

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DE EVOLUÇÃO DE PRAIA - GENESIS

- EM UM TRECHO LITORÂNEO DA CIDADE DE FORTALEZA - CEARÁ

LÉCIO HANNAS SALIM

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.

Porto Alegre, Julho de 1998



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

RESULTADO DO EXAME DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TÍTULO: IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DE EVOLUÇÃO DE PRAIA -
GENESIS - EM UM TRECHO LITORÂNEO DA CIDADE DE FORTALEZA, CE.

MESTRANDO: LÉCIO HANNAS SALIM

INGRESSO: 1993/1

ORIENTADOR: Prof. Luiz Emílio Almeida

CO-ORIENTADOR:

MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA:

NOME	ASSINATURA	CONCEITO
Profª Edith Beatriz Camaño Schettini		A
Prof. Elírio Ernestino Toldo Junior		A
Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres		A

CONCEITO FINAL: A

Porto Alegre, 22 de julho de 1998.

Ao Presidente da Banca Examinadora:

Elimine uma das alternativas a baixo.

1. Este documento é **provisório**. O mestrando tem 60 dias para apresentar as correções solicitadas pela banca, ao final do qual se expira a validade do mesmo.
2. Este documento é **definitivo**. O mestrando satisfaz as exigências da banca e o seu trabalho não tem correções a serem feitas.

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^o. Dr. Luíz Emílio Sá Brito de Almeida da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação, especialmente:

Ao Prof^o. Dr. Luíz Emílio Sá Brito de Almeida, orientador desta dissertação.

À Direção do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN, que permitiu minha participação no Curso de Pós-Graduação além de fornecer recursos humanos e materiais para a realização deste trabalho.

A todos os Professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas/ UFRGS, responsáveis por minha formação nessa área.

Ao colega M. Sc. Jefferson Vianna Bandeira, pelo incentivo dado durante o Curso de Pós-Graduação e na execução deste trabalho, e pelo auxílio no resgate da história de Fortaleza.

Ao colega M. Sc. Virgílio Lopardi Bomtempo, pelas contribuições técnicas e auxílio na preparação do texto na língua inglesa relacionado a este trabalho.

Aos colegas M. Sc. Alberto Avellar Barreto, M. Sc. Arivaldo Moraes do Sacramento, M. Sc. Carlos Alberto de Carvalho Filho, M. Sc. Cláudio Costa Camargo, Dr. Jorge Uemura e à Eng^a Maria Léa Machado, pelo apoio na área de informática.

Ao Prof^o. Erasmo da Silva Pitombeira, da Universidade Federal do Ceará, à Prof^a. Enise Valentini, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, e ao M. Sc. Otávio Eurico de Aquino Branco, colega do CDTN, pelo apoio no resgate dos trabalhos sobre a região litorânea de Fortaleza.

Ao Pesquisador Mark B. Gravens, do Coastal Engineering Research Center - CERC/USA, pela atenção e presteza no envio do modelo GENESIS.

À Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN, em especial à Tenente Ana Cláudia de Paula.

À Comissão Examinadora, constituída pela Prof^a Edith Beatriz Camaño Schettini, Prof. Elírio Ernestino Toldo Junior e Prof. Luíz Augusto Magalhães Endres, pelas preciosas contribuições.

À Secretaria de Desenvolvimento Urbano do Estado do Ceará - SEDURB, em especial à Bibliotecária Fátima Maria Lima Peixe.

Ao Instituto de Planejamento Municipal de Fortaleza - IPLAM, em especial à Arquiteta Vera Feijão e ao Prof^o. Ércio Flávio.

À Companhia Docas do Ceará - CDC, pela disponibilização dos dados de onda.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao estagiário Fabiano Guilherme de Souza, pelo auxílio na digitação dos dados de onda.

À Jacinta Maria de Souza pelo apoio na digitação deste trabalho.

A todos os funcionários e colegas do IPH.

Ao Lúcio do Cavaquinho e Jussara, pela carinhosa acolhida durante minha estadia em Porto Alegre.

À minha filha Ione

**IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DE EVOLUÇÃO DE PRAIA -
GENESIS - EM UM TRECHO LITORÂNEO DA CIDADE DE FORTALEZA -
CEARÁ**

Resumo

O modelo **GENESIS**, associado ao modelo de propagação da onda - **RCPWAVE**, constituem o sistema de modelagem da linha de praia adotado pelo **CERC (COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER)**, U.S.A., para aplicações em costa aberta, em regiões sujeitas às intervenções humanas através de obras civis e atividades como “by-pass” de sedimentos e engordamento artificial de praia.

A implementação do modelo numérico de evolução da linha de praia- **GENESIS** tem como objetivos a sua calibração em um trecho litorâneo da cidade Fortaleza/CE e a avaliação desse modelo como ferramenta auxiliar na previsão de impactos ocasionados pela instalação de obras civis e atividades na região litorânea.

O trecho de praia da cidade de Fortaleza, entre a foz do rio Ceará e o Porto de Mucuripe, definido para a aplicação do modelo, perfaz em linha reta cerca de 12 km e foi escolhido devido ao grande número de estruturas costeiras aí instaladas e sobretudo à existência de dados sobre essa região.

Para a modelagem da região e calibração do modelo criou-se um banco de dados baseado na coletânea de trabalhos realizados sobre essa região, que incluem a história do desenvolvimento portuário dessa cidade, dados de campo dos parâmetros ondulatórios, hidráulicos e sedimentológicos, levantamentos aerofotogramétricos com restituição para os anos de 1963, 1972 e 1995, levantamentos aerofotogramétricos sem restituição dos anos de 1976 e 1978 e fotos aéreas de parte do trecho litorâneo estudado.

A calibração do modelo se fez considerando as linhas de praia medidas em 1972 e 1995. Os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios visto que, para esta região cuja declividade do perfil de praia é da ordem de 1:25 e a amplitude de maré atinge valores superiores a 3 m, a diferença entre as posições das linhas de praia calculada e medida foram sempre inferiores a 60 m.

As estimativas da taxa de transporte litorâneo realizadas pelo modelo durante sua calibração não lhe garantem confiabilidade em quantificar a dinâmica de sedimentos na região. Para isso são necessárias mais informações de campo para validar seus resultados.

Em que pesem as limitações na formulação matemática dos processos e no algoritmo do modelo, pode-se afirmar que a grande vantagem de sua utilização reside na oportunidade de estudar uma extensa região de maneira global. Além disso, sua utilização permite uma análise crítica do modelo conceitual proposto, uma maior objetividade na coleta de informações de campo e, através de uma análise qualitativa, permite também conciliar os projetos de tal forma a impedir que soluções localizadas possam gerar problemas em áreas vizinhas.

**IMPLEMENTATION OF *GENESIS (GENERALIZED MODEL FOR SIMULATING SHORELINE CHANGE)* IN A STRETCH OF THE COASTLINE OF FORTALEZA -
CEARÁ**

Abstract

The numeric model **GENESIS (GENERALIZED MODEL FOR SIMULATING SHORELINE CHANGE)**, associated with the wave propagation model **RCPWAVE**, constitute the shoreline modelling system adopted by **CERC (COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER)**, U.S.A., to be applied to open coast areas under anthropic interventions, such as civil engineering works or others like sediment by-pass and artificial beach nourishment.

The implementation of the model **GENESIS**, as intended in this work, has as main objectives its calibration for a stretch of the coastline of Fortaleza, the capital of the State of Ceará, Brazil, and the avaluation of the model as an auxiliary tool in forecasting the consequences of human intervention in coastal areas.

This stretch of the coastline, spanning from the mouth of river Ceará to the port of Mucuripe, with an extension of about 12 kilometers, was chosen for the application of the model due to the presence of a large number of coastal structures and, in particular, to the existence of several data required for the model.

A data bank was created for modelling the region and for the calibration of the numeric model. The data comprize the hystorical development of the port area, field data concerning wave, hydraulic and sedimentological parameters, aerophotogrametric restitutions for the years 1963, 1972 and 1995, aerophotography for the years 1976 and 1978, and a set of aerial photographs of parts of the coast under investigation.

Calibration of the model was achieved taking into consideration shorelines measured in 1972 and 1995. Results can be accepted as very satisfactory, since, for a region in which average beach profile slope is 1:25 and tide amplitude may be sometimes higher than 3 meters, the deviation between measured and calculated position of shorelines remained under 60 meters.

Estimates of the longshore sediment transport rates as calculated by the model during its calibration do not seem to guarantee its liability in quantifying sedimentological dynamics in the region. Further field data are needed to validate the obtained results.

Although restricted in the mathematical formulation of the processes to be considered and in the algorithms upon which it is based, it can be stated that the main advantage in the application of the model lies upon the possibility of investigating a large area in a global way. Moreover, its application allows for a critical analysis of the proposed conceptual model, straightforwardness in collecting field data and, by means of a qualitative analysis, makes it possible to design localized interventions in such a way to avoid undesired interferences in neighboring areas.

SUMÁRIO

	PÁGINA
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE SÍMBOLOS	xx
LISTA DE ACRÔNIMOS	xxii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1 - Os Modelos de Evolução da Linha de Praia	7
3.2 - O Modelo GENESIS	14
4. METODOLOGIA	41
4.1 - Caracterização da Área de Estudo	44
4.1.1 - Histórico	44
4.1.2 - Clima de Ondas	51
4.1.3 - Marés	60
4.1.4 - Parâmetros Hidro-meteorológicos	61
4.1.5 - Sedimentos	62
4.1.6 - Levantamentos Aerofotogramétricos	64
4.1.7 - Levantamentos Batimétricos e Declividade do Fundo	72
4.1.8 - Transporte Litorâneo	75
4.1.9 - Transporte Eólico	77
4.2 - O Modelo Conceitual	78

4.3 - Modelagem da Área de Estudo.....	80
4.3.1 - Arquivos SHORL e SHORM.....	83
4.3.2 - Arquivo WAVES.....	86
4.3.3 - Arquivo START.....	89
4.3.4 - Arquivo NSWAV.....	105
4.3.5 - Arquivo DEPTH.....	106
4.3.6 - Arquivo SEAWL.....	108
4.5 - Calibração do Modelo GENESIS.....	109
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	114
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	142
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145
APÊNDICE A - ESTRUTURA DO SISTEMA DE MODELAGEM DA LINHA DE PRAIA	
APÊNDICE B - PROGRAMA FORTRAN PARA A COMPLEMENTAÇÃO DOS DADOS DE ONDA PARA O CONJUNTO DE MESES IDÊNTICOS DOS ANOS DE 1991 A 1995	
APÊNDICE C - ARQUIVO “START” PARA A CALIBRAÇÃO (PERÍODO PARCIAL)	

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
1.1	Mapa de localização. Região delimitada do bairro IRACEMA. Reprodução parcial da carta náutica DHN-7102
1.2	Praia de Iracema no passado e no presente (agosto/1997) 3
2.1	Foto de satélite, de um trecho do litoral cearense, entre a Ponta de Mucuripe e a localidade de Paracuru. (Fonte: Guia Quatro Rodas de praias, 1991)6
3.1	Esquema para a formulação matemática do modelo. (Fonte: Price <i>et al.</i> , 1972)..... 10
3.2	Esquema para definição da direção de propagação das ondas em relação a linha de praia. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989) 12
3.3	Esquema para a formulação matemática do modelo. (Fonte: Ozasa e Brampton, 1980)..... 13
3.4	Mapa de localização do porto de Oarai. (Fonte: Kraus e Harikai, 1983) 15
3.5	Detalhes do Porto de Oarai 15
3.6	Mapa de localização do Porto de Oarai, praias adjacentes e o quebra-mar ao largo. (Fonte: Kraus <i>et al.</i> , 1984) 22
3.7	Linhas de praia calculadas para os diversos valores dos parâmetros e linha medida. (Fonte: Kraus <i>et al.</i> , 1984)..... 24
3.8	Janela de energia das ondas definindo os domínios para o cálculo do transporte litorâneo. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989) 27
3.9	Fluxograma de cálculo do sistema de modelagem da linha de praia- SMS 29
3.10	Esquema genérico para a formulação matemática do modelo. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989) 30
3.11	Mapa de localização. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989) 33
3.12	Detalhe da localização do projeto. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989) 33
3.13	Esquema do projeto para o Parque Lakeview. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989)..... 34

3.14	Comparação entre as linhas de praia medida e a calculada pelo modelo GENESIS. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989)	36
4.1	Mapa de localização - Reprodução parcial da carta náutica DHN-710 (correção em 1995).....	42
4.2	Trecho do litoral de Fortaleza e as estruturas costeiras	45
4.3	Fotografia aérea do espigão da praia de Iracema. Vista de SW. (Fonte: INPH, 1972).....	47
4.4	Fotografia aérea mostrando as praias de Formosa, com os muros de proteção, e Pirambú com os 4 espigões. Vista de E. (Fonte: INPH, 1972).....	49
4.5	Histograma de direção da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95	52
4.6	Histograma do período da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95	53
4.7	Histograma da altura significativa da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95.....	53
4.8	Histogramas da direção e diagramas de dispersão mensais, para o período e altura da onda significativa ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95	55
4.9	Histogramas da direção e diagramas de dispersão mensais para o período e altura da onda significativa ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95	56
4.10	Histogramas da direção e diagramas de dispersão mensais para o período e altura da onda significativa ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95	57
4.11	Histogramas da direção e diagramas de dispersão mensais para o período e altura da onda significativa ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95	58
4.12	Distribuição das fácies sedimentares na área do Porto de Mucuripe (Fonte: Moraes, 1972).....	63
4.13	Posições das linhas de praia em 1972 (vermelha), corrigida, e em 1995 (verde), segundo os mapas de restituição dos levantamentos aerofotogramétricos.....	67
4.14	Aerofotografia do trecho em estudo, para o ano de 1976. (Fonte: SEDURB)	69

4.15	Aerofotografia das áreas A e B	70
4.16	Aerofotografia da área A	71
4.17	Reprodução parcial da batimetria realizada ao largo das praias do Arpoador e Pirambú. (Fonte: Morais ,1980).....	71
4.18	Levantamento batimétrico de 1995. Reprodução parcial da carta náutica DHN-710	73
4.19	Representação sinótica do modelo conceitual	79
4.20	Trecho esquematizado para a solução numérica do modelo	81
4.21	Esquema para os arquivos de entrada e de saída do modelo GENESIS.....	83
4.22	Esquema para a definição do sistema de coordenadas do modelo GENESIS. Reprodução parcial da Carta DHN-710.....	84
4.23	Linha de praia, no trecho entre o Rio Ceará e a ponta de Mucuripe (A), referenciada ao sistema de coordenadas do modelo GENESIS. Gráfico gerado pelo programa DPLOT.....	86
4.24	Histograma de direção da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/ CE, para o período de agosto/72 a agosto/95.....	88
4.25	Histograma da altura significativa da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/ CE, para o período de agosto/72 a agosto/95	88
4.26	Histograma do período da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o período de agosto/72 a agosto/95.....	89
4.27	Malha de 35 x 20 pontos de dados altimétricos e batimétricos, para a modelagem do fundo pelo código RCPWAVE. Reprodução parcial da Carta DHN-710, 1995.....	106
4.28	Modelo de fundo da região em estudo, segundo o código RCPWAVE. Notar a disposição invertida da área. Gráfico gerado pelo programa RCPGRAF	108
5.1	Modelo da área de estudo segundo o arquivo START. Gráfico gerado pelo programa GENGRAF.....	114
5.2	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 11 e 10.....	115

5.3	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 10, 9, 8 e 7.....	115
5.4	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 7 e 6	116
5.5	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 6, 5, 4, 3, 2 e espigão da CAGECE	116
5.6	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Porto velho e espigão de Iracema.....	117
5.7	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigão de Iracema.....	117
5.8	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Porto de Mucuripe.....	118
5.9	Erro na posição da linha calculada em relação à linha de praia medida em agosto/95	118
5.10	Erro médio absoluto para a posição da linha calculada pelo modelo, por trecho de praia constituído por 10 células.....	119
5.11	Taxa média do transporte litorâneo resultante de sedimentos que atravessam a parede de cada célula.....	120
5.12	Posição final da linha de praia, extraída diretamente do levantamento aerofotogramétricos sem restituição de 1978, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1978. Trecho coberto pelas células 1 a 45.....	121
5.13	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 11 e 10.....	122

5.14	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 10, 9, 8 e 7.....	122
5.15	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 7 e 6	123
5.16	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 6, 5, 4, 3, 2 e espigão da CAGECE	123
5.17	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Porto velho e espigão de Iracema.....	124
5.18	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigão de Iracema.....	124
5.19	Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Porto de Mucuripe.....	125
5.20	Erro na posição da linha calculada em relação à linha de praia medida em agosto/95	126
5.21	Erro médio absoluto para a posição da linha calculada pelo modelo, por trecho de praia constituído por 10 células.....	126
5.22	Taxa média do transporte litorâneo resultante de sedimentos que atravessam a parede de cada célula.....	127
5.23	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	131
5.24	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	131

5.25	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	132
5.26	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	132
5.27	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	133
5.28	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	133
5.29	Diferença entre as posições das linha de praia, calculada com os dados da direção da onda em ordem crescente e calculada na calibração do modelo	134
5.30	Diferença entre as posições das linha de praia, calculada com os dados da direção da onda em ordem decrescente e calculada na calibração do modelo	134
5.31	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	135
5.32	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	136
5.33	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	136
5.34	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	137

5.35	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	137
5.36	Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração	138
5.37	Diferença entre as posições das linha de praia, calculada com os dados da altura da onda em ordem crescente e calculada na calibração do modelo	138
5.38	Diferença entre as posições das linha de praia, calculada com os dados da altura da onda em ordem decrescente e calculada na calibração do modelo	139
5.39	Posição inicial da linha de praia extraída do levantamento aerofotogramétrico com restituição para o ano de 1963 e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1968. Trecho entre as células 1 e 45.	141
5.40	Posição inicial da linha de praia extraída do levantamento aerofotogramétrico com restituição para o ano de 1963 e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1968. Trecho entre as células 45 e 120.	141

LISTA DE TABELAS

	PÁGINA
4.1	Cronograma aproximado de construção e expansão das estruturas costeiras 50
4.2	Estatística dos dados de onda para o período de fevereiro/91 a junho/95 59
4.3	Média mensal e desvio padrão dos parâmetros da onda, para o período de fevereiro/91 a junho/95 60
4.4	Parâmetros da maré astronômica na região de Fortaleza. Fontes: Tábuas de Marés da DNH - 1974, 1976, 1980, 1986 e 1995. Cartas Náuticas DNH- 701 (1965), 700 (1986) e 710 (1995)..... 61
4.5	Posicionamento dos espigões e quebra-mares portuários no sistema UTM e no sistema de base utilizado na modelagem numérica 96
5.1	Aumento da área emersa, entre a linha de praia inicial, medida em 1972, e as linhas de praia final, medida em 1995 e calculada pelo modelo GENESIS para 1995..... 120
5.2	Aumento da área emersa, entre a linha de praia inicial, medida em 1972, e as linhas de praia final, medida em 1995 e calculada pelo modelo GENESIS para 1995..... 127

LISTA DE SÍMBOLOS

		DIMENSÃO	
A	=	parâmetro de escala dependente da granulometria dos sedimentos	$L^{1/3}$
BYP	=	coeficiente de "by-pass" (adimensional)	
C_g	=	celeridade do grupo de ondas na arrebentação	LT^{-1}
d_{50}	=	diâmetro mediano do sedimento	L
D	=	profundidade	L
D_B	=	altura da berma	L
D_C	=	profundidade de fechamento	L
D_{Lto}	=	profundidade máxima de ocorrência do transporte litorâneo	L
D_G	=	profundidade onde se encontra a extremidade da estrutura costeira	L
D_L	=	profundidade de transporte litorâneo ativo	L
E	=	densidade de energia da onda na arrebentação	MT^{-2}
g	=	aceleração da gravidade	LT^{-2}
H_b	=	altura da onda significativa na arrebentação	L
H_o	=	altura da onda significativa em águas profundas	L
k_1	=	coeficiente de ajuste (adimensional)	
k_2	=	coeficiente de ajuste (adimensional)	
K_1	=	parâmetro de calibração (adimensional)	
K_2	=	parâmetro de calibração (adimensional)	
p	=	porosidade da areia no fundo (considerada 0,4) (adimensional)	
q	=	taxa de transporte frontal	$L^2 T^{-1}$
q_0	=	parâmetro de transporte frontal, ajustado de acordo com K_1 e K_2	$L^2 T^{-1}$
Q	=	taxa de transporte litorâneo	$L^3 T^{-1}$

DIMENSÃO

t	=	tempo	T
T	=	período da onda	T
T _Z	=	período do zero ascendente	T
x ₀	=	distância prefixada a partir do espigão	L
x	=	distância na direção longitudinal a praia	L
y	=	distância “ off-shore ” a partir da linha de praia	L
α ₁	=	parâmetro adimensional	
α ₂	=	parâmetro adimensional	
β	=	ângulo médio da declividade de fundo da região onde ocorre o transporte litorâneo (grau)	
γ	=	índice da arrebentação das ondas (adimensional)	
γ _s	=	peso específico do sedimento submerso = ρ _s - ρ	MT ⁻² L ⁻²
θ _{bs}	=	ângulo de ataque das ondas na arrebentação, em relação à linha de praia (grau)	
θ _s	=	ângulo da linha de praia em relação ao eixo x (grau)	
θ _b	=	ângulo de ataque das ondas na arrebentação, em relação ao eixo x (grau)	
ρ _s	=	peso específico da areia (considerado como 2650 kgf/m ³ para a areia)	MT ⁻² L ⁻²
ρ	=	peso específico da água (1030 kgf/m ³ para a água do mar)	MT ⁻² L ⁻²

LISTA DE ACRÔNIMOS

CAGECE	COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ
CDC	COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ
CERC	COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER
DHI	DANISH HIDRAULIC INSTITUTE
DHN	DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO
FUNCEME	FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
INPH	INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS
IPLAM	INSTITUTO DE PLANEJAMENTO MUNICIPAL DE FORTALEZA
SEDURB	SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DO ESTADO DO CEARÁ
UFC	UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

1. INTRODUÇÃO

As praias de areia sofrem um processo permanente de mudanças, regido principalmente pelo clima de ondas da região, que induz estados de erosão ou acresção, mantendo-se em um estado de equilíbrio dinâmico quando isentas de intervenções humanas. Embora a onda seja o principal agente natural responsável pelas alterações que ocorrem, outros parâmetros como as marés, os ventos e as correntes induzidas, a elevação do nível do mar também exercem influência nas mudanças sofridas pela praia.

As obras costeiras acarretam obstruções ou alterações no caminhamento natural dos sedimentos e mudanças no clima de ondas que atinge a praia. Após a instalação de qualquer estrutura costeira pode-se esperar a desestabilização de praias próximas ou mesmo distantes do local do projeto, com a ocorrência de erosão ou deposição ao longo da praia. As conhecidas mudanças que ocorrem no ambiente costeiro, devido às obras de engenharia e atividades exercidas nessa área, constituem um alerta no planejamento de projetos desta região. A resposta do ambiente a essas interferências se manifesta geralmente pelas mudanças que atingem grandes áreas e, considerando o conhecimento limitado dos mecanismos que induzem essas mudanças, deve ser uma preocupação permanente a implantação dos projetos na área costeira. Portanto, somente a previsão antecipada destas alterações pode direcionar para soluções que causem menos impacto a este ambiente.

Um exemplo marcante de danos ambientais, causado pela falta de planejamento na ocupação de áreas costeiras e pelas obras aí instaladas, são as transformações sofridas pelas praias da cidade de Fortaleza/CE resultantes da intensa erosão ocorrida no final da década de 60 (Figuras 1.1 e 1.2). Tal exemplo é um sinal de alerta para que outras áreas litorâneas do Estado do Ceará, cujo modelo de desenvolvimento portuário e urbano tendem a seguir o modelo de Fortaleza, não sofram o mesmo processo de degradação e perda deste incalculável patrimônio público que é a beleza natural da orla marítima.



a) Praia de Iracema na década de 30, vista de Oeste.



b) Praia de Iracema na década de 30, vista de Este. Ao fundo, à direita, pier do antigo porto.



c) Praia de Iracema no presente, vista parcial de Este. Ao fundo, pier do antigo porto.

Figura 1.2: Praia de Iracema no passado e no presente (agosto/1997).

A utilização de modelos numéricos para previsão da evolução das praias tem se mostrado uma ferramenta poderosa no planejamento dos projetos localizados na região litorânea, ao auxiliar na seleção dos projetos mais adequados, considerando sua vida útil, economicidade e menor impacto. Entretanto, a grande falta de informações da costa brasileira, sobretudo de parâmetros ondulatórios, limita a utilização de modelos, físicos ou matemáticos, para a previsão de impacto.

Devido sobretudo à existência de dados de onda, embora com lacunas, monitorados por um período superior a 4 anos ao largo da cidade litorânea de Fortaleza, associada à história do desenvolvimento portuário e urbano dessa cidade, motivaram a aplicação e avaliação do modelo de evolução da linha de praia - GENESIS nessa região.

O modelo numérico GENESIS é parte de um sistema de modelagem de linha de praia, SMS, composto de dois modelos numéricos principais- GENESIS e RCPWAVE. O GENESIS é um modelo genérico, determinístico e bi-dimensional com grande flexibilidade para ser adaptado a trechos de costa aberta onde existem grande variedade de estruturas costeiras e atividades humanas específicas como engordamento artificial das praias e “by-pass” de sedimentos.

O modelo RCPWAVE tem a função de realizar a propagação das ondas monocromáticas ao largo da arrebentação até nas proximidades da linha da arrebentação e o seu resultado constitui em dados de entrada do modelo GENESIS.

Assim, o conteúdo do presente trabalho trata da história geral do desenvolvimento dos modelos numéricos de evolução da linha de praia e suas aplicações, particularmente sobre o modelo GENESIS e sua implementação em um trecho litorâneo do município de Fortaleza/CE.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivos a calibração do código computacional GENESIS na região litorânea de Fortaleza e sua avaliação como ferramenta auxiliar na previsão de impacto ambiental ocasionado pelas intervenções nas áreas costeiras.

Ao considerar a região litorânea de Fortaleza para a aplicação do modelo, cenário de diversas intervenções realizadas, pretende-se que os procedimentos utilizados e os resultados obtidos na calibração e avaliação do modelo sirvam de subsídio ao estudo de previsão de impacto sobre as praias em outras áreas do litoral do Estado do Ceará. Isso se justifica tendo em vista a similaridade apresentada nas características meteorológicas, sedimentológicas, feições costeiras e sobretudo no regime de ondas em todo o litoral situado a Oeste da ponta de Mucuripe (Figura 2.1).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A abstração da natureza física através de modelos matemáticos, analíticos ou numéricos, exige uma razoável compreensão e equacionamento dos processos físicos envolvidos, quando se pretende quantificar esses processos. Não poderia ser diferente para o estudo da zona costeira.

A previsão de mudanças que ocorrem na praia, devido às intervenções humanas ou fenômenos naturais, através de modelos físicos ou numéricos, são as formas mais adequadas de planejar racionalmente os projetos de engenharia e atividades costeiras. Devido principalmente às limitações dos modelos físicos por problemas de escala, ao clima de ondas regulares a eles associados e ao advento dos computadores e micro-computadores, ocorreu um grande desenvolvimento dos modelos numéricos nas últimas décadas.

Os modelos matemáticos, analíticos ou numéricos, de previsão de mudanças da praia podem ser classificados em dois grupos, de acordo com os objetivos e métodos da modelagem, a saber: modelos de previsão das mudanças da linha de praia e modelos de previsão de mudanças da configuração do fundo litorâneo.

Os modelos de evolução da configuração do fundo são subdivididos em: multilinhas e tridimensionais, e não são objeto de apreciação no presente trabalho. Estudos detalhados podem ser encontrados em Baker (1968), Wang *et al.* (1975), Watanabe (1982, 1988), Watanabe *et al.* (1986), Perlin e Dean (1983), Yamaguchi e Nishioka (1984), Vemulakonda *et al.* (1988), Larson *et al.* (1990), Cassar e Neves (1993), dentre outros.

3.1 Os Modelos de Evolução da Linha de Praia

Segundo a conceituação apresentada pelo Shore Protection Manual (U.S.Army, 1984), a linha de praia pode ser representada pela interseção do plano d'água definido pela média das preamares com a praia. É um conceito abstrato quando se considera os efeitos da maré. Ainda assim, como referência para monitoração de mudanças, outras linhas como a linha definida

pelo nível médio do mar (MSL), a linha de profundidade zero em relação ao datum da DHN, a linha definida pela média das mínimas baixamares no período de 19 anos (MLLW) ou qualquer linha definida na zona do estirâncio, sujeita a ação das ondas, e devidamente referenciada podem ser consideradas como linha de praia para qualquer modelo que simula sua evolução. Uma vez definida a linha de praia, as demais variáveis, batimetria e altura da berma dentre outras, devem estar referenciadas ao plano que a originou.

A história dos modelos de evolução da linha de praia teve início com Pelnard-Considère (1956). Tendo como premissa básica as variações pouco significativas, a longo prazo, do perfil de praia derivou um modelo analítico de 1-linha de evolução do acúmulo provocado pela obstrução do transporte de areia por um espigão, e cuja verificação de sua solução foi realizada em laboratório. Baseando-se na continuidade do fluxo longitudinal de sedimentos, ele relacionou as mudanças da linha de praia às mudanças longitudinais na taxa do transporte litorâneo.

A denominação modelo de 1-linha dada aos modelos de evolução da linha de praia é originada pelo fato de que nestes modelos a forma do perfil de praia é mantida constante ao longo de toda a praia. Isso significa que as isobatimétricas permanecem paralelas entre si em toda a extensão da área modelada. Assim, as posições da linha de praia, indicando avanço ou recuo da linha, são consideradas suficientes para representarem as mudanças que ocorrem na praia.

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 perpendicular, como a erosão provocada por tempestades e as variações cíclicas da posição da linha de praia devido às variações sazonais do clima de ondas, se anulem a longo prazo.

A idéia de Pelnard-Considère (1956) foi otimizada posteriormente e modelos analíticos e numéricos de uma linha, baseados nas equações da continuidade e transporte de sedimentos, foram adotados para simular o comportamento da linha de praia nas proximidades das estruturas costeiras. Dentre os modelos analíticos e numéricos de 1-linha desenvolvidos destacam-se:

1) Grijm (1964) desenvolveu um estudo teórico sobre as formas possíveis da linha de praia. A premissa básica dessa teoria afirma que o transporte litorâneo é função exclusiva do ângulo de ataque das ondas ($\tan \theta_{bs}$). Como soluções da equação diferencial da continuidade, baseada em um sistema de coordenadas polares, foram identificadas linhas teóricas que podiam definir arcos de praia, deltas, baías e cabos. Seus resultados não foram comprovados com dados da natureza;

2) Bakker e Edelman (1964), através de simplificações dos processos naturais, obtiveram soluções analíticas para a geometria da linha de praia nas proximidades dos deltas a partir da equação da continuidade. Em suas simplificações assumiram :

- a) não existência de maré ou correntes de maré;
- b) transporte nulo de sedimentos pelas correntes;
- c) transporte de sedimentos é realizado exclusivamente pelas ondas;
- d) o valor do transporte de sedimentos é dado pelas expressões:

$$Q_m k_1 \tan \theta_{bs} \quad \text{para } 0 < \tan \theta_{bs} < 1,23$$

e $Q_m k_2 / \tan \theta_{bs} \quad \text{para } 1,23 < \tan \theta_{bs} < \infty$

onde Q_m é a taxa máxima de transporte, θ_{bs} é o ângulo de ataque das ondas na arrebentação em relação à linha de praia, $1/k_1 = k_2 = 1,23$, sendo k_1 e k_2 coeficientes de ajuste e o máximo transporte ocorre para $\tan \theta_{bs} = 1,23$ ou $\theta_{bs} \approx 51^\circ$;

- e) os efeitos da refração, difração e reflexão são desprezados;

- f) o perfil tem declividade constante desde a linha de praia até uma profundidade D ;
- g) a contribuição de sedimentos pelo rio é mantida constante;
- h) as ondas chegam à costa com altura, período, comprimento e ângulo de ataque constantes.
- 3) O modelo numérico de 1-linha apresentado por Price *et al.* (1972) é baseado na equação de continuidade, a qual tem a forma abaixo apresentada para o sistema de coordenadas disposto segundo a Figura 3.1:

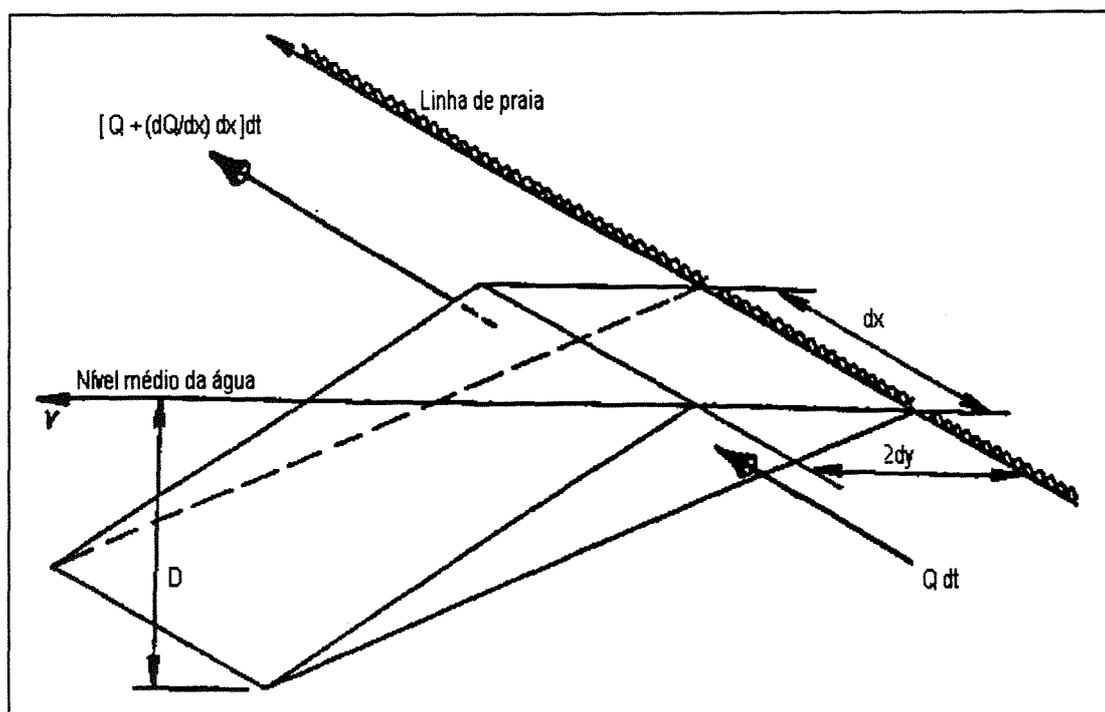


Figura 3.1 : Esquema para a formulação matemática do modelo. (Fonte: Price *et al.*, 1972).

$$\frac{\partial y}{\partial t} + (1/D_c) \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

onde:

x = distância na direção longitudinal à praia

y = distância na direção transversal à praia

D_c = profundidade máxima de transporte litorâneo = profundidade de fechamento

t = tempo

Q = taxa de transporte litorâneo volumétrico, determinada pela equação de transporte

de sedimentos (Komar e Inman, 1970):

$$Q = (0,35/\gamma_s) (E C_g)_b \text{ sen } 2 \theta_{bs} \quad (2)$$

onde:

E = densidade de energia da onda na arrebentação = $1/8 \rho g H_b^2$;

ρ = peso específico da água (1030 kgf/m³ para água do mar)

ρ_s = peso específico da areia (considerado como 2650 kgf/m³ para areia)

γ_s = peso do sedimento submerso = $\rho_s - \rho$

H_b = altura da onda significativa na arrebentação;

C_g = celeridade do grupo de ondas na arrebentação (teoria das ondas lineares);

θ_{bs} = ângulo de ataque das ondas na arrebentação, em relação à linha de praia.

O ângulo θ_{bs} é definido pela relação:

$$\theta_{bs} = \theta_b - \theta_s \quad (3)$$

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 (Figura 3.2).

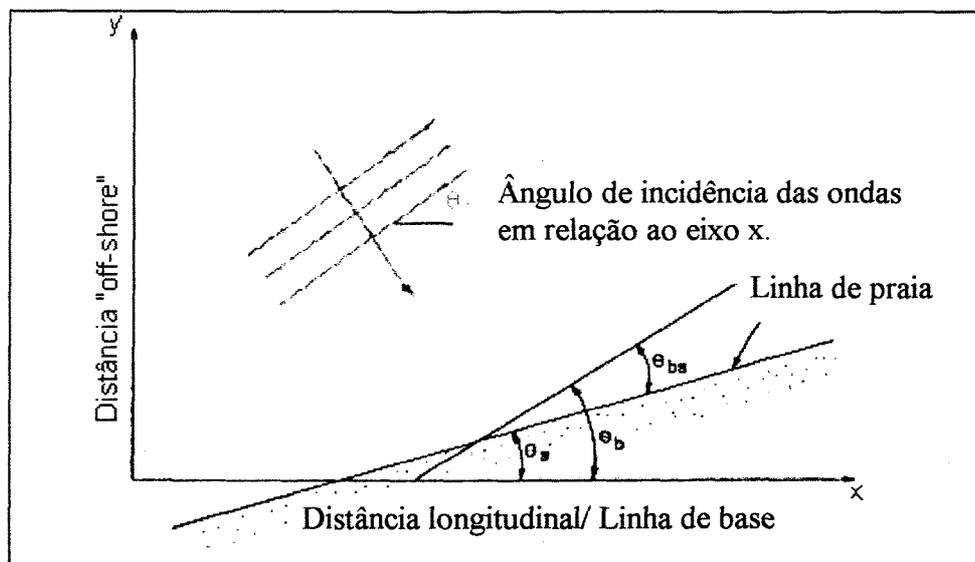


Figura 3.2 : Esquema para definição da direção de propagação das ondas em relação à linha de praia. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989).

Esse modelo objetivava simular a evolução da linha de praia na presença de um espigão ou devido às alterações do clima de ondas. Na aplicação desse modelo numérico, no estudo da evolução da linha de praia próxima a um espigão, todos os dados de entrada necessários à resolução das equações 1 e 2: parâmetros ondulatórios, profundidade de fechamento - profundidade mínima a partir da qual, caminhando para o largo, o transporte de sedimentos é desprezível, forma inicial da linha de praia e celeridade da onda, foram extraídos de um modelo físico simulado em um tanque de ondas. Os resultados obtidos pelo modelo numérico, baseado em fórmulas de diferenças centrais, se mostraram muito similares àqueles obtidos através de simulação com um modelo físico. Os parâmetros ondulatórios foram mantidos constantes durante toda a simulação

4) Le Méhauté e Soldate (1977) apresentaram um modelo analítico para simular a evolução da linha de praia quando sujeita ao processo de engordamento e considerando somente o transporte perpendicular de sedimentos.

5) A necessidade de simular de uma forma simplificada a influência do muro de proteção sobre a linha de praia, quando esta erode e o atinge, levaram Ozasa e Brampton (1980) ao

desenvolvimento de um modelo numérico inovador. Com base no modelo desenvolvido por Price *et al.* (1972) e na experiência dos pesquisadores o modelo foi estruturado tendo como premissa o equilíbrio estático atingido pela praia quando há erosão da berma e a linha de praia atinge o muro. Na concepção do modelo, a equação básica da continuidade, deduzida a partir esquema da Figura 3.3, é acrescida do parâmetro altura da berma - D_B :

$$\partial y / \partial t + \{1/(D_C + D_B)\} \partial Q / \partial x = 0 \quad (4)$$

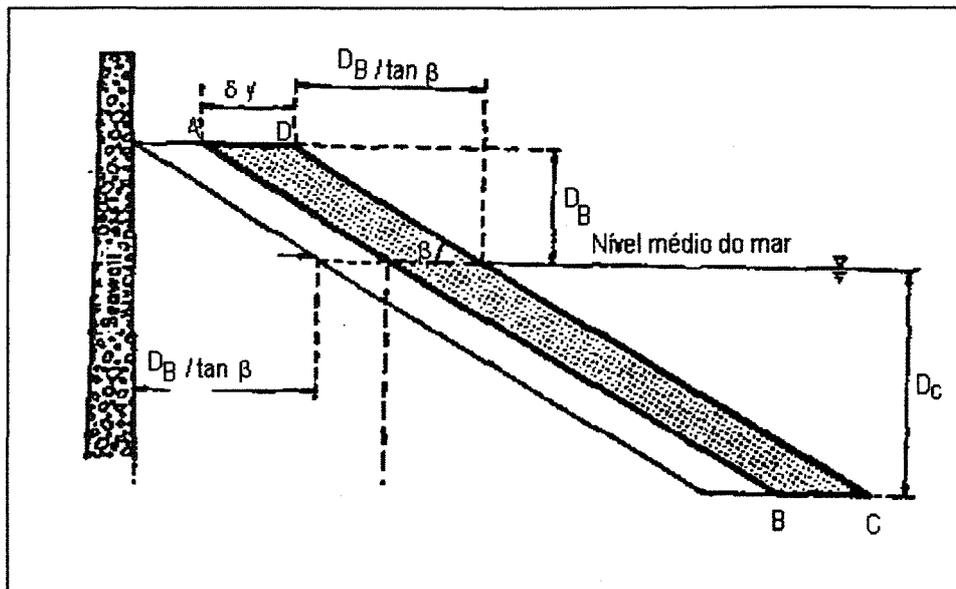


Figura 3.3 : Esquema para a formulação matemática do modelo.
(Fonte: Ozasa e Brampton, 1980).

Apresentaram uma derivação da fórmula de Komar e Inman (1970) para o transporte litorâneo onde é adicionado um termo de deriva litorânea devido ao gradiente longitudinal da altura de onda na arrebentação:

$$Q = (0,385/\gamma_s) (E C_g)_b \{ \text{sen } 2 \theta_{bs} - 3,24 \cot \beta \cos \theta_{bs} \partial H / \partial x \}_b \quad (5)$$

onde, além dos parâmetros já definidos, tem-se:

β = ângulo médio da declividade de fundo da região onde ocorre o transporte litorâneo.

Esse aprimoramento na fórmula do transporte litorâneo teve origem no trabalho apresentado por Bakker (1971) onde no cálculo da corrente litorânea são considerados o

ataque oblíquo das ondas e a variação da altura de onda na arrebentação. Os resultados da evolução da linha de praia, originados da solução da equação diferencial da continuidade pelo método das diferenças finitas, apresentaram uma razoável concordância com aqueles obtidos pelo modelo físico de uma baía no Japão, onde se localizam os portos de Awazu e Imagiri. A taxa de transporte litorâneo calculada em uma determinada seção foi o equivalente a 66% da taxa medida no modelo físico. Todos os parâmetros necessários à solução das equações foram extraídos do modelo físico. Os parâmetros ondulatórios, no modelo físico e numérico, foram mantidos constantes durante o período de simulação.

3.2 O Modelo GENESIS

Os modelos numéricos de uma linha apresentados Kraus e Harikai (1983), Kraus et.al. (1984) e Hanson e Kraus (1986) foram os precursores do modelo genérico GENESIS desenvolvido por Hanson (1987), para aplicações em costa aberta, e posteriormente otimizado por Hanson e Kraus (1989). Os trabalhos iniciais de Kraus e Harikai (1983) foram motivados pela necessidade de entender as mudanças sofridas pela linha de praia nas proximidades das estruturas costeiras e de desenvolver um modelo numérico para simular essas mudanças em regiões controladas por múltiplas estruturas.

O modelo numérico desenvolvido por Kraus e Harikai (1983) introduziu a maioria dos algoritmos básicos de cálculo usados pelo modelo GENESIS e objetivava estudar a evolução das praias arenosas próximas ao porto de Oarai localizado a 150 Km ao norte de Tóquio, Japão (Figuras 3.4 e 3.5).

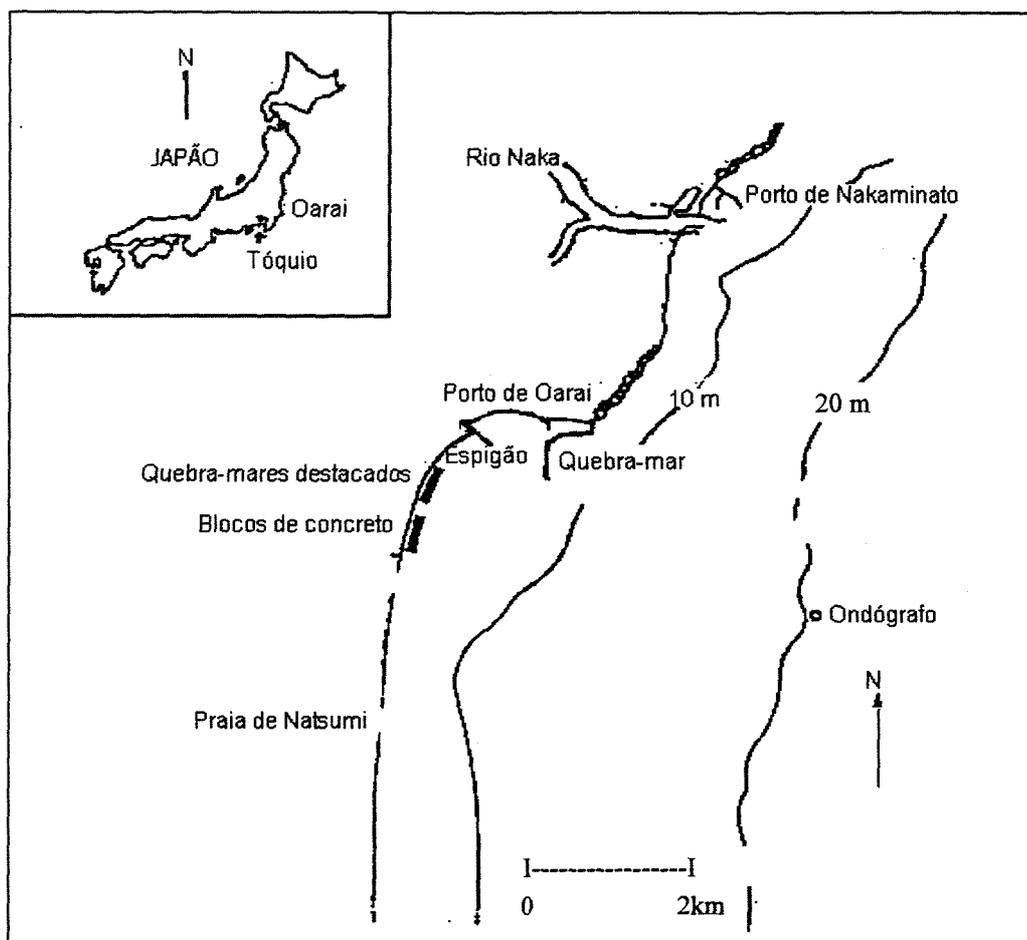


Figura 3.4 : Mapa de localização do porto de Oarai. (Fonte: Kraus e Harikai, 1983).

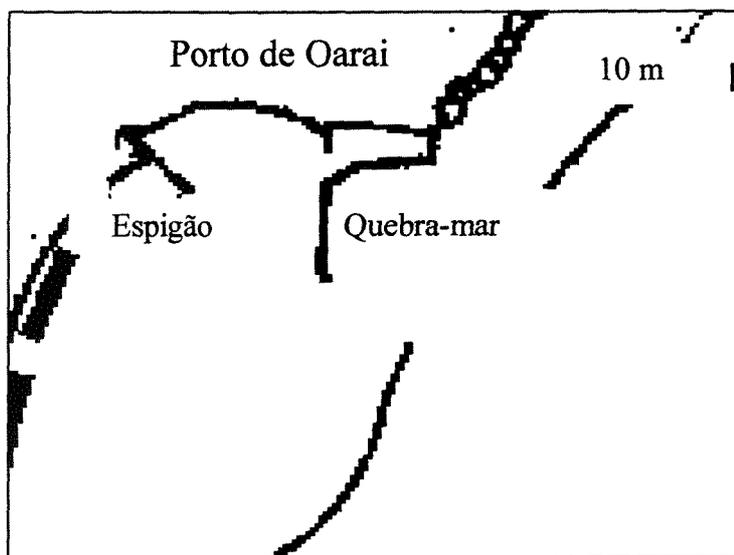


Figura 3.5 : Detalhes do Porto de Oarai.

O quebra-mar do porto de Oarai fornece proteção para as ondas de NE e ENE que predominam na região, com frequência de ocorrência conjunta da ordem de 85%. O problema a ser estudado pelos pesquisadores estava relacionado com a erosão das praias situadas ao sul do espigão. Concomitante ao aumento nas extensões do quebra-mar e do espigão, alterando a corrente e o transporte litorâneo da região, a erosão nas praias avançava progressivamente para sul. Diversos quebra-mares destacados já haviam sido construídos em frente às muralhas de contenção para proteger as praias dessa área. Além disso, foram implantados blocos de concreto mais ao sul do espigão com o mesmo propósito. A evolução do fundo entre os anos de 1977 e 1981, indicando deposição a barlamar do quebramar do porto e a sotamar do espigão e erosão a barlamar do espigão e ao largo das praias, valida os resultados obtidos através de modelos hidráulicos (Arakida *et al.*, 1978 e Mizumura, 1982). Os experimentos realizados por Kraus *et al.* (1981) utilizando areia marcada com traçador fluorescente mostraram que a corrente litorânea e o movimento da areia eram opostos à direção das ondas na arrebentação. Esse resultado é explicado pela variação longitudinal da altura de onda na arrebentação devido à difração provocada pelo quebramar.

Os estudos de campo realizados por Ijima *et al.* (1961) e Kraus e Harikai (1983), além dos estudos em laboratório realizados por Arakida *et al.* (1978) indicavam que a areia originária do rio Naka seguia a direção sul e ao contornar a extremidade do quebra-mar se depositava na área portuária e nas praias situadas ao sul do espigão (Figura 3.4).

A equação da continuidade ou balanço de massa utilizada por Kraus e Harikai (1983) na formulação matemática dos processos envolvidos é a mesma utilizadas por Le Mehaute e Soldate (1980) onde estão considerados o transporte longitudinal e o transporte perpendicular:

$$\partial y / \partial t + \{1/(D_c) (\partial Q / \partial x - q)\} = 0 \quad (6)$$

onde q é a taxa de transporte perpendicular e D_C é a profundidade de fechamento.

