário onde esta fonte não estivesse disponível. Em uma primeira análise descartou-se o uso de *seawalls*, ou estruturas que viessem a comprometer a balneabilidade destas praias, o que iria apenas repetir os problemas registrados nas praias de Iparana e Pacheco. Cogitou-se então a possibilidade de implantação

de espigões, mas por outro lado, mesmo que estas estruturas cheguem a acumular material em sua face à barlar, geralmente observa-se o agravamento da situação das praias localizadas imediatamente a sotamar. Decidiu-se então adotar uma estrutura que, ao invés de barrar o transporte de sedimentos diminuísse o poder energético das ondas incidentes sobre as praias. Assim, foram realizados alguns testes utilizando seqüências de quebra-mares destacados.

Os resultados estão ilustrados nas figuras 5.19 a 5.21. Observa-se que a solução acarreta a fixação de sedimento ao longo da praia do Icarai, mas por outro lado provoca recuos consideráveis no início da praia da Tabuba, ou seja, onde as estruturas não estão mais presentes.

As características das estruturas inseridas são bem semelhantes, todos os quebra-mares possuem 360 metros de comprimento, o que corresponde a quatro células do GENESIS. A distância em relação a linha de referência é de 1700 metros (perfazendo aproximadamente 800 metros de distância da praia) e a permeabilidade de projeto, ou seja, o percentual de energia das ondas que é transferido através deles foi estimado em 50%. Na figura 5.19, eles estão espaçados de 540 metros e o primeiro deles (mais a esquerda) têm a sua primeira extremidade na célula 102 do GENESIS, ou seja, a 9180 metros do eixo de referência. Para esta simulação, o recuo máximo registrado no final da praia do Icarai foi de 250 metros, enquanto que no início desta mesma praia registrou-se um acréscimo máximo de 195 metros. O total de perda de praias foi de 480.000 m², enquanto que a área de crescimento registrada foi de apenas 133.900 m².

Na figura 5.20, as estruturas foram dispostas com um afastamento de 540 metros, conservando a distância da costa, o comprimento e a permeabilidade, sendo que toda a seqüência de estruturas foi transladada de 1000 metros para a esquerda. Embora para esta configuração o recuo máximo tenha sido reduzido para 210 metros, a área total erodida a sotamar das estruturas foi considerável, sendo de 351.000 m², e atingiu praticamente os mesmos trechos erodidos pela configuração anterior.

Mais uma simulação foi realizada com uma nova disposição estrutural. Nesta última, o espaçamento entre os quebra mares foi aumentado para 720 metros. Com a mesma distância da linha de referência, mesma permeabilidade e mesmo comprimento. Assim como para a simulação anterior, observou-se erosão no início da praia do Icarai, indicando a necessidade de mais uma estrutura a direita. O recuo de praia na Tabuba apresentou um máximo de 190 metros, e a área de perdas foi de 315.000 m², contra um acréscimo na praia do Icarai de 113.500 m². Observa-se que apesar da redução da área erodida, esta solução ainda não contempla uma conformação satisfatória para as praias dentro de um cenário futuro.

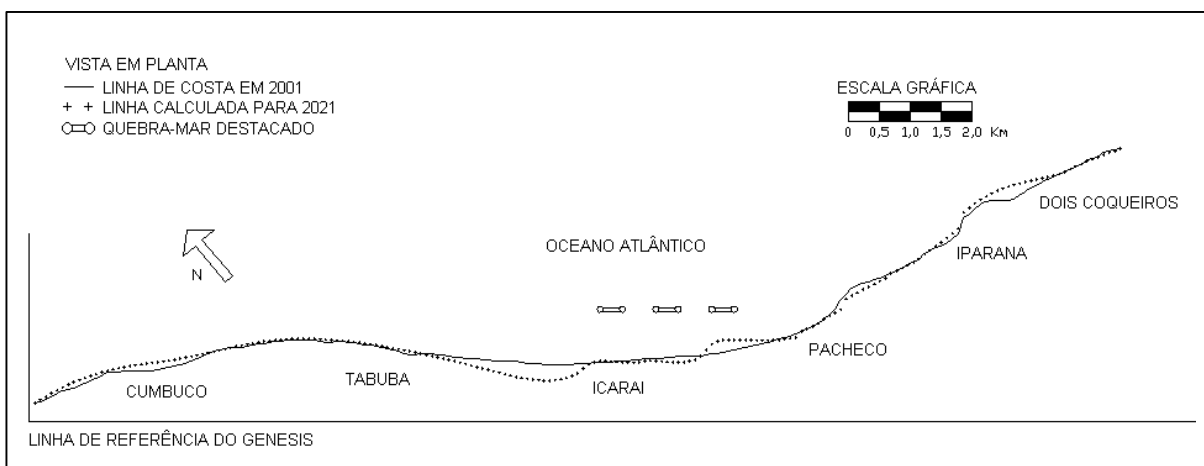


Figura 5.19. Linha de costa calculada para cenários futuros de intervenção na praia do Icarai por meio da implantação de três quebra-mares destacados com 360 metros de comprimento e distanciados 540 metros.