A variável Q , taxa de transporte litorâneo, é similar a apresentada por Ozasa e Brampton (1980) :

$$Q = (H^2 C_g)_b (\alpha_1 \sin 2\theta_{bs} - \alpha_2 \cos \theta_{bs} \partial H / \partial x)_b \quad (7)$$

onde:

H = altura da onda significativa na arrebentação

x = distância longitudinal

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 definido segundo a equação 3.

Os parâmetros adimensionais α_1 e α_2 são obtidos através das equações:

$$\alpha_1 = K_1 / \{ 16 [(\rho_s/\rho) - 1] (1 - p) (1,416)^{5/2} \} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = K_2 / \{ 8 [(\rho_s/\rho) - 1] (1 - p) (\tan \beta) (1,416)^{7/2} \} \quad (9)$$

onde :

K_1 e K_2 = coeficientes empíricos , denominados parâmetros de calibração

ρ_s = peso específico da areia (considerado como 2650 kgf/m³ para areia)

ρ = peso específico da água (1030 kgf/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.

O primeiro termo da equação 7 corresponde à fórmula do CERC (U.S. Army, 1984), que recomenda um valor de K_1 igual a 0,77. Essa equação é baseada no fluxo longitudinal de

energia, a qual considera o transporte litorâneo produzido pelo ataque oblíquo das ondas à linha de praia. Segundo Gourlay (1982), dependendo das hipóteses formuladas o valor de 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) indicam 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. Entretanto, segundo Kraus *et al.* (1984), 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 de uma determinada região e cuja determinação deve ser feita na calibração.

O segundo termo, introduzido por Ozasa e Brampton (1980), considera a variação longitudinal da altura de onda devido à difração produzida pelas estruturas costeiras ou às irregularidades do fundo.

A diferença de sinal entre os dois termos da equação 7 implica que deve existir um ponto de transporte litorâneo nulo a partir do qual ocorrerá o transporte de sedimentos em direção oposta ao ataque das ondas.

A adequacidade da equação como representativa do transporte litorâneo na região foi comprovada pelos estudos com traçadores fluorescentes realizados por Kraus *et al.* (1981), através da estimativa concordante das taxas de transporte litorâneo realizada pelos dois métodos.

Para a solução numérica da equação diferencial parcial, Kraus e Harikai (1983) utilizaram o método das diferenças finitas, empregado simultaneamente nas formas explícita e implícita, para combinar respectivamente a rapidez de um método com a estabilidade numérica do outro.

Os dados de ondas disponíveis para a calibração, obtidos dos registros de um ondógrafo localizado na profundidade de 20 m, perfaziam uma série histórica de 7 meses e meio, julho/79 a fevereiro/80, com intervalo de registro de 6 horas. Essa série foi estendida para um ano, através da inserção de dados de altura e período da onda estimados da série original. Os registros ausentes de direção foram complementados aleatoriamente com base na frequência de ocorrência da direção. A série histórica de um ano assim gerada foi estendida para 3 anos, através da repetição da série, para atender ao período de verificação do modelo, de junho/77 a julho/80. Os levantamentos da linha de praia correspondentes às datas de início e fim dos períodos de calibração e verificação, referenciados ao datum da região, foram ajustados para o datum correspondente ao nível médio do mar. Nessa região a amplitude da maré no período de aplicação do modelo era da ordem de 1,2 m.

Na modelagem da região, diante das dificuldades em quantificar o volume de areia proveniente do rio Naka que contorna a ponta do quebramar e alimenta gradativamente as praias ao sul, os pesquisadores adotaram uma expressão para representar a distribuição do transporte perpendicular responsável pela alimentação das praias:

$$q = q_0 / [1 + (x/x_0)^8] \quad (10)$$

onde:

q_0 = parâmetro de transporte perpendicular, ajustado de acordo com K_1 e K_2

x_0 = distância prefixada a partir do espigão.

x = distância longitudinal a partir do espigão

A profundidade de fechamento foi estimada através da equação de Hallermeier (1978, 1983):

$$D_c = 2,28 H - 68,5 (H^2/gT^2) \quad (11)$$

onde :

H = altura de onda significativa em águas rasas, em condições extremas do clima de ondas

T = período

g = aceleração da gravidade.

Na determinação de D_c , único para toda a área de estudo, realizou-se a estatística para todos os valores possíveis desse parâmetro, calculados com os dados de onda disponíveis. O valor de 6 m foi definido para esse parâmetro, considerando que 98,6 % dos valores calculados estavam abaixo desse limite. Para validar o resultado obtido, utilizou-se 5 levantamentos batimétricos, obtidos entre 1977 e 1981, para um perfil litorâneo situado a 2000 m ao sul do espigão. Através desses levantamentos, apresentados sob a forma de profundidade média em cada ponto do perfil versus desvio padrão, pode-se concluir que a partir da profundidade de 6m para o largo as profundidades médias apresentam um pequeno desvio padrão, significando pouco variação da profundidade no período considerado.

Um segundo modelo numérico foi desenvolvido para a determinação da altura de onda na arrebentação, considerando os efeitos da refração, empinamento e a difração produzida pelo quebra-mar do porto. Adotou-se o método simplificado de Goda *et al.* (1978) para a difração de ondas irregulares pois, além das constatações de Nagai (1972) e Goda *et al.* (1978), os trabalhos de Harnes (1979), realizados em laboratório, indicavam que a altura de onda na zona de sombra é subestimada pela teoria de difração das ondas regulares.

Para a calibração do modelo, Kraus e Harikai (1983) variaram o valor do parâmetro de transporte perpendicular q_0 para duas condições preestabelecidas dos parâmetros de calibração K_1 e K_2 . Os valores de $K_1 = 0,3$, $K_2 = 0,4$ e $q_0 = 2,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ permitiram o melhor ajuste entre as linhas de praia calculada e a real.

A utilização desses valores na verificação do modelo, para um período de 3 anos, resultaram em uma diferença máxima da ordem de 25 m entre as posições da linha de praia

calculada e a medida real.

Concluiu-se também, através de varias simulações, que intervalos de tempo menores entre os registros de ondas, de 6 horas nesse caso, em detrimento a valores médios dos parâmetros ondulatórios representativos de intervalos maiores de tempo, favorecem a precisão da modelagem, ressaltando assim a importância de se ter registros de ondas com maior frequência de amostragem.

Os modelos numéricos de evolução da linha de praia e de propagação das ondas, desenvolvidos por Kraus e Harikai (1983), foram posteriormente aprimorados por Kraus *et al.* (1984) para considerar os efeitos de várias estruturas na difração das ondas e conseqüentemente no cálculo da altura e direção de onda na arrebentação. Introduziram também a condição de contorno devido ao muro de proteção, onde a linha de praia não pode recuar além dessa estrutura. Além disso, tornou-se possível a representação do fenômeno de “by-pass” da areia pelas extremidades dos espigões. Assim, os modelos de Kraus *et al.* (1984) foram aplicados na mesma região do porto de Oarai com o propósito de prever as conseqüências de um quebra-mar destacado, com cerca de 800 m, construído para facilitar a navegação, mais ao largo e a sul do porto de Oarai (Figura 3.6). Esse estudo permitiu avaliar também nove planos hipotéticos para proteger a praia de Natsumi, localizada mais ao sul do porto de Oarai.

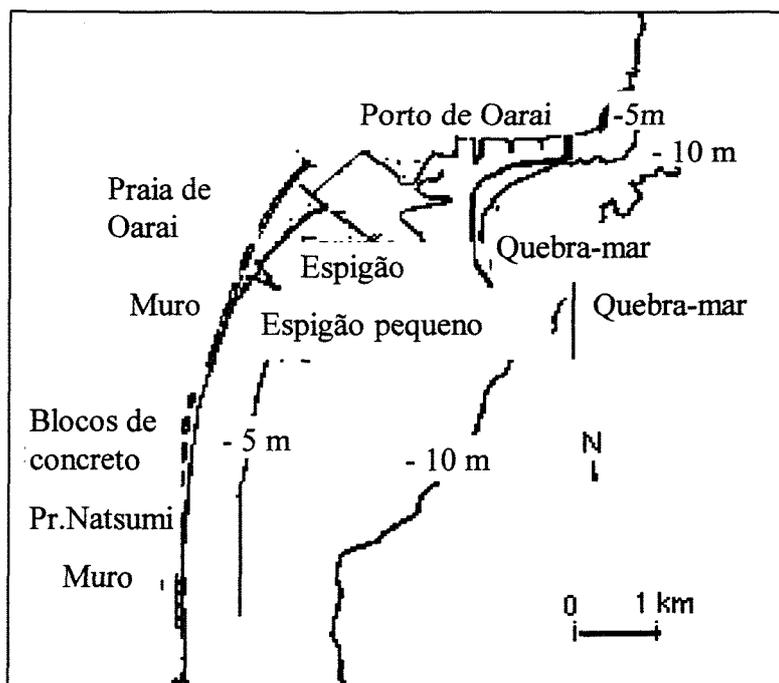


Figura 3.6 : Mapa de localização do Porto de Oarai, praias adjacentes e o quebra-mar ao largo. (Fonte: Kraus *et al.*, 1984).

Com base nos levantamentos batimétricos, Kraus *et al.* (1984) concluíram que o quebra-mar destacado poderia aprisionar parte dos sedimentos provenientes do rio Naka, que supria as praias localizadas ao sul, e inseriu um novo termo para q na equação da continuidade, mais adequado à situação dinâmica da região:

$$q = q_0 / \{ 1 + [(x - K x_0)/x_0]^n \} \quad (12)$$

onde K , x_0 e n são determinados durante as simulações e o parâmetro de calibração q_0 ajustado de acordo com K_1 e K_2 .

Nesse trabalho já dispunham de dados de onda de 4 anos, para o período de junho/79 a junho/83. Tanto os dados de altura e período da onda como de direção, medida por um sistema composto de “strain-gages”, apresentavam lacunas. Assim, foi adotado um procedimento para complementar a série histórica disponível. Com uma série histórica mais longa que aquela utilizada por Kraus e Harikai (1983), os pesquisadores distinguiram dois grupos sazonais para a direção de onda, abril a julho e agosto a março. Para os parâmetros de

altura e período da onda criou-se doze grupos de dados, correspondentes a cada mês do ano. As lacunas isoladas, situadas entre dois registros, eram complementadas através de interpolação linear. Os intervalos maiores de dados faltosos eram complementados aleatoriamente com base nas propriedades estatística de cada parâmetro. Cabe ressaltar que a complementação dos parâmetros da onda se baseou na frequência de ocorrência isolada de cada parâmetro sem considerar sua relação com os demais.

Para considerar as três fontes de difração da onda, a extremidade do quebra-mar do porto e as duas extremidades do quebra-mar destacado, os pesquisadores aprimoraram o modelo de propagação da onda de Kraus e Harikai (1983). Entretanto, os pesquisadores não utilizaram as medições visuais da altura de onda na arrebentação, realizadas em cinco locais ao sul do espigão através de régua graduada, para verificar o modelo de propagação proposto.

Maiores detalhes do modelo proposto para determinar a altura e ângulo da onda na arrebentação em áreas de sombra de múltiplas estruturas pode ser visto no trabalho de Hanson e Kraus (1986).

Com as modificações inseridas no modelo de Kraus e Harikai (1983), Kraus *et al.* (1984) realizaram nova calibração para o mesmo período, julho/79 a fevereiro/80 e as mesmas condições de onda. Determinaram assim os valores de 0,1, 0,1 e $4,0 \times 10^{-6}$ m³/s por metro de praia, respectivamente para os parâmetros K_1 , K_2 e q_0 , valores esses bem diferentes dos obtidos por Kraus e Harikai (1983). Para o período de verificação utilizado, março/81 a junho/83, tendo as obras do quebra-mar iniciadas em janeiro/81, os valores de melhor ajuste foram 0,1, 0,1 e $4,5 \times 10^{-6}$ m³/s/m respectivamente para K_1 , K_2 e q_0 . As maiores diferenças encontradas entre os valores calculados e o real se situaram a partir de 2 km ao sul do espigão, limite da zona de sombra produzida pelo quebra-mar. Os pesquisadores creditaram essa discrepância às limitações do modelo de refração proposto, que não considera as irregularidades do fundo. A escala gráfica apresentada nos resultados do trabalho de Kraus *et*

al.(1984) não permite avaliar o erro resultante dessa simulação (Figura 3.7).

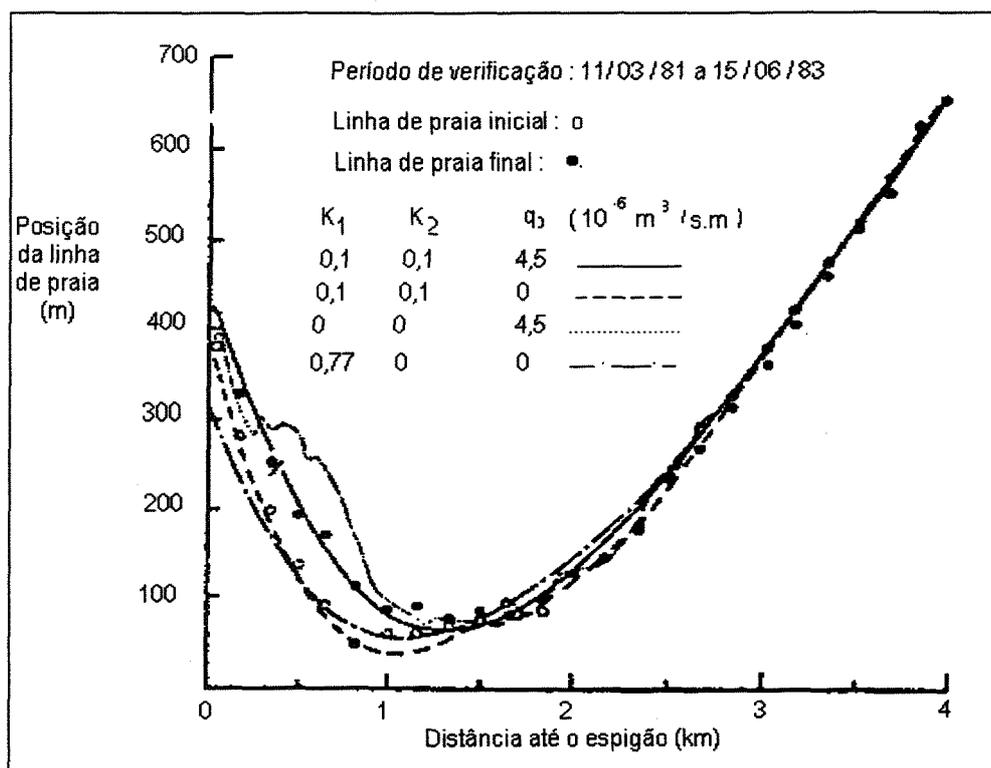


Figura 3.7 : Linhas de praia calculadas para os diversos valores dos parâmetros e linha medida. (Fonte: Kraus *et al.*, 1984).

O exercício de previsão para o período de junho/83 a junho/88 realizado por Kraus *et al.* (1984) objetivava estimar a máxima alteração na linha de praia considerando as prováveis alterações nos parâmetros ondulatórios. Na impossibilidade de conhecer a série temporal futura, assumiram que os dados de ondas para a previsão não apresentavam grandes diferenças dos dados passados. Assim, criaram séries temporais alterando as distribuições individuais da altura e direção de onda mantendo inalterada a distribuição do período na série por uma questão de simplificação.

Para avaliar o impacto máximo do ordenamento do conjunto dos parâmetros ondulatórios, a série histórica completa com os dados de onda, correspondente ao período de junho/79 a junho/83, foi estruturada considerando quatro alternativas: 1) seqüência dos dados segundo a ordem crescente da altura da onda; 2) seqüência segundo a ordem decrescente da

altura da onda; 3) sequência segundo a ordem crescente da direção da onda em relação ao norte geográfico e 4) sequência segundo a ordem decrescente da direção da onda. Além dessas séries foram criadas outras séries para avaliar os efeitos da mudança no fluxo médio ponderado de energia por direção de incidência da onda ao largo. Para isso criaram quatro séries onde os dados de altura de onda e direção estavam individualmente acrescidos e subtraídos de metade do desvio padrão das distribuições desses parâmetros. Em todas as séries assim geradas, somente um dos parâmetros era alterado mantendo inalterado os dois outros, sobretudo o período que permaneceu sempre inalterado. Com exceção da simulação realizada com a série em ordem decrescente do valor da direção de incidência da onda, cujo resultado indicou avanço da praia a 2 km a sul do grande espigão, as demais simulações apresentaram as mesmas tendências observadas pelos pesquisadores nos anos anteriores: deposição imediatamente a sotamar do grande espigão e erosão a partir de 2 km a sul desse espigão.

As simulações de previsão realizadas por Hanson e Kraus (1986) para o período de junho/83 a junho /88 basearam-se na aplicação do método de Monte Carlo em três formas distintas: 1) para cada categoria mensal os conjuntos dos três parâmetros da onda foram aleatoriamente intercambiados; 2) na série histórica completa esses conjuntos foram aleatoriamente intercambiado e finalmente 3) cada parâmetro da onda dentro do conjunto foi aleatoriamente alterado independentemente dos outros dois. Ao contrário dos resultados obtidos por Le Mehaute *et al.* (1983), que mostram uma sensibilidade da posição da linha de praia à ordem da sequência do valor do parâmetro direção de onda na ausência de fontes de difração, nessas simulações os resultados para a linha de praia se mostraram muito similares, independente da ordem utilizada. Tal fato demonstra, segundo Hanson e Kraus (1986), a influência da difração produzida pelos quebra-mares no regime de ondas na arrebenção, que independe praticamente da direção da onda em águas profundas.

Nas simulações para a previsão da linha de praia realizadas nos trabalhos de Kraus *et al.*(1984) e Hanson e Kraus (1986) os parâmetros K_1 e K_2 foram mantidos iguais a 0,1. Para considerar o aumento da capacidade de retenção dos sedimentos provenientes do rio Naka pelo quebra-mar destacado, o valor de q_0 foi fixado em $2,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}$.

Em que pese o grande leque de simulações de previsão efetuadas por Kraus *et al.* (1984) e Hanson e Kraus (1986), adicionando aos modelos determinísticos desenvolvidos características estatísticas, esses resultados carecem de um embasamento mais consistente considerando a impossibilidade demonstrada pelos pesquisadores em estimar com precisão a dependência no tempo do parâmetro de transporte perpendicular q_0 .

Para os testes de previsão Kraus *et al.* (1984) consideraram a série histórica futura com as mesmas características que a passada . Considerando aceito esse procedimento, somente no futuro poderia ser feita sua validação ao comparar as previsões com o estado real da posição da linha de praia. Mas ao que parece nenhum estudo foi publicado posteriormente para confirmar essas previsões e validar o modelo proposto.

Aglutinando todos as características desenvolvidas para os modelos antecessores, Hanson (1987) desenvolveu a estrutura do modelo genérico GENESIS, de 1- linha, sustentado no conceito de “janela de energia das ondas”, através de um projeto de pesquisa conjunta entre a Universidade de Lund, Suécia, e o CERC (Coastal Engineering Research Center), U.S.A.. Tendo como base de sua formulação matemática as equações 6 e 7, propôs uma pequena modificação na equação da continuidade inserindo o parâmetro altura da berma.

O termo “janela de energia” é definido como a área de um trecho de praia susceptível à incidência de ondas. Do ponto de vista prático, uma janela de energia das ondas é definida por duas estruturas ou acidentes geográficos que limitam a penetração da frente de ondas a um determinado trecho de praia (Hanson e Kraus, 1989) (Figura 3.8).

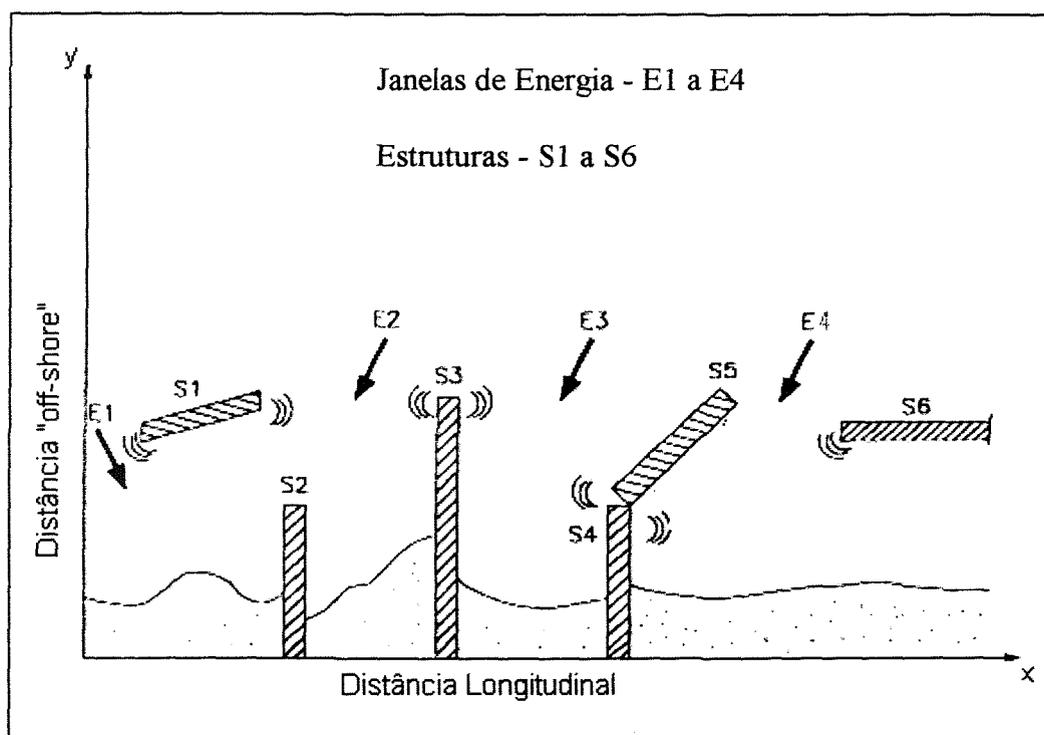


Figura 3.8: Janela de energia das ondas definindo os domínios para o cálculo do transporte litorâneo. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989).

O modelo GENESIS, através do programa que o implementa, soluciona a equação de mudança da linha de praia de modo independente em cada domínio, exceto quando ocorre a passagem de sedimentos pelos seus limites.

Esse modelo foi posteriormente aprimorado por Hanson e Kraus (1989) e Hanson *et al.* (1989) para capacitá-lo a simular a transmissão da energia da onda pelos quebra-mares destacados, a localização de espigões nos contornos do sistema modelado e a inclusão de fontes distintas de geração de ondas (sea e swell). A versão 3 do código computacional que implementa a solução numérica desse modelo, atualizado em dezembro de 1995, é o objeto de estudo do presente trabalho.

Segundo Hanson e Kraus (1989) o modelo GENESIS é utilizado para prever as alterações da linha de praia resultantes das variações espacial e temporal do transporte longitudinal de sedimentos, associadas aos projetos de engenharia costeira ou atividades humanas na região litorânea.

O modelo GENESIS considera o transporte transversal devido às ondas, o transporte eólico, a contribuição fluvial ou qualquer outro tipo de contribuição de sedimentos como fontes ou sumidouro na equação de balanço sedimentológico. De maneira menos versátil que os modelos que lhe deram origem, onde o termo representativo de fonte ou sumidouro de sedimentos q , equação 6, admite uma expressão analítica, no modelo GENESIS as contribuições ou retiradas de sedimentos da área modelada é representada diretamente, através de estimativas, pelo avanço em direção ao largo ou recuo da linha de praia.

Para suprir as deficiências apresentadas pelos modelos anteriores, (Kraus e Harikai,1983, Kraus *et al.*,1984 e Hanson e Kraus,1986), onde o modelo de refração das ondas não contempla as irregularidades de fundo, foi acoplado ao modelo GENESIS o modelo auxiliar RCPWAVE, desenvolvido por Ebersole *et al.* (1986), que realiza a propagação das ondas considerando a batimetria real da área modelada. Assim, foi criado o sistema computacional para a modelagem da linha de praia (SMS), desenvolvido pelo Coastal Engineering Research Center (CERC/USA). Ele é constituído por dois modelos numéricos principais, GENESIS e RCPWAVE, 12 programas de suporte, 2 arquivos de edição, dois programas para visualização de resultados na forma gráfica e um programa geral para geração de gráficos. Ele foi projetado para ser processado em uma configuração de "hardware" cuja capacidade mínima corresponde a um microcomputador PC com microprocessador 386, 25 MHz, com co-processador e monitor colorido VGA. Este sistema numérico, elaborado originalmente na linguagem FORTRAN, é hoje de domínio público e fornecido gratuitamente pelo CERC na sua forma executável. A estrutura do sistema de modelagem da linha de praia é apresentada em resumo no Apêndice A. Para maiores informações consulte o trabalho de Gravens *et al.* (1991).

A Figura 3.9 apresenta o fluxograma da dinâmica do sistema de modelagem da linha de praia.

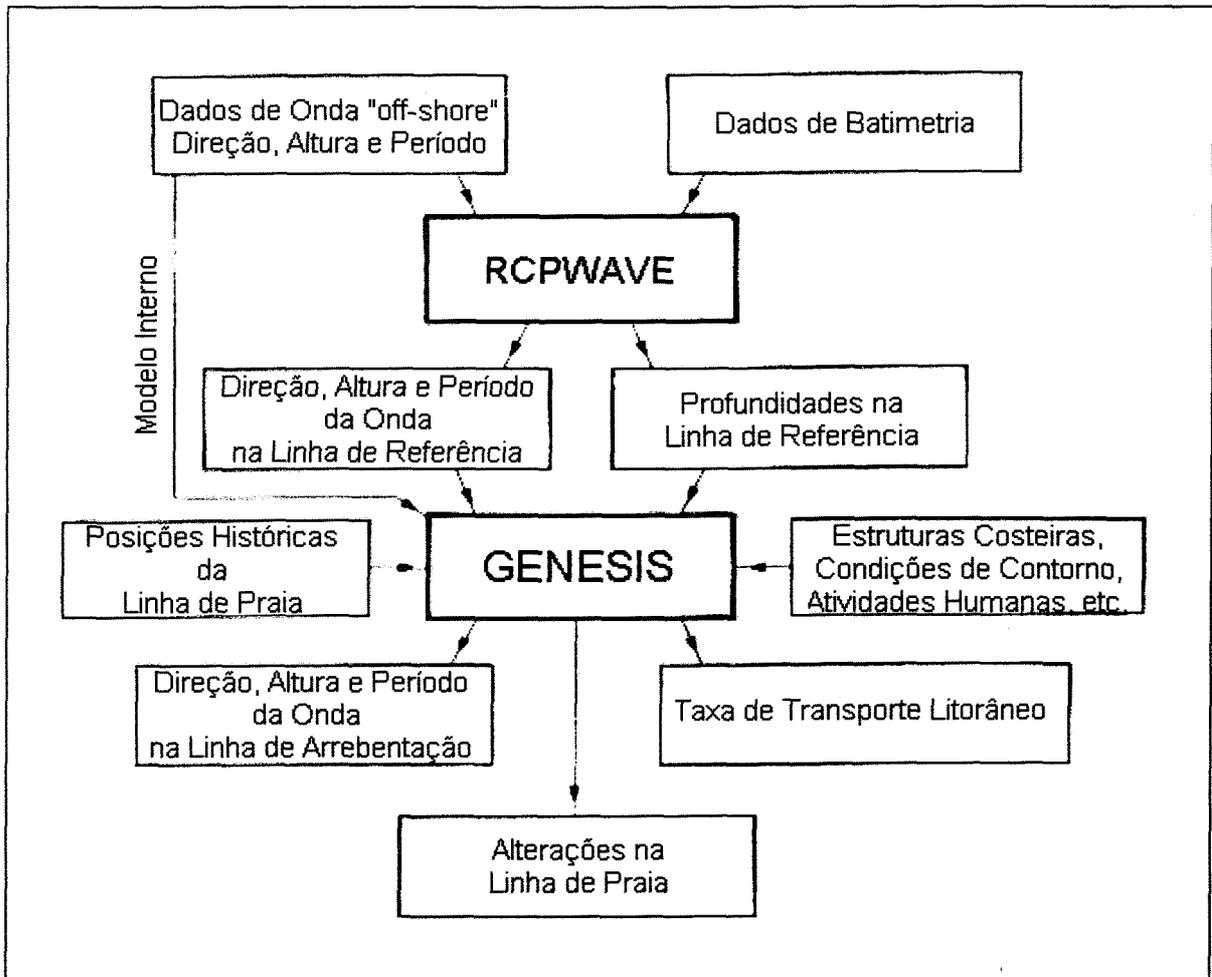


Figura 3.9 : Fluxograma de cálculo do sistema de modelagem da linha de praia- SMS.

Na formulação das equações que governam o modelo GENESIS, que basicamente são as mesmas adotadas nos modelos precursores utilizou-se o esquema mostrado na Figura 3.10. É a representação do processo de variação da linha de praia, que ocorre em um período de tempo Δt , em um trecho de extensão Δx .

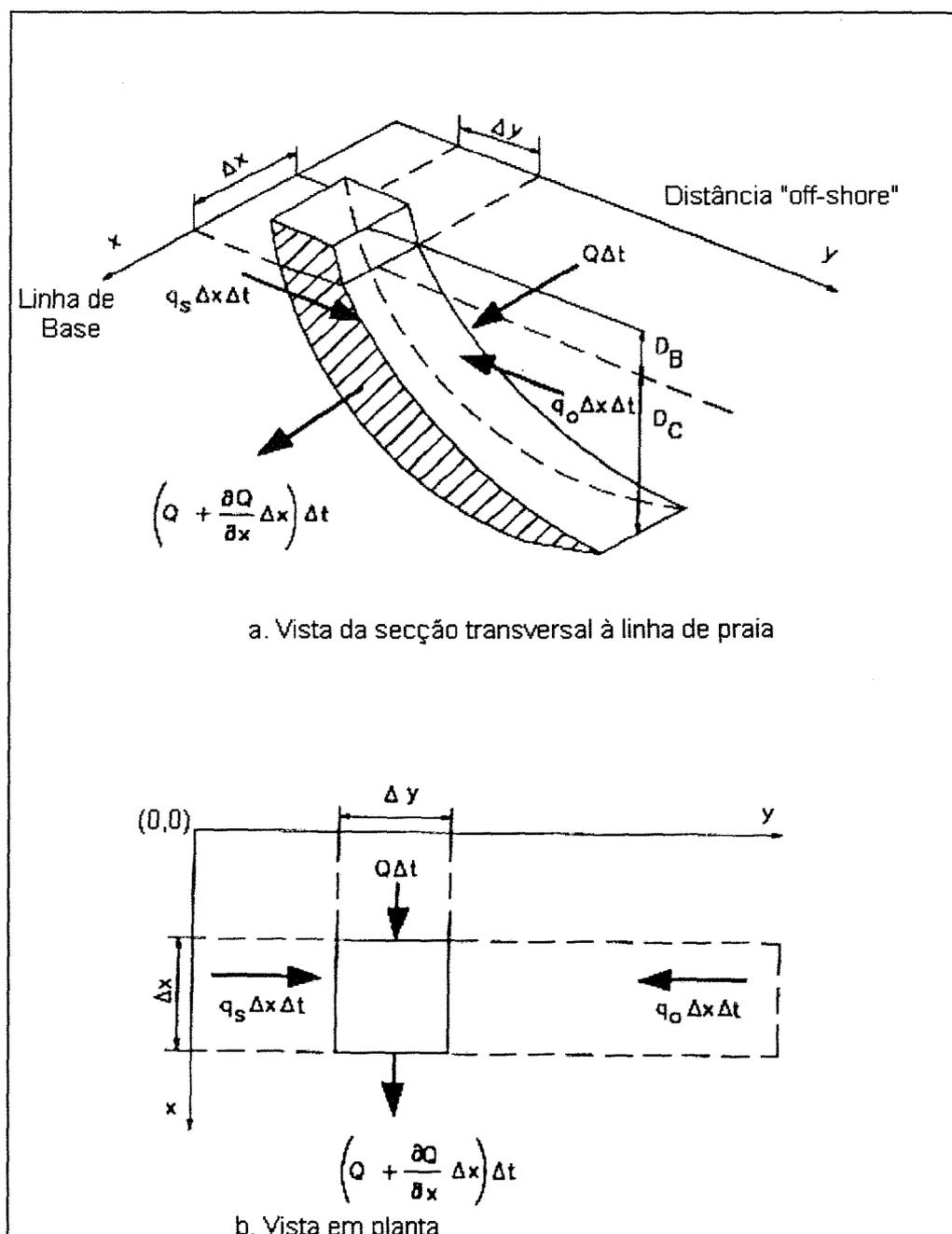


Figura 3.10 : Esquema genérico para a formulação matemática do modelo.
(Fonte: Hanson e Kraus, 1989).

Assim, pela Figura 3.10, a mudança da posição da linha de praia é representada por Δy , o comprimento do trecho da linha de praia é Δx , a altura da berma e a profundidade de fechamento são representadas respectivamente por D_B e D_C e medidas a partir do plano de referência estipulado (MSL, MLLW, MHW, etc). A profundidade de fechamento é a profundidade mínima a partir da qual, caminhando para o largo, o perfil não apresenta

variações temporais, significando transporte desprezível ou nulo de sedimentos. As taxas de transporte litorâneo, em volume de areia por unidade de tempo, nas duas laterais da célula são representadas por Q e $\{Q + (\partial Q/\partial x) \Delta x\}$, significando alteração da taxa de transporte. q_s e q_o representam respectivamente entrada e saída de sedimentos, em volume de areia por comprimento de praia e por unidade de tempo, neste caso podendo representar respectivamente engordamento de praia ou extração de areia (ou transporte pelo vento). Assim, considerando a mudança sofrida pelo trecho Δx , representada pelo volume ΔV , tem-se:

$$\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C) \quad (13)$$

Pela lei da conservação de massa e considerando $q = q_s + q_o$, obtém-se pelo desenvolvimento abaixo, uma das equações que governam o modelo GENESIS :

$$(Q + (\partial Q/\partial x) \Delta x) \Delta t - Q \Delta t + q \Delta x \Delta t = \Delta V \quad (14)$$

$$(Q + (\partial Q/\partial x) \Delta x) \Delta t - Q \Delta t + q \Delta x \Delta t = \Delta x \Delta y (D_B + D_C) \quad (15)$$

rearranjando e para $\Delta t \rightarrow 0$,

$$\partial y / \partial t + (\partial Q/\partial x - q) 1 / (D_B + D_C) = 0 \quad (16)$$

A solução desta equação, que prevê a variação da linha de praia, depende do conhecimento de Q , q , D_B e D_C . Nesta versão do modelo, as variáveis q , D_B e D_C são mantidas constantes e previamente determinadas. A variável Q é determinada pela equação empírica já apresentada anteriormente:

$$Q = (H^2 C_g)_b (\alpha_1 \text{ sen } 2 \theta_{bs} - \alpha_2 \text{ cos } \theta_{bs} \partial H/\partial x)_b \quad (17)$$

sendo α_1 e α_2 definidos como nas equações 8 e 9.

A extensão de trechos de praia utilizados para aplicação do GENESIS se situa aproximadamente entre 1 e 100 km, com resolução espacial variando de 15 a 90 m e com períodos de simulação variando de 1 mês a 20 anos.

Em resumo, o modelo GENESIS dispõe de uma estrutura que o habilita às seguintes simulações:

a) propagação das ondas monitoradas ao largo até a linha de arrebentação utilizando uma subrotina interna que considera as linhas isobatimétricas paralelas ou utilizando o código RCPWAVE que considera as profundidades reais obtidas pela batimetria;

b) um grande número e combinações de estruturas e atividades costeiras como: espigões, molhes, quebra-mares destacados e muros de proteção(seawall), transpasse de sedimentos, engordamento de praia e extração de areia;

c) transmissão e “by-pass” dos sedimentos pelas estruturas do tipo espigão e molhe

d) difração das ondas pelas estruturas;

e) propagação das ondas oriundas de fontes distintas (vagas e ondulações);

f) transmissão da energia das ondas através de quebra-mares destacados.

Como limitações do modelo destacam-se:

a) não simula a reflexão das ondas;

b) não permite a formação de tómbolo;

c) não considera as mudanças de nível d'água devido à maré;

d) o transporte de sedimentos é somente gerado pelas ondas.

O modelo GENESIS não contempla as variações da posição da linha de praia devido as tempestades, considera que estas se anulam a longo prazo.

Baseado essencialmente na hipótese de transporte litorâneo de sedimentos induzido pelo ataque oblíquo das ondas à linha de praia, o modelo não se aplica em áreas onde as ondas não sejam fator determinante do transporte, a saber: áreas onde predominam as correntes de maré e áreas onde predominam as correntes induzidas pelos ventos locais.

Uma aplicação do modelo GENESIS com propósitos acadêmicos foi realizada por Hanson e Kraus (1989) na localidade de Lorain, USA, situada às margens do Lago Erie,

utilizando dados do projeto implantado nesse local (Figuras 3.11 e 3.12).

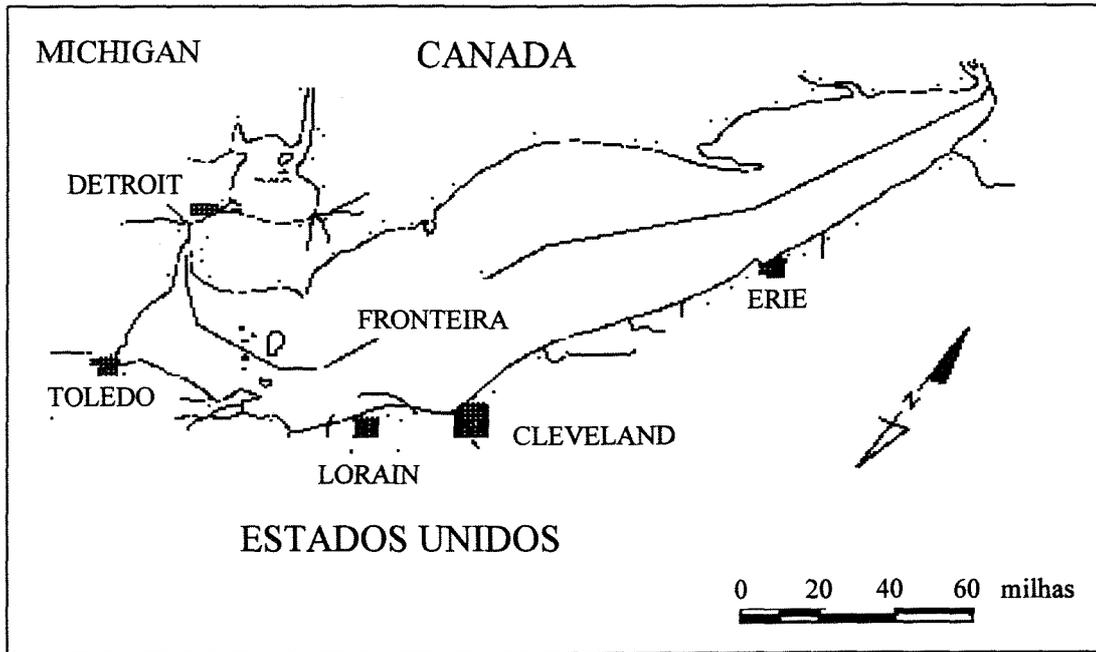


Figura 3.11: Mapa de localização. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989).

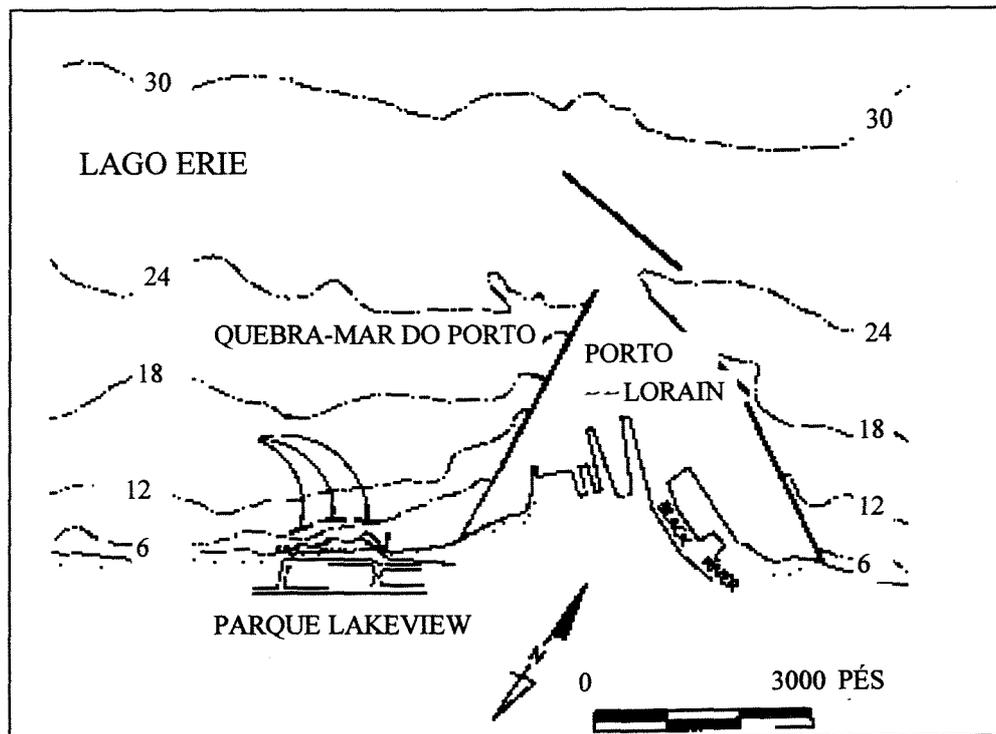


Figura 3.12: Detalhe da localização do projeto. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989).

O projeto de engenharia costeira adotado nessa localidade objetivava criar e manter uma praia para atividades de lazer. Em vista do clima de ondas da região, altas e de curto período, com tendências a erodir a areia da praia, e na pouca disponibilidade de areia, o projeto foi baseado na implantação de dois espigões em cada extremidade da praia a ser criada, na alimentação artificial de areia e na construção de três quebra-mares destacados para evitar que as tempestades causassem a perda da areia da praia (Figura 3.13).

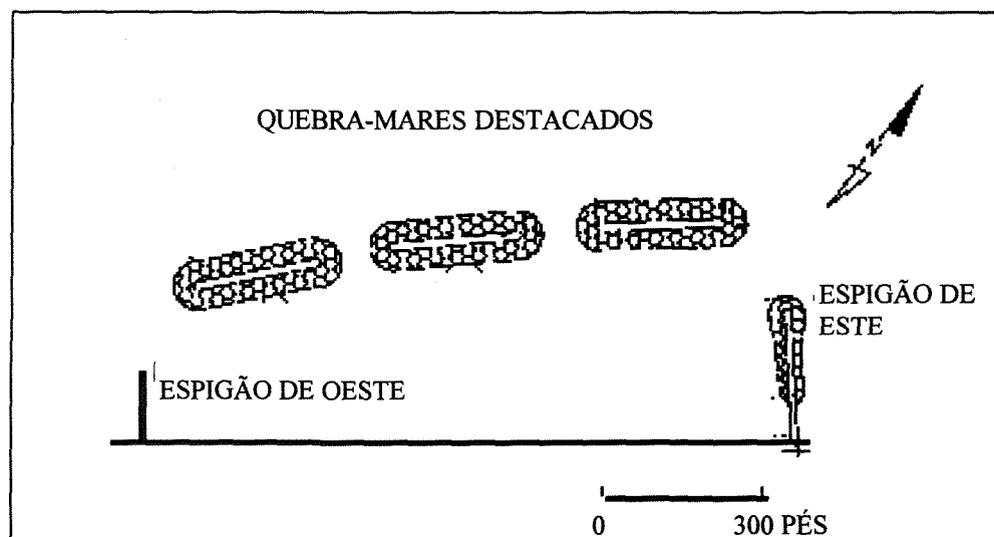


Figura 3.13 : Esquema do projeto para o Parque Lakeview. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989).

As obras de engenharia terminaram em outubro de 1977. O espigão situado a leste foi construído por enrocamento e concretagem, para o outro espigão e os três quebra-mares utilizou-se somente o enrocamento.

Os pesquisadores utilizaram as posições da linha de praia, obtidas através de levantamentos aerofotogramétricos de três épocas distintas, outubro/77, outubro/78 e novembro/79, para criar um período de calibração e outro de verificação do modelo. Como dados de onda utilizaram as previsões efetuadas por Saville (1953) para os anos de 1948 a 1950 para a localidade de Cleveland, a leste de Lorain (Figura 3.11). O parâmetro período da onda dessa série foi multiplicado por dois tendo como base as comparações com as medições instrumentadas realizadas ao largo de Cleveland na profundidade de 9 m, no período de

setembro/81 a novembro/81. Para adequar o parâmetro altura da onda para as condições de Lorain considerou-se que as ondas provenientes do quadrante oeste dispunham de menor “fetch” até Lorain e aquelas provenientes do quadrante leste dispunham de maior “fetch”. Assim, sobre esse parâmetro incidiram fatores de redução e acréscimo, respectivamente da ordem de 0,8 e 1,1, dependendo do ângulo de aproximação da onda. Com as alterações na série de Saville (1953) extraiu-se uma série representativa de um ano que foi novamente modificada para considerar a difração provocada pelo quebra-mar do porto de Lorain, adotando os procedimentos de Goda *et al.* (1978).

Para a modelagem da região Hanson e Kraus (1991) consideraram como a profundidade de fechamento o dobro da máxima altura anual da onda da série modificada, que era da ordem de 2,4 m e período de 7 s, resultando assim para esse parâmetro um valor de 4,8 m. Segundo Hallermeir (1978) a profundidade de fechamento medida é bem descrita pela relação linear aproximada $D_c \sim 1,7 H_0$, sendo H_0 a altura da onda em águas profundas. Entretanto, o melhor ajuste entre os valores calculados e os medidos é obtido pela equação 11, a qual considera o efeito do período da onda.

Utilizando para a modelagem os dados reais do projeto (U.S. Army Engineer District, 1975): período, quantidade e tipo de areia utilizada no engordamento artificial, altura da berma, estimativa de transporte litorâneo resultante, etc. os pesquisadores obtiveram uma boa concordância entre os valores calculados e aqueles medidos. Definiram os valores de 0,42 e 0,12 respectivamente para os parâmetros K_1 e K_2 , e os valores de 0,50, 0,22 e 0,30 como coeficiente de transmissão dos quebra-mares destacados.

Com o modelo calibrado e verificado Hanson e Kraus (1989) simularam a previsão para um período de 5 anos utilizando os levantamentos da linha de praia de outubro/77 e dezembro/82. A série histórica de ondas para o período de 5 anos foi estruturada estendendo, por repetições sucessivas, a série representativa de um ano. Os resultados obtidos mostraram a

capacidade do modelo, para as hipóteses consideradas, em prever a evolução da linha de praia atrás das estruturas construídas (Figura 3.14).

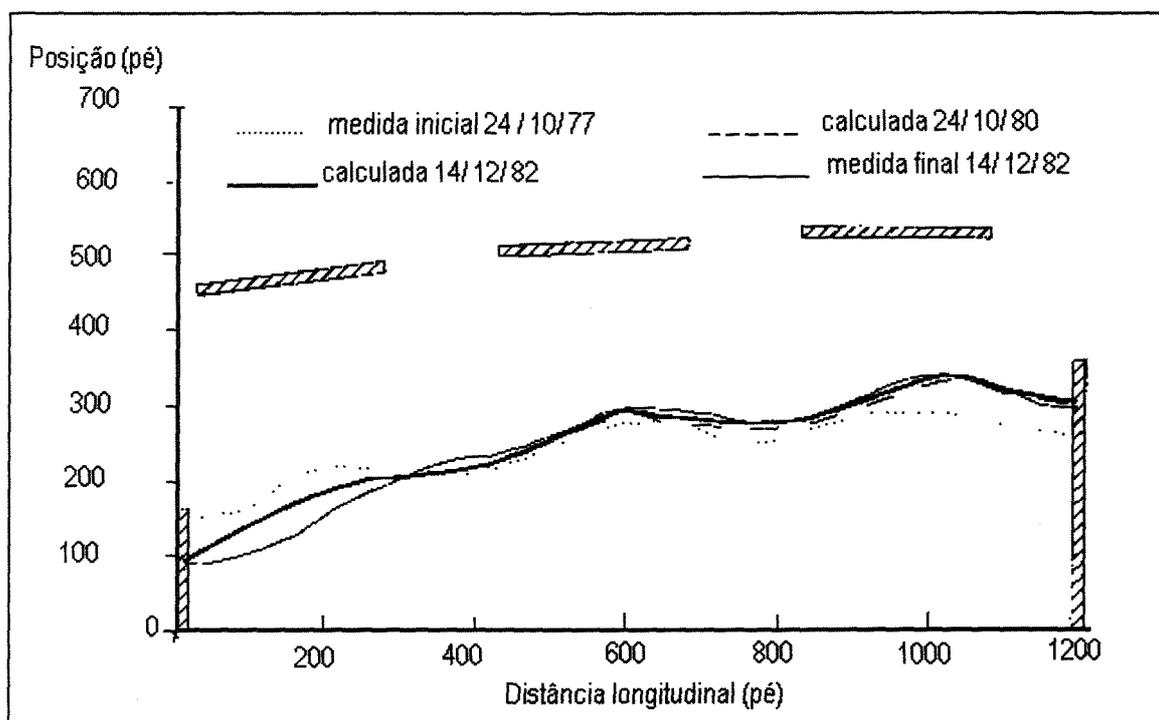


Figura 3.14: Comparação entre as linhas de praia medida e a calculada pelo modelo GENESIS. (Fonte: Hanson e Kraus, 1989).

Outras aplicações do modelo GENESIS são citadas por Hanson e Kraus (1989), como: a simulação do comportamento de um trecho de praia, em Holy Beach, Louisiana (USA), protegido por 6 quebra-mares destacados de constituições distintas (Hanson *et al.*, 1989). Nesta aplicação ocorreu um bom ajuste entre as posições das linhas calculada e medida e demonstrou a importância do coeficiente de transmissão da energia da onda, pelos quebra-mares, no controle das mudanças sofridas pelas praias.

Não houve êxito nas solicitações de cópias de publicações sobre as aplicações do modelo GENESIS para a simulação de um trecho de cerca de 14 km de costa, situada em New Jersey, USA, onde estão inclusos molhes em duas entradas de rios e 44 espigões (Gravens *et al.*, 1989) e para a avaliação de impacto pela construção de um braço de mar entre a baía de Anaheim e o Rio Santa Ana, no sul do Estado da Califórnia, USA (Gravens em preparação).

Acredita-se que estes trabalhos façam parte do acervo particular de projetos realizados pela instituição (CERC) a qual pertencem os pesquisadores e que não estão disponíveis para divulgação.

Uma das limitações do modelo GENESIS em relação ao seu antecessor, elaborado por Kraus *et al.* (1984) se refere ao parâmetro profundidade de fechamento. O algoritmo proposto por Kraus *et al.* (1984) faz o cálculo desse parâmetro a cada passo de tempo considerando os parâmetros ondulatórios daquele instante. No modelo GENESIS a profundidade de fechamento é única para toda a área modelada e período da simulação.

Quanto às limitações na aplicação do modelo GENESIS, Hanson e Kraus (1989) destacam a inadequacidade generalizada dos dados necessários para a modelagem devido a: não existência de dados históricos de onda e de posição da linha de praia na maioria das situações, às incertezas na série de dados de onda utilizada nas previsões, e às dificuldades para determinar com precisão a profundidade de fechamento, a transmissividade da energia das ondas pelos quebra-mares destacados e a permeabilidade das estruturas. Destacam também a má definição das condições de contorno por não haver em geral conhecimento preciso do transporte de sedimentos nesses limites. Esses pesquisadores recomendam reserva quanto aos resultados apresentados pelo modelo visto que, além do ataque oblíquo das ondas, outros parâmetros são também responsáveis pelo transporte litorâneo de sedimentos. Lembram também que dada a complexidade e variabilidade dos processos costeiros, que não são representados em sua totalidade, o resultado único apresentado pelo modelo determinístico apresenta imprecisões.

Young *et al.* (1995) fazem críticas à utilização do modelo como ferramenta de previsão da evolução da linha de praia. Admitem que os erros na formulação de hipóteses, as imperfeições do modelo e a utilização de valores médios para os parâmetros contribuem para incertezas dos resultados e são impossíveis de quantificar. O uso de valores médios para os

dados de onda, perfil de equilíbrio, altura da berma, profundidade de fechamento e declividade do fundo são apontados como fontes de erros devido à imprecisão na modelagem física da área. Afirmam que pequenos erros na estimativa inicial dos parâmetros como localização e volume de areia para o engordamento artificial, profundidade de fechamento, altura da berma, posição da linha de praia, etc. podem se propagar de forma a causar erros consideráveis em simulações longas com o modelo. As imperfeições do modelo são creditadas à equação de transporte longitudinal, sobretudo à utilização de dados de onda na arrebentação oriundos de valores médios da onda ao largo. Creditam também imperfeição à equação de balanço de massa que considera o sedimento espalhado em uma camada cobrindo igualmente toda a superfície limitada pela linha de praia e a isobatimétrica definida pela profundidade de fechamento. Para fundamentar suas críticas aos erros na formulação de hipóteses, Young *et al.* (1995) evocam os trabalhos de Hayes (1967), Morton (1981), Snedden *et al.* (1988) e Pearson e Riggs (1981) que evidenciam um significativo transporte para o largo, que permanentemente retira areia do transporte longitudinal mesmo além da profundidade de fechamento.

Young *et al.* (1995) reforçam também suas críticas ao modelo GENESIS embasados em dois casos estudos. No primeiro deles, realizado por Kraus *et al.* (1988), a calibração do modelo GENESIS para um trecho de praia ao norte do Estado de New Jersey, EUA, mostrou que existe mais de um conjunto de parâmetros de calibração, K_1 e K_2 , para um mesmo conjunto de parâmetros de entrada. Utilizando dois valores distintos para a profundidade de fechamento, estimados pelas condições da onda, definiu-se três conjuntos de parâmetros de calibração com bons resultados na reprodução da linha de praia. Para os pesquisadores isso indica a falta de significado físico dos parâmetros de entrada do modelo, o que transforma todas as variáveis de entrada em parâmetros de calibração.

Analisando a equação 16, do balanço de massa, nota-se que a taxa de variação da posição da linha de praia, que representa a escala de tempo do modelo, é uma relação

aproximada entre a taxa de transporte litorâneo e a profundidade de fechamento. Assim, é possível que diferentes valores para os parâmetros de calibração, K_1 e K_2 , para distintos valores da profundidade de fechamento resultem em séries temporais da taxa de variação da posição da linha de praia aproximadamente idênticas entre si, originando posições muito próximas entre elas, para diferentes parâmetros de calibração.

O outro caso estudo descrito por Young *et al.* (1995) se refere ao projeto de engordamento artificial de um trecho de praia (Folly Beach), na Carolina do Sul, EUA (USACE, 1991). Simulações realizadas com o modelo GENESIS indicavam que a reabilitação de 9 dos 43 espigões existentes, reduziriam a quantidade de material necessário ao projeto inicial de engordamento artificial em cerca de 50%. Os resultados obtidos na simulação indicavam um intervalo de 8 anos para efetuar novo engordamento. Com tais estimativas o projeto inicial foi executado. Entretanto, observações de campo posteriores apontavam para um novo engordamento no prazo de 1 a 2 anos a partir do início do projeto. Segundo Young *et al.* (1995), tal constatação desaprovou o uso do modelo GENESIS para futuros projetos de engenharia costeira. Entretanto, Houston (1996) contesta veementemente a críticas de Young *et al.* (1995) apresentando provas documentadas desse projeto que sustentam os resultados do modelo GENESIS.

As críticas efetuadas por Young *et al.* (1995) não diferem das observações feitas por Hanson e Kraus (1989) quanto às limitações e cuidados na utilização dos resultados do modelo. Seria muita pretensão esperar que fórmulas empíricas utilizadas pelo modelo GENESIS ou qualquer outro modelo reproduzissem fielmente os fenômenos físicos que ocorrem no ambiente costeiro. Ainda que se empregassem formulações matemáticas mais representativas da dinâmica costeira e algoritmos para a solução numérica inquestionavelmente precisos, certamente apresentariam limitações na falta de dados adequados e confiáveis.

Na calibração do modelo GENESIS em um trecho litorâneo da cidade de Fortaleza/CE, cujas características do desenvolvimento portuário e impactos provocados muito se assemelham às do porto de Oarai e praias adjacentes/Japão (Kraus e Harikai, 1983; Kraus *et al.*, 1984 e Hanson e Kraus, 1986), foi possível comprovar suas limitações. Entretanto, não se pode desprezar suas qualidades. A metodologia utilizada na implementação do modelo com dados dessa região e sua calibração é apresentada no capítulo 4, descrito a seguir.

4. METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos do presente trabalho, que são a calibração e avaliação do código GENESIS, estabeleceu-se um plano de ação contemplando inicialmente a formulação de um modelo conceitual mais detalhado para a área litorânea de Fortaleza. Essa proposição preliminar objetiva representar em forma gráfica os processos hidro-sedimentológicos e meteorológicos que ocorrem na região. Com base no conhecimento dos processos que ocorrem realiza-se a modelagem da região com os dados disponíveis da área definida.

Definiu-se como área de estudo a ser modelada o trecho de praia que se estende da embocadura do rio Ceará até o Porto de Mucuripe (Figura 4.1).

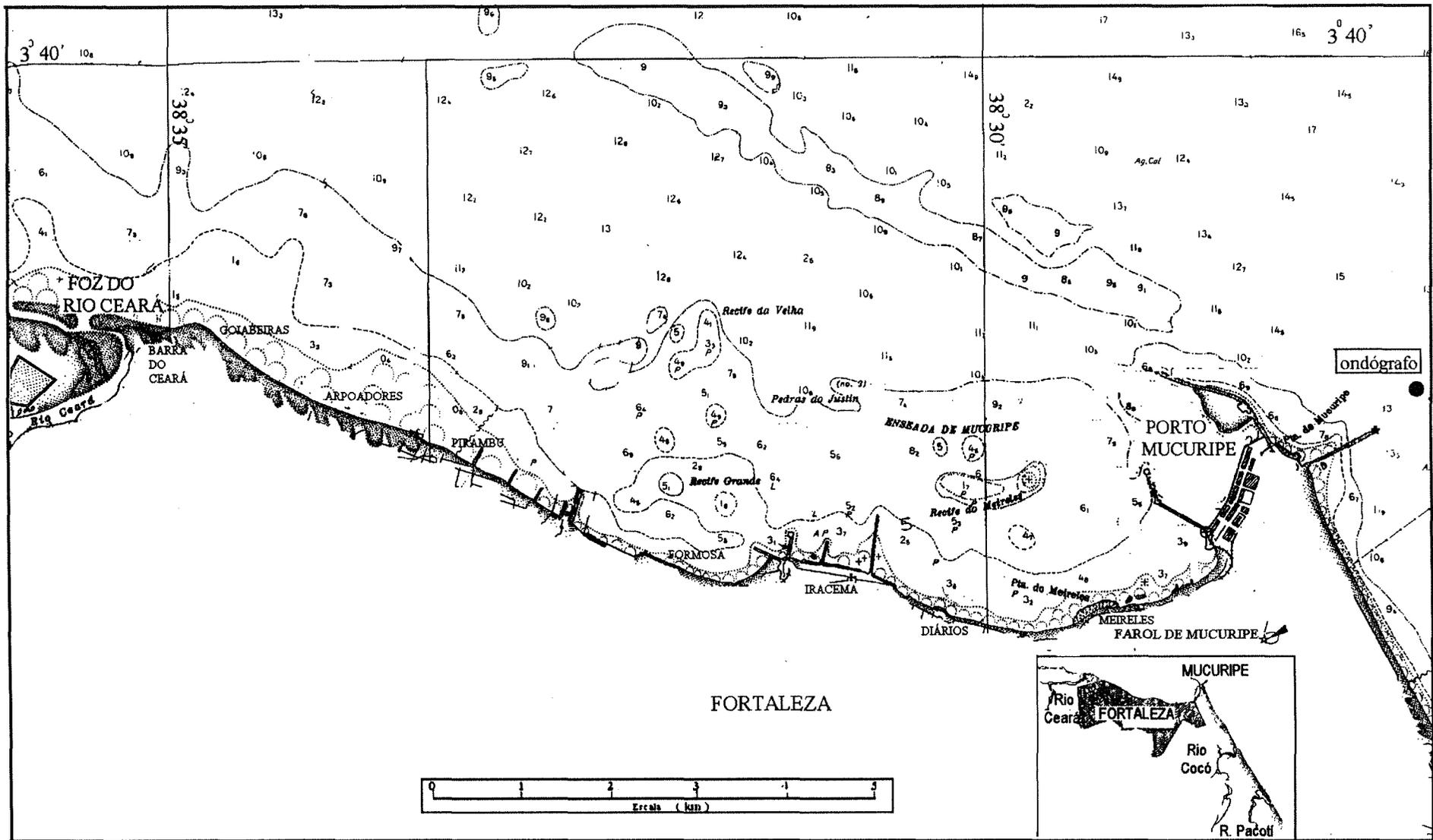


FIGURA 4.1: Mapa de localização - Reprodução parcial da carta náutica DHN -710 (correção em 1995).

Segundo Konikow e Bredehoeft (1992), o modelo conceitual é uma hipótese elaborada para representar, de forma geralmente gráfica, a dinâmica de um sistema. Ele constitui portanto na base de sustentação do modelo matemático e numérico proposto para uma determinada região. Considerando que o modelo numérico GENESIS, a ser aplicado à região de Fortaleza, é constituinte de um sistema já preconcebido para aplicações genéricas, a formulação do modelo conceitual visa permitir a adaptação do código aos processos físicos que ocorrem no litoral e a modelagem mais precisa da região.

Não se tem a pretensão no presente trabalho de formular um modelo conceitual para a região. Isso já foi realizado nos trabalhos de Morais (1980b), Smith e Morais (1984), Valentini e Rosman (1993), Pitombeira e Vieira (1995), dentre outros. Pretende-se acrescentar ao modelo já existente, direcionado para o balanço sedimentológico geral da região, um detalhamento maior dos parâmetros e processos envolvidos no transporte de sedimentos durante o período de calibração do modelo GENESIS, com vistas à quantificação da evolução da linha de praia.

Assim, para a concepção mais detalhada do modelo conceitual, de uma maneira simplificada mas representativa da área de estudo, fez-se mister a caracterização da região litorânea de Fortaleza, através da coleta e organização de um maior número possível de dados e trabalhos existentes sobre essa região. Para cumprir essa etapa do trabalho realizou-se uma viagem a essa cidade, entre os dias 17 e 24/08/97. Com o apoio de instituições municipais, estaduais e federais: IPLAM, SEDURB, CDC, IBGE e UFC, fez-se uma coletânea de informações sobre a região litorânea, necessárias ao conhecimento da região e entendimento dos processos litorâneos existentes.

Baseando-se nos dados e informações disponíveis espera-se que o modelo conceitual possa representar satisfatoriamente a realidade física hidrosedimentológica e fornecer subsídios para uma adequada modelagem da área de estudo. Tendo em vista que o modelo GENESIS

não considera os efeitos da maré nas estimativas das modificações da linha de praia, procurou-se detalhar na caracterização da área de estudo alguns parâmetros que pudessem auxiliar na modelagem da região e atenuar as limitações do código.

4.1 Caracterização da área de estudo

4.1.1 Histórico

A cidade de Fortaleza, capital do Estado do Ceará, situada na região nordeste do Brasil, tem uma extensa história de obras portuárias e de estruturas costeiras realizadas em seu litoral. Por esse motivo e sobretudo pela existência e relativa disponibilidade de dados escolheu-se esta região para a aplicação do modelo GENESIS. Os limites litorâneos do município englobam todo o trecho que se estendem desde o Rio Pacotí até o Rio Ceará (Figura 4.1).

A história do desenvolvimento portuário desta cidade se iniciou em 1807, quando foi construído o porto da então Vila de Fortaleza, objetivando principalmente a melhoria das condições de movimentação de mercadorias. A partir daí, quase 200 anos se passaram e muitas obras costeiras foram propostas e executadas para, além de atender as necessidades comerciais crescentes da metrópole, atenuar o assoreamento dos recintos portuários e combater a erosão das praias.

A construção do quebra-mar de Hawkshaw (Figura 4.2), dentro das melhorais propostas para o antigo porto, data de fins do século passado. Segundo Valentini e Rosman (1993), quando esta estrutura atingiu 350 m, em 1899, já se constatava o avanço da linha de praia, na região de sombra, de cerca de 400 m mar adentro.

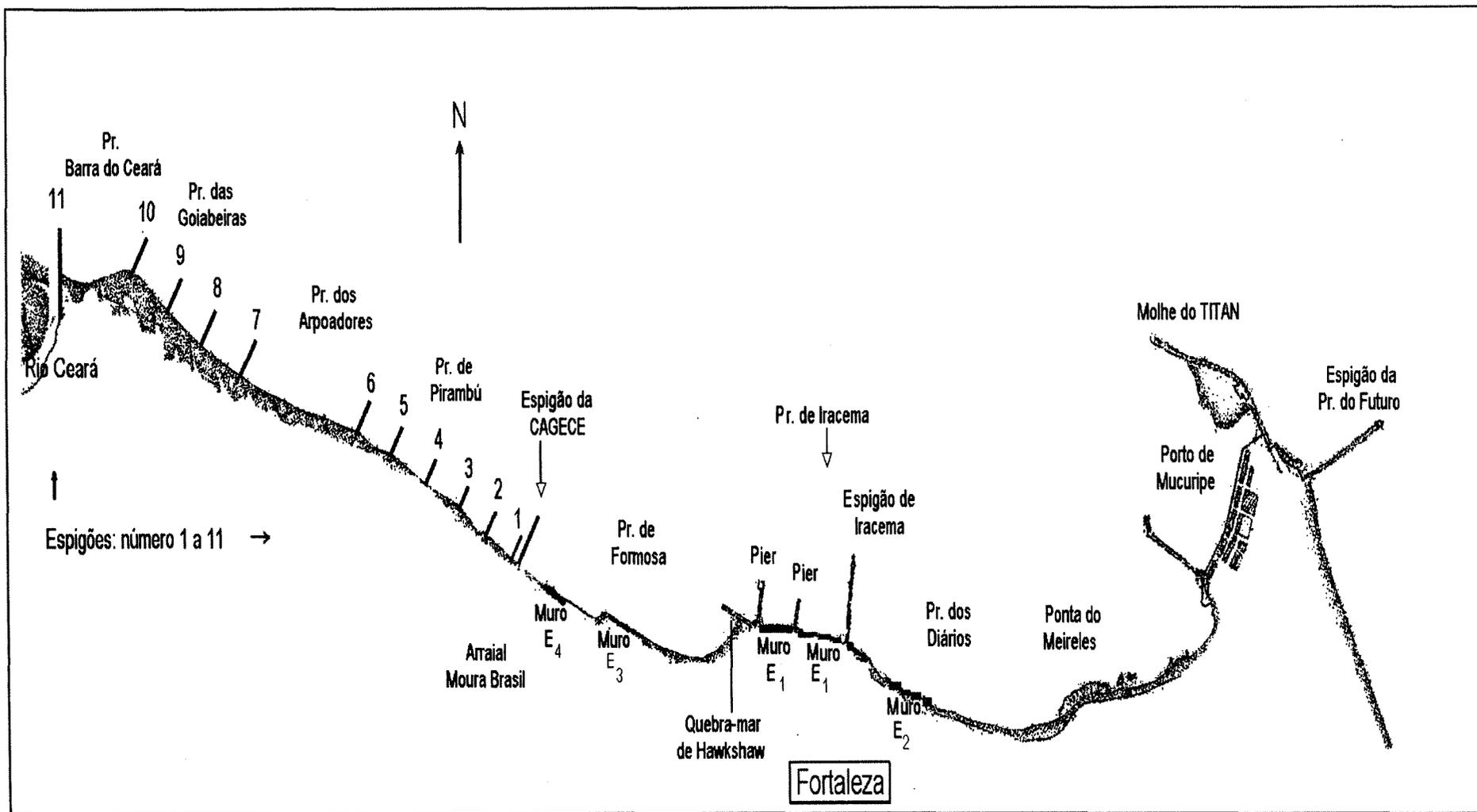


Figura 4.2: Trecho do litoral de Fortaleza e as estruturas costeiras.

Com o crescimento econômico do Estado e os problemas de assoreamento do antigo porto, foi realizada a construção do porto de Mucuripe no período de 1940 a 1945, tendo como projeto inicial um quebra-mar de cerca de 1400 m, um cais de atracação localizado na parede interna do quebra-mar e um cais principal (Morais, 1980b) (Figura 4.2).

Durante a construção do quebra-mar do porto, denominado de molhe do TITAN, teve início o processo de erosão da praia de Iracema (INPH, 1992a). Entretanto, conforme atesta o relatório de 1946/47 do extinto Departamento Nacional de Portos Rios e Canais, a construção do molhe veio somente agravar o processo de erosão nas praias de Fortaleza. Esse processo teve início com a fixação das dunas da Ponta de Mucuripe, realizada há cerca de três décadas atrás, que promovia a retenção da areia empurrada pelos ventos predominantes de SE e E e pela expansão das edificações na cidade (INPH, 1992b).

Com o objetivo de encontrar soluções para atenuar a agitação marinha e o assoreamento na área portuária foram realizados estudos em modelo reduzido no Laboratoire Dauphinois D'Hydraulique de Grenoble, na França, em 1953 (INPH, 1992a). As soluções apresentadas indicavam um aumento da extensão do molhe do TITAN, que somente ocorreu entre 1963 e 1966, e a construção de um espigão de retenção com 200 m de comprimento, na praia do Futuro (Figura 4.2). Esse espigão foi construído ainda na década de 50 e objetivava impedir o caminhamento dos sedimentos que se processa de SE para NNW. Após a construção do espigão de retenção já se definiam três áreas de acumulação das areias que deveriam atingir as praias localizadas a sotamar do porto de Mucuripe: uma restinga submersa localizada ao largo da extremidade do molhe do TITAN, a praia formada na face interna do molhe e a área de retenção a barlar do espigão da praia do Futuro. Com a retenção dos sedimentos pelo espigão, impedindo que os mesmos atingissem as praias mais a oeste, esse mesmo laboratório recomendou o transporte artificial da areia por bombeamento e despejo em local a ser definido. A outra solução proposta para o transporte artificial de sedimentos baseava-se na dragagem do

material retido e deposição em um local distante do canal de acesso. Com a ação das ondas esperava-se que o material deposto viessem a atingir as praias mais a oeste (INPH, 1992b). Entretanto, nenhuma das soluções propostas foi colocada em prática.

Após ter atingido a praia de Iracema, o processo de erosão se estendeu para as praias mais a oeste atingindo assim a praia de Formosa. Para atenuar o problema foram realizadas obras de proteção nessa praia, construindo um muro de proteção por meio de enrocamento da área atingida.

Posteriormente, já na década de 60, entre 1963 e 1966, para diminuir o estado de agitação das ondas na área de abrigo do porto, o molhe do TITAN foi prolongado passando a ter cerca de 1910 m. O mesmo ocorreu com o espigão da praia do Futuro que se encontrava com sua capacidade de retenção esgotada, passando a ter cerca de 550 m de extensão.

Em 1968 o INPH realizou seu primeiro estudo em modelo reduzido para a recuperação da praia de Iracema, o que resultou na construção de um espigão perpendicular a essa praia (Morais, 1980b) (Figura 4.3).



Figura 4.3 : Fotografia aérea do espigão da praia de Iracema. Vista de SW.
(Fonte: INPH, 1972).

Nos fins dos anos 60, após portanto a execução das obras de ampliação portuária e do espigão da praia do Futuro, a erosão ao longo do litoral oeste de Fortaleza colocava em risco a população de baixa renda residente em Arraial Moura Brasil, Pirambú e Bairro Arpoador. Em vista disso, O Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis e a Cia. Docas do Ceará construíram então 11 espigões ao longo desse litoral até na margem direita do Rio Ceará (INPH, 1992a). Com exceção do espigão situado na margem leste do Rio Ceará que foi projetado para alcançar 250 m, atingindo sua extremidade na época a profundidade de -6.0 m em relação ao Nível de Redução da DHN, os demais foram construídos com extensões variando de 100 a 150 m e com as extremidades praticamente não atingindo a profundidade de -1,0 m em relação ao datum da DHN (Carta DHN-710). Estes espigões foram construídos entre 1970 e 1974 sendo que em Outubro/1971 teve início a construção dos espigões, de número 1 a 4, nos bairros Arraial Moura Brasil e Pirambú (Figura 4.4). Os demais espigões, de número 5 a 11, foram construídos entre agosto/72 e dezembro/73. Além dessas obras foi efetivado também a fixação das dunas, em uma extensão de costa de 5,5 km, na situação em que se encontravam na época, resultando em seguida na invasão do campo de dunas pela população em geral (INPH, 1992a).

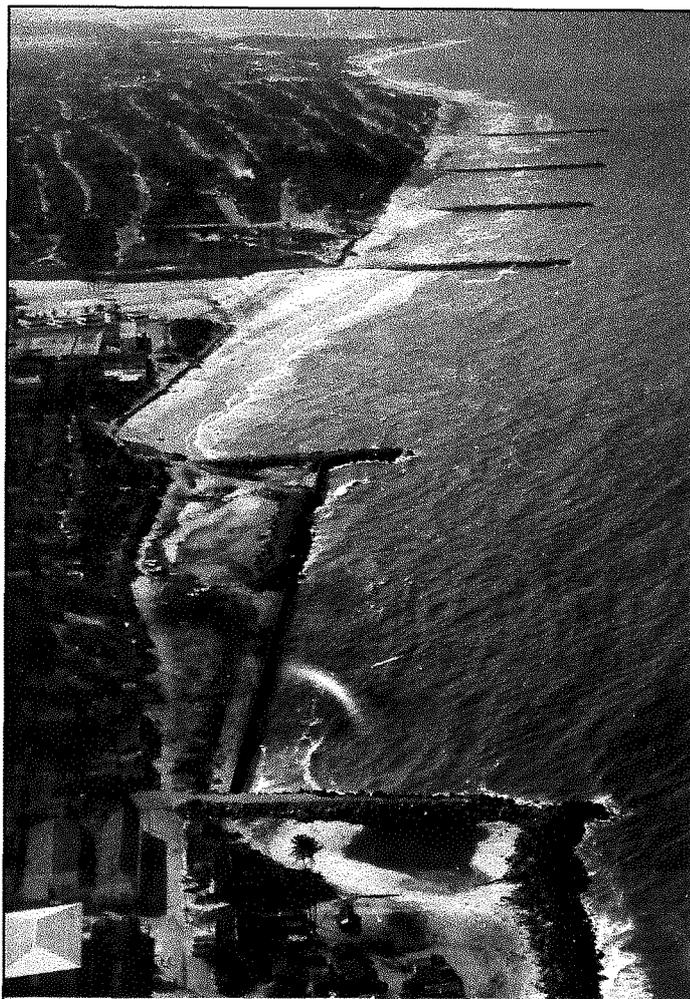


Figura 4.4 : Fotografia aérea mostrando as praias de Formosa, com os muros de proteção, e Pirambú com os 4 espigões. Vista de E. (Fonte: INPH, 1972).

Visto que a capacidade de retenção do espigão da praia do Futuro já se encontrava esgotada em 1974 o mesmo foi prolongado a partir desse ano, passando dos cerca de 550m aos atuais 990 m.

Um resumo da cronologia aproximada da construção de estruturas costeiras e portuárias no período de 1963 a 1995 é apresentado na Tabela 4.1. Esses dados foram estimados através da bibliografia consultada, das cartas náuticas DHN-710 e 701 e dos levantamentos aero-fotogramétricos da região, disponíveis em número de 5. O ponto de interrogação colocado ao lado do ano de construção da estrutura significa uma incerteza que não foi eliminada pela bibliografia disponível.

Tabela 4.1: Cronograma aproximado de construção e expansão das estruturas costeiras.

ESTRUTURA	PERÍODO APROX. DE CONSTRUÇÃO
Muros de proteção	
E1 (Pr. de Iracema)	Anterior a 1963
E2 (Pr. dos Diários)	Anterior a 1963
E3 (Pr. de Formosa)	Anterior a 1963
E4 (Pr. de Formosa)	1968 (?)
Espigões	
Espigão de Iracema	1968-1969
Espigões 1, 2, 3 e 4	1971-1972
Espigões 5 a 11	1972-1973
Espigão da CAGECE	1977
Prolongamento do molhe do TITAN (1400 m para 1900 m)	1963-1965
Prolongamento do espigão da praia do Futuro (550 m para 990 m)	1974

Dentre os afloramentos rochosos que ponteiavam o litoral da cidade de Fortaleza destaca-se a Ponta do Meireles pelas suas dimensões. Na modelagem da região ele é representado como muro de proteção.

As únicas atividades de manejo direto dos sedimentos registrada no período de 1963 a 1995, realizadas para atenuar o assoreamento da área portuária e a erosão das praias, estão relacionadas à dragagem da região portuária e despejo do material ao largo das praias de Iracema e Pirambú. Dentro desse período, 2,2 milhões de m³ de sedimentos foram dragados entre os anos de 1963 e 1972. Outros 11,5 milhões de m³ de sedimentos foram dragados entre

novembro/80 a agosto/91, sendo que desse total inicialmente 2,5 milhões de m³ foram despejados ao largo, próximo à praia de Iracema, e os 9,0 milhões de m³ restantes foram despejados ao largo, próximo à praia de Pirambú, para que parte desses sedimentos viessem a alimentar as praias (INPH/CDRJ, 1992b). Após esse período as estimativas apontam para uma dragagem de manutenção da ordem de 30.000 m³/mês (INPH, 1992b).

4.1.2 Clima de ondas

O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH/CDRJ) realizou no período de fevereiro/91 a julho/95 uma campanha de medições de onda em Fortaleza. Os registros de onda foram obtidos com um ondógrafo não direcional do tipo “WAVE RIDER” instalado a uma profundidade média de 16,0 m ao largo e a leste do espigão da praia do Futuro, no ponto de coordenadas: latitude 3° 42' 14" S e longitude 38° 27' 11" W (Figura 4.1) (INPH, 1996).

Os registros de onda eram realizados diariamente a intervalos de três horas, iniciando às 2 horas da manhã e totalizando 8 registros diários de 20 minutos de duração cada.

As observações visuais de direção de propagação das ondas foram realizadas, a partir de teodolito/bússola localizado no Farol de Mucuripe, três vezes por dia nos horários de 8:00, 14:00 e 17:00 horas.

Os registros obtidos pelo ondógrafo foram analisados em sua totalidade, pelo INPH, pelo método de Tucker-Draper (modificado), fornecendo assim, além das três maiores amplitudes de onda por registro, o período médio T_Z e a altura significativa H_S . Somente esses dois últimos parâmetros, juntamente com as observações da direção da onda, são utilizados como dados de onda nas simulações efetuadas pelo modelo.

A Companhia Docas do Ceará, empresa que contratou os serviços de monitoração das ondas, disponibilizou os dados do período de fevereiro/91 a junho/95. Esses dados foram digitalizados e processados por programas em FORTRAN para permitir a caracterização do clima de ondas da região.

Das 12610 medições simultâneas possíveis dos parâmetros altura, período e direção de onda, considerando um intervalo de 3 horas entre os registros, obtiveram-se 6140 dados de altura significativa e período, sem direção; 2443 dados simultâneos de altura, período e direção e 442 dados de direção, sem dados de período e altura da onda. Assim, as lacunas nos dados dos parâmetros período e altura de onda são de 4027 e, para o parâmetro direção de propagação, de 9725.

A Figura 4.5 mostra a distribuição de direções de propagação das ondas ao largo da Ponta de Mucuriipe. Ela é o resultado do processamento dos 2885 dados disponíveis da direção de propagação da onda em relação ao Norte Geográfico, o que representa 23 % dos dados possíveis dentro do intervalo de 19/02/91 a 14/06/95.

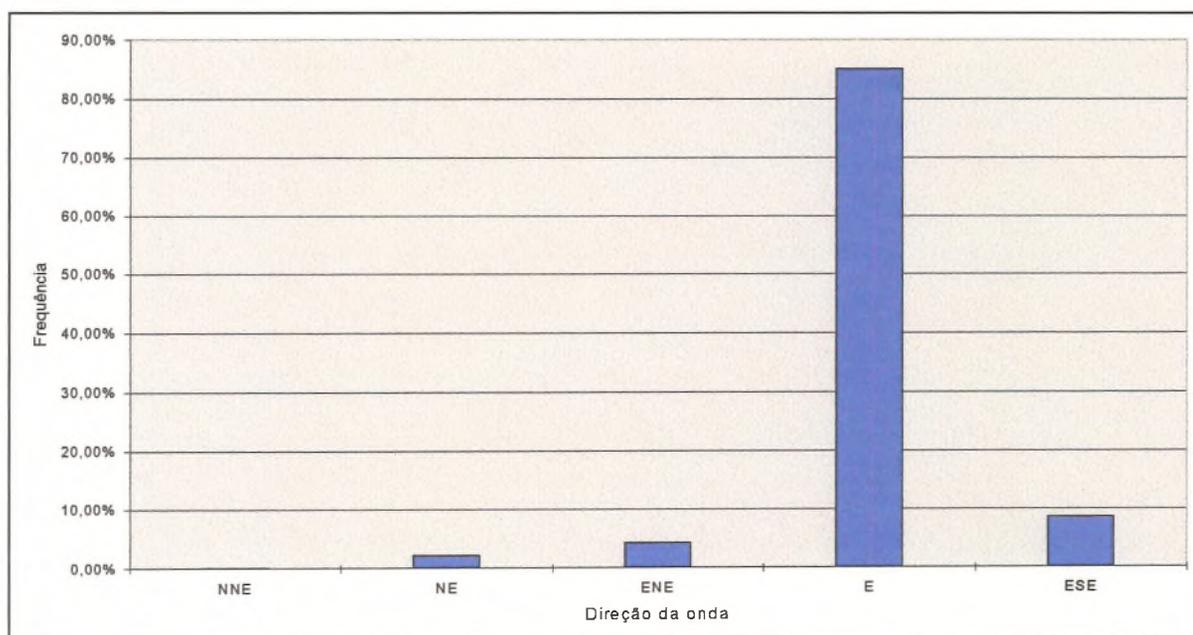


FIGURA 4.5: Histograma de direção da onda ao largo da Ponta de Mucuriipe/ CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95.

Observa-se claramente que as ondas são, em mais de 80% das observações, provenientes do setor E. As ondas originadas dos setores ESE e ENE representam respectivamente cerca de 8% e 4% das observações. Isto resulta em um sentido quase único de transporte de sedimentos, de Leste para Oeste, no trecho compreendido entre a ponta de

Mucuripe e a barra do Rio Ceará.

As Figuras 4.6 e 4.7 são o resultado da estatística dos 8583 pares de dados de período e altura da onda obtidos no intervalo de 19/02/91 a 14/06/95,

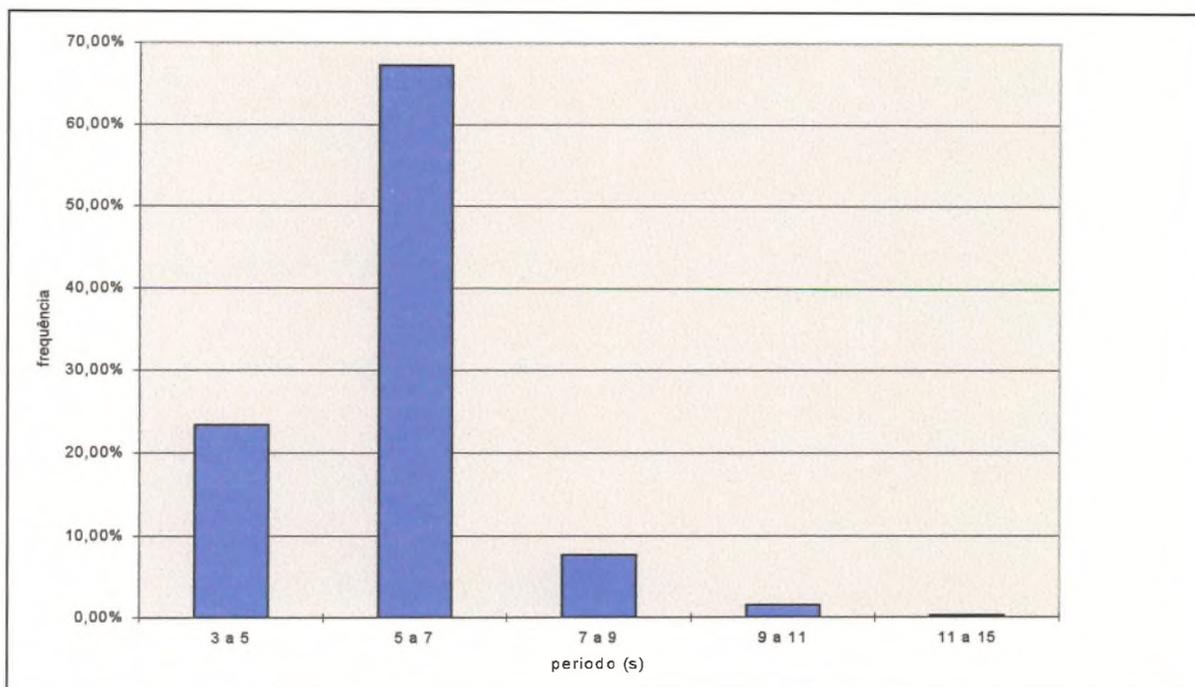


FIGURA 4.6: Histograma do período da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95.

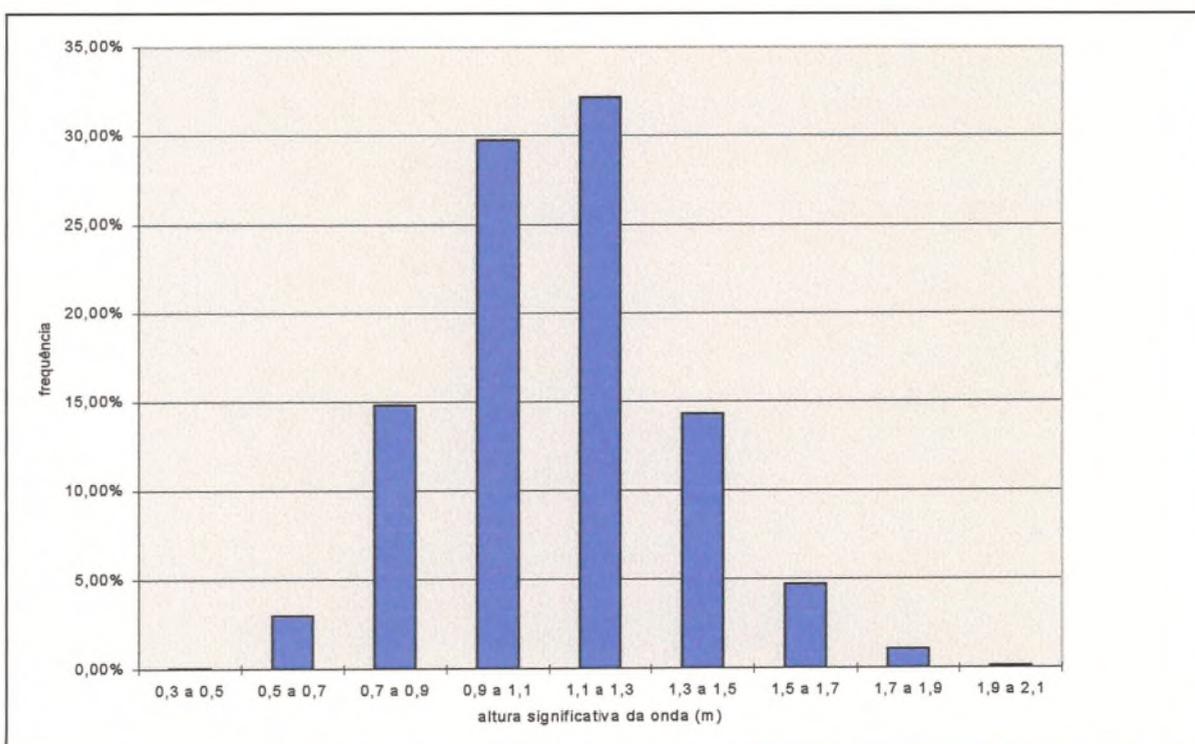


FIGURA 4.7: Histograma da altura significativa da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95.

Verifica-se pela Figura 4.6 que mais de 90 % das ondas têm períodos curtos, entre 3 e 7 segundos. O parâmetro largura espectral ultrapassou o valor de 0,5 em 98,41% dos registros indicando que as ondas ocorridas em Fortaleza tem características essencialmente de vagas (INPH, 1996). Essas características refletem a atuação dos ventos Aliseos que sopram de forma persistente na região. A ocorrência de ondas longas está relacionada às tempestades que ocorrem no Atlântico Norte (Melo F^o, 1993).

As alturas significativas são baixas, conforme é mostrado na Figura 4.7. Em cerca de 90 % dos dados a altura se situa entre 0,7 e 1,5 m.

Os histogramas mensais da direção da onda e os diagramas de dispersão mensais, no intervalo de fevereiro/91 a junho /95, da altura e período das ondas são mostrados nas Figuras 4.8, 4.9 ,4.10 e 4.11. Pode-se observar através dessas figuras que existe uma sazonalidade pouco marcante. Algumas características similares são observadas nos meses de janeiro, fevereiro e março. Nesses meses, além da direção predominante do setor E como em todos os outros meses, ocorre uma frequência maior, em relação aos outros meses, de ondas provenientes do quadrante NE. Nos meses de abril a dezembro, há uma maior frequência de ondas provenientes do setor ESE, além da direção predominante de E.

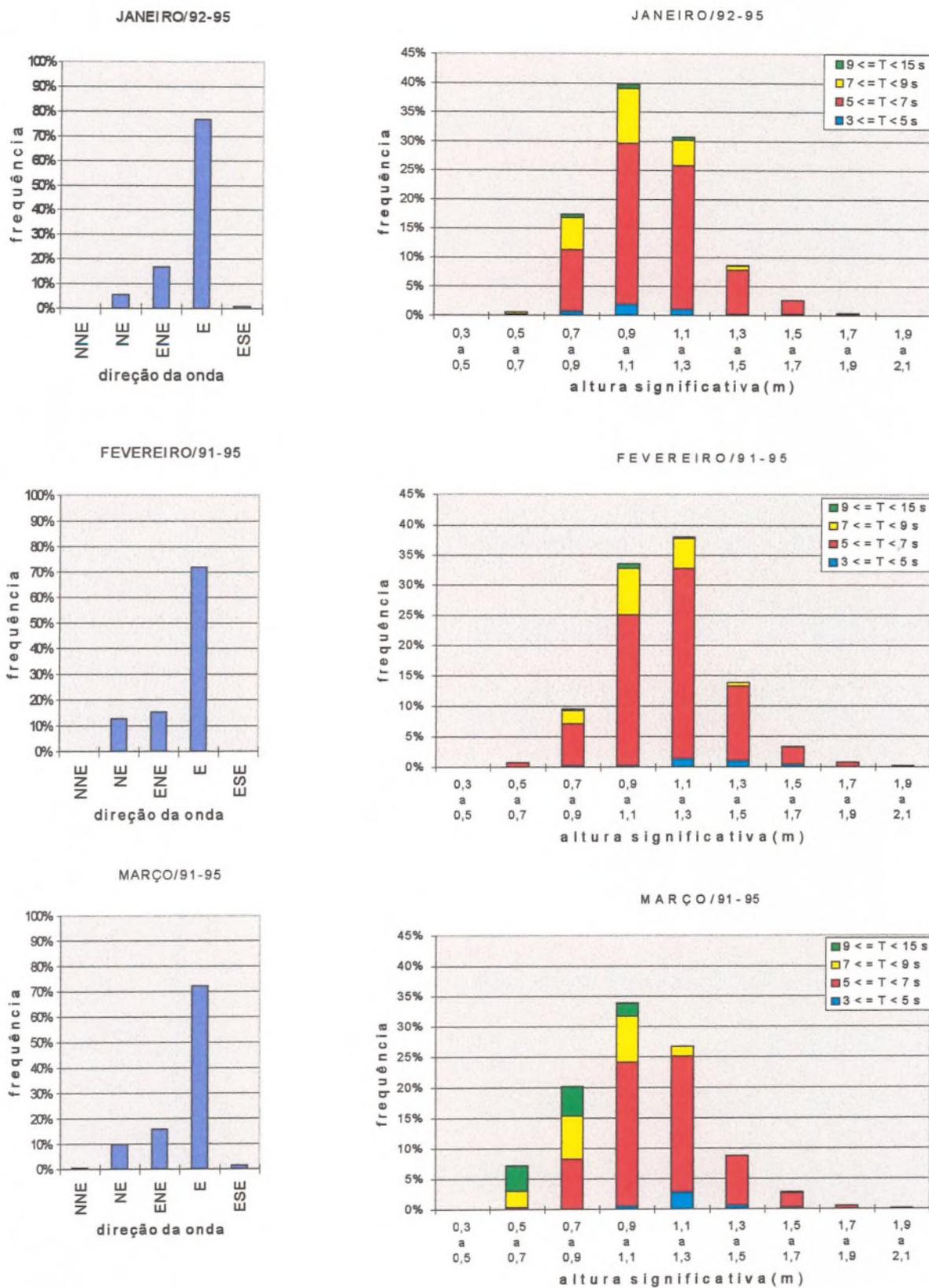


Figura 4.8: Histogramas da direção e diagramas de dispersão mensais, para o período e altura da onda significativa ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95.

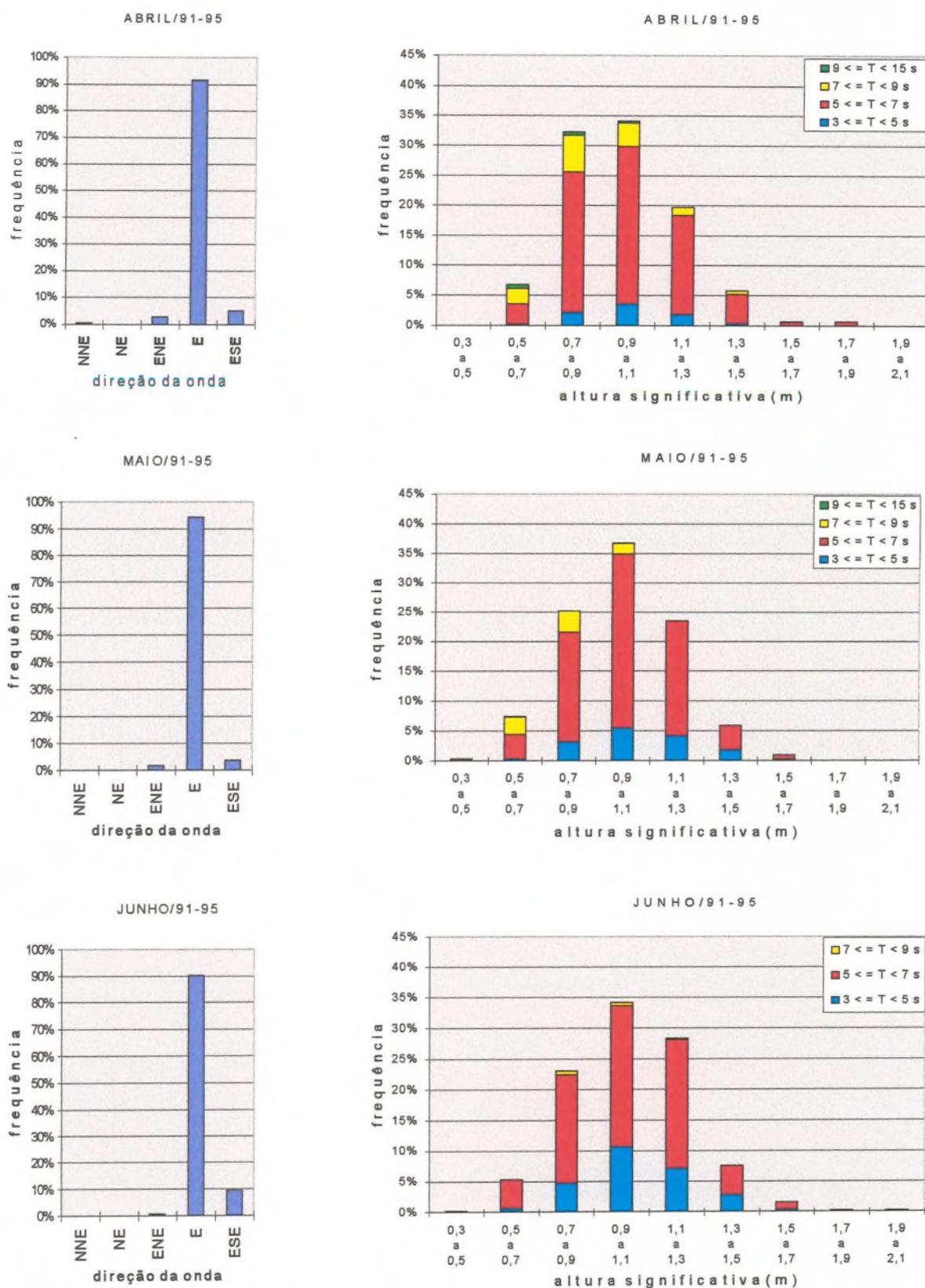


Figura 4.9: Histogramas da direção e diagramas de dispersão mensais para o período e altura da onda significativa ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95.

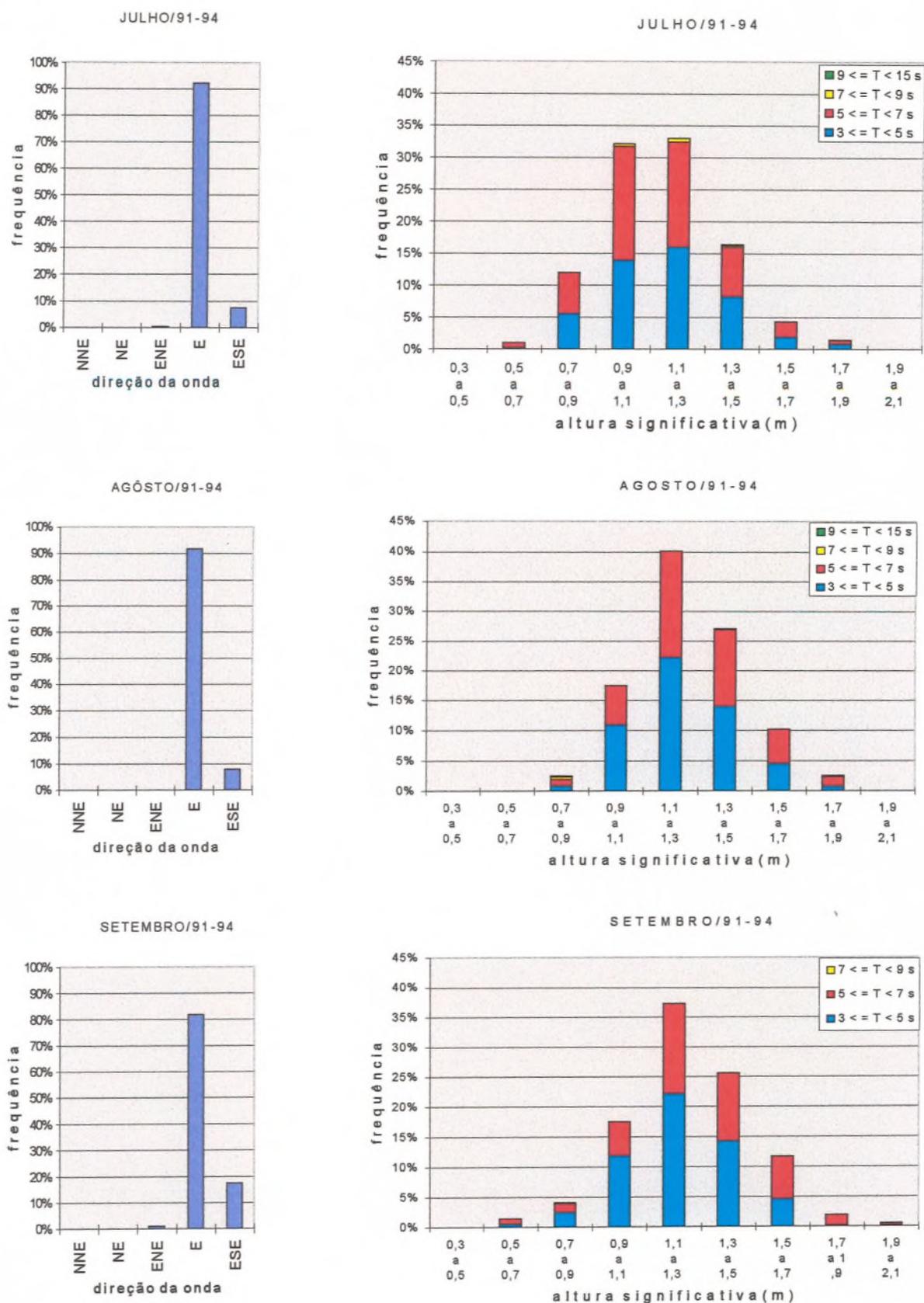


Figura 4.10: Histogramas da direção e diagrama de dispersão mensais do período e altura da onda significativa ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95.