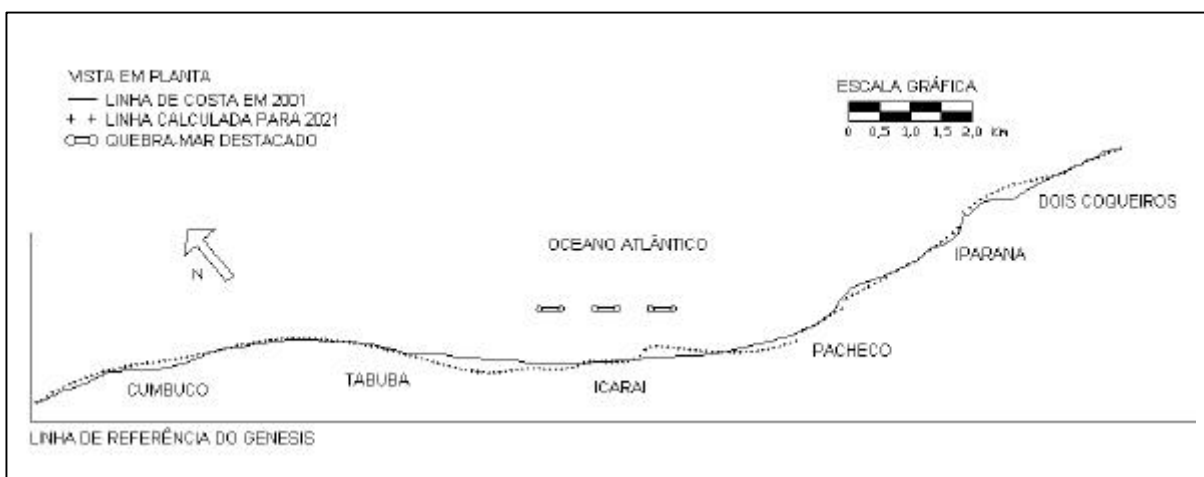


Figura 5.20. Linha de costa calculada para cenários futuros de intervenção na praia do Icarai por meio da implantação de três quebra-mares destacados com 360 metros de comprimento e distanciados 540 metros, transladados 1000 metros para a esquerda.

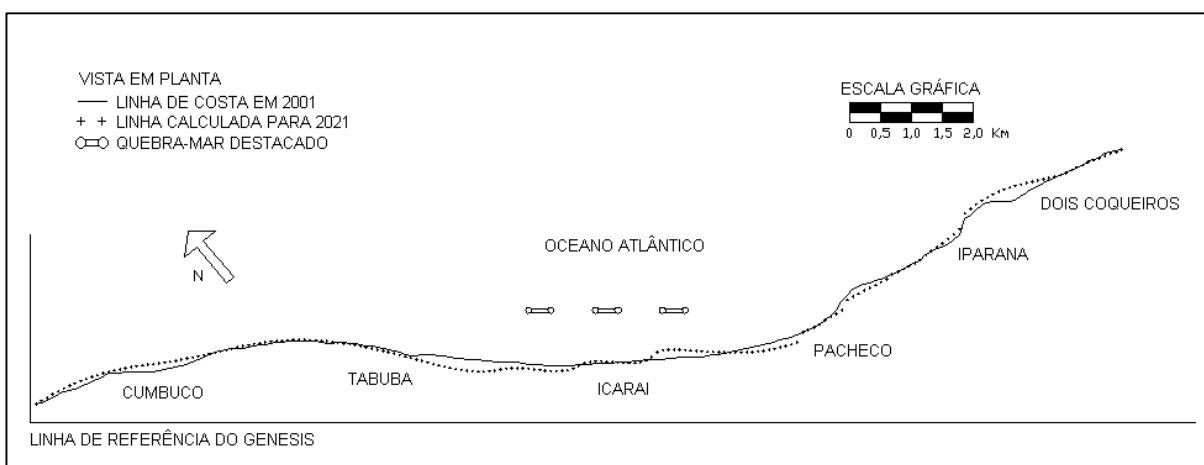


Figura 5.21. Linha de costa calculada para cenários futuros de intervenção na praia do Icarai por meio da implantação de três quebra-mares destacados com 360 metros de comprimento e distanciados 720 metros.