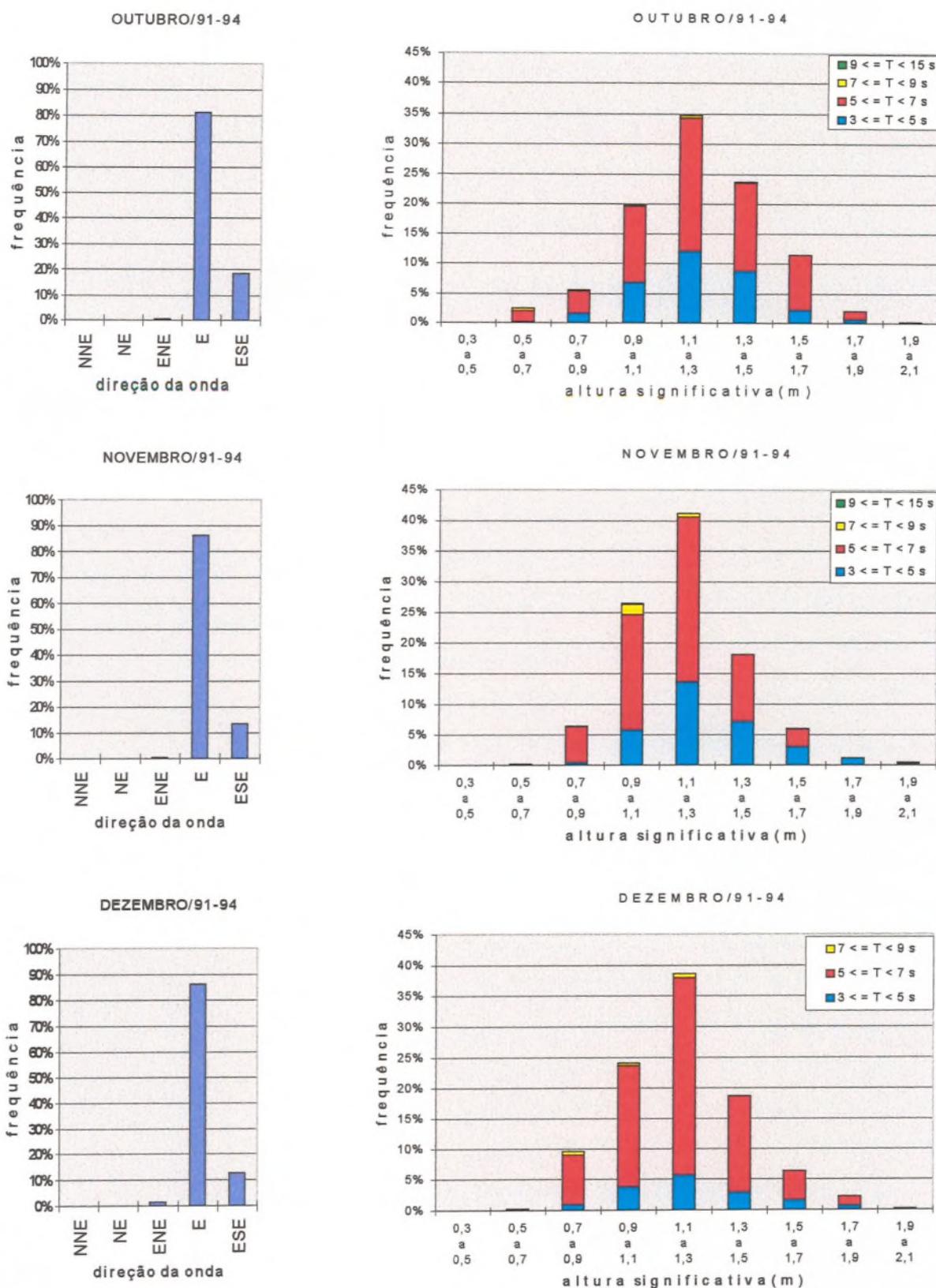


Figura 4.11: Histogramas da direção e diagramas de dispersão mensais para o período e altura da onda significativa ao largo da Ponta de Mucuripe/CE, para o intervalo de fevereiro/91 a junho/95.

Relativamente à altura e período, nos meses de janeiro a junho as ondas de altura mais frequente se situaram, em sua maioria, na faixa de 0,9 a 1,1 m, com período predominante variando de 5 a 7s. Nos meses de julho a dezembro as ondas de altura de maior ocorrência se situaram na faixa de 1,1 a 1,3 m, com o período de 3 a 5 s predominando nos meses de julho a setembro e o período de 5 a 7 s predominando nos meses de outubro a dezembro. Ondas mais longas, com período igual ou maior a 9 s, tiveram maior ocorrência nos meses de janeiro a março.

Embora as características mensais sejam pouco diferenciadas, utilizou-se as estatísticas para cada mês na complementação das lacunas existentes na série temporal dos dados de altura, período e direção das ondas.

Na Tabela 4.2 podem ser visualizados os valores médios, desvios padrões e extremos dos parâmetros, dentro do intervalo de tempo considerado, fevereiro/91 a junho/95.

Tabela 4.2: Estatística dos dados de onda para o período de fevereiro/91 a junho/95.

	MÉDIA	DESVIO	MÁXIMO	MÍNIMO
PERÍODO (s)	5,6	1,0	14,3	3,4
ALTURA (m)	1,12	0,23	2,09	0,35
DIREÇÃO (°)	92,5	10,4	119,0	17,0

A estatística mensal dos dados de onda para cada mês é apresentada na Tabela 4.3, considerando o intervalo de fevereiro/91 a junho/95.

Tabela 4.3: Média mensal e desvio padrão dos parâmetros da onda, para o período de fevereiro/91 a junho/95.

	PERÍODO (s)	ALTURA SIG. (m)	DIREÇÃO-NV (°)
JANEIRO	6,3 +/- 1,0	1,08 +/- 0,19	85,4 +/- 13,0
FEVEREIRO	6,2 +/- 0,9	1,14 +/- 0,20	83,0 +/- 17,8
MARÇO	6,7 +/-1,6	1,04 +/- 0,23	83,0 +/- 16,9
ABRIL	6,1 +/-1,0	0,98 +/- 0,21	93,0 +/- 8,6
MAIO	5,7 +/- 0,8	0,99 +/- 0,20	94,8 +/- 7,7
JUNHO	5,3 +/- 0,6	1,03 +/- 0,22	96,0 +/- 5,4
JULHO	5,1 +/- 0,7	1,14 +/- 0,21	94,7 +/- 5,6
AGOSTO	5,0 +/- 0,8	1,26 +/- 0,20	94,2 +/- 8,0
SETEMBRO	4,9 +/- 0,5	1,26 +/- 0,23	96,0 +/- 5,7
OUTUBRO	5,2 +/- 0,6	1,23 +/- 0,24	96,3 +/- 5,9
NOVEMBRO	5,3 +/- 0,7	1,19 +/- 0,21	95,0 +/- 6,0
DEZEMBRO	5,5 +/- 0,6	1,19 +/- 0,22	94,3 +/- 6,4

4.1.3 Marés

As marés nesta região são semi-diurnas com período médio de 12,4 horas. Essas informações e aquelas apresentadas na Tabela 4.4, vista a seguir, referem-se à maré astronômica e foram obtidas através das Tábuas de Marés e Cartas Náuticas da DHN. Não existe informação disponível sobre a existência de maré meteorológica na região.

Os registros de maré realizados em 1976 (Ochipinti, 1976) indicaram uma amplitude máxima de 2,7 m, no equinócio de abril, correspondendo um nível máximo de 2,5 m em relação ao zero da DHN.

Tabela 4.4: Parâmetros da maré astronômica na região de Fortaleza.
 Fontes: Tábuas de Marés da DHN - 1974, 1976, 1980, 1986 e 1995.
 Cartas Náuticas DHN - 701 (1965), 700 (1986) e 710 (1995)

ANO	Nível Médio do mar (m)	Amplitude máxima (m)	Nível máximo (m)	MHWS Média das preamares de sizígia (m)	MHWN média das preamares de quadratura (m)
1965	1,39	-	-	2,64	2,02
1974	1,17	2,5	2,5	-	-
1976	1,17	2,7	2,5	-	-
1980	1,55	3,3	3,3	-	-
1986	1,55	3,1	3,1	2,70	2,08
1995	1,55	3,2	3,1	2,82	2,20

4.1.4 Parâmetros hidro-meteorológicos

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).

As informações sobre o regime de ventos nessa região, extraídas do trabalho de Valentini (1994), são originadas de observações realizadas pela FUNCEME, com sensor situado a 2 m do solo, no período de 1976 a 1985. Em mais de 90% do período, as direções

predominantes mensais se situaram nos setores SE, com 66,7 % de frequência, e setor E, com 26,7 % de frequência, com intensidades médias variando de 1,6 a 6,1 m/s e maiores intensidades ocorrendo na primavera. A frequência de ocorrência nos setores S, NE e N são respectivamente 5%, 0,08% e 0,08%.

O outro parâmetro que pode influenciar na intensidade do transporte eólico é a pluviosidade na região. Concentrada no primeiro semestre, atinge 90% do total anual de cerca de 1580 mm. Esse dado, baseado no período de registro de 1963 a 1983, é originário da Estação Meteorológica do Centro de Ciências Agrárias da U.F.C. (Lima *et al.*, 1988).

Segundo Valentini (1994), o rio Ceará, situado no limite oeste da região de estudo, como os demais rios da região é intermitente e não contribui para o balanço sedimentológico. Seu estuário é governado predominantemente pela maré, exceto no período de chuvas intensas. Segundo Moraes (1980a), mais ao largo da embocadura do rio Ceará, formou-se uma sequência de barras que atuam como ponte para os sedimentos provenientes de Leste através do transporte litorâneo.

4.1.5 Sedimentos

Os sedimentos que constituem as praias e dunas, unidade geológica do Quaternário, são areias cujo constituinte básico é o quartzo. Ocorre também, nesses sedimentos, a presença de minerais pesados como a turmalina, ilmenita e hornblenda. As areias que formam as dunas apresentam granulometria média e fina e são de coloração branca e amarela (Moraes, 1972; Lima *et al.*, 1988). Esses sedimentos recobrem os sedimentos do Grupo Barreiras que em alguns pontos se manifestam na forma de falésias (Lima *et al.*, 1988).

A caracterização dos sedimentos na área compreendida entre a linha de praia e a isóbata de -10m é praticamente inexistente. Moraes (1980a) realizou uma caracterização isolada dos sedimentos colhidos na berma, linha de maré alta e zona de maré baixa, no litoral do município de Fortaleza, cujo resultado indicou granulometrias cujos diâmetros medianos

(d_{50}) apresentavam as seguintes faixas de variação: 0,17 a 0,5 mm na praia do Futuro, 0,075 a 0,14 mm na praia do Meireles, 0,12 a 0,41 mm entre o espigão de Iracema e o antigo porto, 0,18 a 0,42 mm na praia de Pirambú, 0,17 a 0,37 mm na praia dos Arpoadores, 0,25 a 0,37 mm na praia das Goiabeiras e 0,19 a 0,87 mm na praia da Barra do Ceará (Figura 4.2). Nesse levantamento não está bem caracterizado uma posição preferencial de deposição dos sedimentos de maior granulometria, dentre as três definidas para a coleta.

Segundo os estudos do material de fundo constituinte da região portuária, realizados por Moraes (1972), na bacia de evolução domina a fácies argilo-siltica, associada a um alto teor de matéria orgânica, sendo a fração de areia sempre inferior a 10 %. Entretanto, outras fácies foram caracterizadas em áreas do canal de acesso e adjacências e igualmente susceptíveis de sofrerem dragagem (Figura 4.12).

Valentini (1994) ressalta a presença de sedimentos mais finos que os nativos em praias recuperadas com material dragado.

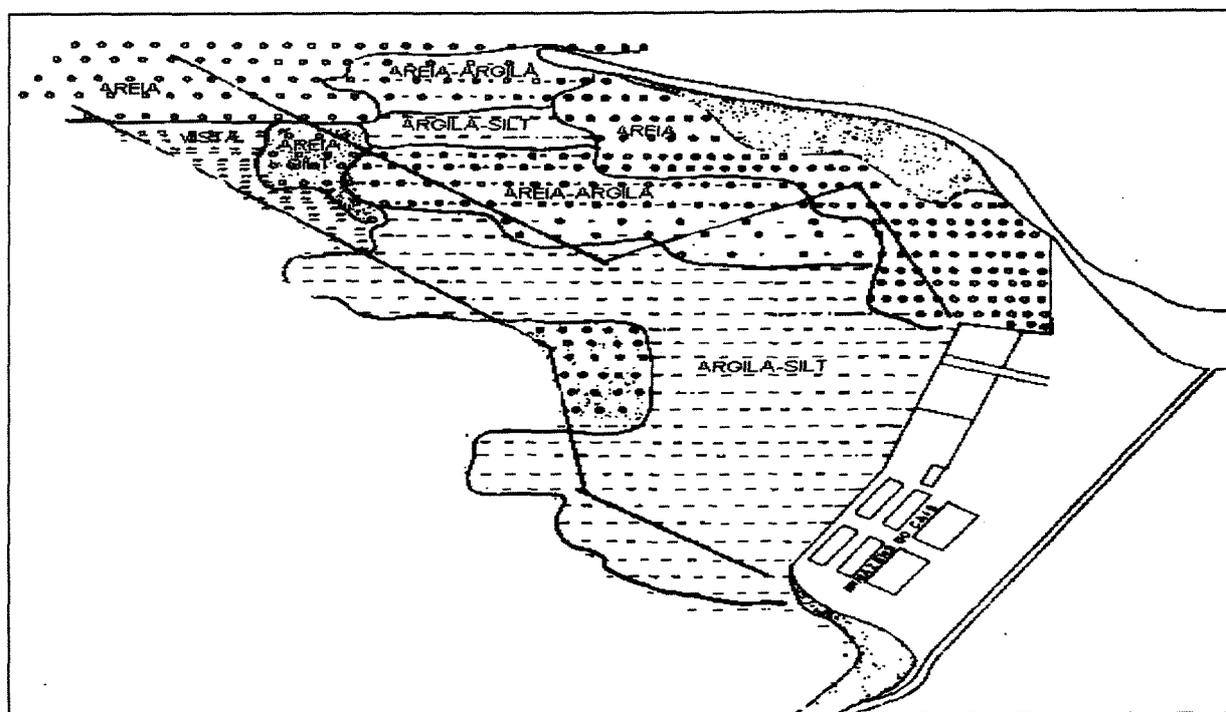


Figura 4.12: - Distribuição das fácies sedimentares na área do Porto de Mucuripe (Fonte: Moraes, 1972).

4.1.6 Levantamentos aerofotogramétricos

As fotografias aéreas obtidas ao longo dos anos constituem uma importante ferramenta para avaliar qualitativamente as transformações por que passam as áreas costeiras. Os levantamentos aerofotogramétricos controlados e com restituição em escala por sua vez são pré-requisitos indispensáveis na quantificação dessas transformações.

No presente trabalho o alvo de acompanhamento são as mudanças sofridas pela linha de praia. Como já mencionado, para o local cujo nível d'água sofre flutuações significativas devido a maré, a linha de praia torna-se uma referência abstrata e sua visualização se dá somente através de mapas rigorosamente referenciados a um sistema de coordenadas imutável no tempo. Estas condições exigem um cuidado especial na determinação das variações da linha de praia, sobretudo devido às variações do nível médio do mar.

O sistema de coordenadas UTM, base de restituição dos levantamentos aerofotogramétricos, é originário da planificação da geóide, superfície equipotencial da gravidade terrestre que mais se aproxima do nível médio do mar em um determinado período. Com as mudanças do nível médio do mar ocorrem também mudanças na geóide e conseqüentemente no sistema de coordenadas UTM.

Assim, uma vez definida a linha de praia e a sua localização dentro de um sistema de coordenadas, o acompanhamento de suas transformações ao longo do tempo se faz pela sobreposição do sistema de coordenadas, devidamente corrigidos, aos quais estão referenciadas.

Com base nessas premissas iniciou-se o processo de definição da linha localizada na zona de estirâncio que deveria servir de referência na avaliação das transformações sofridas pela praia.

Dentre os levantamentos aerofotogramétricos obtidos junto ao IPLAM e SEDURB, para os anos de 1963, 1972, 1976, 1978 e 1995, somente aqueles correspondentes aos anos de

1963, 1972 e 1995 estão disponíveis com restituição em escala e podem ser utilizados nos estudos de evolução da linha de praia. Para esses anos, as curvas de nível nos mapas estão referenciadas ao datum do IBGE. Segundo o relatório de descrição de referências de nível produzido pelo INPH em 1982 o zero do IBGE encontrava-se nessa ocasião a 47 cm acima do Nível de Redução da DHN, na estação maregráfica de Mucuripe (DHN,1998). Para o ano de 1963 o levantamento, realizado pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército, tem restituição sobre mapas segundo o sistema de coordenadas ortogonais UTM, na escala de 1:5000, e as curvas de nível iniciam-se em 2,5 m, com intervalo de 2,5 m entre os demais planos. A linha de separação água-terra não está no plano de referência do IBGE. Para os levantamentos de agosto/1972 e agosto/1995, realizados respectivamente pelas empresas: Serviço de Aero-Levantamento Cruzeiro do Sul e PROSPEC, as restituições em mapas se encontram também referenciadas ao sistema de coordenadas ortogonais UTM, na escala de 1:2000, e as curvas de nível, referenciadas ao datum do IBGE, iniciam em 1,0 m com intervalo de 1,0 m entre os demais planos. Nesses mapas as linhas de separação água-terra também não se encontram no plano de referência do IBGE.

As comparações entre as coordenadas UTM, de pontos idênticos das estruturas costeiras, nos mapas de 1963 e 1972, indicam que as coordenadas Este no mapa de 1972 estão defasadas de 159 a 233 m, para Este, em relação às de 1963. O mesmo ocorre com as coordenadas Norte no mapa de 1972 que estão defasadas, para Norte, em relação às coordenadas de 1963 de distâncias variando de 24 a 43 m. Tal fato caracteriza que as restituições dos levantamentos aerofotogramétricos para os anos de 1963 e 1972 foram realizadas sobre sistemas de coordenadas UTM baseados em geóides distintas.

Os sistemas de coordenadas UTM para os anos de 1972 e 1995 também se encontram originalmente deslocados, o que provavelmente caracteriza o uso de sistemas de coordenadas UTM baseados em geóides distintas. Entretanto, essa defasagem entre as coordenadas é bem

regular ao longo de todo o trecho em estudo, o que permitiu eliminar a diferença entre os sistemas desses dois anos. Tal fato será tratado mais detalhadamente na modelagem da região.

O IBGE (1997) não dispõe do histórico dos sistemas geodésicos utilizados nas restituições destes aerolevantamentos. Segundo informações obtidas nesse órgão, estima-se que nos últimos 25 anos a diferença entre os planos de referência utilizados não tenha ultrapassado 20 cm. Assim, na falta de informações mais precisas considerou-se um único datum como referência para as restituições dos levantamentos aerofotogramétricos.

Para o ano de 1965, o nível médio da maré de sizígia era de 2,64 m (Carta DHN-701, 1965) e em 1976 a maré atingiu o nível máximo de 2,5 m em relação ao zero da DHN, no equinócio de abril (Morais, 1980). Com esses dados pode-se concluir que a curva de nível mínima, a 2,5 m acima do datum do IBGE, apresentada no mapa de 1963, estaria 2,97 m acima do zero da DHN, portanto praticamente fora da zona de estirâncio e da influência das ondas durante grande parte do tempo. Consequentemente foi descartada a adoção do nível altimétrico de 2,5 m acima do zero do IBGE, como referência e caracterização da linha de praia nos estudos da evolução da praia. A não consideração dos efeitos da maré pelo modelo GENESIS reforça essa decisão.

As curvas de nível, a uma distância mínima de 1,0 m em relação ao datum do IBGE, apresentadas nos mapas dos anos de 1972 e 1995, estão a 1,47 m acima do zero da DHN. Considerando que nesse período os níveis máximos de sizígia atingidos pela maré variaram de 2,5 a 3,3 m, em relação ao zero da DHN, com amplitudes na mesma ordem de grandeza e que os níveis máximos de quadratura variaram de 2,0 a 2,6 m acima do zero da DHN, com amplitude média de 1,2 m, é de se esperar que essa curva possa representar, embora com ressalvas, a linha de praia. As ressalvas ficam por conta dos períodos em que a maré se encontra abaixo da linha de praia, ficando assim fora da influência das ondas e consequentemente das transformações induzidas por elas.

prováveis de sedimentos o despejo da dragagem realizada ao largo das praias de Iracema e Pirambú. Esse processo de engordamento é auxiliado pelos espigões construídos em todo esse trecho. Outra fonte de sedimentos que muito provavelmente contribuiu para esse engordamento, em um período limitado de tempo, são as dunas localizadas entre a Praia de Pirambú e a foz do Rio Ceará que foram fixadas no fim de 1973 e imediatamente invadidas pela população.

Na Figura 4.14 é apresentado um levantamento aerofotogramétrico da região, para o ano de 1976, realizado pela empresa GEOFOTO, onde se pode visualizar o comportamento das correntes através dos sedimentos finos em suspensão. Nota-se nitidamente uma área de vórtice, delineada pelos sedimentos em suspensão. Tal fato sugere a necessidade de um estudo mais detalhado das correntes da região.

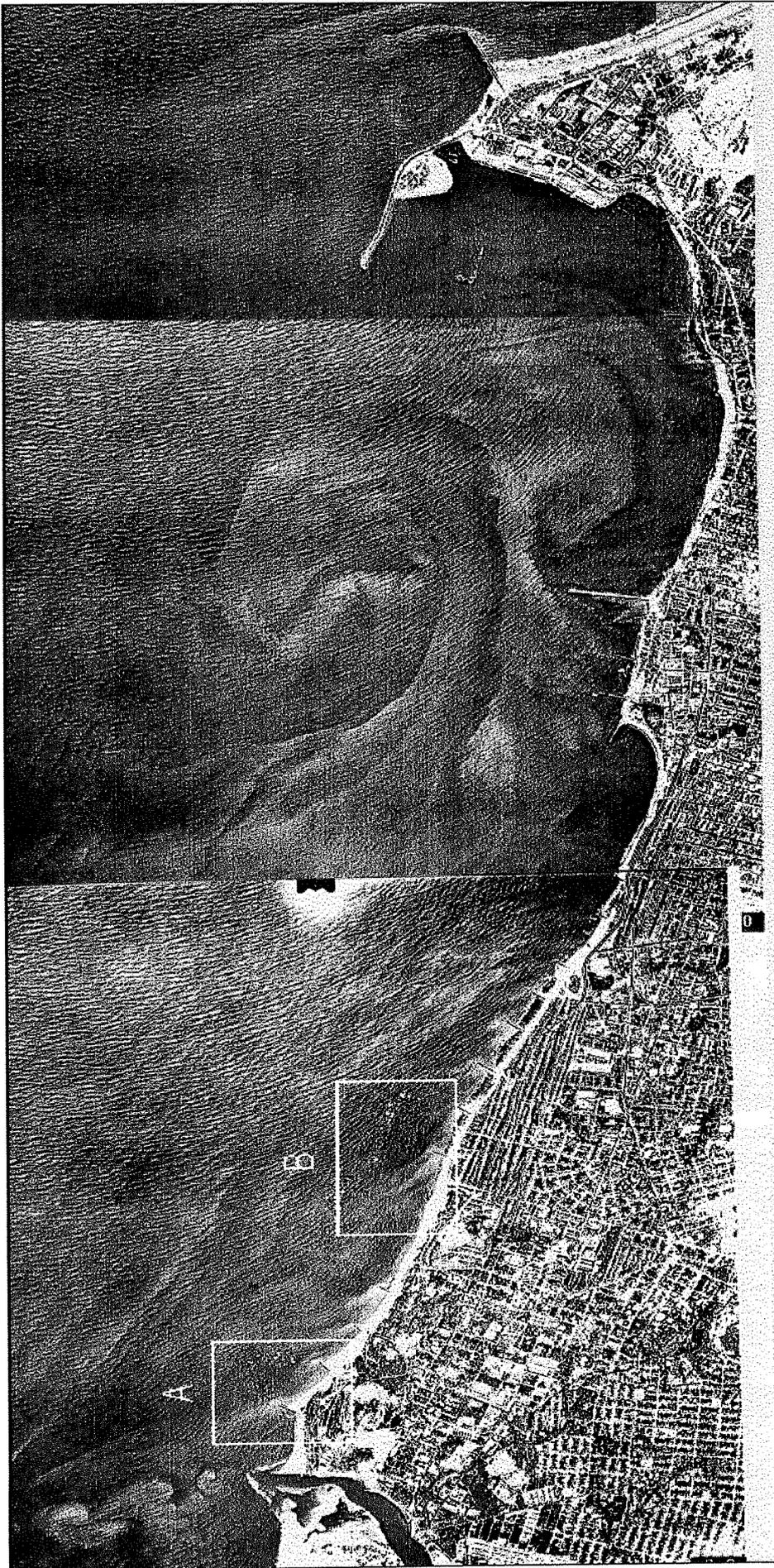


Figura 4.14 : Aerofotografia do trecho em estudo, para o ano de 1976. (Fonte: SEDURB).

Ainda na Figura 4.14 pode-se visualizar duas áreas delineadas, A e B, cujos detalhes são apresentados na Figura 4.15. Observando a Figura 4.15 nota-se nestas áreas um comportamento mais distinto das ondas, em relação à outras regiões adjacentes, apresentando-se mais atenuadas e refratadas, caracterizando provavelmente a existência de baixios. Morais (1980a , 1980b) menciona a existência de rochas de praia na embocadura do rio Ceará e recifes submersos na praia das Goiabeiras.



Figura 4.15 : Aerofotografia das áreas A e B.

A área A, delineada na Figura 4.14 é vista com mais nitidez na fotografia aérea de 1995 e apresentada na Figura 4.16. Pode-se observar a arrebentação precoce das ondas, o que reforça a suposição da presença de áreas de baixio.

Em parte da carta batimétrica apresentada por Morais (1980b), Figura 4.17, nota-se uma extensa área de baixio ao largo da praia do Arpoador, circundada pela isóbata de -1.0 m, coincidente com a localização da área B, delineada na Figura 4.14.



Figura 4.16 : Aerofotografia da área A.

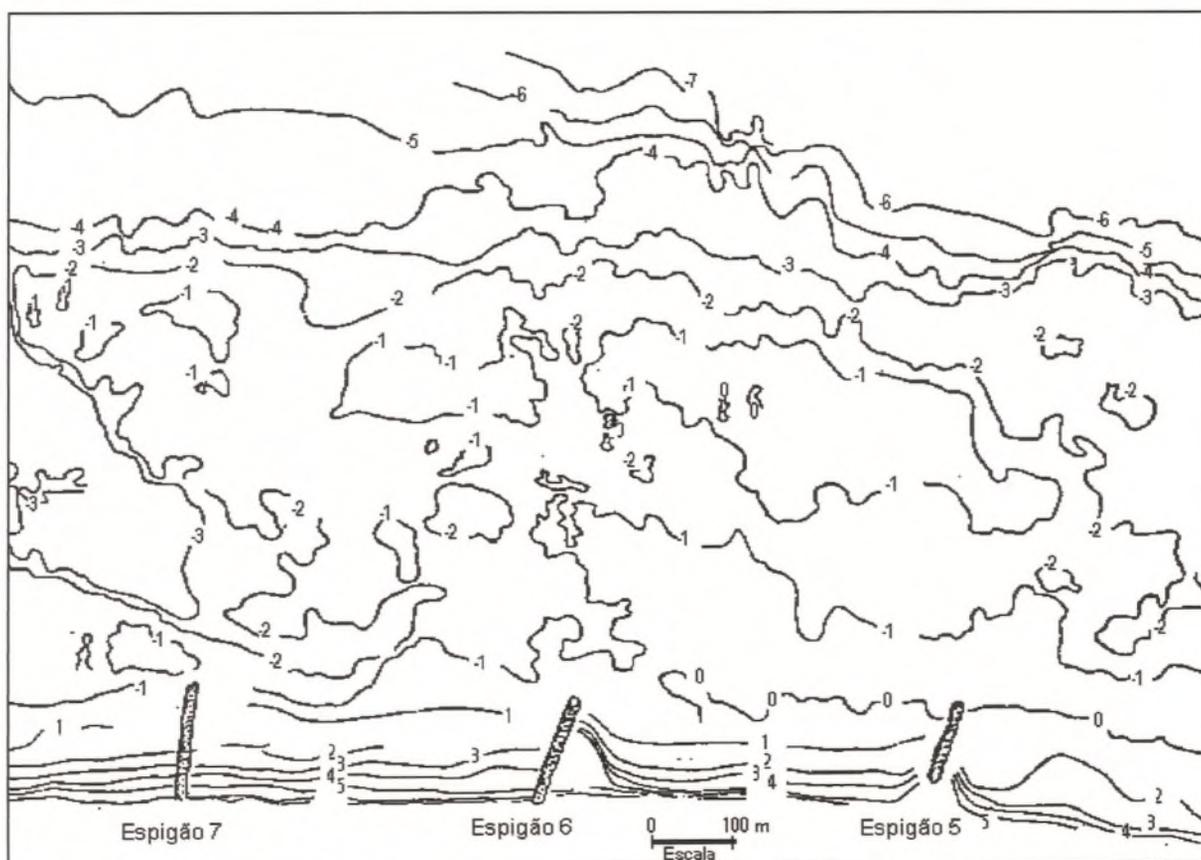


Figura 4.17 : Reprodução parcial da batimetria realizada ao largo das praias do Arpoador e Pirambú. (Fonte: Moraes, 1980).

Tais detalhes são importantes na modelagem da região e devem ser considerados, visto que há alterações no comportamento da onda, único agente responsável pelo transporte litorâneo de sedimentos segundo o modelo GENESIS.

4.1.7 Levantamentos batimétricos e a declividade do fundo

O levantamento batimétrico da região em estudo pode ser visualizado na Carta 710 da DHN, atualizada até 1995, reproduzida parcialmente na Figura 4.18. Em que pese as transformações ocorridas na batimetria da área, entre os anos de 1972 e 1995, na falta de maiores informações considerou-se essa carta como fonte de dados de profundidade no trabalho aqui exposto. Embora a carta náutica DHN-701 apresente um maior detalhamento do fundo na região, em razão da escala de 1:13000, não contempla toda a área de estudo.

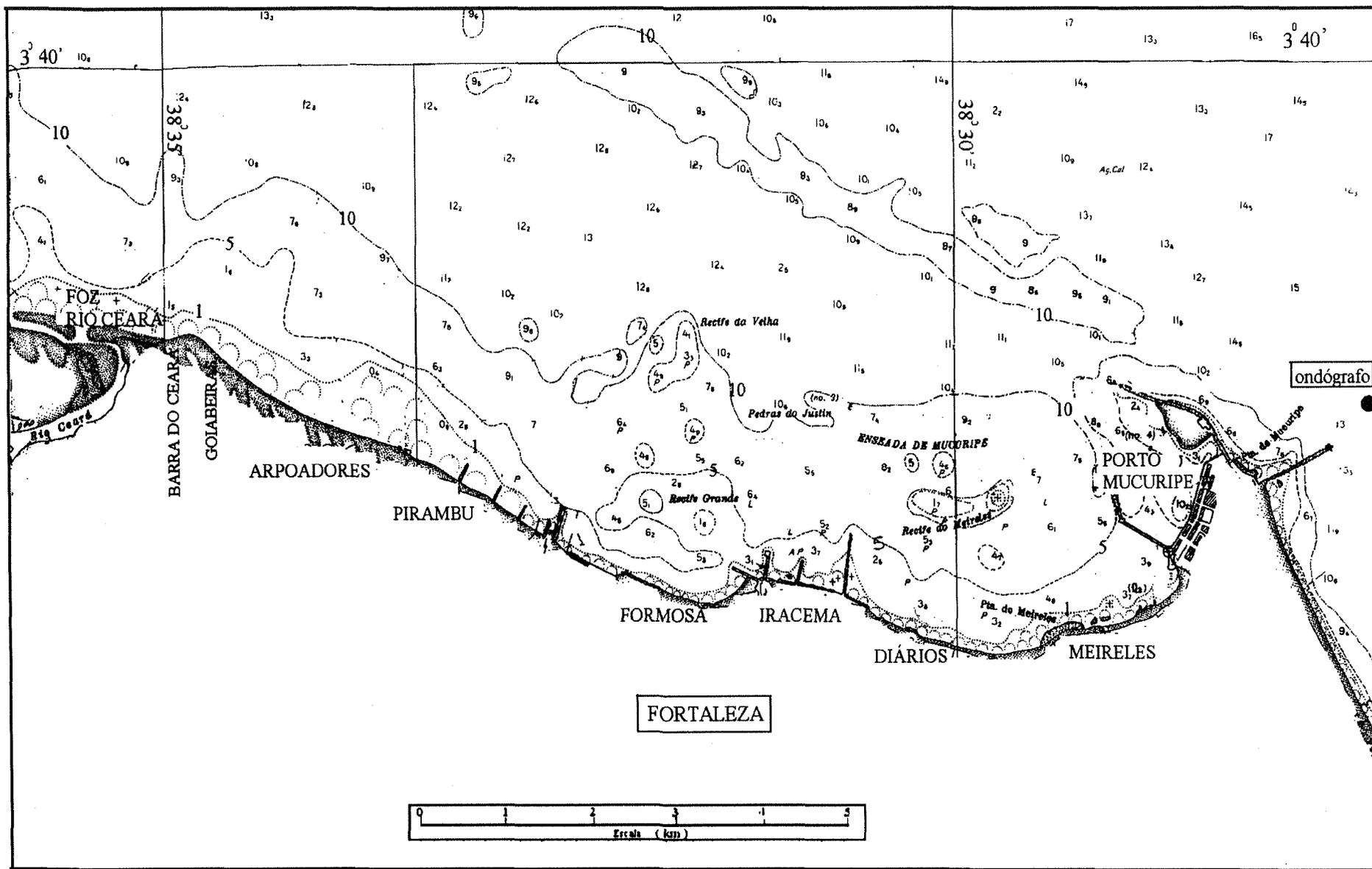


Figura 4.18 : Levantamento batimétrico de 1995. Reprodução parcial da carta náutica DHN-710.

Observa-se na Figura 4.18 que as linhas isobatimétricas de -1.0 m e -5.0 m em relação ao zero da DHN, no trecho que se estende desde a praia Barra do Ceará até a praia de Pirambú, se encontram distanciadas respectivamente de 450 a 900 m, em média, da linha divisória terra-água. Com esses dados pode-se concluir que a declividade de fundo é muito suave nesse trecho, atingindo o valores médios de 0,0022 e 0,0055 respectivamente para as isóbatas de -1,0 e -5,0 m consideradas como limites.

Relativamente à declividade da praia nesse trecho, a sua quantificação foi possível, embora precariamente, ao utilizar a altimetria de três pontos isolados, extraída do mapa de restituição do levantamento aerofotogramétrico de 1995. Esses pontos estão localizados entre a linha de 1,0 m acima do zero do IBGE e a linha divisória água-terra, nas praias Barra do Ceará e Arpoadores. Nas altitudes de 0,7 m, 0,28 m e 0,5m, esses pontos encontram-se distanciados horizontalmente da linha isoaltimétrica de 1,0 m, respectivamente de 12,0 m, 12,0 m e 16,0 m, o que indica uma declividade média aproximada de 1:25.

Para um nível de maré da ordem de 1,47 m acima do zero da DHN, correspondente ao plano de referência adotado, a declividade do fundo, $\tan \beta$, entre a linha de praia e a isóbata de -1 m em relação ao zero da DHN, considerando a distância média de 450 m, seria da ordem de 1:180. Utilizando o número de Iribarren, $\xi = 1,25 T (\tan \beta) / \sqrt{H_o}$, para avaliar o tipo de arrebentação para a maioria das ondas ($T = 6$ s e $H_o = 1,15$ m), tem-se $\xi = 0,039$. Esse valor indica ondas de arrebentação do tipo progressivas (Bruun, 1983).

Com essas características de fundo é de se esperar um grande área de dissipação da energia das ondas durante o período de níveis baixos da superfície d'água, sobretudo na baixamar. Ao relacionar o clima de ondas dessa região, onde existe uma grande frequência de ondas ao largo com altura significativa menor que 1,3 m, com estas características do perfil litorâneo, supõe-se que a linha de praia não sofra alterações durante parte do ciclo da maré.

Para o trecho compreendido entre o antigo porto e a Ponta de Mucuripe, as isóbatas de -1,0 m e -5,0 m afastam-se da linha divisória terra-água, na Carta DHN 710, respectivamente de 200 m e 700 m em média, indicando declividades de fundo respectivamente de 0,005 e 0,0014. As declividades médias das praias do Ideal, Diários e Meireles, foram estimadas através dos dados extraídos do mapa de 1995, originado da restituição do levantamento aerofotogramétrico de mesmo ano. Excepcionalmente nesse trecho existem pontos locados cujas cotas em relação ao datum do IBGE é 0 (zero). Assim, as declividades médias dos perfis das praias acima mencionadas foram estimadas considerando os níveis de 0 e 1,0 acima do datum do IBGE e as distâncias horizontais entre os pontos localizados nesses níveis, e indicaram valores variando de 1:25 a 1:50. Essas informações sugerem que, também nesse trecho, as declividades de fundo e da praia tenham um perfil suave. Além dessas características dos perfis, que indicam uma extensa área de dissipação da energia, ocorre também a atenuação das ondas devido ao efeito de difração provocado pelo molhe do TITAN, chegando mais amortecidas e com um poder erosivo atenuado. Assim, é de se esperar que a linha de praia localizada na zona de sombra do molhe, e antecedida por uma extensa área de perfil suave do fundo, não sofra alterações durante parte do ciclo da maré.

4.1.8 Transporte Litorâneo

No trecho em estudo o transporte litorâneo é praticamente unidirecional, de Leste para Oeste. Para chegar a essa conclusão corrobora o clima regular de ondas característico da região, com a maioria das ondas provenientes do setor Leste, e o avanço da linha de praia na face Leste dos espigões, como pode ser visualizado na Figura 4.14. Outras evidências são apresentadas por Valentini (1994), como a existência de esporão na margem direita das embocaduras e a orientação dos contornos batimétricos.

O INPH (1992b) estimou indiretamente o transporte de sedimentos na praia do Futuro, através de levantamentos topohidrográficos. Para avaliar o volume total de sedimentos que se

movimenta nesta região realizou-se a medição dos três depósitos de sedimentos existentes: material retido no espigão da praia do Futuro, material retido no canal de acesso e bacia portuária e material que originou a restinga a Oeste do molhe do TITAN. Na avaliação do volume retido no espigão da praia do Futuro utilizou-se plantas de levantamentos batimétricos dessa área, dos anos de 1977 a 1983. Dentre os diversos valores encontrados para o volume mensal de sedimentos que aportam a essa região cita-se a estimativa de $25.228 \text{ m}^3/\text{mês}$, que contribuem para a deposição existente a barlamar desse espigão. Essa taxa de deposição foi estimada através da comparação das plantas batimétricas de 1977 e 1983. É importante ressaltar que foram estimados valores superiores e inferiores ao acima referido, para a taxa de deposição dessa área, ao se considerar as comparações entre plantas batimétricas de anos consecutivos. Valores negativos também foram estimados, significando erosão da área. Há de se lembrar que a região está sujeita a ondas do setor NE, oriundas de tempestade do Hemisfério Norte (Melo F^o, 1993) e o alinhamento da praia do Futuro, aproximadamente 30° W, favorece o transporte de NW para SE.

A partir de dados de volume dragado na região portuária estimou-se uma taxa de deposição de $30.000 \text{ m}^3/\text{mês}$. O volume de material que alimenta mensalmente a restinga, da ordem de $21.000 \text{ m}^3/\text{mês}$, foi estimado através da cubagem aproximada dessa área, utilizando a Carta DHN-710 de 1986, e considerando que esse material levou 30 anos para atingir o estágio em planta (INPH,1992b). Esses valores apontam para uma capacidade de transporte litorâneo, na região da praia do Futuro, da ordem de $915.000 \text{ m}^3/\text{ano}$.

Estimativas da capacidade de transporte litorâneo na praia do Futuro, realizadas por Pitombeira (1997), utilizando fórmulas que levam em conta o fluxo de energia paralelo à praia, indicam valores da ordem de $800.000 \text{ m}^3/\text{ano}$.

A estimativa da capacidade de transporte litorâneo realizada por Valentini (1994) na praia de Iparana, indicou um valor de cerca de $600.000 \text{ m}^3/\text{ano}$. Para essa estimativa utilizou-

se a metodologia do CERC. Os dados de onda foram extraídos do Global Wave Statistics. A determinação das condições da onda na arrebentação foi feita através do modelo matemático de propagação das ondas de Melo e Guza (1990). Por essa mesma metodologia, as estimativas da capacidade total de transporte para a praia do Futuro indicaram um valor também da ordem de $600.000 \text{ m}^3/\text{ano}$, e uma taxa líquida de $550.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ de SE para NW.

Segundo Pitombeira (1997), o código LITPACK, desenvolvido pelo DHI - Danish Hydraulic Institute e implementado com os dados da área que compreende a praia do Futuro, indicou uma capacidade de transporte da ordem de $790.000 \text{ m}^3/\text{ano}$. Esse mesmo código, implementado com os dados da área costeira de Pecém, indicou uma capacidade de transporte nessa região da ordem de $450.000 \text{ m}^3/\text{ano}$.

Infelizmente, não existem estimativas para o transporte litorâneo de sedimentos na área de estudo, entre a Barra do rio Ceará e o porto de Mucuripe, baseadas em medições de campo, que pudessem servir de referência para a estimativa dos parâmetros de calibração do modelo GENESIS.

4.1.9 Transporte Eólico

Conforme já diagnosticado por diversos pesquisadores, o vento desempenha um papel relevante no balanço sedimentológico do litoral cearense. Atuando sobre as dunas móveis e estirâncio das praias ele supre determinadas praias com sedimentos e os retira de outras, dependendo do alinhamento da costa.

Utilizando a metodologia proposta por Swart (1986), Valentini (1994) estimou o transporte sólido anual devido ao vento, para diversas localidades do município de Fortaleza e fora dele. Considerando os valores médios mensais de intensidade e direção do vento no período de 10 anos, entre 1976 e 1985, e características granulométricas dos sedimentos constituintes do local, determinou-se a capacidade de transporte do vento para as regiões da Barra do Ceará e Pirambu, dentre outras. Os resultados indicaram uma capacidade de

transporte de $93,4 \text{ m}^3/\text{m}/\text{ano}$ na Barra do Ceará e de $87,4 \text{ m}^3/\text{m}/\text{ano}$ na região de Pirambu. Para a verificação das estimativas feitas para as regiões de Mucuripe e Iparana, Valentini (1994) comparou seus resultados com medições diretas de campo realizadas por Morais (1980a). Nessa verificação constatou-se que as estimativas realizadas pela metodologia de Swart (1986) indicaram valores superiores aos obtidos por medições de campo da ordem de 100% e 22%, respectivamente para Mucuripe e Iparana.

4.2 O Modelo Conceitual

O conhecimento da história das intervenções e das características do litoral da cidade de Fortaleza sustentam o modelo de balanço sedimentológico proposto por vários pesquisadores: Morais (1980b), Smith e Morais (1984), Valentini e Rosman (1993), Pitombeira e Vieira (1995), dentre outros. O transporte litorâneo devido às ondas se processa, na maior parte do tempo, de Leste para Oeste. O barramento dos sedimentos pelo espigão da praia do Futuro e pelo molhe do TITAN, e o avanço da urbanização sobre as dunas impediram que as praias localizadas a Oeste do Porto de Mucuripe fossem alimentadas com sedimentos arenosos. Conseqüentemente, para atender a capacidade de transporte das ondas nesta região, ocorreu uma forte erosão nas praias cujo processo foi paralisado pela construção dos espigões e muros de proteção ao longo de todo o litoral. O despejo de material de dragagem ao largo das praias de Iracema e Pirambú e a alimentação das praias pelos sedimentos oriundos da atuação dos ventos sobre as dunas, auxiliados pelas obras de proteção, promoveram a reconstituição de parte das áreas degradadas.

Com base no conhecimento do balanço sedimentológico da região, apresenta-se na Figura 4.19 uma representação gráfica sinóptica do modelo conceitual proposto. Nele estão assinalados o despejo de dragagem, o fluxo de sedimentos induzido pelas ondas e o transporte eólico originado pelos ventos.

Para permitir a modelagem da região sem desprezar os efeitos da maré são propostas duas hipóteses para o modelo conceitual, baseadas nas características da região, e que serão comparadas através das simulações com o modelo GENESIS:

- 1) Na primeira hipótese supõe-se que a linha de praia sofra influência das ondas durante todo o ciclo de maré e que o material arenoso originário do despejo de dragagem atinja a região, onde ocorre o transporte litorâneo, suprindo a capacidade de transporte das ondas e promovendo o engordamento das praias;
- 2) Na segunda hipótese, para os processos que ocorrem na região litorânea, supõe-se que, durante os níveis de maré baixa, o material arenoso proveniente do despejo de dragagem atinja a faixa de transporte litorâneo e atenda exclusivamente a capacidade de transporte das ondas. Supõe-se também que durante os níveis de maré baixa a linha de praia não sofra influência da onda. Para essa suposição considerou a baixa declividade da praia e do fundo litorâneo que provavelmente não induzem esforços gravitacionais nas camadas superiores da praia.

Durante os níveis mais elevados de maré, supõe-se que o material arenoso atinja a zona de transporte litorâneo e esteja disponível para suprir a capacidade de transporte das ondas e promover o engordamento das praias, considerando que nesse estágio há trabalho da onda sobre a linha de praia e a retenção de sedimentos pelos espigões é mais eficiente.

4.3 Modelagem da Área de Estudo

Essa etapa tem como objetivo colocar o modelo conceitual da área em forma apropriada para a modelagem numérica. Isso é realizado introduzindo os dados da região de estudo no código computacional genérico GENESIS. Nessa etapa define-se o intervalo de tempo da simulação, os passos de tempo, as condições de contorno e iniciais, o desenho da malha, os parâmetros hidráulicos e sedimentológicos e realiza-se a transferência de todas as informações do modelo conceitual para a malha. Dessa forma as informações são estruturadas permitindo a elaboração do modelo numérico do local.

Na modelagem numérica de uma determinada região define-se inicialmente a extensão da linha de praia a ser modelada, num sistema de coordenadas x-y e segundo a distância longitudinal na coordenada x. Conforme o grau de detalhamento desejado define-se no eixo x o comprimento elementar Δx que corresponde a um trecho projetado da linha de praia sobre o eixo x. A figura plana assim formada é denominada célula e o comprimento elementar Δx é denominado comprimento da célula. A partir da extensão longitudinal do trecho a ser modelado e do comprimento da célula define-se o número de células N (Figura 4.20). Os limites laterais da célula são denominados paredes da células. A parede de mesmo número da célula está situada à esquerda do centro da célula. Assim, a parede situada no limite superior, à direita do trecho em estudo, tem o número N+1 correspondente ao número de uma célula virtual situada fora do trecho definido.

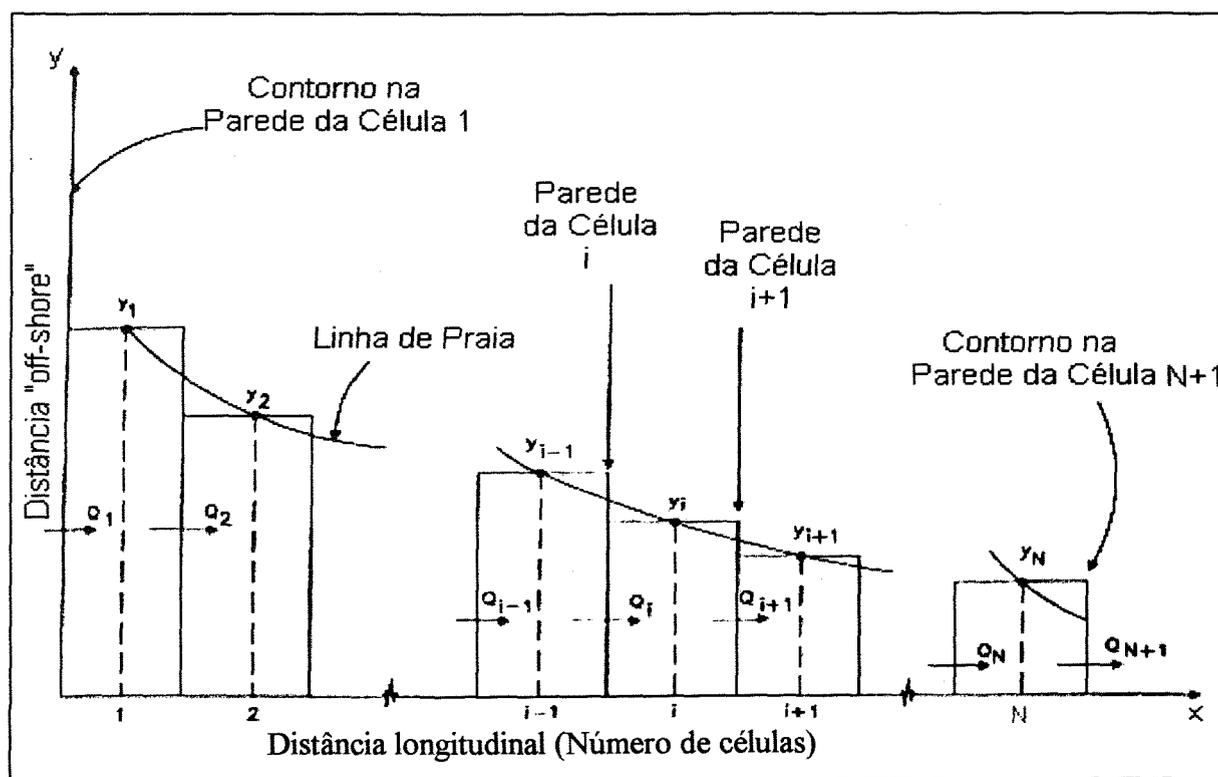


FIGURA 4.20 : Trecho esquematizado para a solução numérica do modelo.

Para atender ao esquema do método das diferenças finitas proposto para a solução das equações do modelo GENESIS, a natureza tem que ser representada dentro dos limites

definidos segundo este esquema. Assim, as posições da linha de praia y_i são definidas, através das linhas centrais das células, a uma distância $\Delta x/2$ das paredes das células. As taxas de transporte Q_i são calculadas segundo o fluxo dos sedimentos nas paredes das células, onde também são definidas a altura e direção da onda. As extremidades das estruturas costeiras, como os quebra-mares destacados, tem as paredes das células como limites. Os espigões devem ser posicionados nas paredes das células, perpendiculares ao eixo x . O processo de engordamento de praia, descarga de rios e outras fontes ou sumidouros de sedimentos devem ser representados segundo as posições y_i da linha de praia. O mesmo ocorre com as posições do muro de proteção.

Com base no esquema apresentado na Figura 4.20, a equação 16, da conservação de massa, é resolvida numericamente utilizando o método implícito de Crank-Nicholson (Crank, 1975).

A entrada de dados do código GENESIS se faz através de 7 arquivos, cujos nomes devem seguir as exigências do código (Figura 4.21). A denominação da extensão, a critério do usuário, deve ser única para todos os arquivos. A descrição dos arquivos e dos procedimentos adotados para a estruturação de cada arquivo com os dados da região são apresentados a seguir.

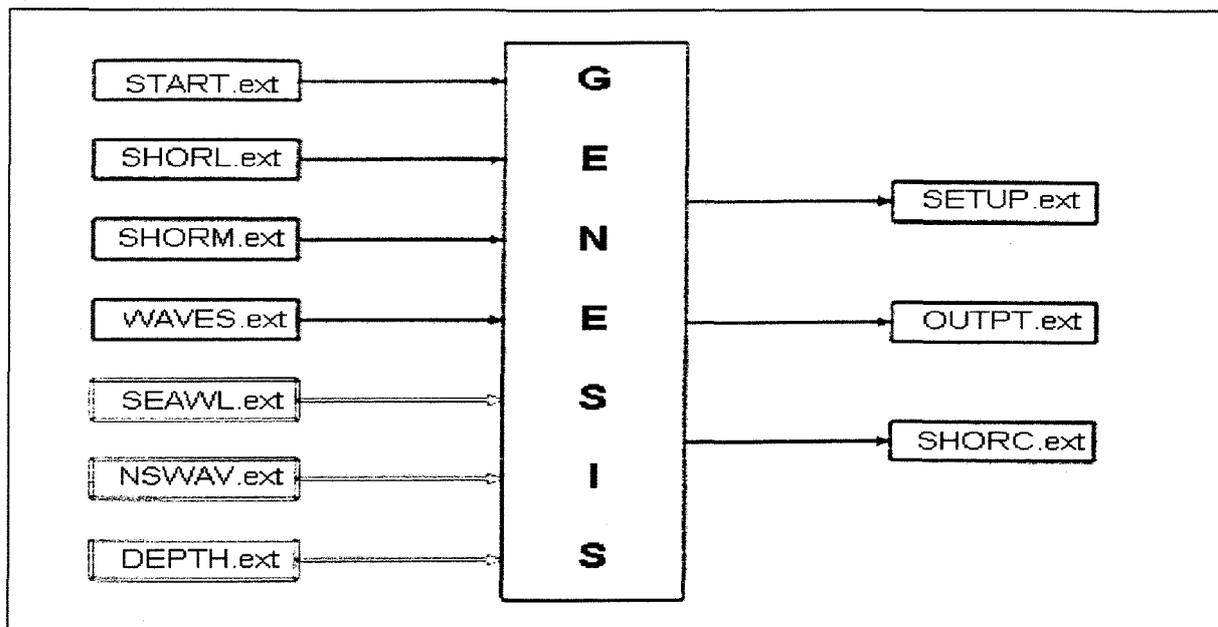


Figura 4.21 : Esquema para os arquivos de entrada e de saída do modelo GENESIS.

4.3.1 Arquivos SHORL e SHORM

SHORL é o arquivo de dados da posição inicial da linha de praia e SHORM é o arquivo de dados da posição final da linha de praia. Considerando que se dispõe das posições da linha de praia para os anos de 1972 e 1995, essas linhas correspondem respectivamente as posições inicial e final na modelagem e calibração.

Já tendo escolhido na Carta Náutica da DHN-N^o 710, Figura 4.22, o trecho da região a ser modelado: a faixa litorânea que se estende desde a margem direita do rio Ceará até o Molhe do TITAN, no porto de Mucuripe, define-se em seguida nessa Carta o sistema de coordenadas, para o modelo GENESIS, ao qual a linha de praia deve estar referenciada.

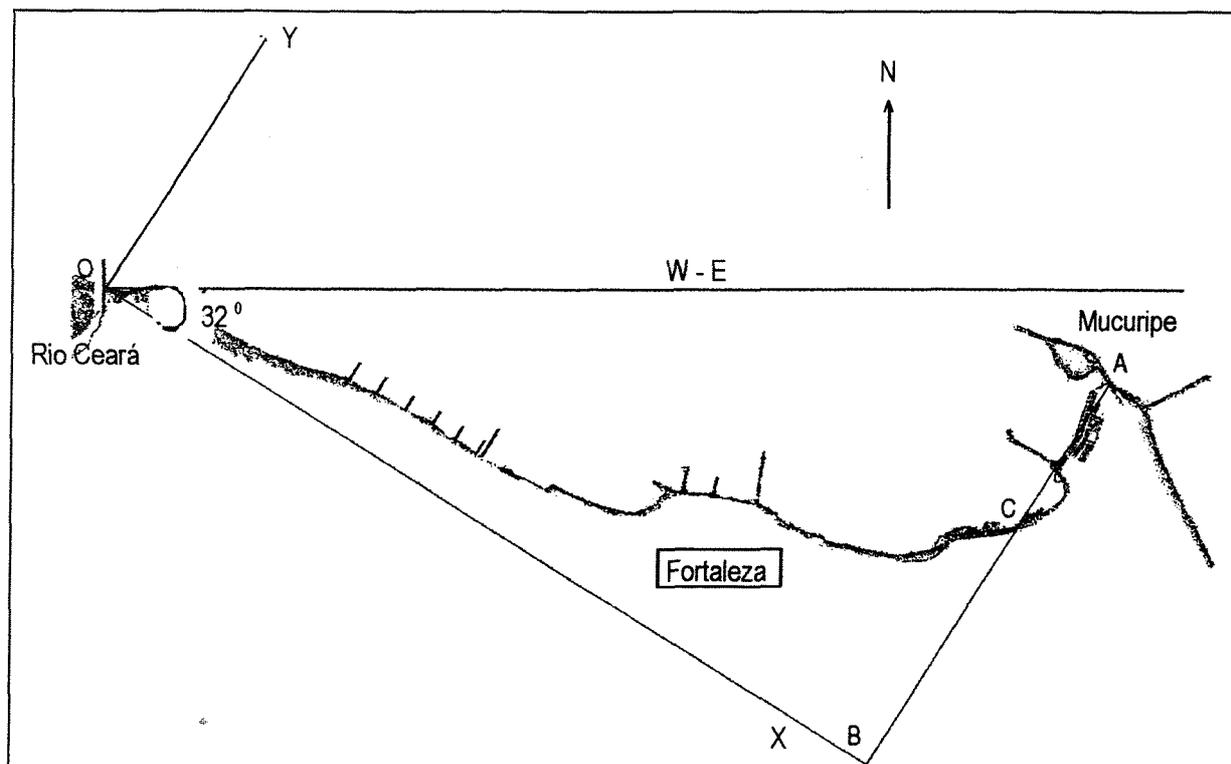


Figura 4.22 : Esquema para a definição do sistema de coordenadas do modelo GENESIS. Reprodução parcial da Carta DHN-710.

A partir de um ponto O, localizado na margem direita do rio Ceará, escolhido no mapa de restituição do levantamento aerofotogramétrico, traça-se o eixo x segundo um alinhamento aproximado da linha de praia desse trecho. Definiu-se assim a semi-reta que faz um ângulo de 32° , no sentido horário, com o eixo geográfico EW. Essa semi-reta, além de seguir a tendência aproximada da linha de praia, permite que a totalidade dos dados de ondas seja processada pelo código RCPWAVE, que estabelece limites para o ângulo de incidência da onda em relação ao eixo x escolhido. Outra vantagem dessa escolha se refere ao posicionamento da maioria dos espigões instalados entre a praia de Formosa e a foz do rio Ceará, cujos alinhamentos estão praticamente perpendiculares ao semi-eixo x definido. Tal situação permite uma melhor simulação dessas estruturas. A partir do ponto de origem do semi-eixo x traça-se o eixo perpendicular y, criando assim o sistema de coordenadas do modelo.

Os arquivos SHORL e SHORM são construídos a partir dos mapas de restituição, na

escala de 1:2.000, do levantamentos aerofotogramétricos de agosto/1972 e agosto/1995. Inicialmente estes mapas são transformados em arquivos de imagem digitalizada através do dispositivo "SCANNER". Em seguida, utilizando o aplicativo IDRISI, efetua-se o georeferenciamento dessas imagens, o que significa referenciar essa imagem ao sistema de coordenadas UTM. Posteriormente, inicia-se o processo de vetorização da linha de praia. Nesse processo, que significa a digitalização das coordenadas dos pontos da linha de praia, é criado um arquivo de dados de coordenadas UTM de até 1500 pontos constituintes da linha.

Através do programa auxiliar gráfico DPLOT, as linhas foram sobrepostas para definir o deslocamento entre os sistemas de coordenadas UTM dos anos de 1972 e 1995. Tomando o ano de 1995 como base, o sistema de coordenadas de 1972 está deslocado de 45 +/- 3 metros para Oeste e 31 +/- 2 metros para Sul. Para chegar a essas estimativas comparou-se as coordenadas de localização das estruturas costeiras dos sistemas de coordenadas dos anos de 1972 e 1995. Com essas informações as coordenadas UTM dos pontos constituintes da linha de praia para o ano de 1972 foram deslocados para o sistema de coordenadas de 1995.

Em seguida, através do programa SHORLROT, a origem do sistema de coordenadas UTM é transladado para o ponto O de coordenadas UTM : 545.896 E e 9.591.720 N, localizado na margem direita do Rio Ceará, e em seguida esse sistema sofre uma rotação de 32° no sentido horário. Desta forma, as linhas de praia ficam referenciadas ao sistema de coordenadas do modelo.

Agora, através do programa DPLOT, traça-se a partir do ponto A (Figura 4.23), início do mergulho do Molhe do TITAN, a perpendicular ao semi-eixo x. Define-se dessa forma sobre o semi-eixo x a extensão longitudinal da área de estudo- segmento OB. Esse segmento tem o comprimento de 11640 m. Considerando que o código GENESIS admite no máximo 200 células, redefiniu-se a extensão longitudinal como sendo de 11700 m, estabelecendo-se assim um número de 180 células, com a extensão de 65 m cada.

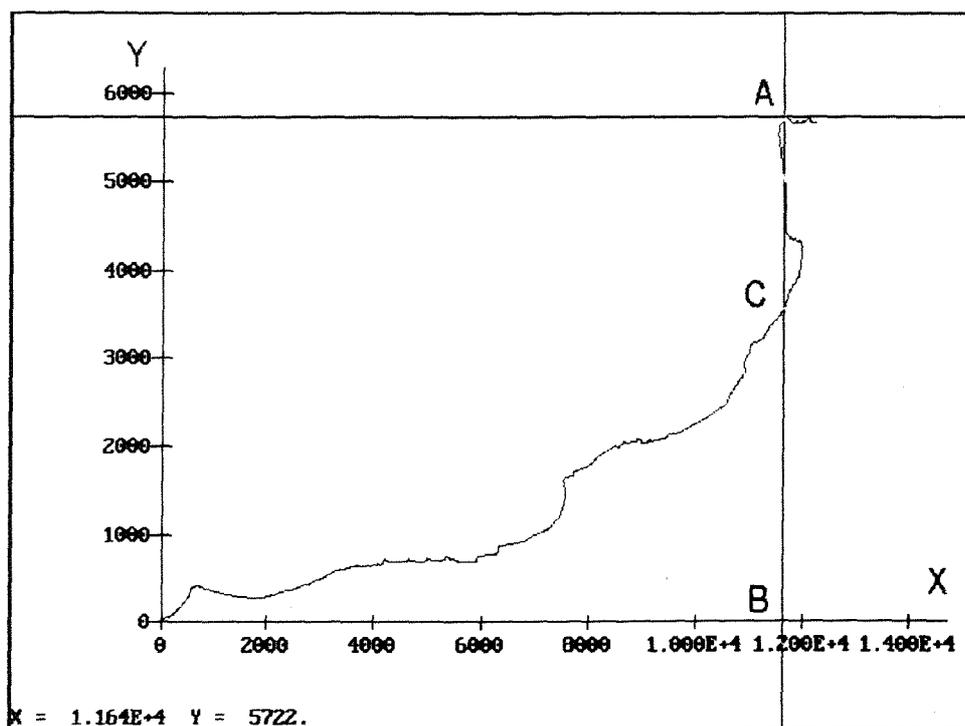


Figura 4.23 : Linha de praia, no trecho entre o Rio Ceará e a ponta de Mucuripe (A), referenciada ao sistema de coordenadas do modelo GENESIS. Gráfico gerado pelo programa DPLOT.

Para efeitos de modelagem, despreza-se o pequeno trecho sinuoso da linha de praia que se inicia a partir de C em direção a A. Assim, considera-se o segmento CA como um espigão que está conectado ao molhe do TITAN.

Definida a extensão da célula, o arquivo de dados da posição da linha de praia referenciada ao sistema de coordenadas do modelo é processado pelo programa LINTP. Esse programa realiza a interpolação das posições da linha de praia segundo a disposição das células definidas. O resultado fornecido pelo programa LINTP é processado pelo programa WTSO, que dispõe os dados da posição da linha de praia em formato próprio para o código GENESIS.

4.3.2 Arquivo WAVES

Considerando que o modelo GENESIS necessita de série histórica completa de dados de ondas, alguns procedimentos foram adotados para preencher as lacunas existentes na sequência dos parâmetros direção, altura e período das ondas e criar uma série que atendesse o

período de calibração, 15/08/72 a 15/08/95.

As lacunas foram preenchidas pela aplicação de estatística de frequência conjunta entre os parâmetros e através de procedimentos simplificados de interpolação, implementados através de programa computacional. A lacuna única existente entre dois dados, separados por um intervalo ou passo de tempo, foi preenchida pela interpolação linear, enquanto que para mais de uma lacuna os dados complementares foram escolhidos aleatoriamente com base na frequência de ocorrência conjunta dos parâmetros altura e período e altura e direção da onda. As frequências de ocorrência mensal conjunta dos parâmetros altura e período, e altura e direção da onda foram obtidas pelo processamento de cada um dos doze arquivo de dados criado, sendo cada arquivo constituído pelos dados de meses iguais.

Encontra-se no Apêndice B o programa computacional, feito em FORTRAN, utilizado na complementação dos dados de onda.

As Figuras 4.24 a 4.26 mostram em gráficos a estatística sucinta dos dados já complementados. Pode-se observar a grande similaridade na estatística dos dados complementados com aquela apresentada pelos dados incompletos, Figuras 4.5, 4.6 e 4.7. Tal fato demonstra a eficiência dos procedimentos para complementação dos dados. Acredita-se que a série histórica assim complementada represente de maneira satisfatória o clima de ondas da região. Entretanto, somente o teste de sensibilidade do modelo GENESIS poderá validar ou não os procedimentos utilizados.

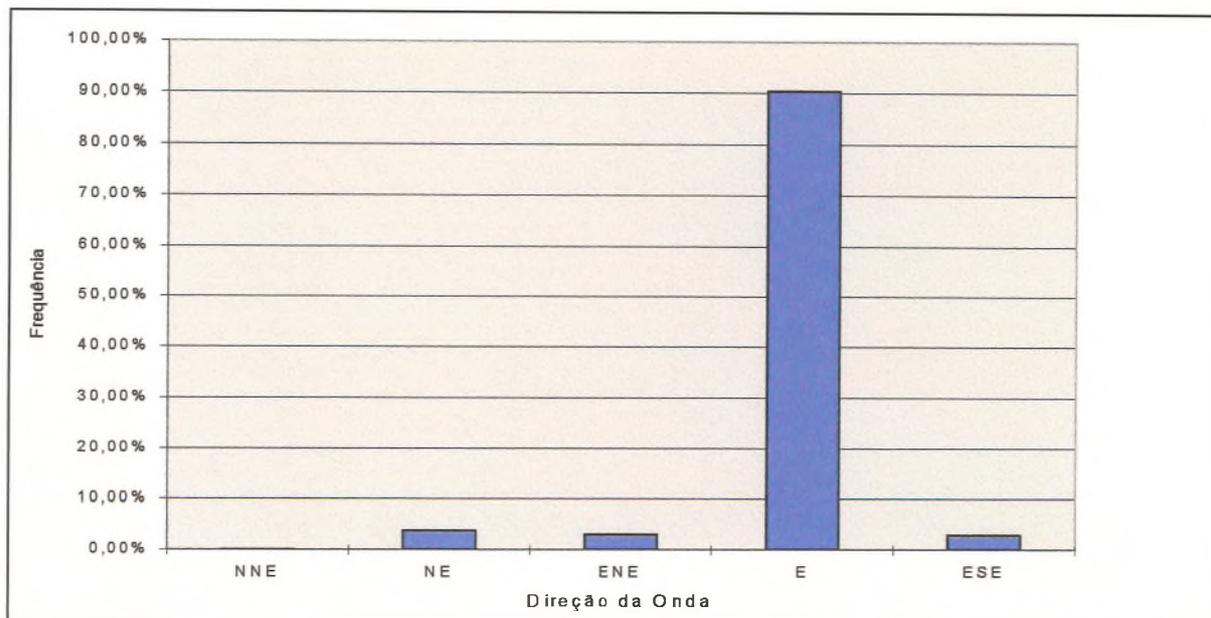


Figura 4.24: Histograma de direção da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/ CE, para o período de agosto/72 a agosto/95.

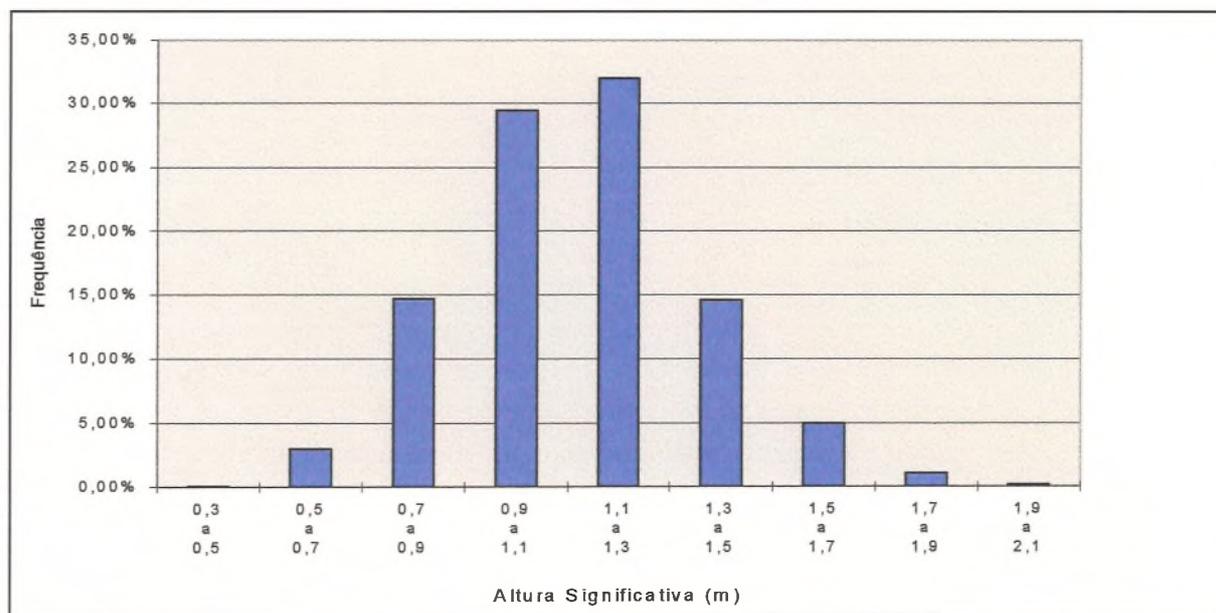


Figura 4.25: Histograma da altura significativa da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/ CE, para o período de agosto/72 a agosto/95.

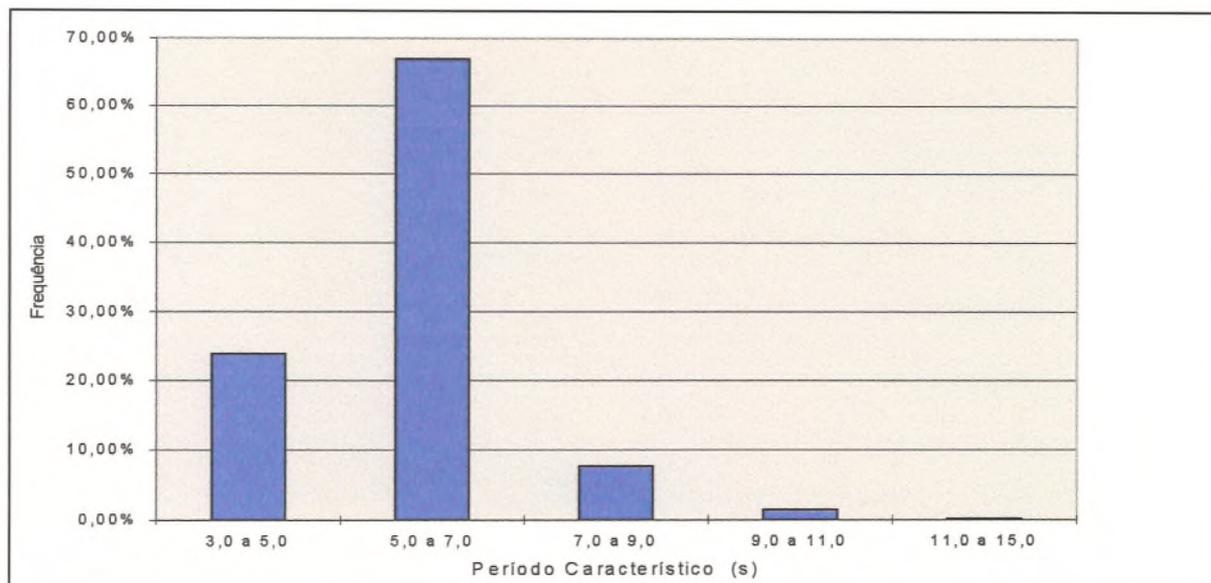


Figura 4.26: Histograma do período da onda ao largo da Ponta de Mucuripe/ CE, para o período de agosto/72 a agosto/95.

Para estruturar o arquivo WAVES de forma a atender o período considerado para a calibração, 15/08/72 a 15/08/95, acrescentou-se à série já complementada de fevereiro/91 a junho/95 os meses faltosos para constituir uma série completa de 5 anos. Para isso adotou-se o seguinte procedimento: o mês de janeiro e parte do mês de fevereiro de 1991 foram complementados com os seus equivalentes do ano de 1995. Para complementar os meses restantes de 1995 utilizou-se os meses equivalentes dos anos de 92, 93 e 94. A série de 5 anos assim formada foi repetida um número de vezes necessários para criar uma série que atendessem ao período de calibração.

4.3.3 Arquivo START

O START é o principal arquivo do GENESIS. Ele define a configuração da área modelada.

Os procedimentos para a determinação dos principais parâmetros constituintes desse arquivo são descritos a seguir. Para facilitar a aplicação do modelo por outros usuários foram mantidos os mesmos símbolos utilizados pelo código GENESIS para designar os parâmetros, e para as linhas de localização do dado no arquivo.

-Linha A.3:- Número de trechos de praia (Célula) para o cálculo - NN;**- Extensão da célula - DX**

Conforme o item 4.3.1 definiu-se o número de 180 células com extensão de 65 m cada.

-Linha A.5: Passo de tempo - DT

Para minimizar o erro na solução numérica definiu-se como 3 horas a duração do passo de tempo. Isso foi possível considerando que os dados de onda disponíveis foram registrados a cada 3 horas.

-Linha A.12: Coeficientes de calibração do transporte litorâneo - K_1 e K_2

Os coeficientes K_1 e K_2 , também denominados de parâmetros do transporte litorâneo, podem ser determinados durante a calibração do modelo.

Os valores para K_2 se situam na faixa de 0,5 a 1,5 vezes o valor de K_1 , não se recomendando ultrapassar de uma vez o valor de K_1 para evitar mudanças exageradas da linha de praia nas proximidades das estruturas costeiras (Hanson e Kraus, 1989).

Observando as equações 16 e 17, apresentadas no capítulo 3, verifica-se que os parâmetros de calibração, K_1 e K_2 , ajustam a escala de tempo do modelo. Se houver uma superestimativa do parâmetro profundidade de fechamento D_c , pode-se concluir pela equação 16 que o recuo ou avanço da linha de praia será mais lento do que deveria ser. Para compensar este efeito obrigatoriamente os valores de K_1 e K_2 deverão ser alterados para aumentar o gradiente longitudinal da taxa de transporte litorâneo $\partial Q/\partial x$.

Na falta de medições diretas na região de estudo que permitam validar as estimativas de transporte litorâneo realizadas pelo modelo GENESIS, os parâmetros K_1 e K_2 foram determinados durante a calibração. Para o melhor ajuste entre a linha de praia calculada e a final, medida em agosto;95, obteve-se os valores de $K_1 = 0,1$ e $K_2 = 0,1$. Cabe ressaltar que o valor de K_1 é fortemente dependente da estimativa do percentual de areia que atinge as praias proveniente do despejo de dragagem e da alimentação fornecida pelas dunas.

-Linha B.3: Define o modelo de propagação das ondas- interno ou externo (RCPWAVE)

Os dados de onda, altura , direção e período, obtidos ao largo, quer seja por medição direta através de ondógrafo ou utilizando modelos de previsão, necessitam ser transformados até a arrebentação para serem utilizados no cálculo do transporte litorâneo.

Dentro do pacote de programas do sistema há duas alternativas para realizar a propagação das ondas: 1) pela subrotina do código GENESIS que considera todas as linhas isobatimétricas paralelas à linha de praia; 2) pelo código RCPWAVE que faz a propagação das ondas, segundo as linhas isobatimétricas reais, a partir do largo até uma linha de referência imediatamente antes da arrebentação e, a partir desta linha, a subrotina do código GENESIS as transporta até a arrebentação. Na presente aplicação utilizou-se o código RCPWAVE.

-Linha B.7: Número de fontes geradoras de ondas - NWAVES

Embora tenham sido identificadas ondas tipo “Swell”, geradas ao largo, e ondas tipo “Sea”, geradas por ventos locais, a totalidade dos registros de onda obtidos foram analisados pelo método de Tucker-Drapper, ou seja pela interpretação manual que fornece os parâmetros: altura significativa da onda e período dos zeros ascendentes (INPH, 1996). Dessa forma considera-se somente uma fonte geradora.

-Linha C.1- Diâmetro mediano do grão de areia - D_{50}

Esse parâmetro permite ao código GENESIS definir o perfil litorâneo representativo da área em estudo. Uma vez definido ele é utilizado para a determinação da declividade média do fundo ($\tan \beta$), necessária ao cálculo do transporte litorâneo, equações 9 e 17.

O código GENESIS define o perfil de equilíbrio através da equação deduzida por Bruun (1954) e refinada por Dean (1977):

$$D = A y^{2/3} \quad (18)$$

onde:

D = profundidade

A = parâmetro de escala dependente da granulometria dos sedimentos

y = distância “ off-shore” a partir da linha de praia

O parâmetro A, segundo Moore (1982), pode ser estimado através de uma série de equações, dependendo do diâmetro mediano dos sedimentos (d_{50}). Considerando o trecho em estudo, grande parte dos sedimentos tem o diâmetro mediano menor que 0,40 mm (Morais, 1972), nesse caso, segundo Moore (1982) tem-se:

$$A = 0,41 (d_{50})^{0,94} \quad (19)$$

sendo d_{50} expresso em milímetros e A em $m^{1/3}$.

Como não se dispõe de medições de perfil de fundo da região e considerando a faixa de variação do diâmetro mediano dos sedimentos ao longo da região litorânea, procurou-se determinar o parâmetro A e o diâmetro mediano correspondente através do procedimento descrito a seguir. Com base na média das distâncias aproximadas das isobatimétricas de -1,0 e -5,0 metros em relação a praia, ao longo do trecho compreendido entre a foz do rio Ceará e a praia de Pirambu, extraída do mapa da DHN - 710, tem-se respectivamente os valores médios de 450 e 900 m como referências. Considerando que o plano de referência utilizado no presente trabalho se situa a 1,47 m acima do datum da DHN, foi calculado um perfil representativo para este trecho utilizando as fórmulas de Bruun (1954) e Dean (1977) e tendo como referência o plano definido. Assim para as distâncias médias ao largo de 450 e 900 m e profundidades respectivas de 2,47 e 6,47 m, em relação ao plano da linha de praia, tem-se um parâmetro médio de escala A igual a $5,574 \times 10^{-2} m^{1/3}$. Daí se deduz um valor representativo do diâmetro mediano da areia de 0,12 mm.

Para o trecho compreendido entre o antigo porto e a Ponta de Mucuripe, as isóbatas de -1,0 m e -5,0 m, em relação ao zero da DHN, afastam-se em média da linha divisória terra-água, na Carta DHN 710, respectivamente de 200 m e 700 m. Com tais valores o parâmetro

médio de escala A é da ordem de $7,715 \times 10^{-2} \text{ m}^{1/3}$ indicando uma granulometria cujo diâmetro mediano é de 0,17 mm.

Como o código GENESIS considera somente um valor para representar todo o trecho em estudo definiu-se o valor de 0,12 mm como dado preliminar para o diâmetro mediano. Uma granulometria de menor diâmetro produz um perfil mais suave segundo a fórmula de Dean (1977) e significa um deslocamento da linha de arrebentação para o largo.

A declividade média do perfil de fundo é determinada pelo código, a cada passo de tempo Δt , partir da equação:

$$\tan \beta = (A^3 / D_{LT0})^{1/2} \quad (20)$$

sendo D_{LT0} a profundidade máxima de ocorrência do transporte litorâneo definida pela equação 11 de Hallermeier (1978,1983).

- Linha C.2 - Altura da berma (D_B) - ABH

Considerando o plano da linha de praia situado a 1,47 m acima do zero da DHN e o nível máximo de 3,3 m, em relação ao zero da DHN, atingido pela maré em 1980 (Morais,1980), definiu-se um valor de 2,0 m para a altura da berma.

- Linha C.3 - Profundidade de fechamento (D_C) - DCLOS

Na falta de levantamentos batimétricos detalhados e sistemáticos da região torna-se impraticável definir esse parâmetro. Sendo assim, adotou-se os procedimentos empíricos relatados a seguir.

Segundo Hanson e Kraus (1989) a profundidade de fechamento pode ser estimada como sendo duas vezes a altura significativa máxima anual da onda, em águas profundas. Segundo Hallermeier (1978) a profundidade de fechamento medida é bem descrita pela relação linear aproximada $D_C \sim 1,7 H_0$, sendo H_0 a altura da onda em águas profundas, mas o melhor ajuste entre os valores calculados e os medidos é obtido pela equação 11, a qual considera o efeito do período da onda. Para a faixa de período de maior ocorrência das ondas, 5 a 7 s,

essas se encontram em águas intermediárias na profundidade de monitoramento, 17,47 m em relação ao datum do IBGE. Pela teoria linear das ondas, a altura máxima significativa de 2,09 m para essa profundidade, e período de 6 s, corresponde a uma altura de 2,19 m em águas profundas, considerando que não sofrera refração. Sendo assim a profundidade de fechamento segundo Hanson e Kraus (1989) corresponde à profundidade de 4,4 m.

- Linhas C.4, C.7 e C.10 - Condições de contorno

As obras de construção dos 7 espigões restantes, de um total de onze, se deu após o mês de agosto/72, sendo finalizadas em 1973 (INPH, 1992a). Como não se tem um cronograma preciso do período de construção de cada espigão, estimou-se que a cada 2 meses, a partir de agosto/72, haveria um espigão inserido no sistema. Adotando esta estimativa, o último espigão construído na embocadura do rio Ceará deveria ter sua obra concluída em outubro/73. Assim, no processamento do código GENESIS para o período de agosto/72 a outubro/73, considerou-se o contorno aberto na embocadura do rio Ceará e fechado a direita pelo Molhe do TITAN.

Para simular a condição de pleno barramento dos sedimentos pelo Molhe do TITAN, considerou-se uma grande distância, 500 m, entre a linha de praia situada a direita dessa estrutura e a extremidade do espigão simulado ao qual o Molhe do TITAN está conectado. Além disso, estabeleceu-se uma profundidade de -6.0 m, superior à profundidade de fechamento, na extremidade “off-shore” deste espigão.

Para maiores detalhes das condições de contorno possíveis para a modelagem consulte Hanson e Kraus (1989).

- Linha D.3 - Número de espigões não difrativos - NNDG

Com exceção do espigão localizado na margem direita do rio Ceará, cuja extensão é de 250 m, os 10 espigões localizados na parte oeste do litoral de Fortaleza tem extensões que variam de 100 a 150 m. Dependendo do nível da água e da altura da onda, a extremidade “off-

shore” dessas estruturas pode se localizar antes ou depois da arrebentação das ondas.

Durante a calibração realizou-se simulações considerando essas estruturas como não difrativas e difrativas. A resposta do modelo a diversas simulações indicam que a linha de praia nessa região é insensível a essa caracterização da estrutura.

Linha D.4 - Número da célula de localização dos espigões não-difrativos - IXNDG

A posição de um espigão no modelo numérico é definida na parede esquerda da célula e sua disposição é considerada perpendicular ao eixo x. No modelo as células são dispostas sobre o eixo x, definindo através delas as posições longitudinais do trecho modelado. Assim, para definir a localização de um espigão projeta-se um ponto dessa estrutura sobre o eixo x e calcula o número de células desde a origem dos eixos até esse ponto. Em termos práticos, com as coordenadas UTM da extremidade de cada espigão, Tabela 4.5, determina-se analiticamente o ponto de intercessão da perpendicular, a partir desse ponto, ao eixo x. A distância do ponto de intercessão à origem dos eixos define a localização do espigão em número de células.

Tabela 4.5: Posicionamento dos espigões e quebra-mares portuários no sistema UTM e no sistema de base utilizado na modelagem numérica.

Espigão	Extremidade “off-shore” (UTM)	Extremidade em terra (aprox.) (UTM)	Posição no sistema modelado (célula)
1	550.822 E 9.589.638 N	550.735 E 9.589.507 N	84
2	550.543 E 9.589.835 N	550.451 E 9.589.693 N	78
3	550.252 E 9590.030 N	550.140 E 9.589.870 N	73
4	549.859 E 9.590.281 N	549.769 E 9.590.129 N	66
5	549.435 E 9.590.434 N	549.360 E 9.590.318 N	59
6	549.004 E 9.590.628 N	548.933 E 9.590.488 N	52
7	547.716 E 9.591.055 N	547.669 E 9.590.963 N	32
8	547.339 E 9.591.253 N	547.277 E 9.591.186 N	25
9	547.007 E 9.591.535 N	546.931 E 9.591.444 N	19
10	546.609 E 9.591.857 N	546.531 E 9.591.722 N	11
11	545.934 E 9.591.930 N	545.924 E 9.591.685 N	1
CAGECE	550.964 E 9.589.830 N	550.835 E 9.589.459 N	85
IRACEMA	554.327 E 9.589.561 N	554.260 E 9.588.925 N	135
Porto de Mucuripe	558.743 E 9.590.451 N		181
Porto velho	553.246 E 9.589.065 N		118
Quebra-mar			Extremidades (célula)
Virtual 1			7 - 12
Virtual 2			45 - 53
Recife do Meireles			140 - 154
Porto de Mucuripe	557.502 E 9.591.183 N	558.748 E 9.590.444 N	159 - 181
Porto velho	552.406 E 9.589.426 N	553.250 E 9.589.059 N	114 - 118

- Linha D.5 - Comprimento dos espigões não-difrativos- YNDG

Para o modelo esse parâmetro é definido considerando a distância da extremidade do espigão até o eixo x ou linha de base.. Na determinação desse parâmetro utilizou-se a posição da extremidade ao largo de cada espigão. Assim, como descrito anteriormente, com as coordenadas UTM da extremidade de cada espigão, Tabela 4.5, determina-se analiticamente o ponto de intercessão da perpendicular, a partir desse ponto, ao eixo x. A distância entre esses dois pontos determina o comprimento do espigão.

Esse parâmetro auxilia no cálculo do coeficiente de “by-pass”, que representa a percentagem de área transversal disponível para o transporte litorâneo quando existe estrutura costeira de barramento do transporte. A sua estimativa é realizada pelo modelo a cada intervalo de tempo Δt através da equação:

$$BYP = 1 - D_G/D_L \quad (21)$$

onde BYP é o coeficiente de “by-pass”, D_G é a profundidade onde se encontra a extremidade da estrutura costeira, definida pela equação do perfil e D_L é a profundidade de transporte litorâneo ativo

O parâmetro D_L é também calculado pelo modelo, a cada intervalo de tempo, pela relação:

$$D_L = (1,27/\gamma) (H)_b \quad (22)$$

onde γ é o índice da arrebentação das ondas e H_b é a altura da onda significativa na arrebentação.

Para a modelagem de formas de espigões mais complexas consulte Hanson e Kraus (1989).

- Linha E.3 - Número de espigões que difratam as ondas - NDG

Para modelar os molhes do antigo porto e o do porto de Mucuripe é necessário que estas estruturas fiquem conectadas a espigões. Os espigões assim conectados são considerados difrativos pelo modelo, independente de sua extensão. Além desses dois espigões, tem-se

como estruturas difrativas o espigão da praia de Iracema, cuja extensão é de cerca de 600 m, e o espigão da CAGECE construído em 1977 entre as praias de Formosa e Pirambú, com uma extensão de aproximadamente 350 m.

- Linha E.6 - Profundidade onde se localiza a extremidade dos espigões difrativos - DDG

Esse parâmetro foi estimado por interpolação a partir dos valores de profundidade apresentados nas cartas náuticas DHN-710, 1995, acrescidos de 1,47 m para referenciá-los ao plano da linha de praia.

- Linha F.2 - Permeabilidade dos espigões/molhes- PERM

É o parâmetro que traduz o grau de facilidade da estrutura em permitir a passagem de sedimentos por dentro ou sobre elas. Sua estimativa depende das características de construção da estrutura, elevação em relação ao plano de referência e nível de maré local

Para essas estruturas construídas por enrocamento estabeleceu-se inicialmente uma permeabilidade nula para todas. Entretanto, durante a calibração do modelo algumas estruturas foram consideradas com alguma permeabilidade para compensar as incertezas na distribuição dos sedimentos sobre os trechos de praia oriundos das dunas e do despejo de dragagem.

- Linha F.4 - Distância da linha de praia localizada fora dos limites de domínio do modelo, à extremidade “offshore” do espigão localizado na fronteira direita

Dentro da concepção estabelecida para a dinâmica de sedimentos na região, o sedimento que contorna o Molhe do TITAN não atinge as praias. Isso equivale a considerar que no limite a direita da área modelada não ocorre entrada de sedimentos no sistema. Para considerar essa situação na modelagem estabeleceu-se uma grande distância, igual a 500m , entre a extremidade do espigão e a linha de praia situada fora dos limites do modelo.

- Linha G.3 - Número de quebra-mares destacados - NDB

Além dos dois quebra-mares correspondentes ao porto antigo e ao porto de Mucuripe, dois outros foram inseridos para simular o comportamento das ondas próximo às praias .

Conforme já justificado (item 4.1.6), estes quebra-mares “virtuais” estão inseridos paralelamente às praias da Barra do Ceará e Arpoadores para simular as regiões de baixios. Um outro quebra-mar foi inserido entre o Porto de Mucuripe e o espigão de Iracema para simular a região de baixio correspondente ao recife do Meireles (Figura 4.2).

Dada as limitações do modelo, o quebra-mar que simula o molhe do TITAN é representado por um trecho retilíneo, que segue a orientação do último prolongamento do referido molhe, conectado ao espigão que define o limite a direita da área modelada (Figura 4.2).

Todos os parâmetros que caracterizam os quebra-mares: comprimento, distância ao eixo x e profundidade das extremidades, subsidiam o modelo GENESIS na implementação de sua rotina interna de difração das ondas por estas estruturas.

- Linha G.6 - Posição das extremidades dos quebra-mares segundo o número de células - IXDB

As posições em coordenadas UTM das extremidades dos quebra-mares dos dois portos foram obtidas dos mapas de restituição dos levantamentos aerofotogramétricos. Esses pontos foram projetados no eixo x, a partir dos cálculos da geometria analítica e em seguida definidas as paredes das células. Deve-se lembrar que uma das extremidades de cada um desses quebra-mares está localizado na mesma parede de célula dos espigões aos quais estão conectados.

Para os dois quebra-mares situados ao largo das praias da Barra do Ceará e dos Arpoadores, algumas simulações foram realizadas para definir suas distâncias ao eixo x, seus comprimentos, os ângulos em relação a linha de praia e as profundidades das extremidades, objetivando o melhor ajuste da posição da linha de praia calculada.

Em geral, as projeções das extremidades não coincidem com a parede da célula, nesse caso deve ser alterado o comprimento do quebra-mar.

- Linha G.7 - Distância do eixo x à extremidade do quebra-mar - YDB

Esse parâmetro é definido a partir das coordenadas UTM das extremidades dos quebra-mares e dos pontos de interseção da reta perpendicular ao eixo x e que passa pela extremidade do quebra-mar. Mesmo com o prolongamento ou redução no comprimento do quebra-mar, para coincidirem com as paredes das células, foram mantidas as coordenadas reais das extremidades no cálculo desse parâmetro

- Linha G.8 - Profundidade da água nas extremidades dos quebra-mares - DDB

Para os quebra-mares dos portos e para o quebra-mar representativo do recife do Meireles esse parâmetro foi definido aproximadamente a partir da Carta Náutica DHN-710, 1995, acrescido de 1,47 m para referenciá-lo ao datum escolhido.

- Linha G.9 - Coeficientes de transmissão dos quebra-mares destacados - TRANDB

Esse é um coeficiente empírico que traduz o percentual da energia das ondas transmitida através da estrutura ou sobre ela. Para as obras de enrocamento que constituem os dois portos estabeleceu-se um fator nulo de transmissividade das ondas. A definição desse parâmetro para os quebra-mares submersos “virtuais” se deu por tentativas, alterando o parâmetro de transmissão de cada estrutura em repetidas simulações do modelo. Os valores que permitiram um melhor ajuste são 0,65 e 0,63 respectivamente para o quebra-mar da praia da Barra do Ceará e para a praia dos Arpoadores. Para o quebra-mar que simula o recife do Meireles foi definido um coeficiente de 0,4.

- Linha H.1 - Define a existência ou não de paredões ou muros de contenção (seawall)

Com base nas datas de construção dos muros de proteção, Tabela 4.5, todas estas estruturas são inseridas na simulação. Além delas um dos afloramentos rochosos que ponteia o litoral da cidade de Fortaleza, como a Ponta do Meireles, pode ser considerado como estrutura de proteção e está representada como tal.

A projeção da extremidade do muro ou afloramento sobre o eixo x deve coincidir com o centro da célula, do contrário deve-se redefinir sua extensão e adota-se os mesmos procedimentos descritos anteriormente para definir sua posição em números de células.

Os dados de localização dessas estruturas são fornecidos ao código GENESIS através de um arquivo específico denominado SEAWL.

- Linha I.3 - Número de processos de engordamento de praia realizados durante o período de calibração

No modelo conceitual proposto para a região, para o período de calibração, admite-se que a ampliação da área emersa seja devido ao aporte de sedimentos provenientes do despejo de material dragado, do transporte de areia das dunas pelo vento, e auxiliada pela retenção dos sedimentos pelos espigões. O modelo GENESIS não contempla diretamente na equação de transporte a parcela referente ao transporte frontal, mas permite que esse processo seja representado por engordamento ou retirada artificial de areia da praia. Assim, com base no período a partir do início da simulação, em que as dunas situadas entre a foz do rio Ceará e a praia de Pirambu não se encontravam fixadas, agosto/72 a outubro/73, e nos períodos dos trabalhos de dragagem na região portuária e despejo do material (INPH, 1991 e 1992) pode-se caracterizar 7 fontes provedoras de sedimentos:

- 1) Dunas - considera-se o período compreendido entre 15/04/73 a 15/10/73 em que elas não se encontravam fixadas (INPH,1992);
- 2) Despejo de 2.5 milhões de metros cúbicos de material dragado, ao largo da praia de Iracema (20/11/80 a 20/04/81);
- 3) Despejo de 3,888 milhões de metros cúbicos de material dragado, ao largo da praia de Pirambu (21/04/81 a 31/12/81);
- 4) Despejo de 2,357 milhões de metros cúbicos de material dragado, ao largo da praia de Pirambu (01/06/82 a 31/12/83);

5) Despejo de 986 mil metros cúbicos de material dragado, ao largo da praia de Pirambu (25/08/86 a 15/04/87);

6) Despejo de 1,8 milhões de metros cúbicos ao largo da praia de Pirambu (04/91 a 08/91);

7) Despejo da dragagem de manutenção, estimada em 30 mil metros cúbicos por mês, ao largo da praia de Pirambu (01/01/92 a 15/08/95). A data do início da dragagem de manutenção foi arbitrada pelo autor dessa dissertação. O relatório do INPH (1992) menciona a ordem de grandeza dessa dragagem de manutenção na época de sua edição, em agosto de 1992.

Na impossibilidade de determinar a distribuição espacial e temporal do material despejado que atinge as praias estabeleceu-se, por uma questão de simplificação, 4 fontes de engordamento: dunas, material despejado ao largo da praia de Iracema, material despejado ao largo da praia de Pirambú no período de novembro/81 a agosto/91, material despejado ao largo da praia de Pirambú no período de janeiro/92 a agosto/95.

- Linha I.4 - Data de início das atividades de engordamento da praia

- Linha I.5- Data do final das atividades de engordamento da praia

Fonte 1 - dunas: 15/08/72 a 15/10/73

Fonte 2 - material despejado ao largo da praia de Iracema: 20/11/80 a 20/04/81

Fonte 3 - material despejado ao largo da praia de Pirambú no período de abril/81 a agosto/91.

Foi considerado como alimentando diretamente as praias no período de 20/04/81 a 15/08/95

Fonte 4 - material despejado ao largo da praia de Pirambú no período de janeiro/92 a agosto/95. Foi considerado como alimentando diretamente as praias no período de 01/01/92 a 15/08/95.

- Linha I.6 - Número das células onde se iniciam os engordamentos

- Linha I.7 - Número das células onde terminam os engordamentos

A Figura 4.14, aerofotografia de 1976, indica que as dunas dominavam desde a foz do Rio Ceará até as proximidades do sexto espigão a partir da praia Formosa. Pela direção

predominante dos ventos pode-se considerar que toda esta extensão, coberta pelas células de número 1 a 51, estaria sujeita a receber a areia das dunas transportada pelos ventos.

Na caracterização, quantificação e distribuição do transporte do material despejado ao largo das praias arbitrou-se alguns parâmetros em vista do pouco conhecimento dos processos envolvidos. Assim, parte do material dragado e despejado ao largo da praia de Iracema, foi considerado como alimentador do trecho de praia que se estende desde a célula 150 até a célula 181. Parte do material despejado ao largo da praia de Pirambu foi considerado como tendo alimentado uniformemente a extensão de praia que se inicia na foz do rio Ceará até a praia de Formosa, corresponde às células de número 1 a 90.

- Linha I.8 - Largura adicional da berma com o processo de engordamento

O modelo de evolução da linha de praia não contempla diretamente o transporte frontal de sedimentos e nem o transporte eólico, entretanto, permite a simulação de seus efeitos através dos processos de engordamento artificial. A grande dificuldade reside na correta quantificação desses efeitos, no espaço e no tempo, imprescindíveis na modelagem do sistema e exigido pelo código GENESIS.

Conforme já exposto no item 4.1.1, 9,0 milhões de metros cúbicos de material dragado no porto de Mucuripe foram despejados ao largo da praia de Pirambú, entre novembro de 1980 e agosto de 1991. Acrescentando a esse montante um volume aproximado de 1,29 milhões de metros cúbicos, referentes ao volume total de dragagem de manutenção realizada entre janeiro/92 e agosto/95, com base na estimativa média de dragagem de 30.000 m³/mês (INPH, 1992b), calcula-se que cerca de 10,29 milhões de metros cúbicos foram despejados ao largo e próximo da praia de Pirambú. Estimar quando e quanto desse material poderia atingir as praias e suprir a capacidade de transporte das ondas, além de se estabelecer na praia para permitir seu engordamento seria uma tarefa árdua e permeada de incertezas por não dispor de informações suficientes. O mesmo se poderia dizer para os sedimentos fornecidos pelas dunas

do litoral oeste, cujos procedimentos de fixação ocorreram no final de 1973 e sua área imediatamente invadida.