Para estas três simulações, a linha de referência utilizada para a obtenção dos coeficientes de transformação do RCPWAVE coincidiu com a batimétrica de -7 metros, ao invés da de -4 . Dado que a locação dos quebra-mares variou entre 4 e 6 metros.

Diante dos resultados observados, conclui-se que o problema das praias é realmente o déficit sedimentar, e que qualquer solução que venha a reter material em algum ponto - mesmo que simplesmente por meio da redução do potencial energético das ondas - só viria à agravar a situação desta costa. Compilando as observações e ponderações realizadas ao longo do processo de diagnóstico e modelagem desta área, conclui-se que a melhor solução para o problema de recuo de linha da praia ao qual estas praias estão submetidas é o seu preenchimento artificial com material de granulometria semelhante. Tal estoque está disponível em abundância no banco formado em frente a cidade de Fortaleza, justamente devido a quebra do caminhamento normal dos sedimentos que se deu com a construção do Porto do Mucuripe. Logo, uma obra de engorda artificial, realizada nos primeiros quilômetros da praia do Icarai, daria continuidade ao processo de abastecimento realizado pelas ondas, e sem maiores conseqüências negativas, proporcionaria a manutenção da posição destas praias e das edificações ali construídas.

As taxas deste preenchimento serão similares às de desmonte das dunas calculadas no item 5.3, no entanto não serão as mesmas, dado que o abastecimento por parte das dunas se dá de forma contínua, enquanto que a atividade de engorda se dará em períodos fixos e curtos, que vão variar de acordo com a frequência de manutenção. Como ponto de partida para as simulações, considerou-se o preenchimento sendo executado entre as células 122 e 133, que situam-se a 10.980 e 11.970 metros do eixo de referência, contemplando uma faixa de praias de um quilômetro de extensão, e tendo como coordenadas iniciais: 537.588 E 9.592.355 N e finais: 538.346 E 9.591.719 N. Considerou-se ainda, que a engorda seria realizada a cada 5 anos e as obras durariam 2 meses cada. A figura 5.22 ilustra a conformação destas praias para o ano 2021 para engordas realizadas em 2001, 2006, 2011 e 2016, contemplando um aumento de 40 metros na praia, ou um volume de 322.800 m³ para cada uma das quatro engordas.

É interessante observar que este tipo de solução não traz impactos negativos para as áreas adjacentes, pois não cria pontos concentrados de erosão a sotamar de sua implantação. Na verdade, a deriva litorânea tende a distribuir o material para as praias próximas. Segundo a extrapolação realizada pelo modelo, o recuo médio observado foi de 37 metros, com um máximo de 60 metros, e redução das perdas para 130.500 m² de praias para dezembro de 2021, ou seja, nos período onde deveria ser realizada outra engorda. Assim sendo, pode-se limitar a distância de 100 metros do nível médio do mar como mínima para que não sejam realizadas construções nestas praias. A comparação da figura 5.22 com a 5.18 evidencia ainda

a redução dos recuos médios para os trechos mais erodidos, que agora passam a ser controlados. Outro fato a ser analisado é a preservação das dunas que atualmente estão sendo desmontadas e a preservação das edificações localizadas nas praias próximas.

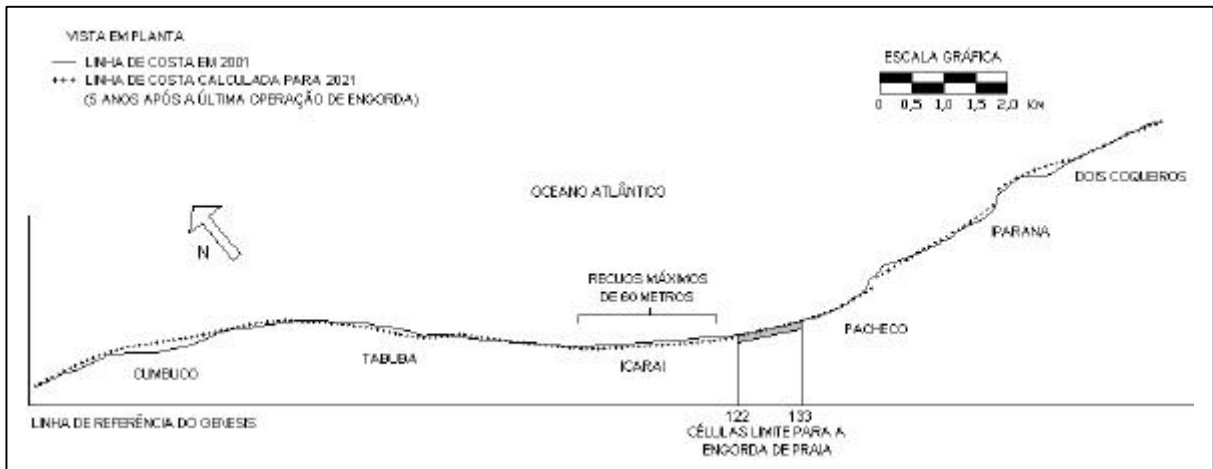


Figura 5.22. Linhas de costa calculadas para cenários futuros de intervenção na praia do Icarai por meio de engorda artificial. Resultado ilustrativo da posição da praia 5 anos depois da última operação de engorda.

Os resultados comentados se referem ao período de maior recuo, justamente por perfazer 5 anos após a última operação de engorda. Em um outro extremo, temos na figura 5.23 a posição da linha de praia exatamente após um destes períodos de engorda, em fevereiro de 2017. O recuo médio experimentado por estas praias seria de 20 metros com máximo de 50 metros, mostrando-se bastante inferior ao recuo médio estimado para o caso da ausência de suprimento por parte das dunas, que foi de 72 metros, com máximos superiores a 100 metros. Com o tempo, o material que foi adicionado será distribuído, as zonas de maior recuo sofrerão um acréscimo, e voltarão a recuar até a próxima engorda.

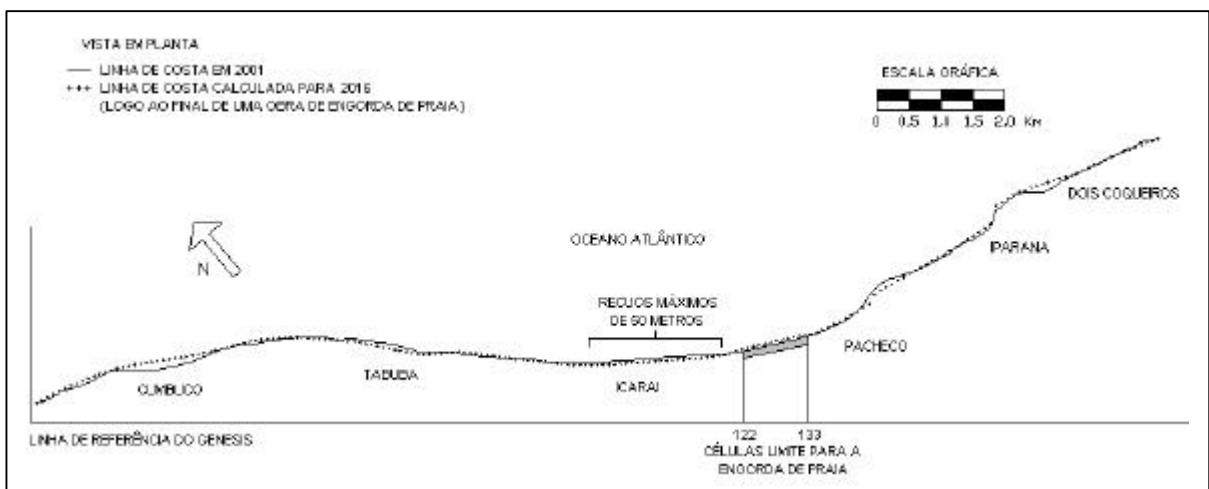


Figura 5.23. Linhas de costa calculadas para cenários futuros de intervenção na praia do Icarai por meio de engorda artificial. Resultado ilustrativo da posição da praia logo após uma operação de engorda.

A vantagem de se adotar um sistema de reabastecimento para estas praias consiste em se passar a ter o controle destas taxas de recuo. Caso se deseje reduzir ainda mais os recuos máximos, deve-se aumentar o volume de sedimento a ser introduzido, que já não é pequeno, dada a extensão da área adjacente a ser abastecida.

Para estas simulações, considerou-se ainda que o material das dunas situadas no trecho das obras não entraria no balanço realizado para os próximos 20 anos, de forma a preservar estes ecossistemas. Mais uma vez o cálculo foi realizado a favor da segurança. Deve-se notar que as taxas de abastecimento devem vir a ser diferentes caso seja dada continuidade no processo cíclico de engorda destas praias, pois o clima de ondas e mesmo o nível médio do mar podem vir a sofrer modificações ao longo do tempo.

A viabilidade do projeto é evidenciada tanto pelos reduzidos impactos negativos que este traria para a região, quanto pela localização da área fonte, que estaria a menos de 15 quilômetros do ponto de despejo, a uma profundidade de aproximadamente 10 metros e consiste em um depósito de material de granulometria compatível com a existente nas praias a serem supridas, que surgiu devido a quebra do fluxo normal de sedimentos ao longo da Ponta do Mucuripe, em Fortaleza. A figura 5.20 ilustra a disposição tanto da área fonte como da área de despejo.