Outra questão referente ao material de despejo é o desconhecimento da história de suas características granulométricas. Além do trabalho de Moraes (1972), cujos resultados apresentados no item 4.1.1, Figura 4.3, estipulam um percentual máximo de 10% de areia no material colhido na bacia de evolução, a única informação qualitativa disponível se encontra no relatório INPH (1991) que caracteriza o material de despejo como constituído basicamente de vasa.

Em que pese os cálculos de transporte eólico realizadas por Valentini (1994), não existem medições da campo na área de estudo que permitam validar suas estimativas

Diante das limitações dos dados disponíveis para estimar o que se pode considerar os parâmetros mais importante na modelagem e calibração do modelo na região litorânea de Fortaleza, transporte eólico e transporte do material despejado pela dragagem, arbitrou-se que a fração arenosa constituinte do material despejado e que atingia as praias representava 10% do total.

Com base nas estimativas de Valentini (1994), considera-se que as dunas localizadas entre a foz do rio Ceará e a praia de Pirambu forneceram os sedimentos arenosos para suprir o transporte litorâneo e o engordamento de praia a uma taxa média aproximada de 90 m³ /metro/ano. Assim, para o trecho que se estende da foz do rio Ceará até o espigão 6, limite a direita da região das dunas, células 1 a 51, estima-se um avanço aproximado de 14,1 metros/ano na linha de praia se não houvesse o transporte longitudinal: (volume / metro de praia / (altura da berma + profundidade de fechamento) = [(90 / 1) / (2 + 4,4)].

Supondo um volume de areia de 10% do material despejado ao largo da praia de Iracema, o que corresponde ao volume de 250.000 m³, alimentando uniformemente as células 150 a 180, tem-se um engordamento de 19,4 m = [250.000 / 31 / 65 / (2 + 4,4)].

O volume de areia de cerca de 903.100 m³ despejados próximos a praia de Pirambú, no período de abril/81 a agosto/91, e distribuídos uniformemente nas células de 1 a 90 induz um engordamento de 24,1 m na linha de praia = $[903.100 / 90 / 65 / (2 + 4,4)]$.

Finalizando, supondo um volume de areia de 130.500 m³ provenientes do despejo da dragagem de manutenção próximo a praia de Pirambú, realizado entre janeiro/92 e agosto/95, resulta no engordamento de 3,5 m = $[130.500 / 90 / 65 / (2 + 4,4)]$.

Encontra-se no Apêndice C o arquivo START com todos os dados utilizados na configuração física do sistema, além dos parâmetros ajustados na calibração.

4.3.4 Arquivo NSWAV

Os dados constantes desse arquivo são o ângulo de ataque da onda na linha de referência e o coeficiente de transformação da altura da onda até essa linha, devido à sua propagação sobre um fundo irregular.

Os dados desse arquivo são originados do processamento do modelo de propagação das ondas-RCPWAVE. Para o processamento desse modelo é necessário definir uma malha bidimensional de pontos sobre a região em estudo, correspondentes às profundidades do local. Para a região definida entre a foz do rio Ceará e a Ponta de Mucuripe estabeleceu-se uma malha sobre a Carta náutica 710- DHN, com as profundidades corrigidas para 1995, constituída por 20 pontos na longitudinal e 35 pontos na transversal ao eixo x (Figura 4.27), totalizando 700 pontos. Os pontos longitudinais estão espaçados de uma distância de 650 m e para os pontos transversais o espaçamento é de 200 m. Com esses espaçamentos foi necessário realizar para a maioria dos pontos da malha uma interpolação com base nas profundidades existentes na Carta da DHN. Para os pontos localizados em terra estabeleceu-se uma altura única de 5 m.

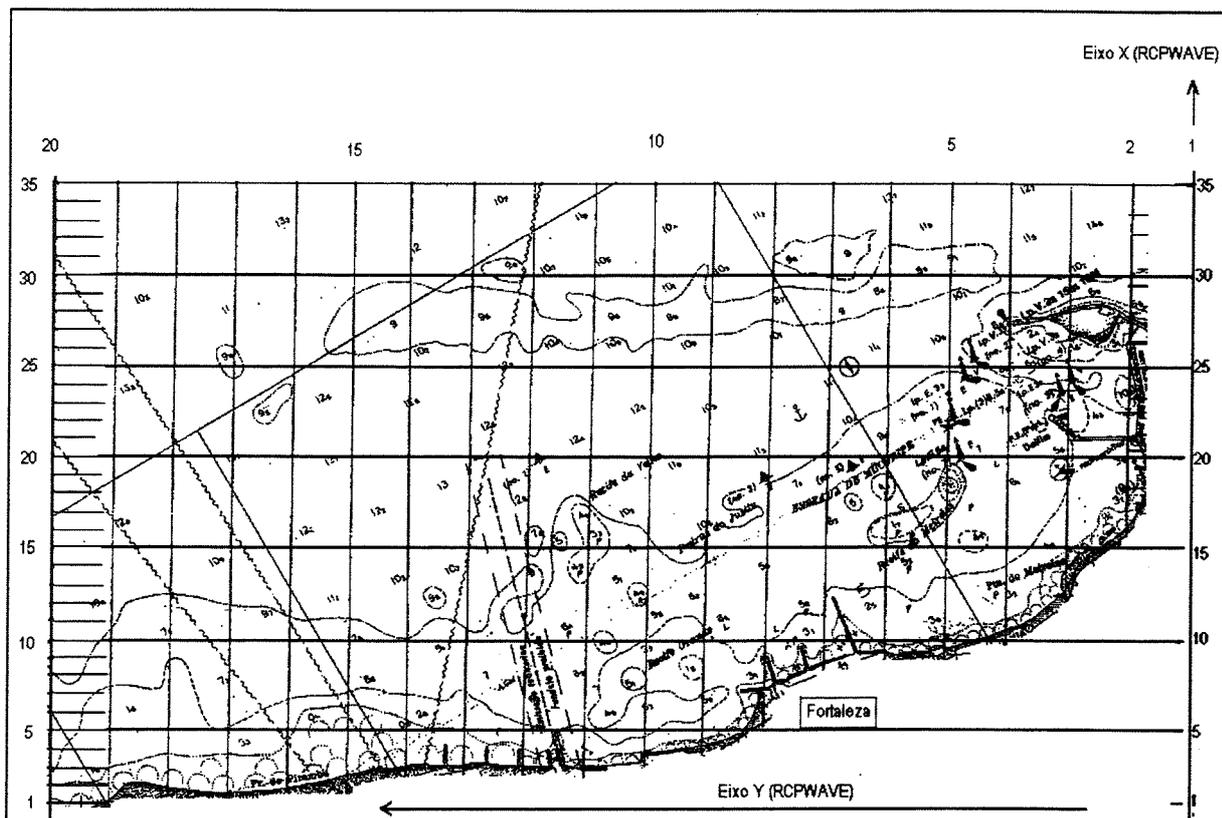


Figura 4.27 : Malha de 35 x 20 pontos de dados altimétricos e batimétricos, para a modelagem do fundo pelo código RCPWAVE. Reprodução parcial da Carta DHN-710, 1995.

Com a modelagem do fundo e as condições da onda ao largo, o modelo realiza a propagação da onda e calcula o ângulo de ataque na linha de referência, previamente escolhida, e os coeficientes de transformação da altura da onda até essa linha.

Maiores detalhes dos arquivos de dados de entrada do código RCPWAVE, para a modelagem de propagação das ondas, são apresentados no trabalho de Gravens et al. (1991).

4.3.5 Arquivo DEPTH

É o arquivo de dados da profundidade dos pontos situados na linha de referência. Esses dados, extraídos do arquivo de saída do código RCPWAVE, são na realidade determinados previamente pelo usuário do código. O usuário indica para o código RCPWAVE as profundidades até as quais, partindo da posição “off-shore”, deverá ser realizada a propagação das ondas. Um indicador para definir as profundidades é a altura máxima da onda na série histórica utilizada. Com essa informação e o índice de arrebentação define-se a máxima

profundidade onde ocorre a ruptura da onda. As profundidades da linha de referência devem obrigatoriamente serem maiores que a máxima profundidade de arrebentação.

Considerando que o código RCPWAVE não realiza a difração das ondas devido a estruturas costeiras, parte da linha de referência está situada em uma posição ao largo do molhe do TITAN, estendendo-se daí até uma posição ao largo do antigo porto, limite da zona de influência dessa estrutura. A partir daí até o limite Oeste da região de estudo essa linha se aproxima da praia, atingindo profundidades da ordem de 4 m em relação ao plano de referência situado a 1,47 m acima do datum da DHN. Assim, as ondas são propagadas até essa linha com base na conformação real do fundo. Entre essa linha e a linha de arrebentação a propagação é realizada pela subrotina interna do código GENESIS, considerando os efeitos da refração e empinamento e as isobatimétricas paralelas à linha de praia.

Por não estarem disponíveis os dados de profundidade da região de épocas anteriores, necessárias ao processamento do modelo de propagação das ondas (RCPWAVE), utilizou-se os dados batimétricos da carta náutica DHN-710, de 1995, na escala de 1:50.000. A carta náutica DHN-701, apesar de sua escala, 1:13000, apresentar um maior detalhamento do fundo litorâneo, não contempla toda a área de estudo.

A Figura 4.28 apresenta a modelagem do fundo pelo modelo RCPWAVE, baseada nos dados de profundidade fornecidos ao código.

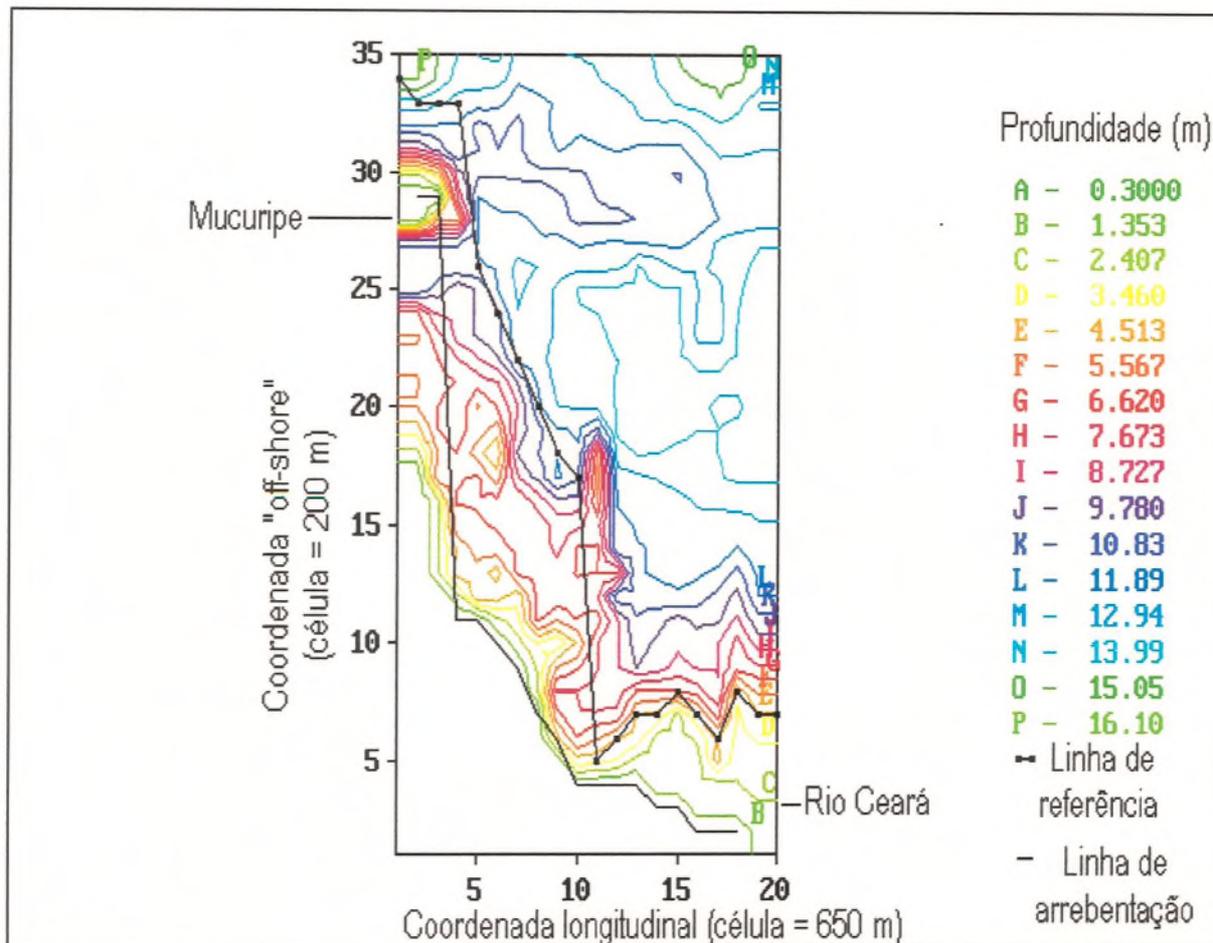


Figura 4.28 : Modelo de fundo da região em estudo, segundo o código RCPWAVE. Notar a disposição invertida da área. Gráfico gerado pelo programa RCPGRAF.

4.3.6 Arquivo SEAWL

É o arquivo dos dados de posição dos muros de proteção (seawall) e afloramentos rochosos. As posições dessas estruturas ou afloramento rochoso, que efetivamente produzem o mesmo efeito dos muros de proteção da praia, estão também referenciadas à linha de base. Considerando que os contornos dessas estruturas e afloramentos coincidem com a linha de praia, os dados desse arquivo são os mesmos do arquivo SHORL.EXT. Nas células onde não existem a estrutura ou afloramento, o dado de posição do muro de proteção é definido com o número -9999, significando que existe virtualmente essa estrutura em terra a uma distância considerável da linha de praia.

4.4 Calibração do modelo GENESIS

Foi estabelecido uma metodologia para calibrar o código GENESIS, considerando inicialmente a hipótese de ataque das ondas sobre a linha de praia durante todo o ciclo de maré. Isso consistiu no ajuste de determinados parâmetros definidos no arquivo START, para permitir ao modelo reproduzir a posição da linha de praia de Agosto/95.

Para que os parâmetros cujos valores foram definidos empiricamente não se transformassem em parâmetros de calibração, estabeleceu-se que além dos parâmetros principais K_1 e K_2 haveria ajuste somente nos parâmetros dos quebra-mares virtuais e na permeabilidade dos espigões. Os demais parâmetros foram mantidos com os valores determinados empiricamente e estabelecidos inicialmente no arquivo START.

Em vista do pouco conhecimento qualitativo e quantitativo dos processos hidrosedimentológicos que ocorrem no despejo da dragagem e sobre os sedimentos que contornam o espigão do Futuro e alimentam a restinga ao largo, estabeleceu-se como única fonte de alimentação das praias, além da areia fornecida pelas dunas, o material dragado e despejado ao largo das praias de Iracema e Pirambú. Estabeleceu-se também que em todo o processo de calibração o suprimento de areia para praia, teria o valor fixo de 10% do material despejado e representado como engordamento artificial no arquivo START. Ao contrário dos modelos precursores que permitiam a simulação de transporte frontal através de uma expressão matemática, no modelo GENESIS esse processo é representado diretamente pelo engordamento de praia..

Em virtude da construção de 8 espigões dentro do período de calibração, agosto/72 a agosto/95, fez-se necessário a criação de 9 arquivos de configuração da área, START. O arquivo de saída para a linha de praia calculada, SHORC, constitui no arquivo de entrada, SHORL, para cada configuração estabelecida no arquivo START. Considerando que entre agosto/72 e o final de 1973 foram construídos 7 espigões no litoral oeste da área e na falta de

informações detalhadas do cronograma de execução dessas obras, estabeleceu-se a inserção de um espigão a cada dois meses, a partir de agosto/72. Assim, para efeitos de atualização da configuração do sistema modelado, o espigão localizado na foz do rio Ceará foi inserido no sistema em outubro de 1973. O espigão da CAGECE foi construído em 1977 e na falta de maiores informações a sua inserção no sistema é considerada a partir de 01/07/1977.

Utilizou-se a técnica de ajuste por tentativa e erro para minimizar as diferenças entre os valores calculados para a linha de praia e aquele medido. Os resultados da posição da linha de praia obtidos durante todo o processo de calibração, foram avaliados qualitativamente e quantitativamente. Qualitativamente a análise dos resultados se fez visualmente, utilizando o aplicativo GENGRAF, que permite comparar através dos gráficos as posições das linhas de praia calculada e medida.

Para analisar quantitativamente os dados utilizou-se o mesmo parâmetro calculado pelo código GENESIS, com algumas alterações. A média dos valores absolutos da diferença entre as posições dos pontos da linha de praia calculada e medida é realizada automaticamente pelo código GENESIS. Entretanto, sendo esse cálculo realizado para toda a extensão da área modelada pode ocorrer um mascaramento do desajuste de alguns trechos. Assim, para uma melhor avaliação dos resultados esse parâmetro foi calculado para cada trecho de extensão correspondente a 10 células.

O modelo foi julgado calibrado para um erro médio absoluto menor que 30 m para qualquer dos trechos constituídos de 10 células e a diferença entre as posições calculadas e medidas menor que 60 m. As diferenças entre as posições da linha de praia calculada e medida é facilmente visualizada pelo programa GENGRAF.

Tendo como base aproximada a declividade do perfil de praia da ordem de 1:25 e a amplitude de maré da ordem de 3.0 m, uma diferença entre a linha calculada e aquela medida da ordem de até 60 m pode ser considerada um resultado satisfatório.

Basicamente, para a calibração, manteve-se inicialmente todos os valores dos parâmetros definidos no arquivo START, com exceção dos parâmetros K_1 e K_2 . Com o parâmetro K_2 mantido nulo o programa foi processado para distintos valores de K_1 , variando de 0,1 a 0,6, até a definição de um valor para K_1 igual a 0,1 que melhor ajustou a linha de praia nas células situadas imediatamente a barlamar dos espigões.

Definido o valor de K_1 , o valor de K_2 foi alterado dentro da faixa de 0,5 a 1,5 vezes o valor de K_1 . O parâmetro K_2 tem sua maior influência na região imediatamente a sotamar dos espigões. Dado ao pequeno comprimento dos espigões que foram considerados não difrativos em sua quase totalidade, a influência de K_2 se manifesta nas áreas de maior irregularidade de fundo, que ocasiona por sua vez um gradiente de altura de onda na arrebentação. Assim, esse valor sofreu acréscimos e decréscimos até atingir a situação ideal onde houvesse uma maior extensão de ajuste das linhas de praia, o que resultou no valor ótimo de 0,1 para o parâmetro K_2 .

Posteriormente foram alterados os valores dos coeficientes de transmissão dos dois quebra-mares virtuais até atingir um razoável ajuste entre os valores calculados com aqueles medidos para a linha de praia. Finalmente, realizou-se as alterações nos coeficientes de permeabilidade dos espigões. Ainda que fisicamente isso não represente a realidade dos processos, constitui no entanto numa forma de minimizar as dificuldades em quantificar no espaço e no tempo o fluxo de areia que atinge as praias.

O período de tempo utilizado para a calibração, agosto/72 a agosto/95, é muito extenso devido à não disponibilidade de levantamentos aerofotogramétricos com restituição em escala compatível com a precisão necessária. Ainda assim, para uma avaliação qualitativa, utilizou-se a linha de praia extraída do levantamento aerofotogramétrico de 1978, sem restituição e sem o conhecimento da época em que foi realizado o vôo. Essa linha foi digitalizada diretamente da aerofotografia tendo como referências as coordenadas UTM dos

espigões. Devido ao pouco contraste entre a cor da água e a areia molhada na maioria dos trechos, dificultando a definição da linha divisória água-areia, essa linha foi estabelecida somente para um pequeno trecho entre a foz do rio Ceará e o espigão número 6 na praia dos Arpoadores. Considerando que para essa linha não existe informação quanto a data e hora exata da fotografia e por isso não sofreu qualquer correção devido aos efeitos da maré, a sua comparação com aquela calculada pelo modelo deve ser realizada com reservas.

Os testes de sensibilidade foram realizados para avaliar a influência dos procedimentos utilizados na complementação da série de dados de onda nos resultados do modelo. Nesses testes foram consideradas quatro condições extremas de ocorrência dos parâmetros altura e direção da onda. Duas simulações foram realizadas considerando a sequência dos valores de ocorrência da altura da onda em ordem crescente e a outra em ordem decrescente. Outras duas simulações foram realizadas considerando as sequências em ordem crescente e decrescente da direção da onda em relação ao Norte geográfico.

Para avaliar o desempenho do código GENESIS, considerando a hipótese da influência das ondas sobre as linhas de praia em somente meio ciclo da maré, duas alterações foram realizadas nos dados de entrada:

- 1) O arquivo WAVES para essa simulação dispõe dos dados de ondas para meio ciclo da maré, no outro meio ciclo os valores de altura de onda são considerados nulos. Isso significa que nesse meio ciclo não há ataque sobre a linha de praia. Assim, para um ciclo de 12 horas da maré e dados de ondas de 3 em 3 horas tem-se somente dois conjuntos de dados de parâmetros ondulatórios para cada ciclo, dentro do arquivo WAVES;
- 2) Considera-se que somente metade dos 10% do material arenoso, proveniente do despejo de dragagem, atinja e modifique a linha de praia durante a maré alta. A outra metade faz parte do transporte de sedimentos que ocorre mais ao largo, durante o período da maré baixa, e não é considerada no engordamento artificial da praia.

A areia proveniente das dunas, que alimenta as praias, independe do ciclo da maré e é integralmente considerada na simulação para as duas hipóteses propostas.

A preparação dos dados utilizados na modelagem da região litorânea da cidade de Fortaleza demandou um tempo aproximado de 4 meses.

O processamento dos dados pelo código GENESIS foi realizado em um microcomputador com processador PENTIUM, de 100 MHz, e 32 Mbytes de memória RAM. Com essa configuração e considerando a hipótese de ataque das ondas a linha de praia durante todo o ciclo de maré, o tempo de processamento do código atingiu 2 horas e 20 minutos, para a simulação iniciando em 15/08/72 e terminando em 15/08/95. Para a segunda hipótese, ataque das ondas em somente meio ciclo da maré, o tempo de processamento atingiu 1 hora e 15 minutos para o mesmo período da simulação.

Para ajustar a posição calculada da linha de praia o mais próxima possível da posição da linha medida, foram necessárias cerca de 120 simulações com o modelo GENESIS.

Os resultados finais obtidos na calibração, considerando as duas hipóteses do modelo conceitual, e nos testes de sensibilidade do modelo às variações na sequência de dados da altura e direção da onda, são apresentados no capítulo a seguir.

Com os parâmetros ajustados na calibração realizou-se uma simulação de previsão da evolução da linha de praia no trecho entre a foz do rio Ceará e o antigo porto de Fortaleza, para o período de 1963 a 1968. Os resultados dessa simulação são também apresentados no capítulo a seguir.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5.1 é apresentado o modelo da área de estudo segundo o arquivo de configuração START.

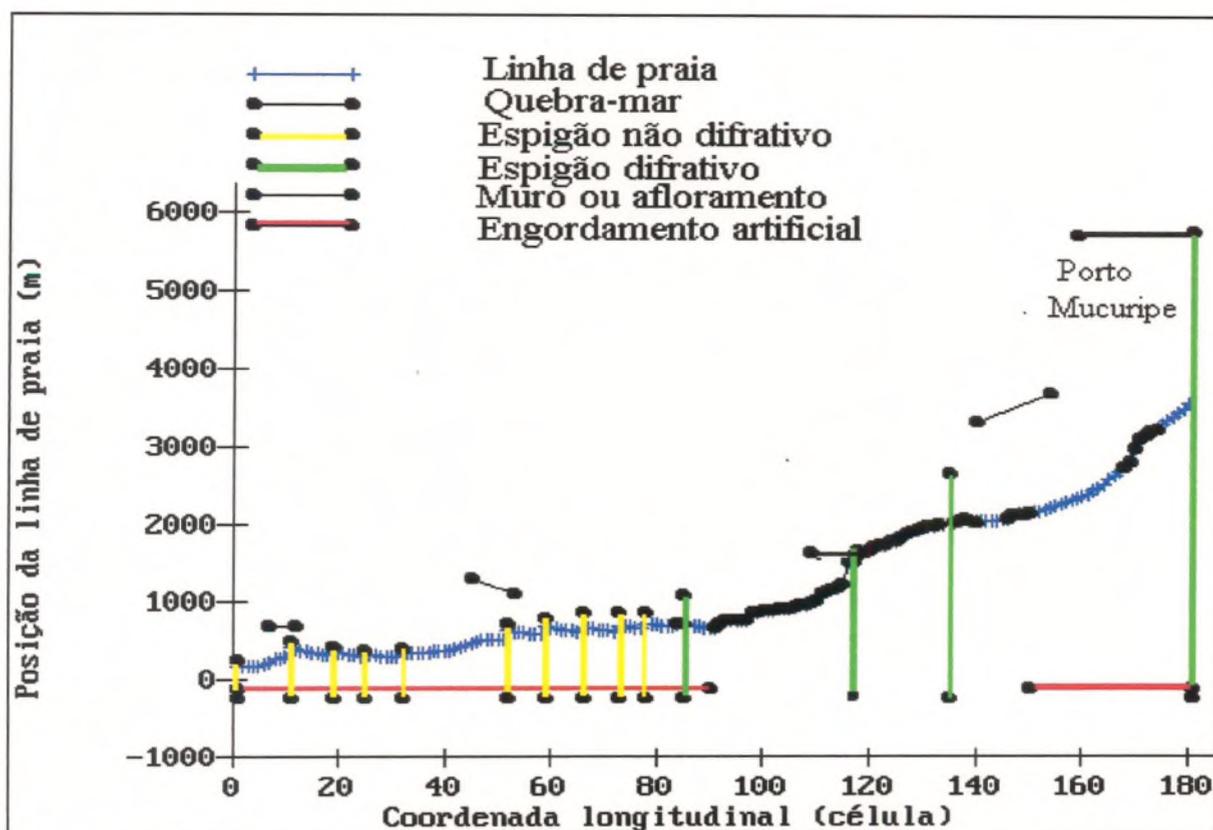


Figura 5.1: Modelo da área de estudo segundo o arquivo START. Gráfico gerado pelo programa GENGRAF.

Nas Figuras 5.2 a 5.8 pode-se visualizar a posição da linha de praia calculada pelo modelo, quando se considera a hipótese das ondas atuando sobre a linha de praia durante todo o ciclo de maré. Dada a extensão do trecho modelado e para não perder os detalhes gráficos dos resultados, houve necessidade de dividi-lo em trechos menores. Todos os gráficos apresentados foram gerados pelo programa GENGRAF. Considerando que eles são gerados por esse programa dentro do ambiente DOS, há necessidade de tratá-los pelo aplicativo Corel Photo-Paint, que permite eliminar a cor preta da tela de fundo daquele ambiente e alterar as cores das linhas dos gráficos.

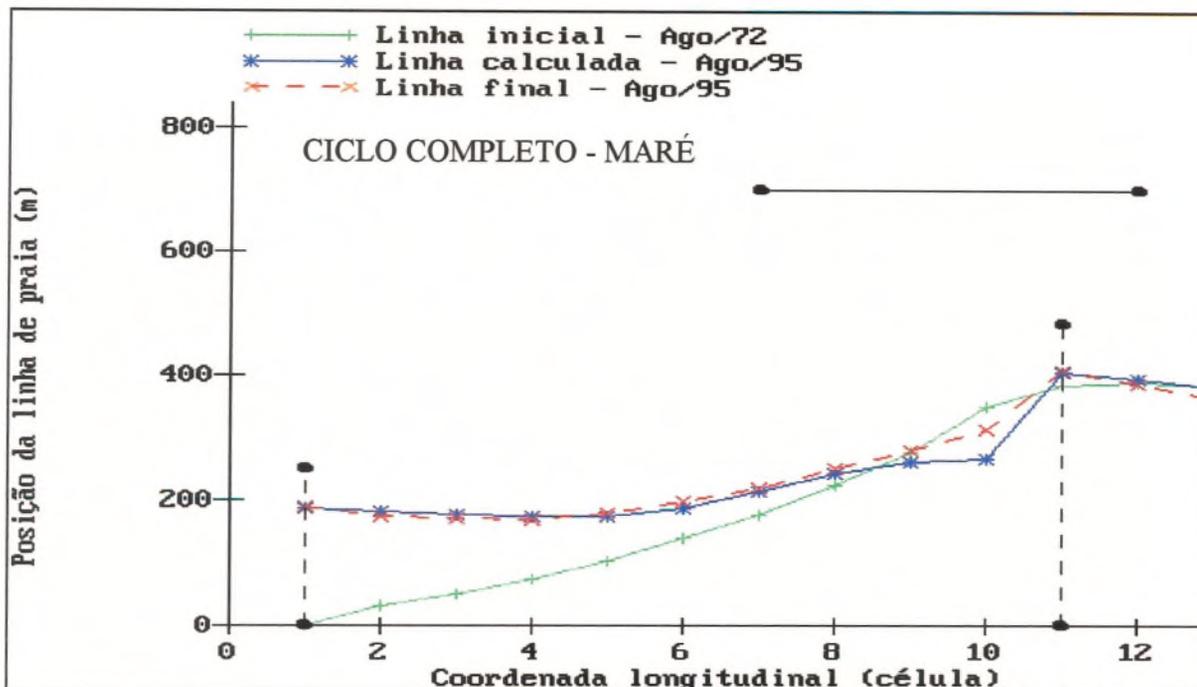


Figura 5.2: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 11 e 10.

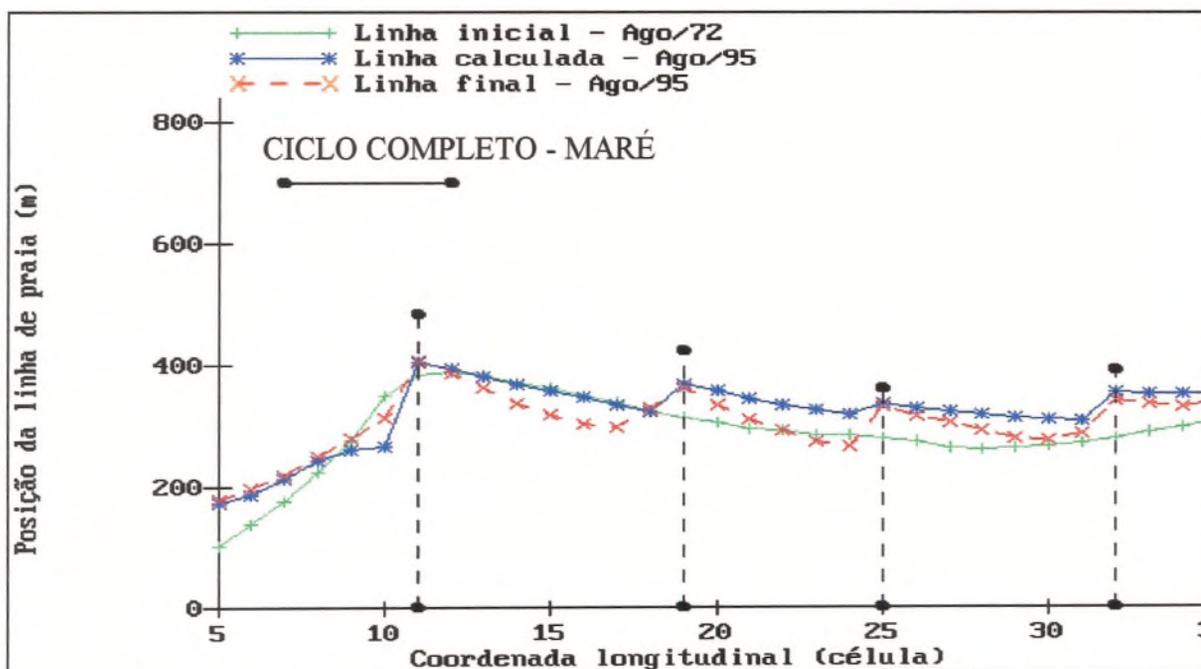


Figura 5.3: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 10, 9, 8 e 7.

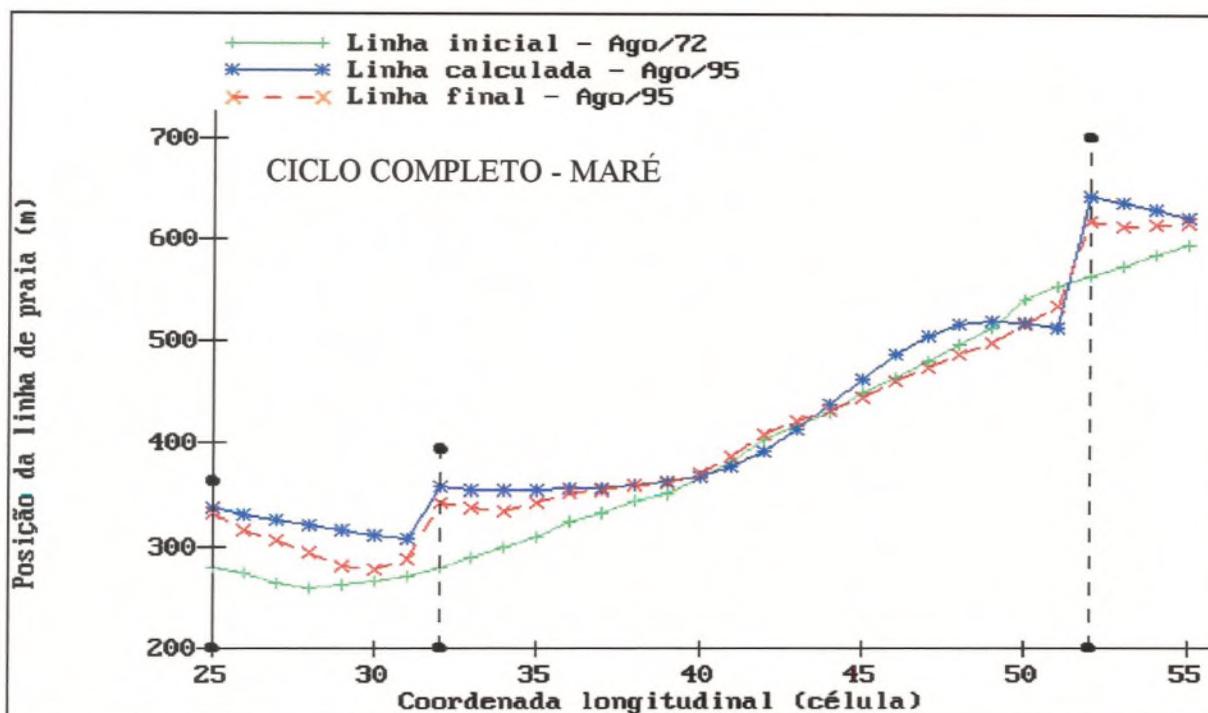


Figura 5.4: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 7 e 6.

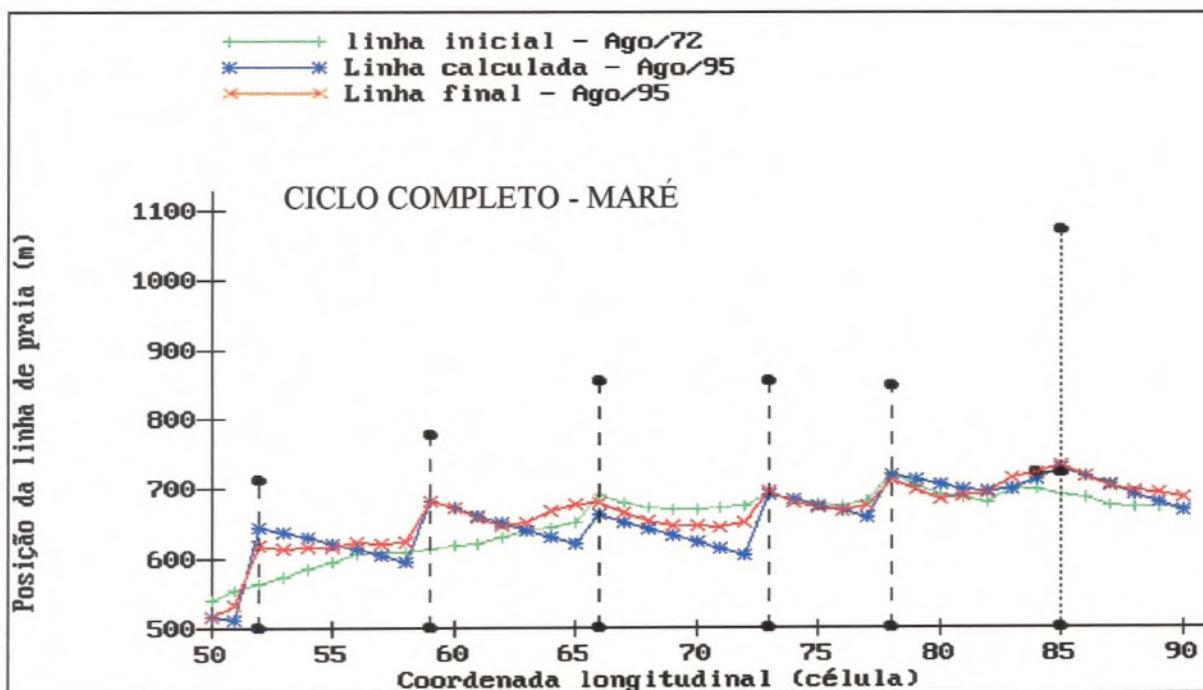


Figura 5.5: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 6, 5, 4, 3, 2 e espigão da CAGECE.

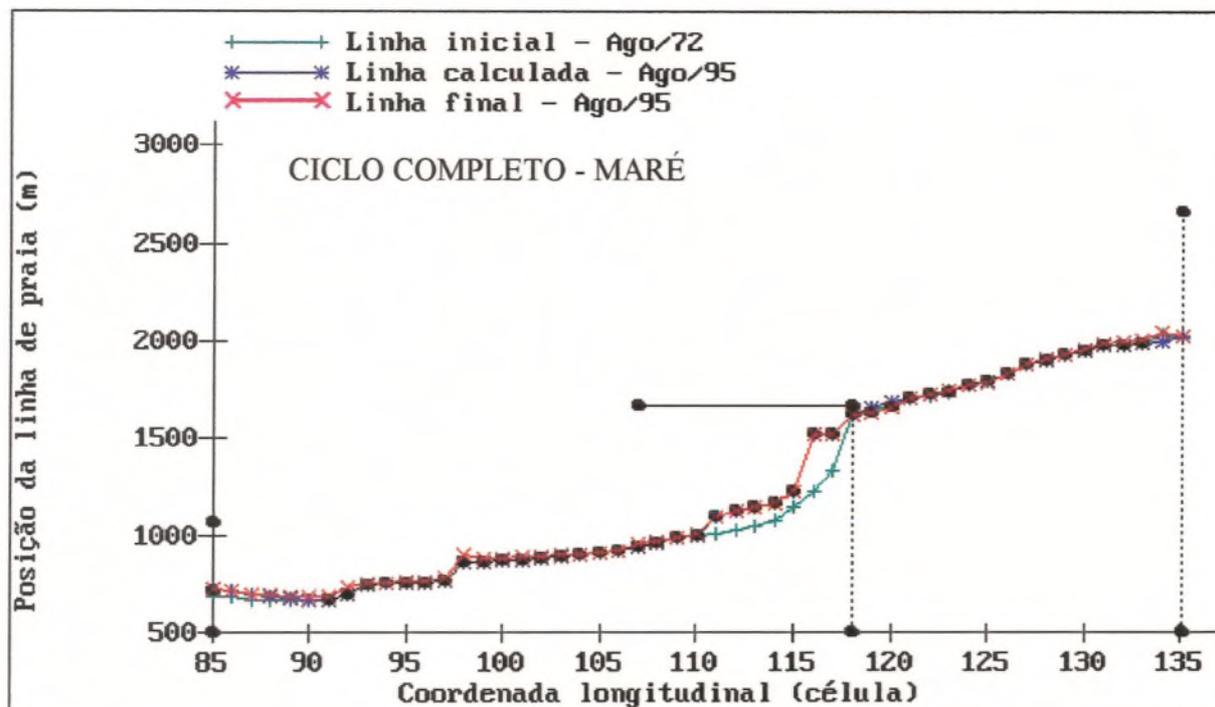


Figura 5.6: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Porto velho e espigão de Iracema.

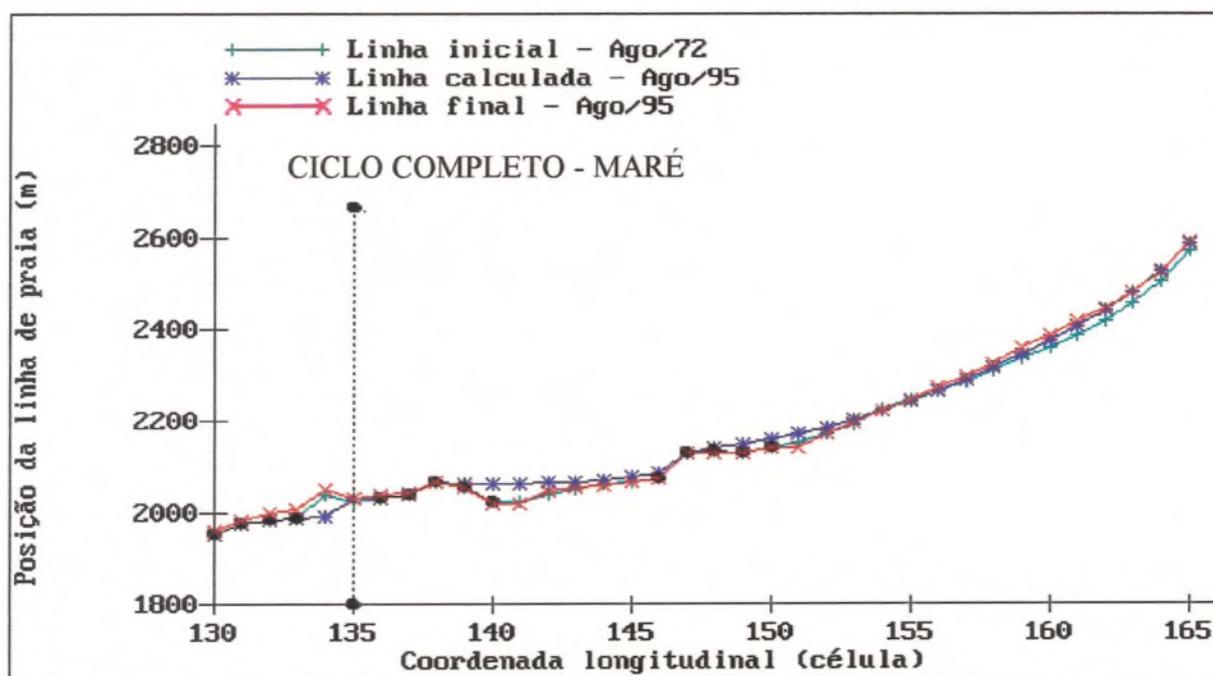


Figura 5.7: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigão de Iracema.

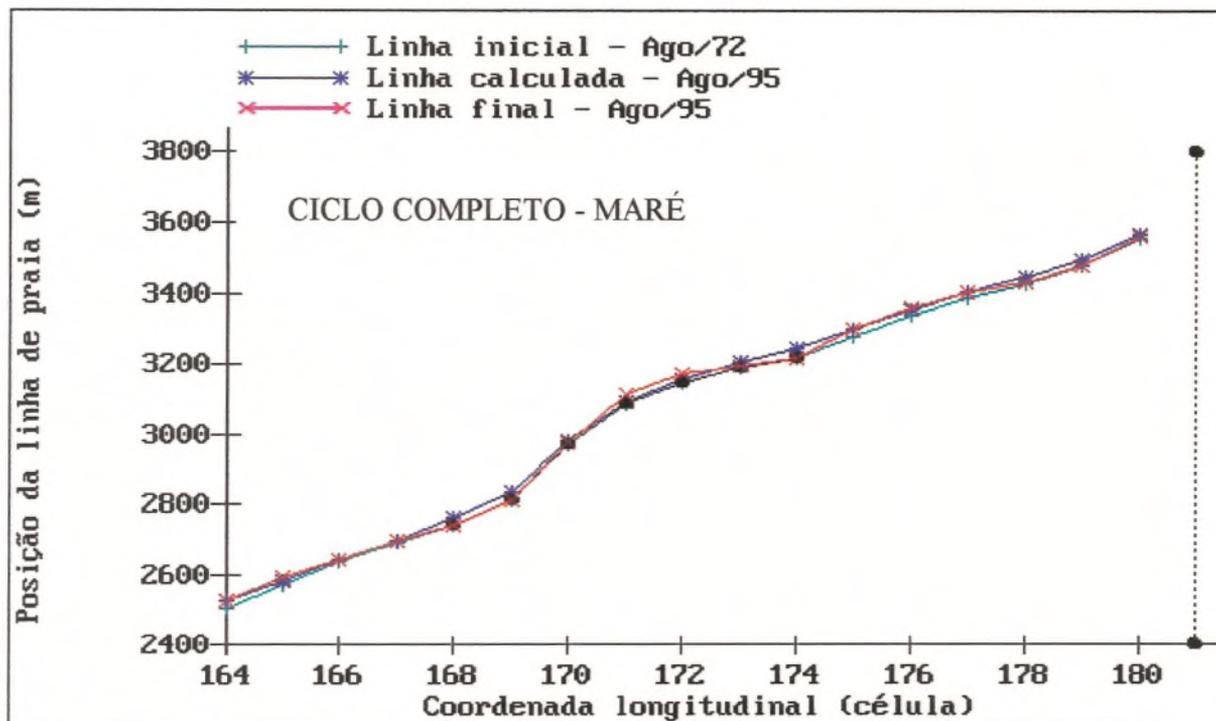


Figura 5.8: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Porto de Mucuripe.

A Figura 5.9 apresenta, em forma gráfica, a diferença entre os valores das posições das linhas de praia calculada e medida e na Figura 5.10 é apresentado na forma gráfica o erro médio absoluto para cada trecho constituído de 10 células.

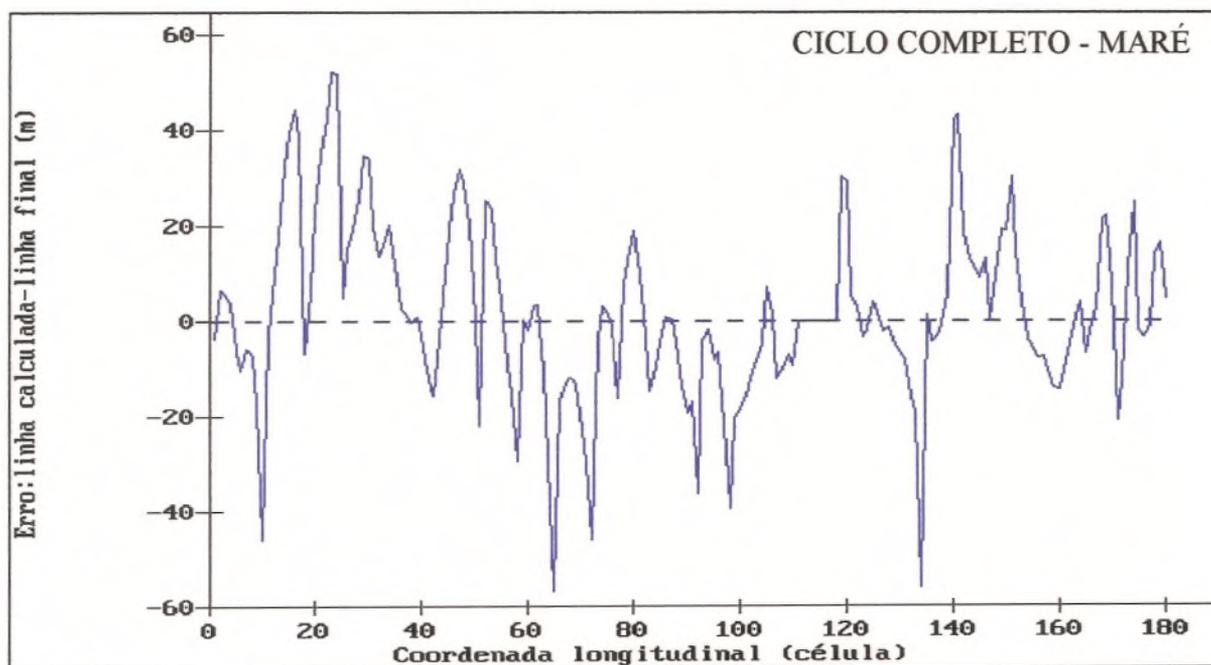


Figura 5.9: Erro na posição da linha calculada em relação à linha de praia medida em agosto/95.

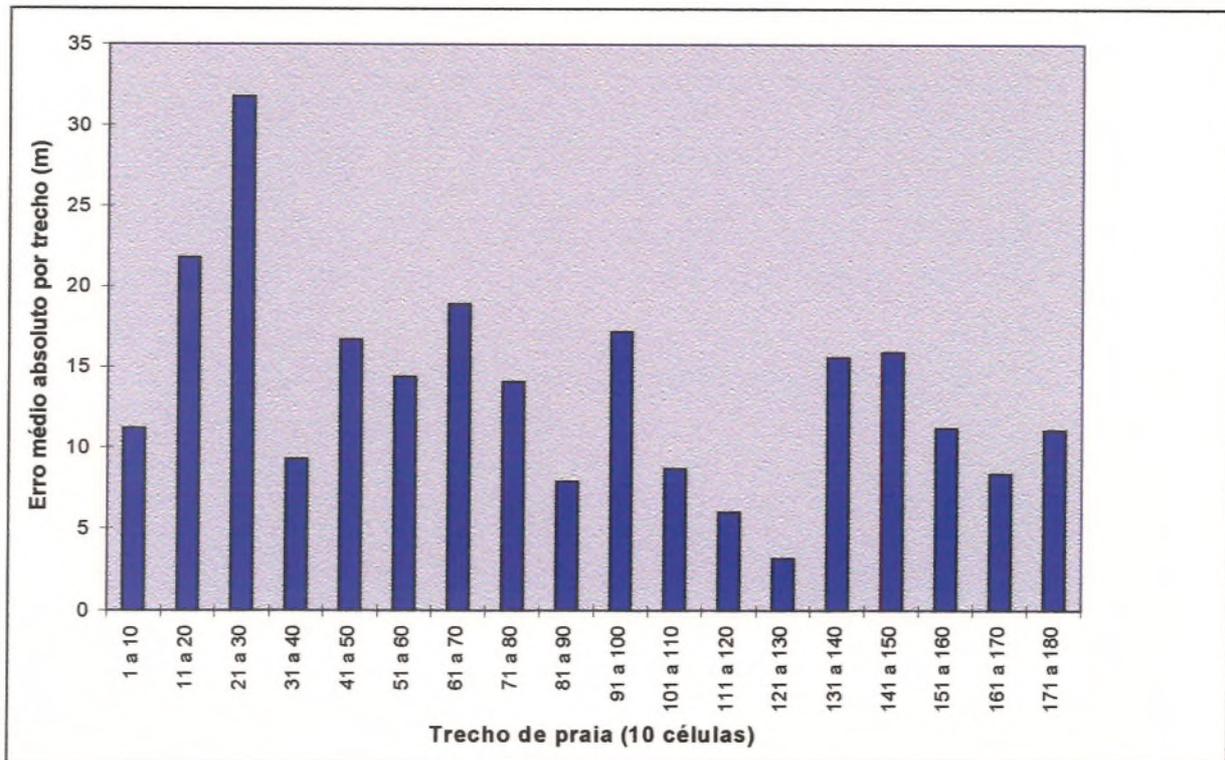


Figura 5.10: Erro médio absoluto para a posição da linha calculada pelo modelo, por trecho de praia constituído por 10 células.

No gráfico da Figura 5.11 pode-se visualizar a distribuição do transporte litorâneo resultante, ao longo de todo o trecho modelado e na Tabela 5.1 são apresentados os aumentos da área emersa desde 1972 até 1995 para as linhas de praia medida e calculada pelo modelo.

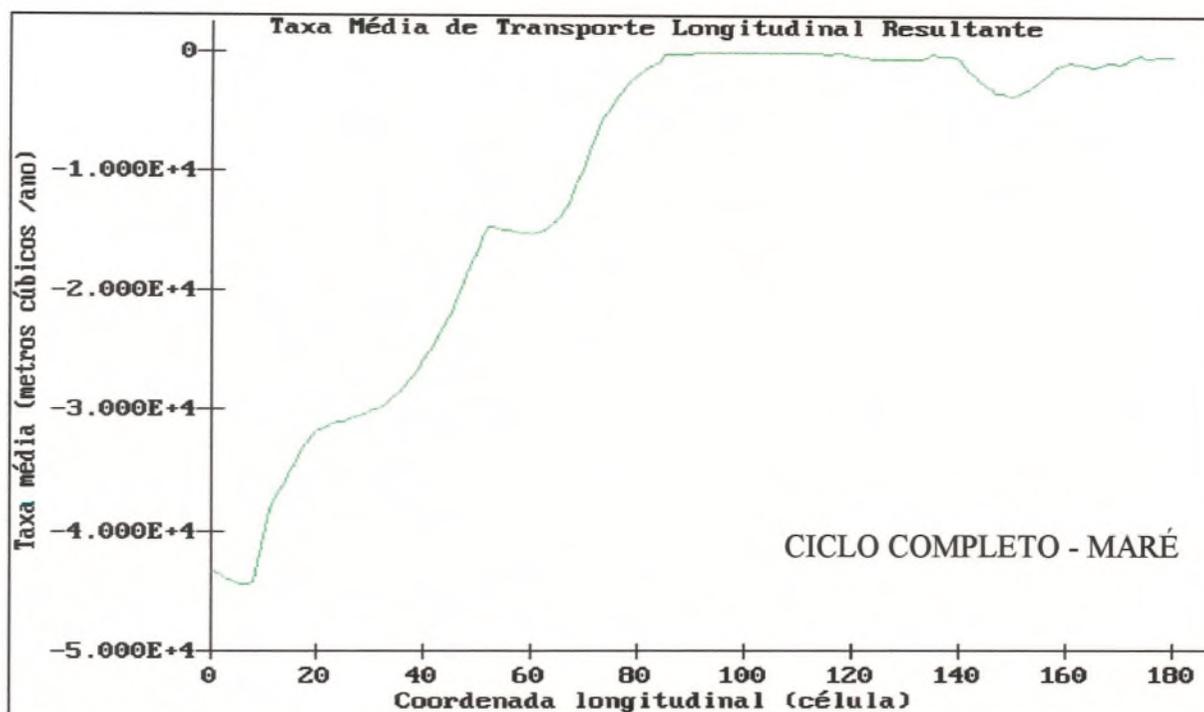


Figura 5.11: Taxa média do transporte litorâneo resultante de sedimentos que atravessam a parede de cada célula.

Tabela 5.1: Aumento da área emersa, entre a linha de praia inicial, medida em 1972, e as linhas de praia final, medida em 1995 e calculada pelo modelo GENESIS para 1995.

	Aumento da área emersa. Trecho: células 1 a 90 (m²)	Aumento da área emersa. Trecho: células 135 a 180 (m²)
Linha de praia medida/95	90.000	27.000
Linha de praia calculada/95	112.000	39.000

Para ilustração, apresenta-se na Figura 5.12 as posições das linhas de praia calculada para 01/08/78 e medida através da aerofotografia sem restituição de 1978. A data utilizada para o cálculo foi inferida das aerofotografias obtidas em agosto de 1972 e agosto de 1995. Segundo informações obtidas junto ao IPLAM, os levantamentos aerofotogramétricos são sempre realizados no segundo semestre do ano em virtude das melhores condições do tempo nesse período.

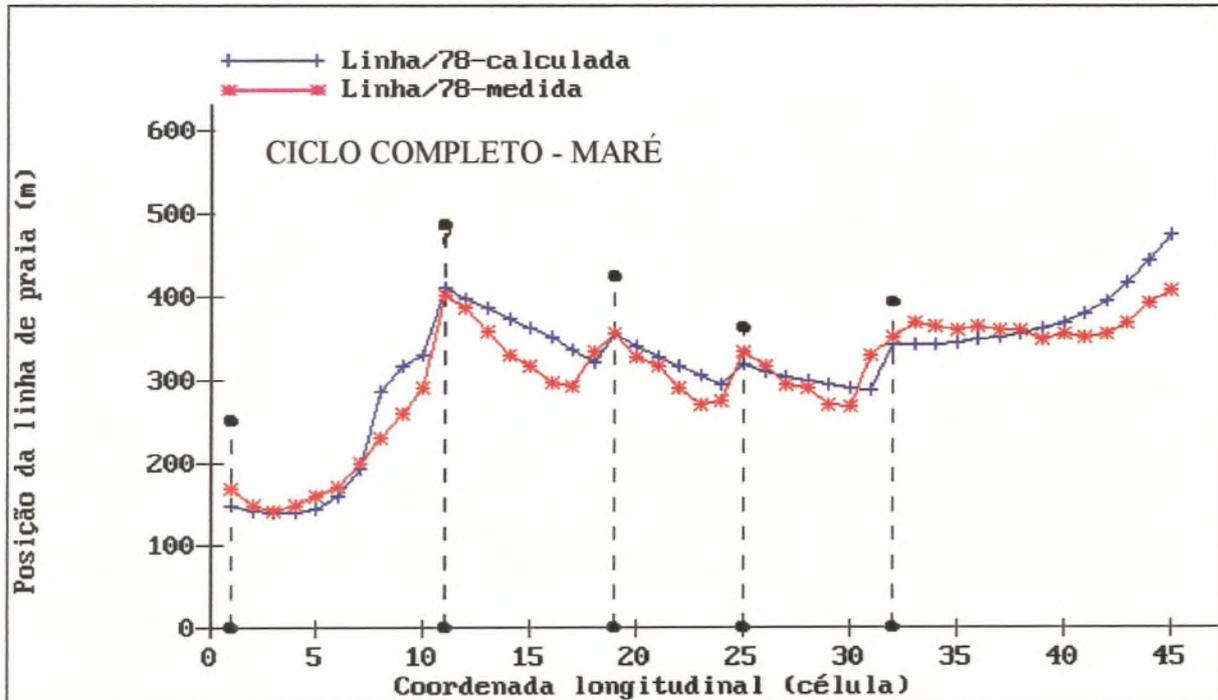


Figura 5.12: Posição final da linha de praia, extraída diretamente do levantamento aerofotogramétricos sem restituição de 1978, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1978. Trecho coberto pelas células 1 a 45.

Os resultados das simulações realizadas com o modelo GENESIS considerando a hipótese de atuação das ondas em somente meio ciclo da maré podem ser vistos nas Figuras 5.13 a 5.19. Os gráficos apresentados nessas figuras foram também gerados pelo programa GENGRAF.

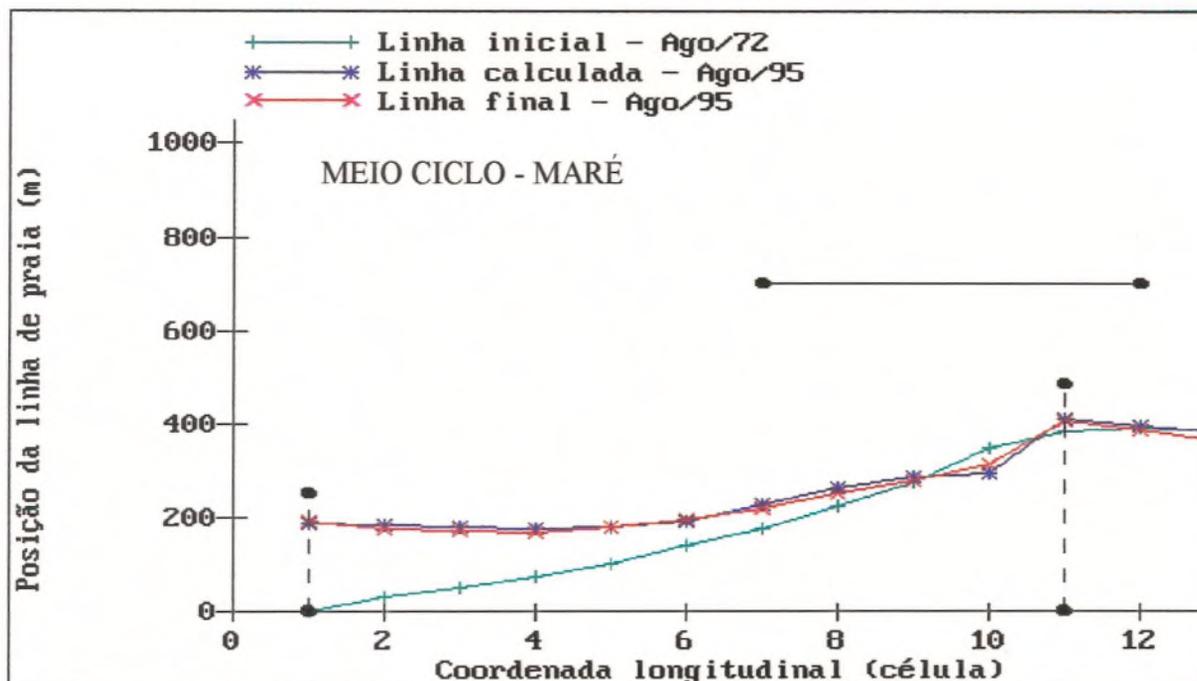


Figura 5.13: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 11 e 10.

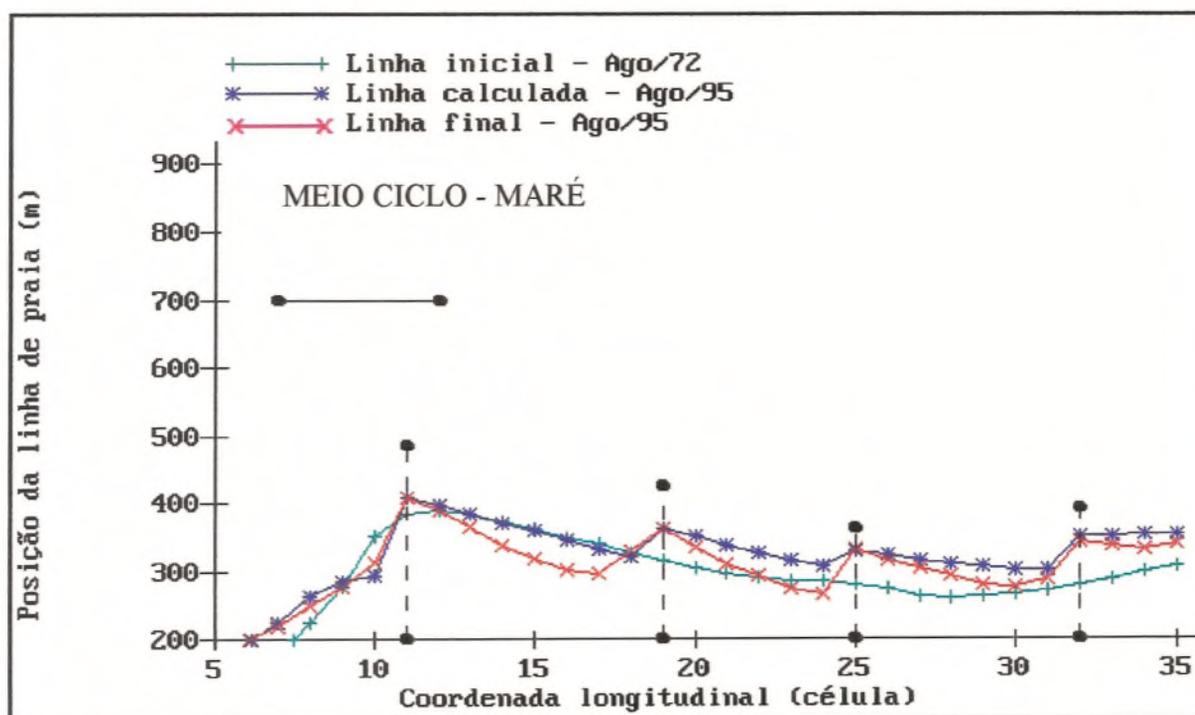


Figura 5.14: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 10, 9, 8 e 7.

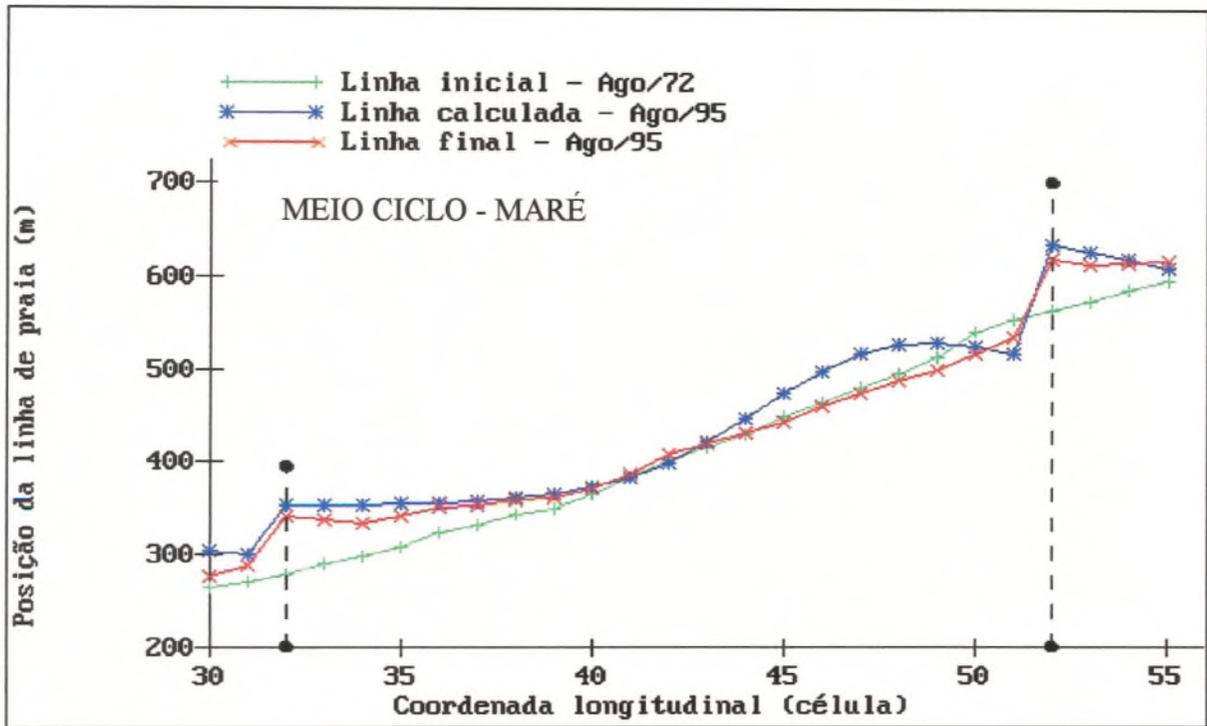


Figura 5.15: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 7 e 6.

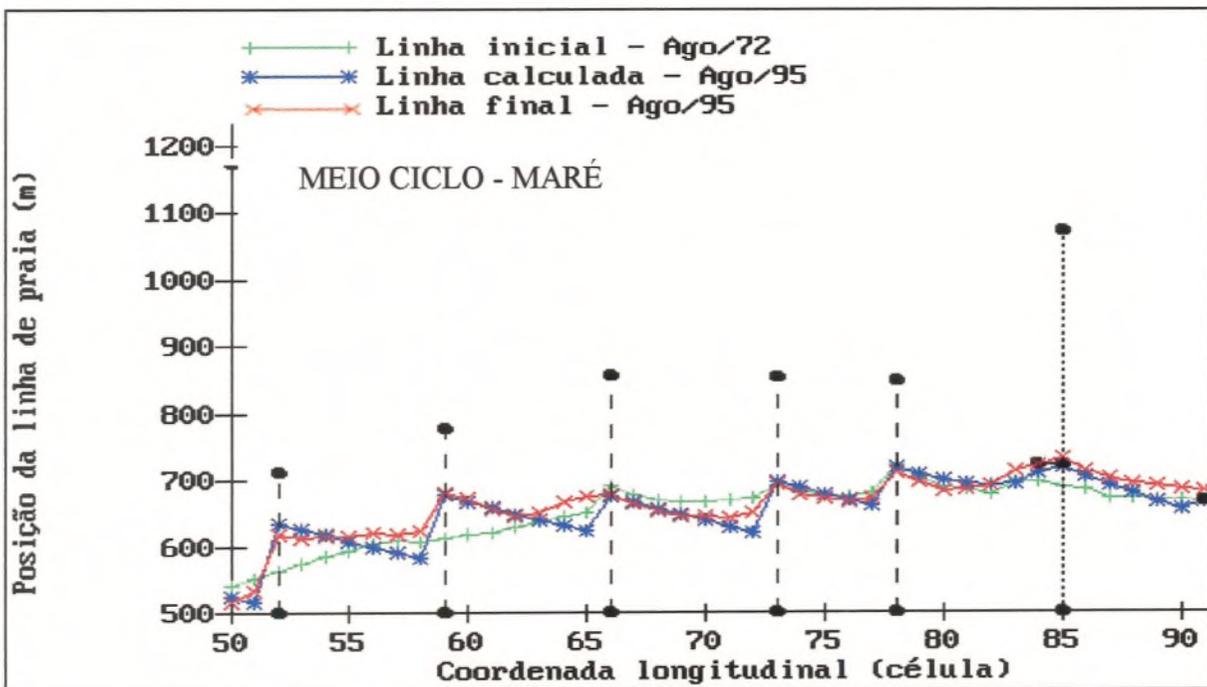


Figura 5.16: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigões 6, 5, 4, 3, 2 e espigão da CAGECE.

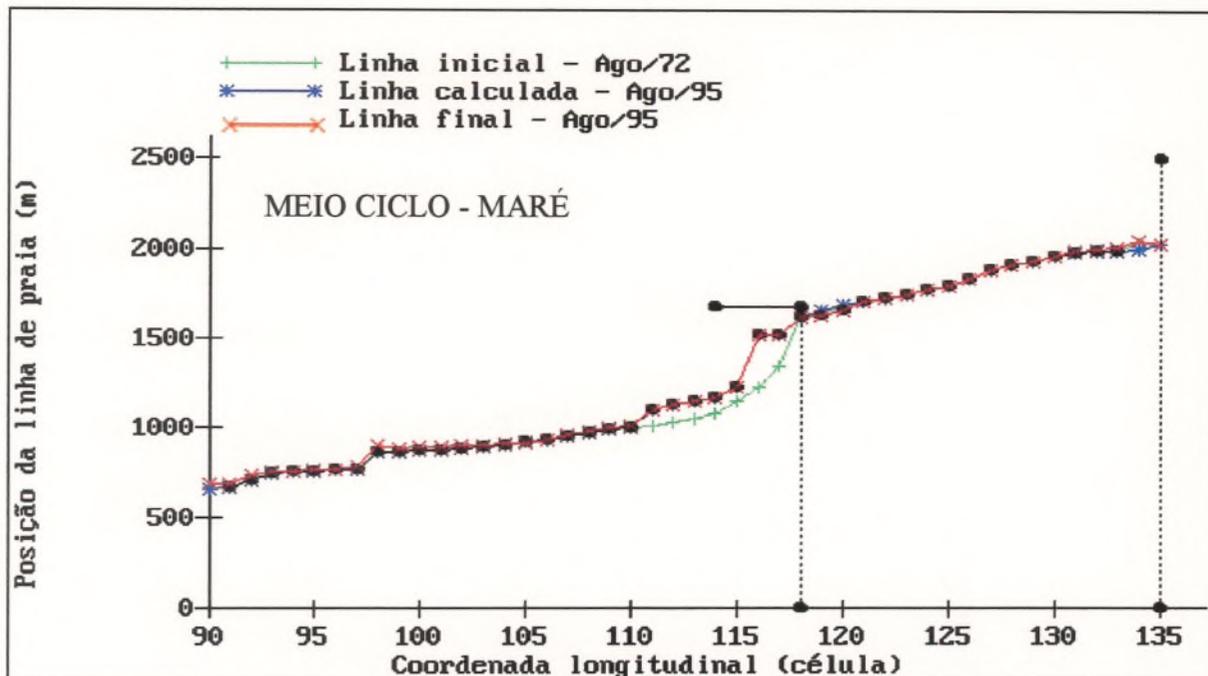


Figura 5.17: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Porto velho e espigão de Iracema.

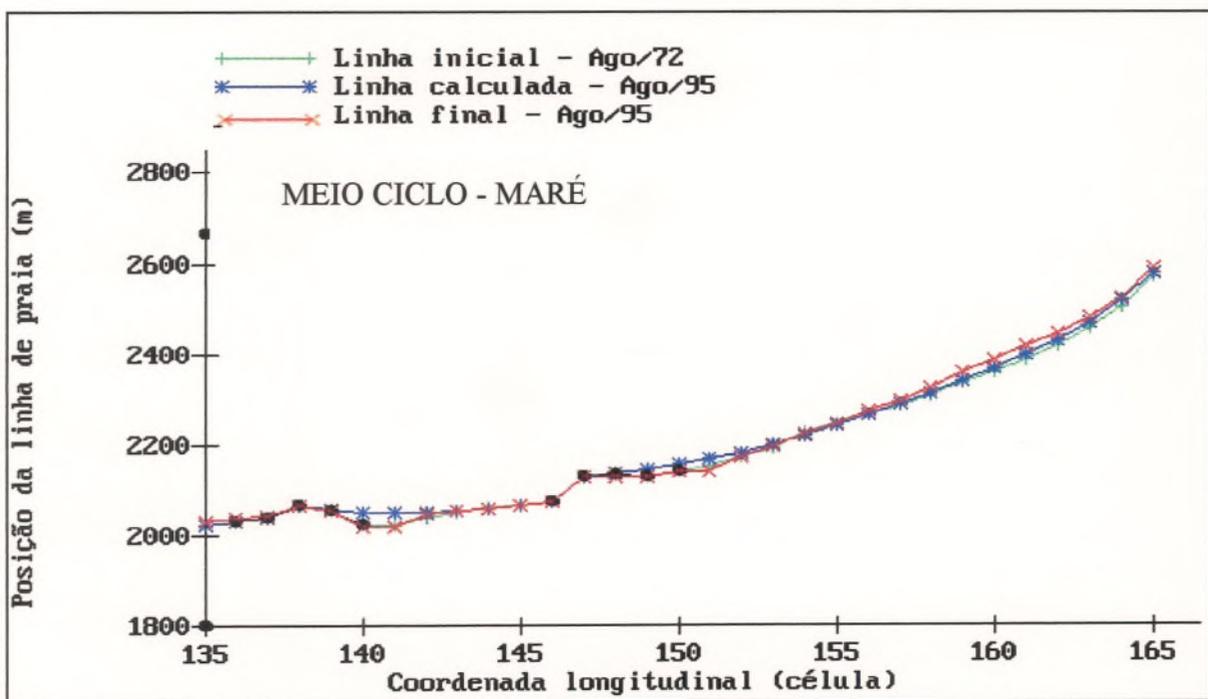


Figura 5.18: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Espigão de Iracema.

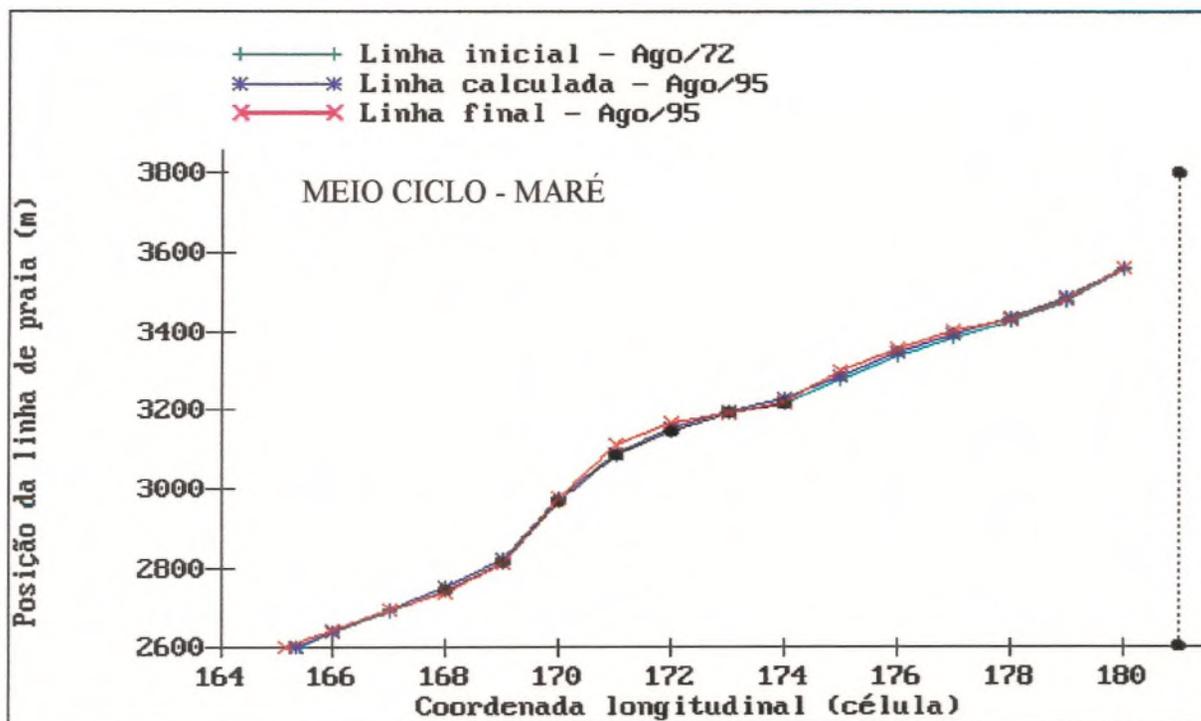


Figura 5.19: Posições inicial e final da linha de praia, extraídas dos levantamentos aerofotogramétricos com restituição de agosto/1972 e agosto/1995, e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1995. Porto de Mucuripe.

A Figura 5.20 apresenta, em forma gráfica, a diferença entre os valores calculados e medidos das posições das linhas de praia e na Figura 5.21 é apresentado em forma gráfica o erro médio absoluto para cada trecho constituído de 10 células.

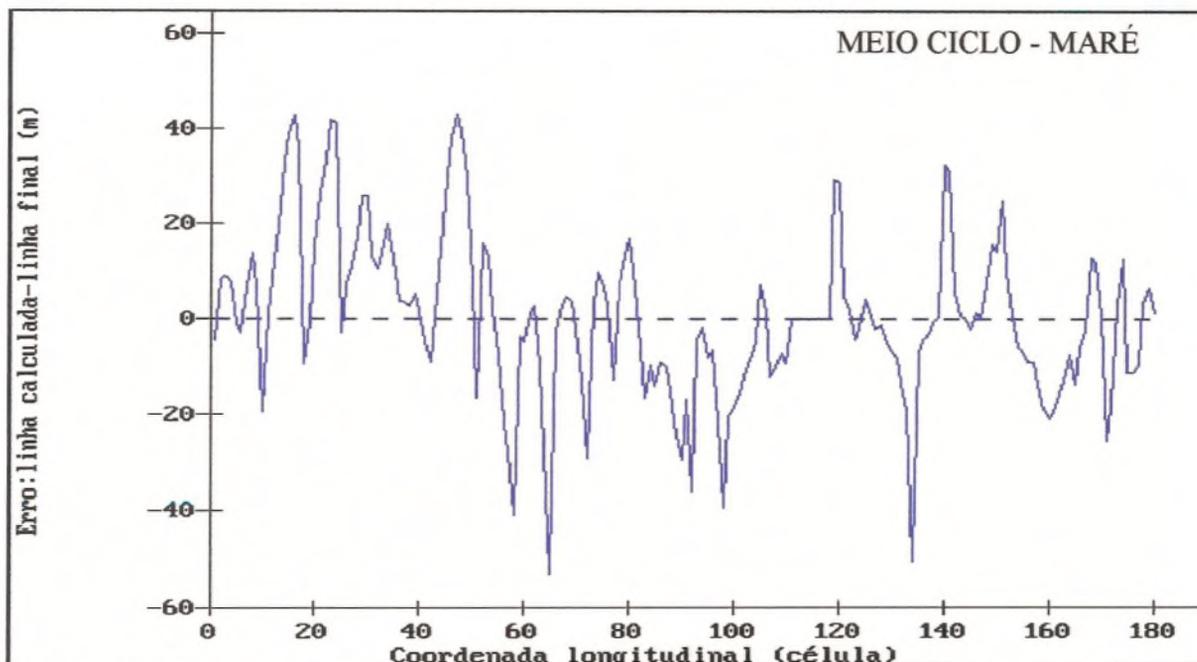


Figura 5.20: Erro na posição da linha calculada em relação à linha de praia medida em agosto/95.

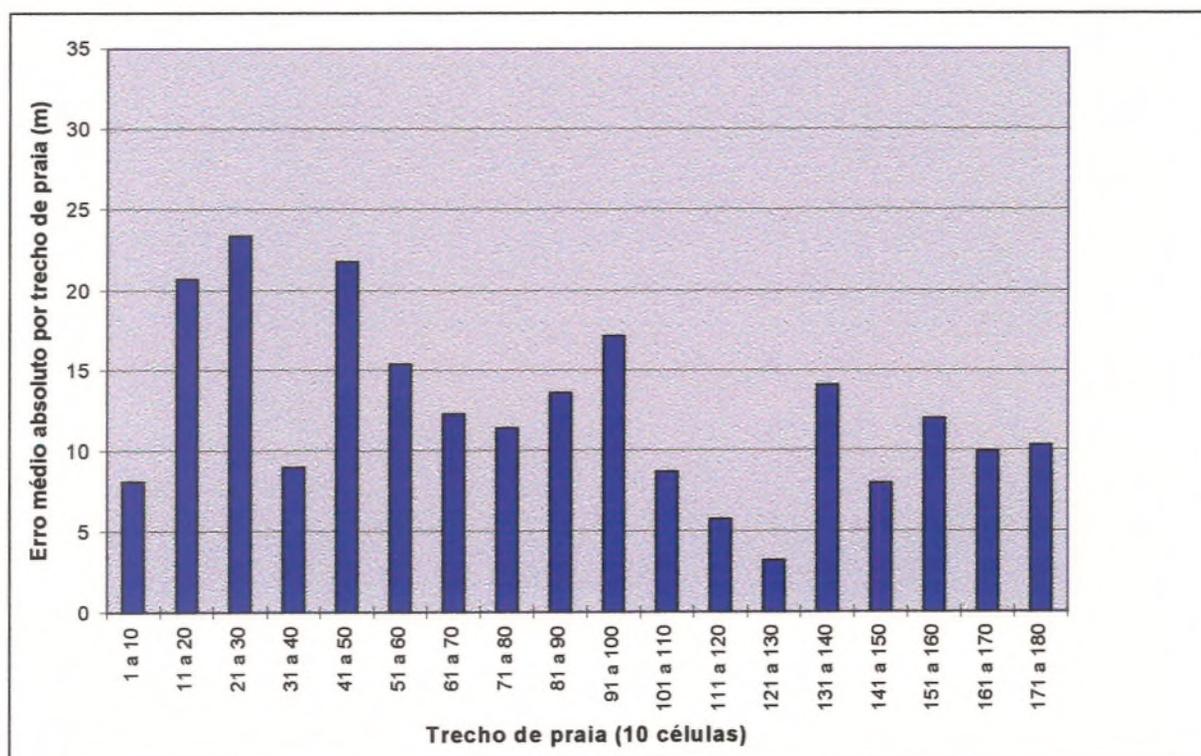


Figura 5.21: Erro médio absoluto para a posição da linha de praia calculada pelo modelo, por trecho de praia constituído de 10 células.

No gráfico da Figura 5.22 pode-se visualizar a distribuição do transporte litorâneo

resultante, ao longo de todo o trecho modelado e na Tabela 5.2 são apresentados os aumentos da área emersa desde 1972 até 1995 para as linhas de praia medida e calculada pelo modelo.

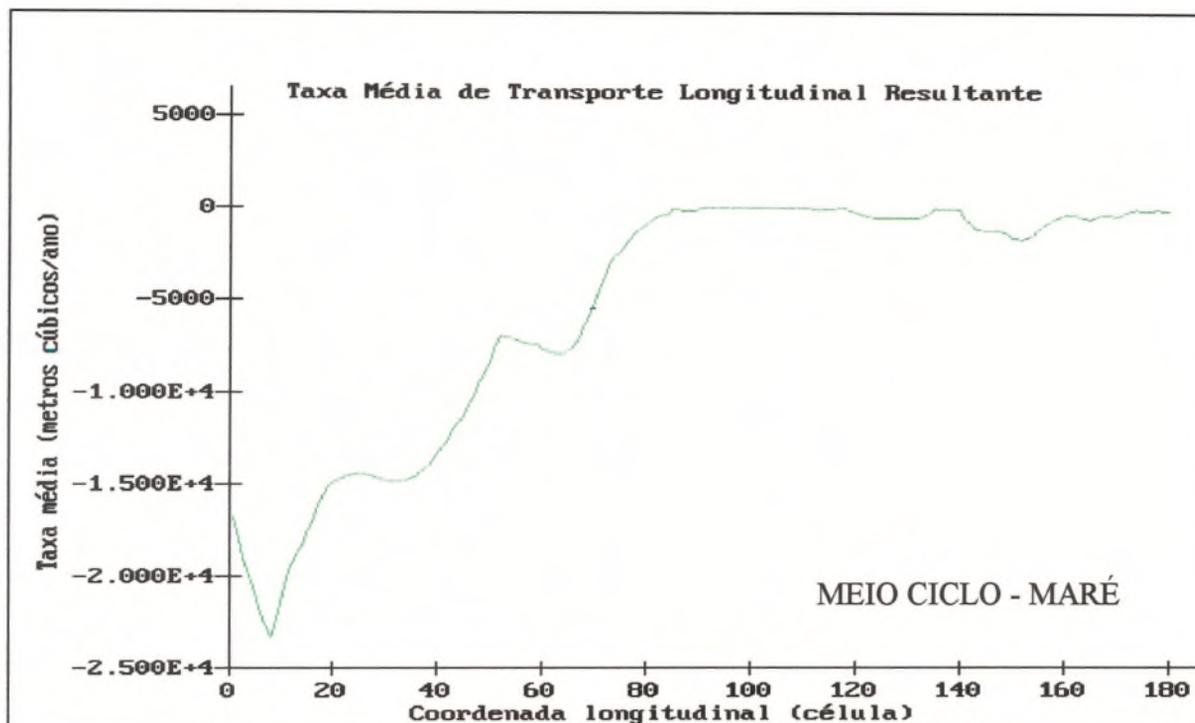


Figura 5.22: Taxa média do transporte litorâneo resultante de sedimentos que atravessam a parede de cada célula.

Tabela 5.2: Aumento da área emersa, entre a linha de praia inicial, medida em 1972, e as linhas de praia final, medida em 1995 e calculada pelo modelo GENESIS para 1995.

	Aumento da área emersa. Trecho: células 1 a 90 (m²)	Aumento da área emersa. Trecho: células 135 a 180 (m²)
Linha de praia medida/95	90.000	27.000
Linha de praia calculada/95	118.000	20.000

As duas hipóteses propostas para o modelo conceitual apresentam resultados praticamente idênticos na modelagem da linha de praia. Entretanto, considerando a grande amplitude de maré na região, o modelo que considera a atuação das ondas sobre a linha de praia somente em parte do ciclo da maré parece mais adequado em representar os fenômenos físicos que ocorrem nessa região litorânea. Embora essa hipótese ainda seja uma grande

físicos que ocorrem nessa região litorânea. Embora essa hipótese ainda seja uma grande simplificação de processos complexos que ocorrem nessa área.

Nota-se que em praticamente toda a extensão da área modelada, para as duas proposições para o modelo conceitual, existe uma grande concordância entre a linha final, medida em agosto/95, e a calculada nas regiões imediatamente a barlar dos espigões (Figuras 5.2 a 5.5 e 5.13 a 5.16).

No trecho que compreende os espigões 7, 8 e 9, o modelo não simula com precisão a linha de praia nos pontos a sotamar dessas estruturas (Figuras 5.3 e 5.14). Nas condições reais há um recuo da linha de praia nessas regiões, indicando que pode estar ocorrendo a difração das ondas de uma forma intensa. Entretanto, mesmo nas simulações realizadas considerando esses espigões difrativos o modelo não reproduz as posições medidas da linha de praia. Somente o ajuste do parâmetro K_2 , que influencia a linha de praia a sotamar das estruturas, não é suficiente para que o modelo possa reproduzir com maior fidelidade a linha de praia nessa região.

De acordo com a malha utilizada no modelo RCPWAVE, para cada conjunto de 10 células no modelo GENESIS corresponde um único estado da onda por intervalo de tempo atuando na linha de referência. Adotando esse procedimento para modelar a propagação das ondas, produz-se uma atenuação no gradiente longitudinal da altura da onda no trecho correspondente a 10 células. Isso é justificado pelo modo como subrotina do código GENESIS realiza a propagação das ondas, que considera as isobatimétricas paralelas a linha de praia entre a linha de referência e a linha de arrebentação. Tal limitação poderia ser eliminada por meio de mapas batimétricos mais detalhados, que permitissem uma malha mais fina na modelagem da propagação de ondas pelo modelo RCPWAVE. Entretanto, deve-se ter em mente que para a modelagem de grandes extensões esse procedimento torna-se extremamente trabalhoso e demorado se não houver disponibilidade de dados batimétricos já digitalizados.

A simulação da hipotética região de baixio ao largo do espigão 10, através do quebra-mar destacado, resultou num bom ajuste entre as linhas calculada e medida (Figuras 5.2 e 5.13). Por outro lado, o quebra-mar colocado ao largo do espigão 6 não permitiu um ajuste tão satisfatório (Figura 5.4 e 5.15). A simulação de diversas disposições do quebra-mar nessa região é demorada e com poucas chances de êxito, considerando a grande quantidade de parâmetros envolvidos para caracterizar essa estrutura. Assim, para um bom ajuste do modelo, nesta região, faz-se necessário conhecer o fundo desta região. Sendo porém uma zona de arrebentação das ondas, certamente há necessidade de adotar procedimentos não convencionais no levantamento das profundidades.

Os resultados das simulações apresentados para o trecho compreendido entre o espigão da praia de Iracema e o molhe do TITAN considerando as duas hipóteses para o modelo conceitual (Figuras 5.7, 5.8, 5.18 e 5.19), indicam um bom ajuste entre a linha calculada e a medida. O erro na posição da linha de praia em relação a linha medida (Figura 5.9 e 5.20) não ultrapassa 20 m na maioria das posições calculadas. Para a modelagem esse trecho não está caracterizado como uma unidade fisiográfica, considerando que a extremidade do espigão de Iracema está a uma profundidade de 4,0 m e portanto menor que a profundidade de fechamento de 4,4 m.

Considerando a dinâmica de sedimentos na região delimitada pelo espigão de Iracema e o molhe do TITAN, é provável que parte dos sedimentos que são introduzidos nessa região pelo vórtice de corrente contrária à direção de propagação das ondas, venha se sedimentar no porto. Entretanto, somente estudos sistemáticos das correntes, auxiliado pela simulação dos sedimentos com traçadores fluorescentes ou radioativos (Bandeira, 1978), poderiam fornecer um diagnóstico mais preciso do comportamento sedimentológico nessa região.

Na hipótese de influência das ondas sobre a linha de praia durante todo o ciclo de maré, a modelagem indica que os sedimentos saem do sistema, no limite esquerdo da região, a uma

taxa média de transporte litorâneo resultante da ordem de 42.000 m³/ano. Para uma taxa média de 36.000m³/ano de material arenoso entrando no sistema, considerando o despejo da dragagem de manutenção de 30.000 m³/mês e a porcentagem hipotética de 10% de material arenoso constituinte do material despejado, existe um pequeno déficit de sedimentos na área. Entretanto, pela extensão do trecho sujeito ao ataque das ondas, o déficit indicado é desprezível e caracteriza a estabilidade da linha de praia como na situação real. Assim, para as hipóteses propostas, o modelo demonstra ser razoavelmente representativo na simulação do transporte litorâneo da região.

A taxa média de saída de sedimentos do sistema, indicada na Figura 5.22, considerando a hipótese de influência das ondas em parte do ciclo da maré, é da ordem de 17.000 m³/ano. Esse valor acrescido de uma taxa média de transporte de valor no mínimo igual, que ocorre durante a outra parte do ciclo de maré, aponta para uma taxa média de saída dos sedimentos da mesma ordem de grandeza do material arenoso do despejo de dragagem. Assim, também para essa hipótese, o modelo demonstra ser razoavelmente representativo na simulação do transporte litorâneo da região.

Os resultados dos testes de sensibilidade do modelo às variações na seqüência dos dados de direção da onda são apresentados nas Figuras 5.23 a 5.28. O termo direção crescente e decrescente significam respectivamente que a seqüência dos valores desse parâmetro, em relação ao Norte geográfico, estão em ordem crescente e decrescente. Além da linha medida em agosto/95 e das linhas calculadas para as duas condições de disposição do dados de direção da onda, é apresentada também nos gráficos a linha calculada na calibração considerando a hipótese de influência da onda durante todo o período da maré.