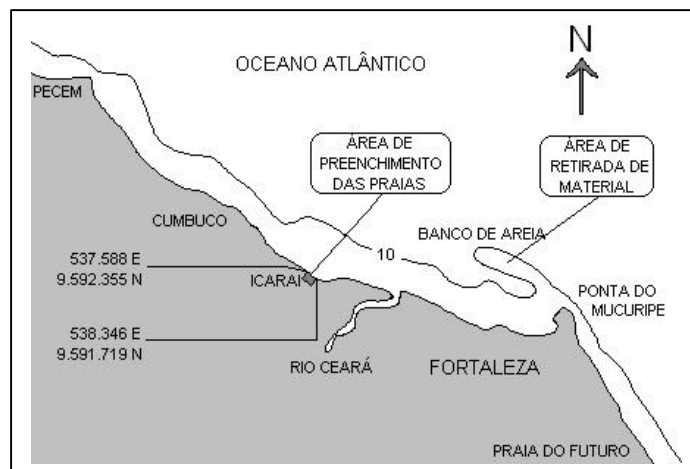


Figura 5.24. Disposição da área fonte e do local a ser realizada a engorda de praia.

Obviamente, os resultados obtidos nas simulações para períodos futuros, devem ser encarados com reservas. As tendências apresentadas pelo modelo GENESIS devem ser consideradas como uma estimativa, com incertezas, à auxiliar na tomada de decisões. Além das incertezas dos parâmetros empiricamente calculados ou medidos, existe também incertezas na série histórica dos parâmetros ondulatórios, nos modelos de propagação das ondas e na formulação matemática através de um sistema bidimensional.

As simulações realizadas sugerem um plano de controle de erosão voltado principalmente para a praia do Icarai. Um maior conhecimento dos parâmetros atuantes na região, como um todo, podem fornecer condições para a formulação de um plano mais abrangente. De qualquer forma, a ideia de se estipular envoltórias de controle ao longo linha de praia a serem regidas por um processo contínuo de manutenção de reserva sedimentar se mostrou uma solução compatível com a realidade local.

Caso venha a ser adotada a sistemática de reposição artificial de sedimentos para estas praias, deve ser implantada uma sistemática de coleta de dados específicos na área, tais como a utilização de séries mais extensas do clima de ondas, o resgate de informações relativas à posição da linha de costa para outros períodos - de forma que o modelo possa ser testado para estas novas conformações - e dados mais atuais sobre a conformação do fundo.

6. Conclusões e recomendações

Neste trabalho foi realizado o estudo das praias localizadas a oeste da cidade de Fortaleza, analisando as características de sua evolução e os agentes responsáveis pelas modificações ocorridas ao longo do tempo. É inegável a importância da construção do Porto do Mucuripe e da urbanização da orla da capital cearense na intensificação dos processos erosivos que atuam sobre a região estudada. Por outro lado, a fixação das dunas e a construção de estruturas de proteção nestas últimas, acarretaram a transferência gradual dos problemas de recuo da linha de costa para as praias adjacentes no sentido leste-oeste, atingindo diretamente os primeiros 12 km de praias localizadas na margem direita do Rio Ceará.

Diante dos objetivos do trabalho e dos resultados nele obtidos, a partir de uma análise global com o auxílio da ferramenta da modelagem numérica, pode-se concluir que:

- A modelagem dos primeiros 20 km de praias localizadas a oeste da cidade de Fortaleza gerou bons resultados dentro de uma margem de erro aceitável, diante das limitações embutidas nos dados de entrada e nas próprias simplificações assumidas nas rotinas do programa;
- O modelo GENESIS mostrou-se eficiente na representação de afloramentos rochosos por meio das estruturas lineares disponíveis em seu código;
- O modelo contribuiu de forma significativa para a organização e avaliação dos parâmetros observados e estimados para a região, além de definir os locais e agentes que necessitam de maior observação de campo, de maneira a permitir melhor precisão na quantificação dos processos existentes;
- Parte das diferenças apresentadas pelo modelo na conformação final da praia, pode dever-se a não representação da maré, que para esta região possui amplitudes significativas;
- O transporte longitudinal de sedimentos é, sem dúvida, o principal agente modelador desta região, dado que os seus potenciais calculados são perfeitamente coerentes com as modificações observadas a longo prazo;
- Um intenso desmonte das dunas localizadas nos primeiros quilômetros da praia do Icarai têm reduzido o déficit sedimentar das praias vizinhas. Por outro lado, constatou-se uma significativa retirada de sedimentos na praia do Cumbuco que provavelmente se deve ao transporte eólico, que dadas as características de alinhamento da praia leva material da zona de estirâncio até o interior do continente;

- Simulações realizadas para um cenário futuro indicaram recuos máximos da ordem de 100 metros nas praias do Icarai e Tabuba. Já nos trechos onde o afloramento de rochas de praia e as estruturas de fixação da linha de costa estão presentes, como em Dois Coqueiros, Iparana e Pacheco, pouca modificação foi observada, exceto no limite destas duas últimas praias, situado a sotamar do Muro de Iparana;
- Dada a falta de suprimento sedimentar através da fronteira direita do sistema, ou seja, no limite mais a leste, e a unidirecionalidade da deriva litorânea, a implementação de estruturas rígidas ao longo da zona de surfe (sejam paralelas ou perpendiculares) com o intuito de reter sedimento não apresentaria um bom desempenho, ocasionando intensificação dos recuos nas áreas à sotamar das mesmas;
- A execução de um plano de manutenção destas praias através da realização de obras de engorda artificial em um trecho de aproximadamente 1 km de extensão situado no início da praia do Icarai com material dragado do banco formado próximo à orla de Fortaleza apresentou-se como a melhor forma de controlar os recuos de praia previstos para cenários futuros;
- Os resultados obtidos nas simulações, devem ser encarados com reservas. As tendências apresentadas pelo modelo GENESIS devem ser consideradas como uma estimativa no auxílio às tomadas de decisões. Além das incertezas dos parâmetros empiricamente calculados ou medidos, existe também incertezas na série histórica dos parâmetros ondulatórios, nos modelos de propagação das ondas e na formulação matemática através de um sistema bidimensional.

Para trabalhos futuros na área, são feitas algumas recomendações:

- 1 – Uma melhor caracterização do clima de ondas local. Atualmente, o ondógrafo do Pecém já possui uma série mais extensa, o que pode fornecer base para resultados mais precisos em futuras simulações;
- 2 – Resgate e realização de levantamentos para posicionamento da linha de costa na região, bem como das características atuais da batimetria, de forma que se gere dados em escalas mais precisas;
- 3 – Realizar estimativas a partir de observações de campo, das taxas reais de transporte eólico e de desmonte de dunas para as praias da região;

- 4 – Estudo de formas de controle da linha de costa utilizando em conjunto obras de engorda artificial e estruturas perpendiculares, com o intuito de aumentar o período de manutenção daquelas primeiras;
- 5 – Verificar e validar o modelo para períodos distintos para que se possa avaliar sua capacidade de previsão na evolução da linha de praia e representatividade do transporte litorâneo;
- 6 – Uso de outros modelos de evolução da linha de praia afim de comparar a qualidade dos resultados assim obtidos.

7. Referências Bibliográficas

ACCETTA, D., VARGAS, B. M., DIAS, W. S. S., PINTO, A. P. S., MARTINS, L. A. B., SANTOS, ELFRINK, B., PITOMBEIRA, E. S. 1997. Repercussões na linha de costa decorrentes da implantação do terminal off-shore de Pecém/Ceará, através de modelagens numéricas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, 1997, Vitória, ES. Anais. São Paulo: ABRH. V.4, p 455-462.

ALMEIDA, L. E. S. B., ROSAURO, N. L., TOLDO, E. E., GRUBER, N. L. S. 1999. Avaliação da profundidade de fechamento para o litoral norte do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 1999, Belo Horizonte, MG. Anais. Belo Horizonte: ABRH. 1CD.

BENDAT J. S. 1986. Random Data: analysis and measurement procedures. 2nd ed. Nova York: John Wiley.

CASSAR, J. C. M. 1993. Modelo N-isóbatas para evolução de praias. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Danish Hydraulic Institute. 1997a. Litpack - User's guide and reference manual. CD-ROM/Manual – DHI. Dinamarca. 1CD.

Danish Hydraulic Institute. 1997b. Mike 21 - User's guide and reference manual. CD-ROM/Manual – DHI. Dinamarca. 1CD.

DAVIS, A. D., HAYES M. O. 1983. What is a wave-dominated coast ? International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics, Amsterdam, V.60, pp 313-329.

DEAN, R. G. 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Newark: Department of Civil Engineering, University of Delaware. (Ocean Engineering Report, No. 12).

FRANCO, A. S. 1964. Livro texto de marés: Curso de hidrografia para oficiais. Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação.

GRAVENS, M. B. 1992. User's guide to the Shoreline Modeling System (SMS). Viksburg: Coastal Engineering Research Center. (Instruction Report CERC-92-1).

GOULAY, M. R. 1982. Nonuniform alongshore currents and sediment transport – a one dimensional approach, Report Rep. No. CE31, Dept. of Civil Engineering, University of Queensland, Australia, 67p..

HANSON, H., KRAUS, N. C. 1986. Forecast of shoreline change behind multiple coastal structures. Coastal Engineering in Japan, vol 29, p. 195-213.

HANSON, H. 1987. GENESIS A Generalized Shoreline Change Numerical Model for Engineering Use. Report No. 1007, Departament os Water Resources Engineering, University of Lund, Lund, Sweden.

HANSON, H., KRAUS, N. C. 1989. GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. Technical Report CERC-89-19, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center. Vicksburg, Ms.

HOGBEN, N., LUMB, F. E. 1967. Ocean Wave Statistics. London: National Physical Laboratory. Ministry of technology.

KRAUS, N. C., ISOBE, M., IGARASHI, H., et al. 1982. Field experiments on longshore sand transport in the surf zone. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 18, 1982. Proceedings..., ASCE, p. 969-988.

KRAUS, N. C., HARIKAI, S. 1983. Numerical model of the shoreline change at Oarai Beach. Coastal Engineering, 7(1983) 1-28. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam.

KRAUS, N. C., HANSON, H., HARIKAI, S. 1984. Shoreline change at Oarai Beach, Japan – past, present and future. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 19, 1984, Houston. Proceedings, ASCE, p. 2107-2123.

LIMA S. F. 1999. Avaliação da Eficiência das Estruturas de Proteção Costeira Implantadas nas Praias do Município de Caucaia/Ceará: Relatório de Graduação. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará.

MAGALHÃES, S.H.O. 2000. Estudo morfodinâmico e impactos ambientais na linha de praia dos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante- CE. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife

MELO, E., ALVES, J.H.G.M., JORDEN, V., ZAGO F. e DIAS W.S.S. 1995. Instrumental Confirmation of the Arrival of North Atlantic Swell to the Ceará Coast. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PORT AND COASTAL ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 4., 1995, Rio de Janeiro. Proceedings. Rio de Janeiro. pp 1984-1996.

OZASA, H., BRAMPTON, A. H. 1980. Mathematical modelling of beaches backed by seawalls, Coastal Engineering, Amsterdam, V. 4, N. 1, pp. 47-64.

PITOMBEIRA, E. S. 1976. Deformação das ondas por difração no molhe do Porto do Mucuripe (Fortaleza – Ceará – Brasil). Fortaleza: Laboratório de Ciências do Mar/ Universidade Federal do Ceará.

PERNARD-CONSIDÉRE, R. 1956. Essai de théorie de l'évolution des forms de rivage en plages de sable et de galets. In: 4ème Journées de l'Hydraulique, Les Energie de la Mer, Question III, Rapport No. 1, p. 289-298.

PRESTIL, A. C. 1994. Modelado del transporte longitudinal de sedimentos: aplicacion a la costa catalana. Tese (Doutorado) - Universidade Politécnic de Catalunya, Barcelona.

SALIM, L. H. 1998. Implementação do modelo numérico de evolução de praia – GENESIS – em um trecho litorâneo da cidade de Fortaleza – Ceará. 167f. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, A. C. 1984. Estabilidade e Morfologia dos Contornos Litorâneos a Partir de Levantamento sedimentológico na Região de Fortaleza – CE. Afro-America Gloss News, São Paulo, Edição 3(2), 1999. Disponível em: <http://www.mares.io.usp.br/41o5.html>. Acesso em 10 de Ago. 2001.

TRUCCOLO, E. C. 1998. Maré meteorológica e forçantes atmosféricas locais em São Francisco do Sul – S.C. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1984. Shore protection manual. Fort Belvoir: Coastal Engineering Research Center. 3v.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1985. Sediment size and fall velocity effects on longshore sediment transport. Fort Belvoir: Coastal Engineering Research Center.

VALENTINI, E., ROSMAN, P. C. C., 1992. Erosão costeira em Fortaleza. Revista Brasileira de Engenharia, Vol 10, No. 1, pp. 19-36.

VALENTINI, E., ROSMAN, P. C. C., 1993. Subsídios técnicos para o gerenciamento costeiro no Ceará. X Simpósio Brasileiro de Recursos, Anais 2, pp. 51-60. Gramado.

Apêndice A

Rotina de interpolação dos dados de onda

```

Dim Hora(5718), Dir(5718), T(5718), Hs(5718) As Currency
Dim Horaout(5443), Dirint(5443), Tajus(5443), Tint(5443), Hsint(5443), interout As Currency
Open "Arquivo1.txt" For Input As #1
Input #1, s$, s$, s$, s$, s$
For i = 1 To 5718
  Input #1, Hora(i), Dir(i), T(i), Hs(i)
Next i
Close #1
Rem *****
Rem * Intervalo de interpolacao (interout) = 3horas *
Rem * Numero final de pontos = 5443 *
Rem *****
interout = 3
For i = 1 To 5443
  Horaout(i) = (i - 1) * interout
  For a = 1 To 5718
    If Horaout(i) < Hora(a) And Horaout(i) >= Hora(a - 1) Then
      Dirint(i) = ((Dir(a) - Dir(a - 1)) * (Horaout(i) - Hora(a - 1))) / (Hora(a) - Hora(a - 1)) + Dir(a - 1)
      Hsint(i) = ((Hs(a) - Hs(a - 1)) * (Horaout(i) - Hora(a - 1))) / (Hora(a) - Hora(a - 1)) + Hs(a - 1)
      Tint(i) = ((T(a) - T(a - 1)) * (Horaout(i) - Hora(a - 1))) / (Hora(a) - Hora(a - 1)) + T(a - 1)
      GoTo 10
    End If
  Next a
10 Next i
Open "c:\ondasout.csv" For Output As #1
Print #1, "Hora, Direcao, T, Hs"
For i = 1 To 5443
  Print #1, Horaout(i); ", "; Dirint(i); ", "; Tint(i); ", "; Hsint(i)
Next i
Close #1

```

Apêndice B

Rotina de classificacao das ondas em categorias estabelecidas

```

Dim Dirint(5443), Tint(5443), Hsint(5443) As Currency
Dim Tmed, Dirmed As Currency
Dim Dircat(181), Tcat(100), contado(180, 99) As Currency

Open "c:\ondasout.csv" For Input As #1
Input #1, s1$, s2$, s3$

Rem *** Referenciamento dos angulos das ondas à normal a linha de costa

For i = 1 To 5443
Input #1, Tint(i), Hsint(i), Dirint(i)
  If Dirint(i) > 40 And Dirint(i) <= 220 Then Dirint(i) = -(Dirint(i) - 40)
  If Dirint(i) > 0 And Dirint(i) <= 40 Then Dirint(i) = 40 - Dirint(i)
  If Dirint(i) > 220 And Dirint(i) <= 360 Then Dirint(i) = 400 - Dirint(i)
Next i
Close #1

Rem *** Classificacao de direções de 90 a -90 com precisão de 2 Graus ***
Rem *** Classificacao de periodos de 2.5 a 22 com precisão de 1 segundo ***

For i = 1 To 91
  Dircat(i) = 90 - (i - 1) * 2
Next i
For i = 1 To 40
  Tcat(i) = 2 + (i - 1) * 1
Next i
For b = 1 To 180
  For c = 1 To 99
    contado(b, c) = 0
  Next c
Next b

Open "Ondasclas.csv" For Output As #1
Fora = 0
For a = 1 To 5443
Achou = 0
  For b = 1 To 180
  If Dirint(a) <= Dircat(b) And Dirint(a) > Dircat(b + 1) Then
    For c = 1 To 39
    If Tint(a) >= Tcat(c) And Tint(a) < Tcat(c + 1) Then
      contado(b, c) = contado(b, c) + 1
      Tmed = (Tcat(c) + Tcat(c + 1)) / 2
      Dirmed = (Dircat(b) + Dircat(b + 1)) / 2
      Print #1, Tmed; ", "; Hsint(a); ", "; Dirmed
      Achou = 1
      GoTo 20
    End If
    Next c
  End If
  Next b
20 If Achou = 0 Then

```



```

Print #1, "-99.9, 0, 0"
Fora = Fora + 1
End If
Next a

Print #1, "Frequencia, Periodo, Direcao"
For b = 1 To 180
  For c = 1 To 39
    Tmed = (Tcat(c) + Tcat(c + 1)) / 2
    Dirmed = (Dircat(b) + Dircat(b + 1)) / 2
    If contado(b, c) <> 0 Then Print #1, contado(b, c), Tmed, Dirmed
  Next c
Next b
Print #1, ""
Print #1, "Fora (5, 0, 0): "; Fora

For b = 1 To 180
  For c = 1 To 39
    Tmed = (Tcat(c) + Tcat(c + 1)) / 2
    Dirmed = (Dircat(b) + Dircat(b + 1)) / 2
    If contado(b, c) <> 0 Then Print #1, "WAVCOND    1.0    "; Tmed; Dirmed; "0    NO"
  Next c
Next b
Close #1

```