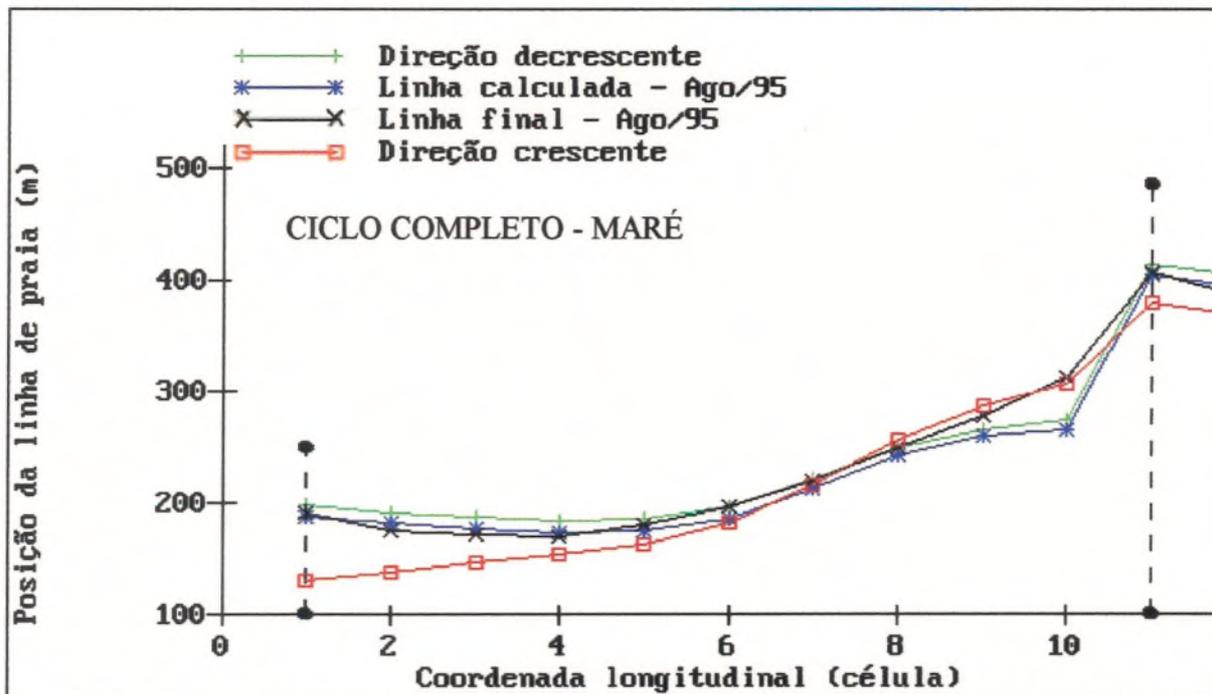


Figura 5.23: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

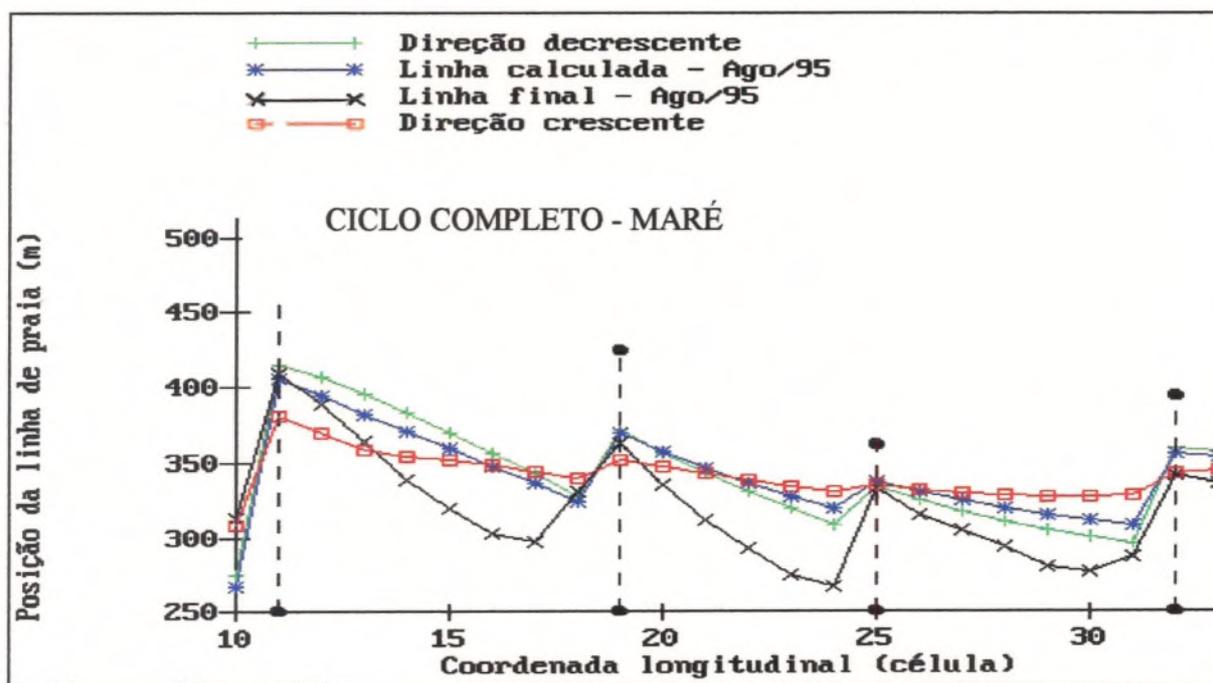


Figura 5.24: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

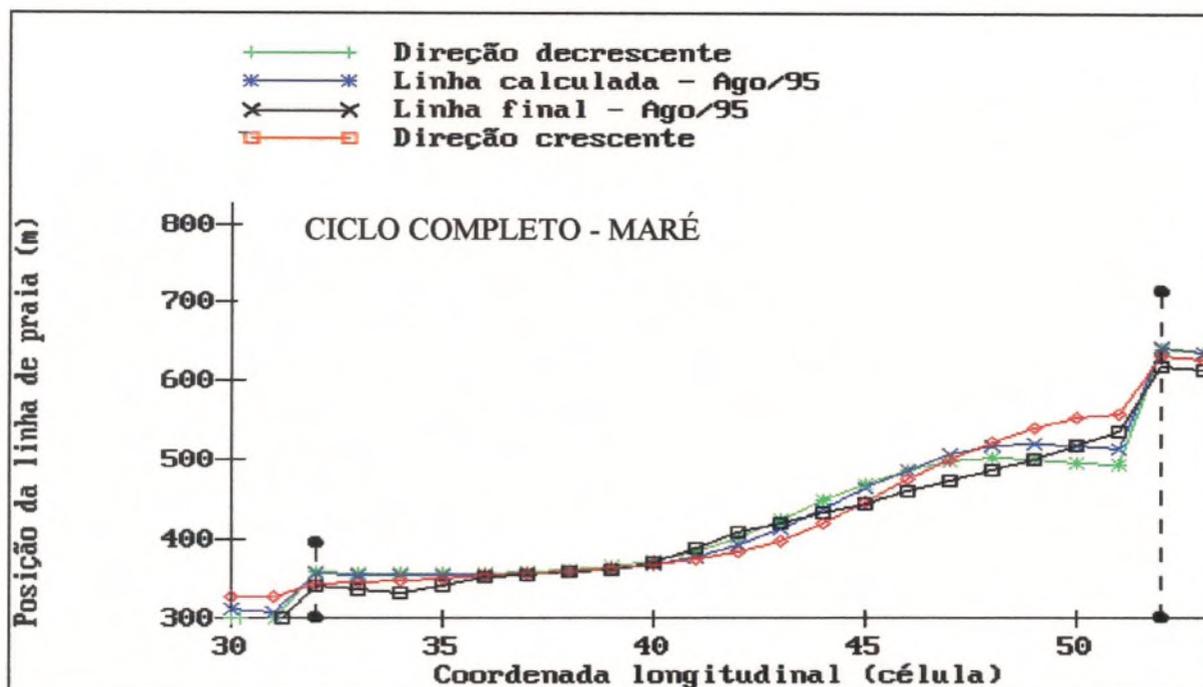


Figura 5.25: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

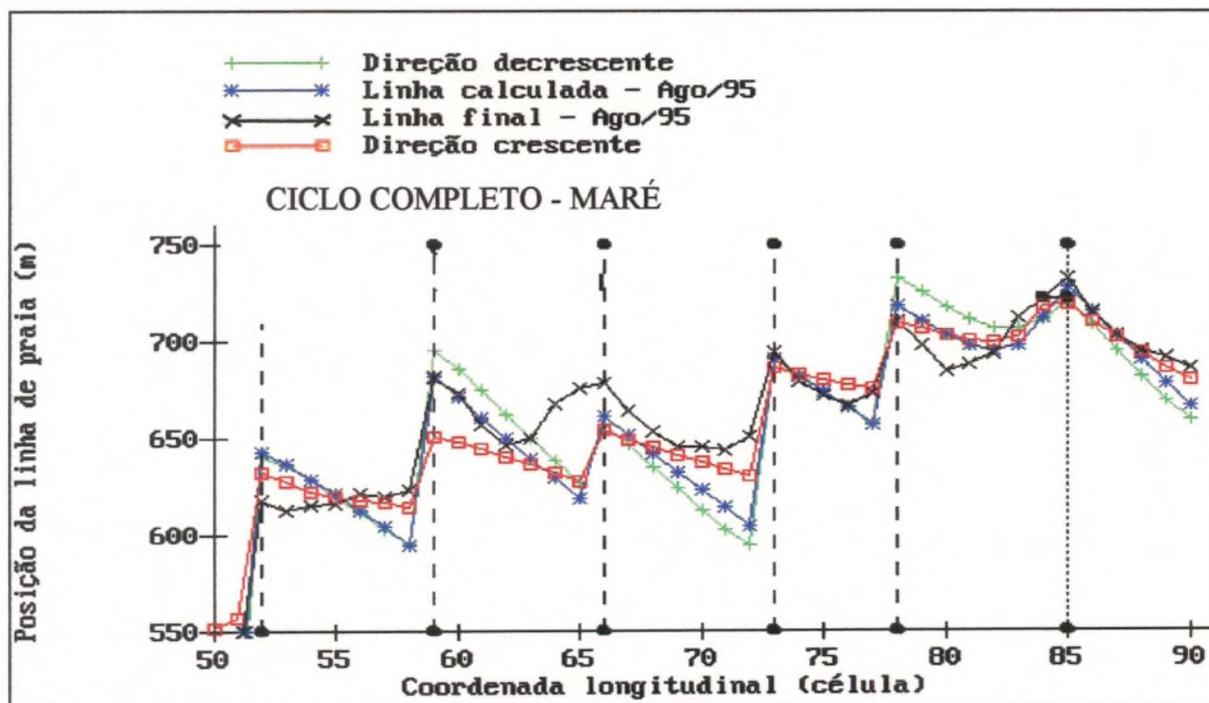


Figura 5.26: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

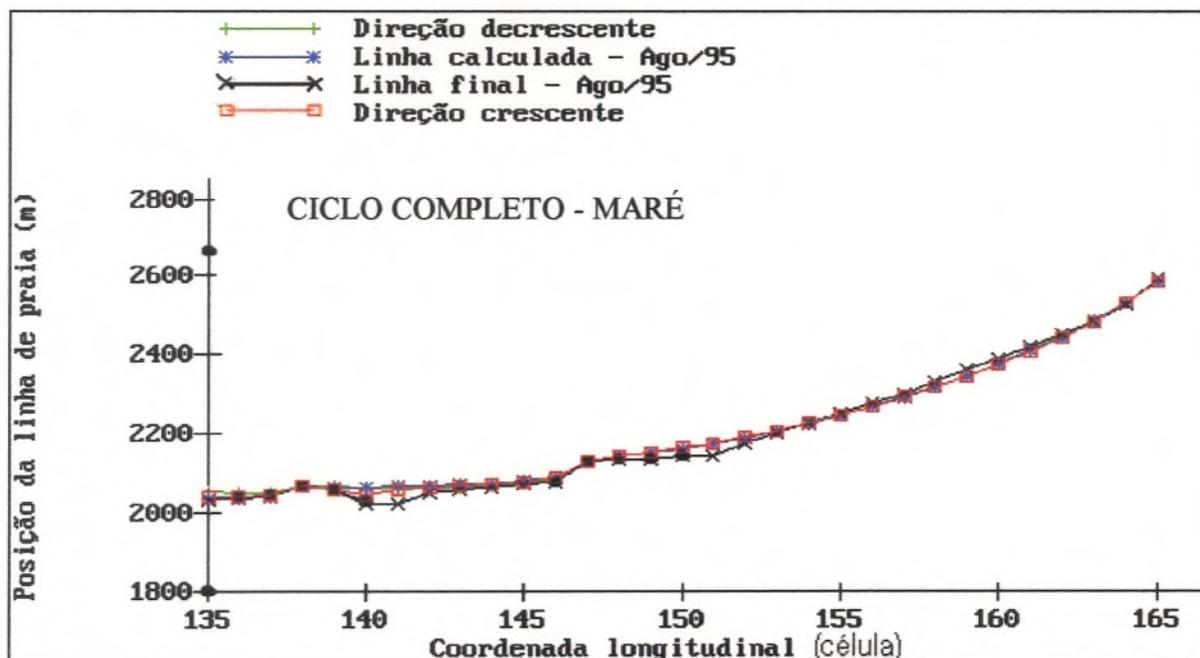


Figura 5.27: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

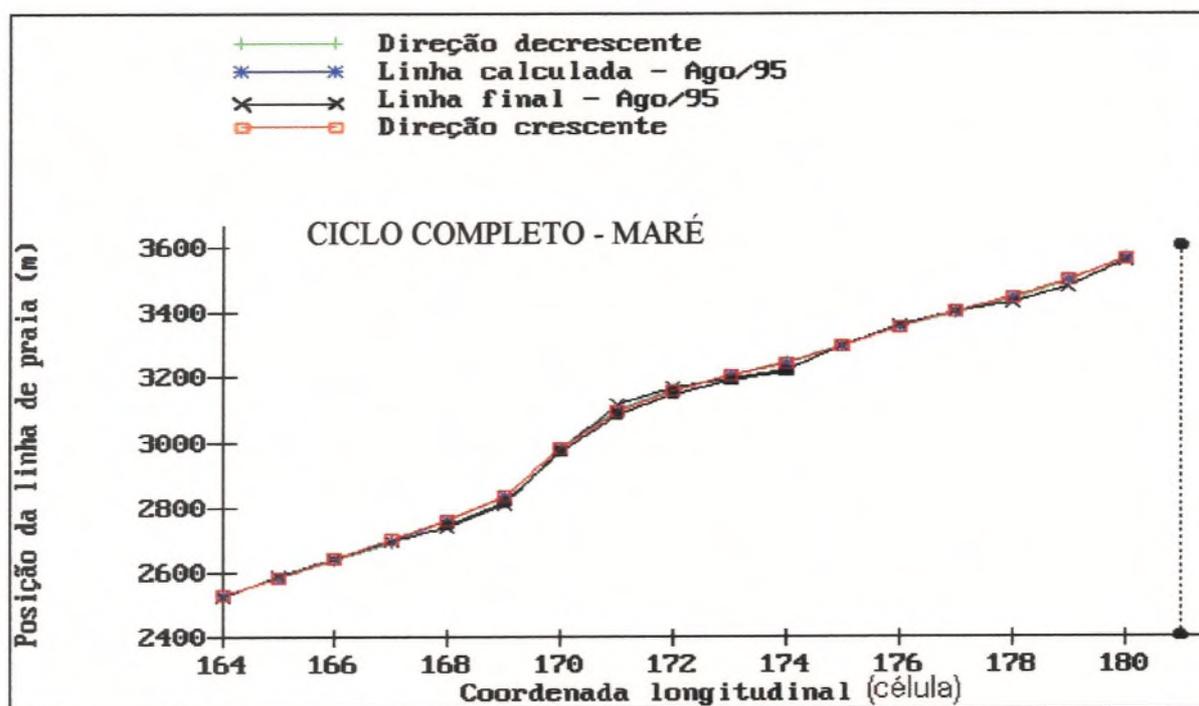


Figura 5.28: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro direção da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

Nas Figuras 5.29 e 5.30 são apresentadas em forma gráfica as diferenças entre as posições das linhas calculadas, para sequências distintas dos dados de direção da onda, e a posição da linha de praia calculada na calibração.

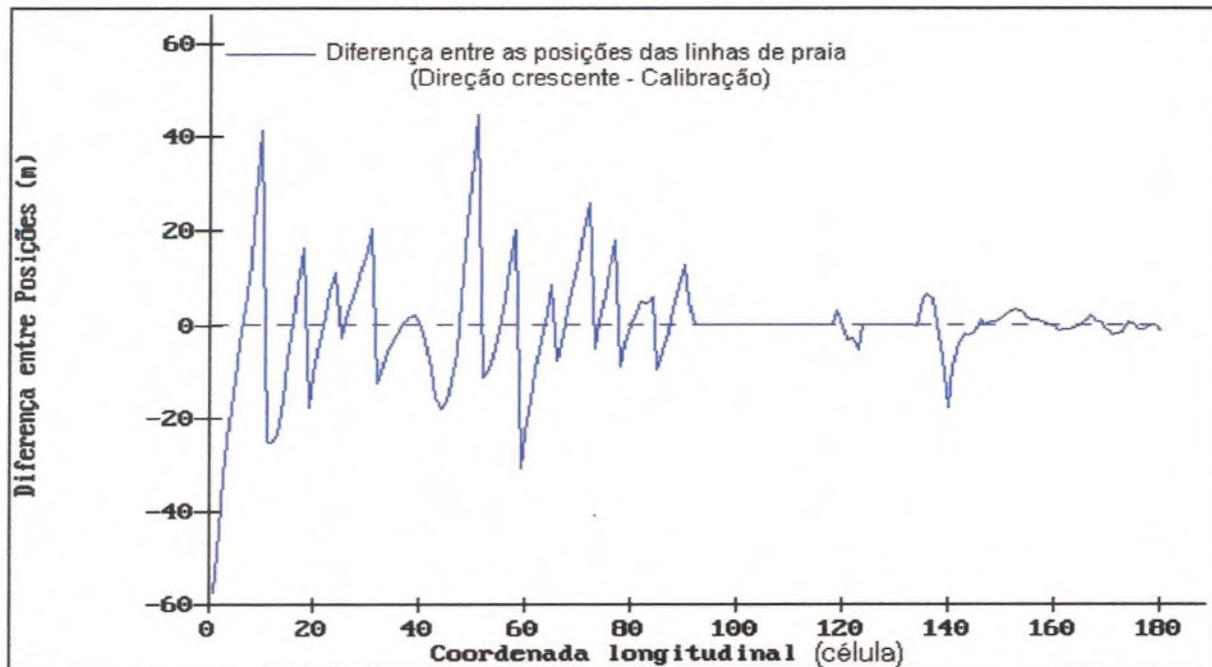


Figura 5.29: Diferença entre as posições das linha de praia, calculada com os dados da direção da onda em ordem crescente e calculada na calibração do modelo.

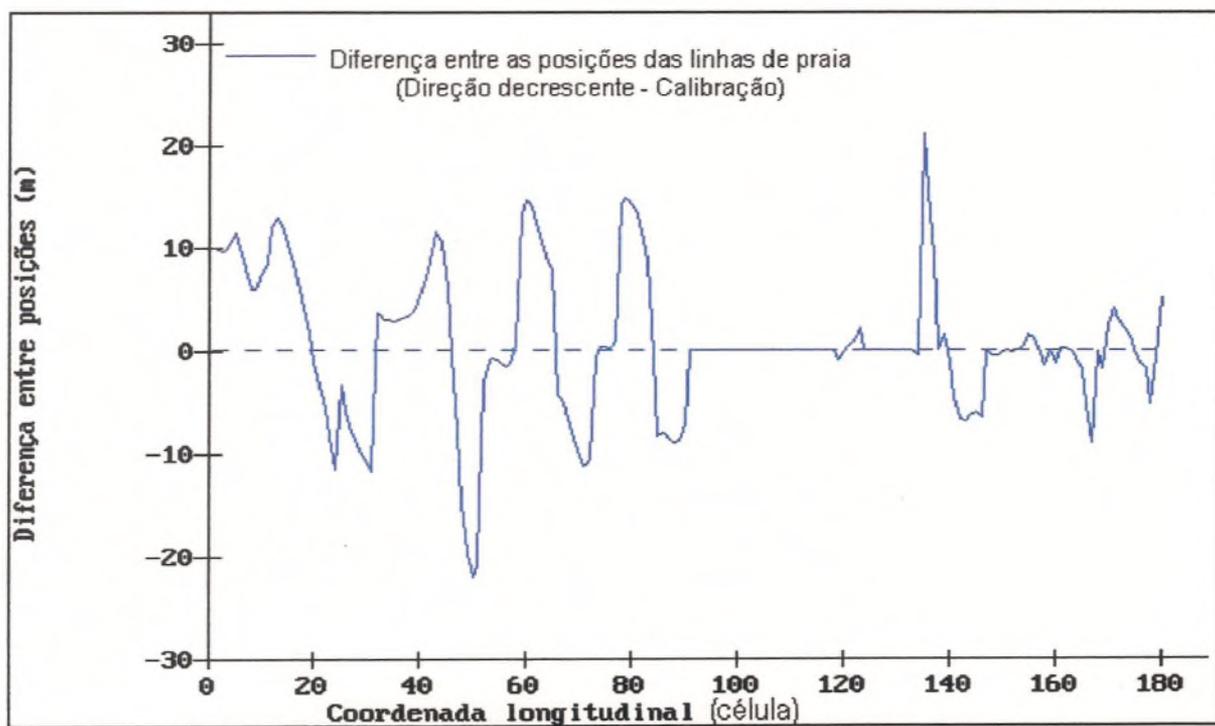


Figura 5.30: Diferença entre as posições das linha de praia, calculada com os dados da direção da onda em ordem decrescente e calculada na calibração do modelo.

Os resultados dos testes de sensibilidade do modelo às variações na sequência dos dados de altura da onda são apresentados nas Figuras 5.31 a 5.36. Além da linha medida em agosto/95 e das linhas calculadas para as duas condições de disposição do dados de altura da onda, é apresentada também nos gráficos a posição da linha calculada na calibração, considerando a hipótese de influência da onda durante todo o período da maré.

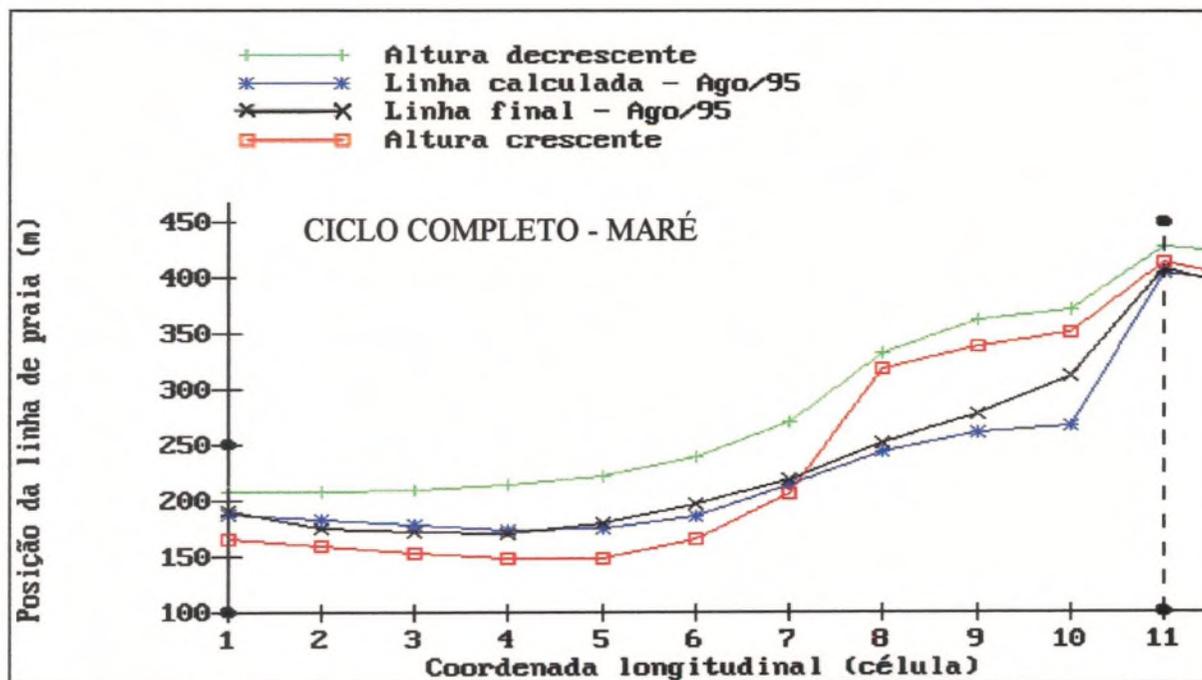


Figura 5.31: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

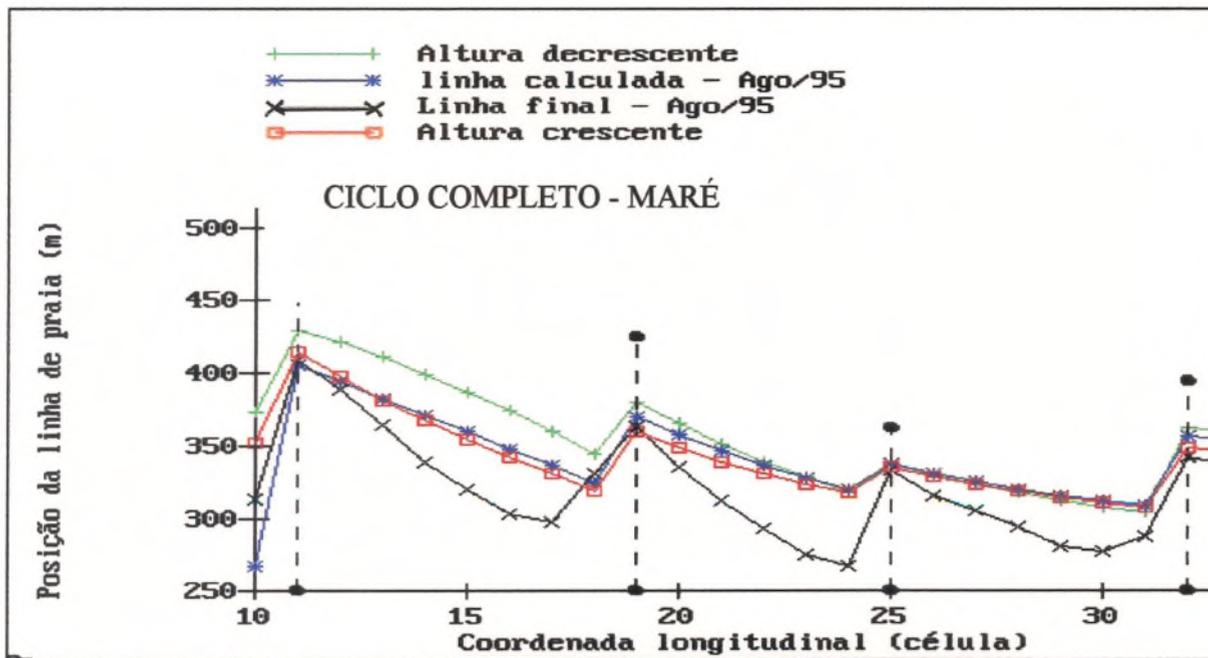


Figura 5.32: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

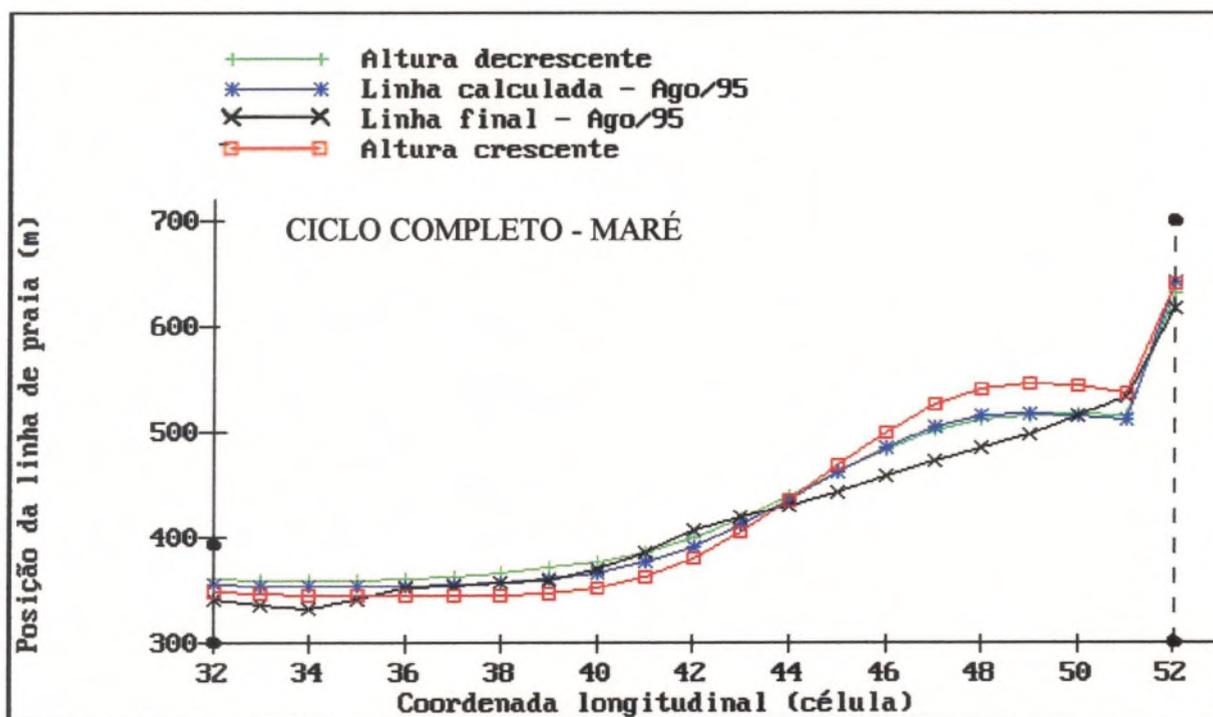


Figura 5.33: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

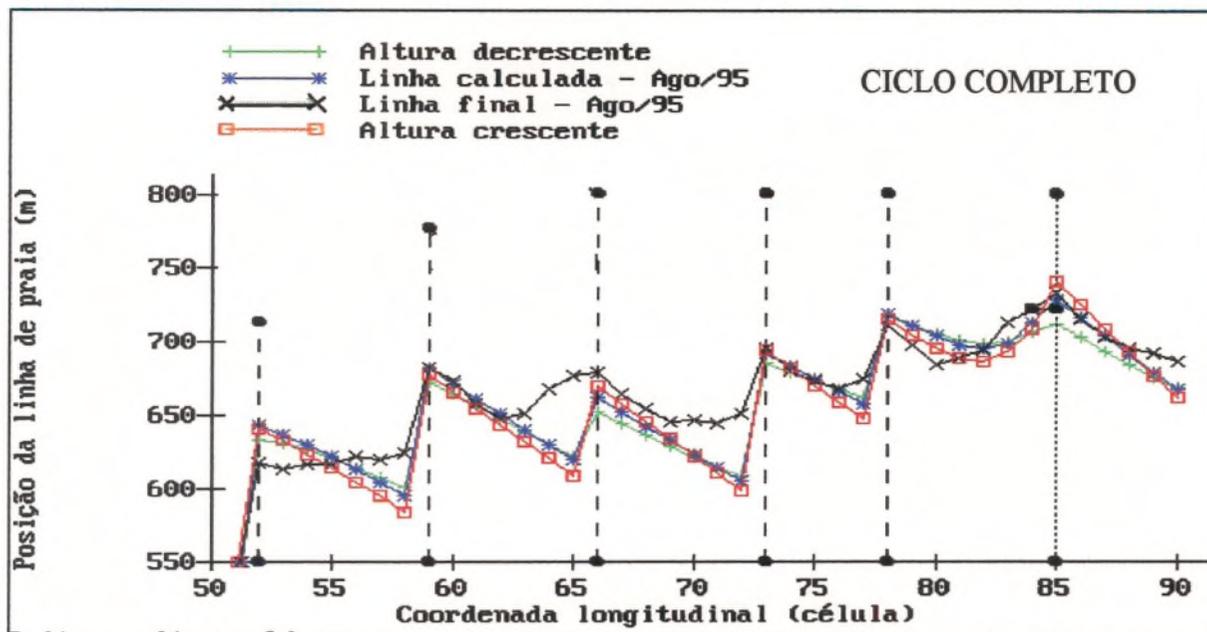


Figura 5.34: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

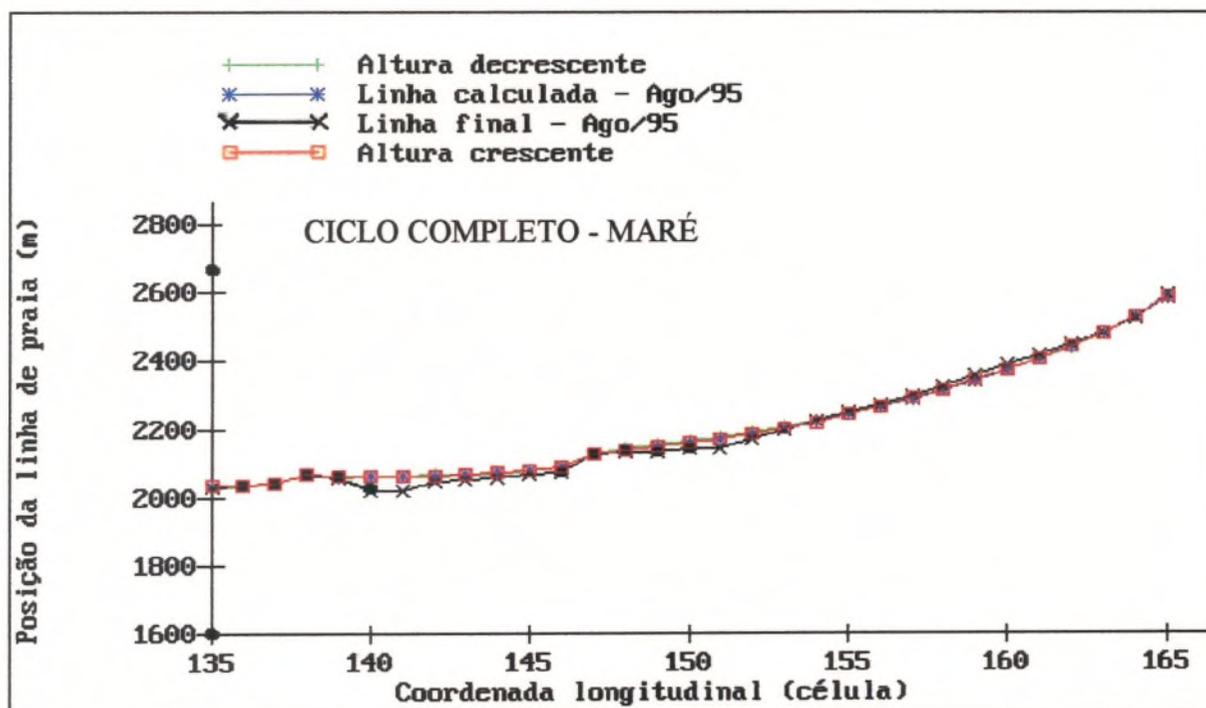


Figura 5.35: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

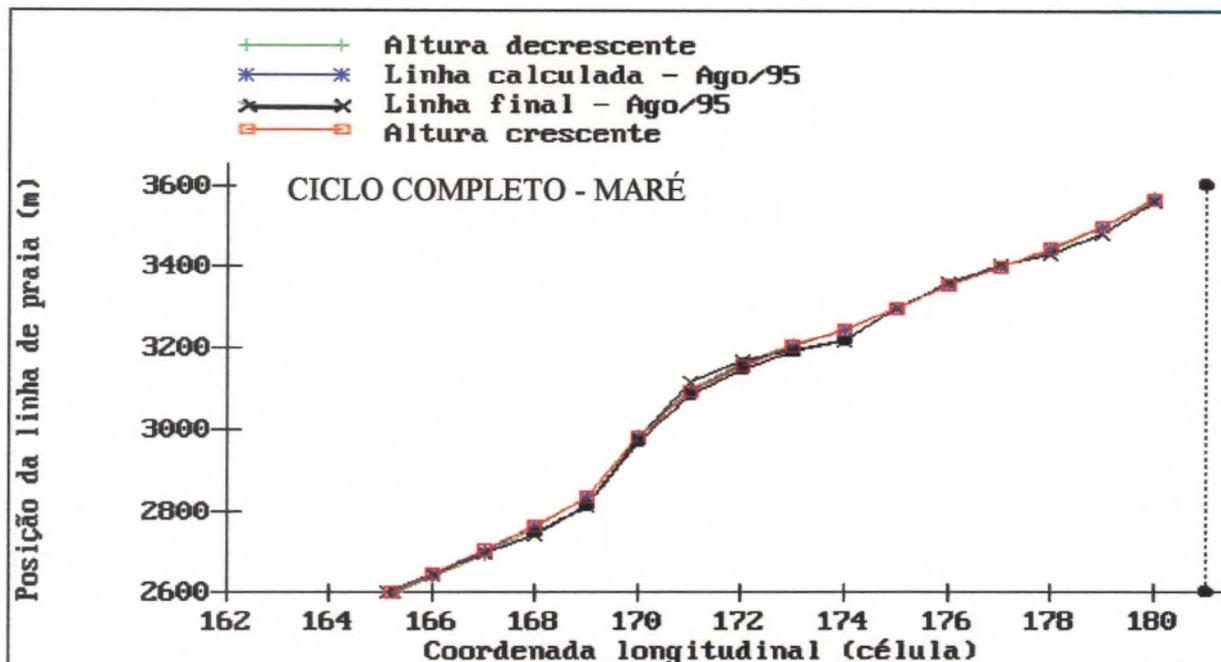


Figura 5.36: Posições das linhas de praia: a) calculadas para duas outras condições do parâmetro altura da onda; b) final, extraída do levantamento aerofotogramétrico de agosto/1995 com restituição; c) calculada na calibração.

Nas Figuras 5.37 e 5.38 são apresentadas em forma gráfica as diferenças entre as posições das linhas calculadas, para sequências distintas dos dados de altura onda, e a posição da linha de praia calculada na calibração.

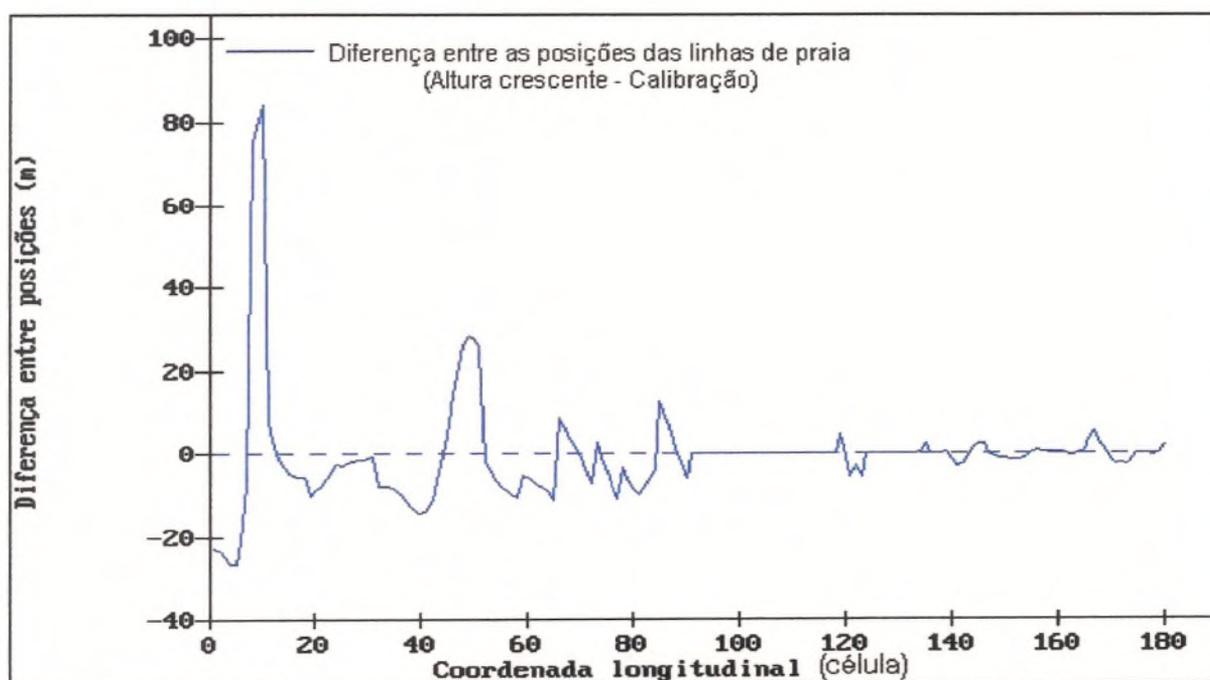


Figura 5.37: Diferença entre as posições das linha de praia, calculada com os dados da altura da onda em ordem crescente e calculada na calibração do modelo.

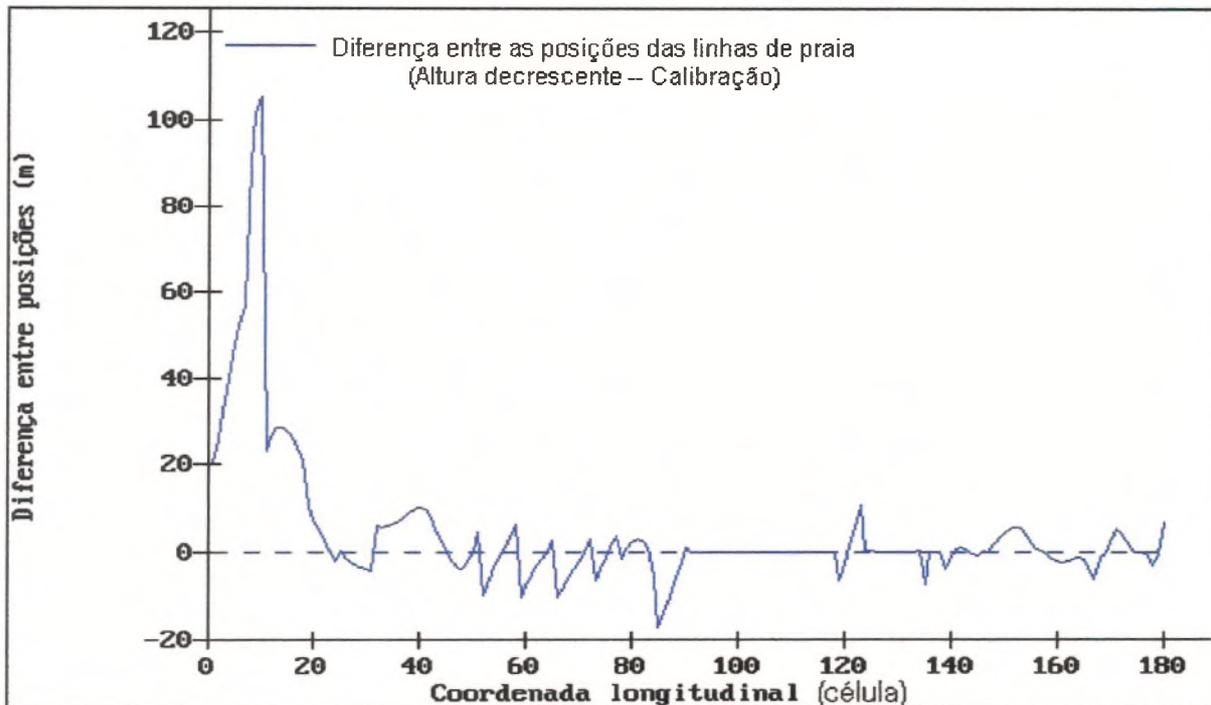


Figura 5.38: Diferença entre as posições das linha de praia, calculada com os dados da altura da onda em ordem decrescente e calculada na calibração do modelo.

Analisando os resultados apresentados nos testes de sensibilidade, verifica-se que:

1) No trecho que se estende das células 90 a 180, independente da disposição dos dados de altura e direção da onda, existe uma grande concordância nas posições calculadas para as linhas de praia. Essa observação fica bem evidenciada pelas Figuras 5.29, 5.30, 5.37 e 5.38, onde a diferença entre as posições das linhas de praia é desprezível. Esse trecho está localizado na zona de sombra do molhe do TITAN e confirma os resultados de Hanson e Kraus (1986) quanto a baixa sensibilidade apresentada pela linha de praia localizada na zona de sombra das estruturas, à sequência de valores do parâmetro direção da onda. Segundo esses pesquisadores, o clima de ondas nessas regiões é regido pela difração produzida pelas estruturas e praticamente independe da direção da onda ao largo. Quanto ao parâmetro altura da onda, o principal fator que determina sua pouca influência na linha de praia localizada na zona de sombra do molhe do TITAN, é a grande atenuação sofrida até a linha de arrebentação, devido ao fenômeno da difração e refração.

2) Entre as células 1 e 90, as sequências distintas dos parâmetros direção e altura da onda ocasionam diferenças de maior significância entre as posições das linhas de praia calculadas para essas sequências e aquela calculada na calibração do modelo nos trechos influenciados pelos quebra-mares “virtuais”. Esses resultados indicam que o procedimento adotado para preencher aleatoriamente as lacunas da série dos parâmetros ondulatórios pode ser uma das fontes de erro no cálculo da linha de praia durante a calibração do modelo.

Finalmente, são apresentados nas Figuras 5.39 e 5.40 os resultados da simulação de previsão para o período de 1963 a 1968. Pode-se observar na Figura 5.39 o avanço da linha de praia em direção ao mar, entre as células 1 e 51, o que pode caracterizar uma estimativa exagerada do engordamento de praia promovido pela alimentação das dunas ou até mesmo uma subestimativa do parâmetro K_1 . Na Figura 5.40 pode-se observar a erosão no trecho compreendido pelas células 90 a 100, região das praias de Formosa e bairro Arraial Moura Brasil, confirmando a degradação sofrida por esse trecho no final da década de 60 (Figura 4.4).

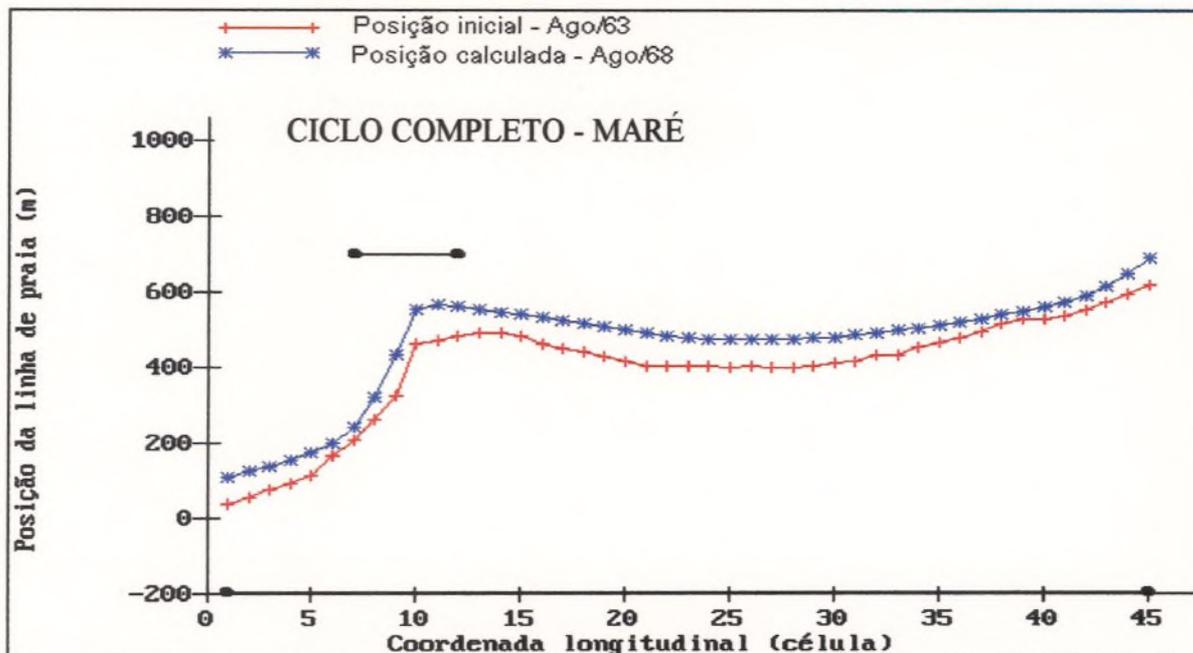


Figura 5.39: Posição inicial da linha de praia extraída do levantamento aerofotogramétrico com restituição para o ano de 1963 e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1968. Trecho entre as células 1 e 45.

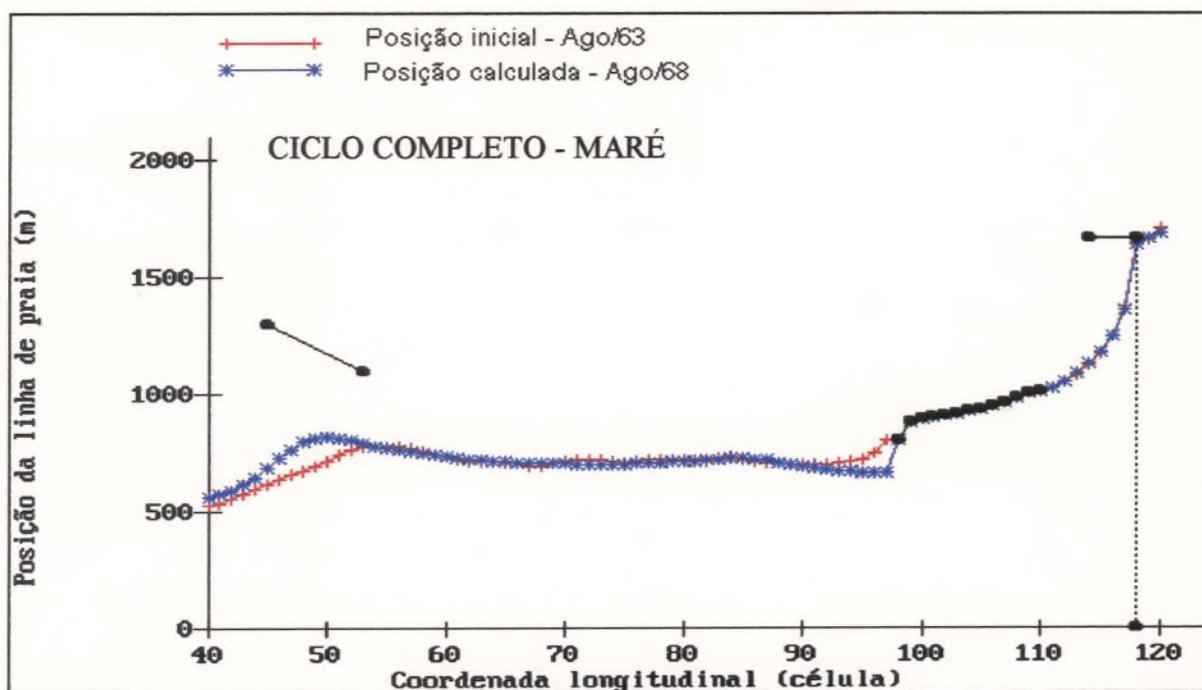


Figura 5.40: Posição inicial da linha de praia extraída do levantamento aerofotogramétrico com restituição para o ano de 1963 e posição da linha de praia calculada pelo modelo GENESIS para agosto/1968. Trecho entre as células 45 e 120.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dentro dos objetivos do presente trabalho e de acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a modelagem da região litorânea de Fortaleza resultou na calibração do modelo para as hipóteses consideradas e limites de erro definidos;
- o modelo GENESIS demonstrou seu potencial para as simulações da evolução da linha de praia, considerando o longo período utilizado para a calibração, a extensa área modelada e o grande número de estruturas costeiras envolvidas;
- as estimativas da taxa de transporte litorâneo realizadas na calibração não garantem ao modelo plena confiabilidade em quantificar esse processo que ocorre na região. O ajuste dos parâmetros K_1 e K_2 está diretamente relacionado com as estimativas da entrada de sedimentos no sistema modelado. Durante as simulações com o código GENESIS, observou-se que outras estimativas para a entrada de sedimentos no sistema, através do despejo de dragagem e alimentação pelas dunas, originavam outros valores para K_1 e K_2 que permitiam um ajuste, dentro do limite de erro definido, entre a linha calculada e a medida.
- o modelo contribuiu de forma significativa para a organização e avaliação dos parâmetros observados e estimados para a região, além de definir os locais ou parâmetros que necessitam de maior observação em campo, de maneiras a permitir uma maior precisão na quantificação dos processos existentes.
- a insensibilidade do modelo à influência das ondas em somente meio ciclo da maré, em relação à hipótese de influência durante todo o ciclo de maré, não descarta a influência da variação do nível d'água na dinâmica costeira, pois a hipótese proposta para dar ao modelo representatividade desse fenômeno é extremamente simplificada uma vez que não considera a alteração da profundidade na refração das ondas, dentre outras.

- a correta definição do modelo conceitual para a região necessita de um conhecimento maior da dinâmica dos sedimentos na região.

- é necessário verificar e validar o modelo em períodos distintos para avaliar sua capacidade de previsão da evolução da linha de praia e representatividade do transporte litorâneo. Ainda que não tenha sido possível avaliar, no presente trabalho, a capacidade de previsão do modelo, pode-se afirmar que a grande vantagem de sua utilização como uma ferramenta auxiliar, não necessariamente para previsão, reside na oportunidade de estudar uma extensa região de maneira global. Além disso, auxilia o usuário na revisão do modelo conceitual proposto preliminarmente, permite uma maior objetividade na coleta de informações de campo e, através de simulações de caráter qualitativo, permite conciliar os projetos de tal forma a impedir que soluções localizadas possam gerar problemas em áreas vizinhas.

Para complementar os conhecimentos sobre a dinâmica de sedimentos na área em estudo, o que possibilita maior precisão no modelo conceitual proposto e avaliação da representatividade do modelo, além de permitir realizar a verificação e validação do modelo, faz-se as seguintes recomendações:

1. aprimorar a caracterização do clima de ondas da região, sobretudo da direção da onda que foi realizada por medições visuais ao largo da área de estudo, com o aproveitamento das medições instrumentadas de direção que estão sendo realizadas ao largo da localidade de Pecém. Em geral, existe uma tendência, nas medições visuais de direção, em filtrar as ondas de período mais longo e não distinguir a direção dessas ondas que são cavalgadas pelas de curto período;
2. adotar procedimentos, em terra, para verificar a representatividade dos modelos de transformação da onda, através de medições da altura e direção da onda próxima a linha de arrebenção;

3. caracterizar o material de despejo de dragagem e adotar procedimentos, como levantamentos batimétricos, coleta de sedimentos de fundo e simulações com traçadores radioativos ou fluorescentes, para estimar, no espaço e no tempo, a quantidade de areia proveniente do despejo de dragagem que atinge as praias;
4. caracterização do depósito de sedimentos entre a praia e a isóbata de aproximadamente -10 m para dar suporte ao estudo da dinâmica de sedimentos na região;
5. o resgate das folhas de bordo e levantamentos batimétricos pretéritos, realizados pela DHN na área;
6. a utilização de traçadores, radioativos ou fluorescentes, para determinar a profundidade de fechamento;
7. o resgate de levantamentos aerofotogramétricos com restituição para os anos de 1976 e 1978;
8. reservas quanto aos resultados apresentados pelo modelo GENESIS e considerá-los sempre como mais uma estimativa dentre outras, com incertezas, a 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, na formulação matemática através de um sistema bidimensional, onde os parâmetros e fenômenos em muitas situações são considerados invariáveis no espaço e no tempo, para representar parâmetros e fenômenos que ocorrem no sistema tridimensional, variáveis no espaço e no tempo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAKIDA, T., TSURUKAWA, Y., MIZUMURA, K. 1978. Currents and shoreline change behind a breakwater. In: JAPANESE CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 25, 1978. Proceedings..., p. 199-203 .
- BAKKER, W. T., EDELMAN, T. (1964). The coastline of river-deltas. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 9, 1964, Lisboa. Proceedings..., ASCE, p. 199-218.
- BAKKER, W.T. (1968). The dynamics of a coast with a groyne system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 11, 1968, London. Proceedings..., ASCE, p. 492-517.
- BAKKER, W.T. 1971. The influence of longshore variation of wave height on the littoral current. Study Report WWK 71-19, Ministry of Public Works (Rijkswaterstaat) The Hague, The Netherlands.
- BANDEIRA, J.V. 1978. Estudos sedimentológicos em engenharia de costas com a utilização de traçadores. In: PALESTRAS EM ENGENHARIA COSTEIRA, 1, 1978, Rio de Janeiro.
- BRUUN, P. 1954. Coastal erosion and development of beach profiles. Technical Memorandum N° 44, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, Waterway Experiment Station, Vicksburg, MS.
- BRUUN, P. 1983. Laboratory study on the shoreline changes behind a coastal structure by K. Mizumura and N. Shirashi - Discussion. Coastal Engineering, 7, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, p. 177-182.
- CASSAR, J.C.M. e NEVES, C.F. 1993. Modelo numérico de evolução de costa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10, e, SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO CONE SUL, 1, v.5, 1993, Gramado, Rio Grande do Sul. Anais..., ABRH, p. 505-514.
- CRANK, J. 1975. The mathematics of diffusion. Clarendon Press, 2nd ed., Oxford, England.
- DEAN, R. G. 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Ocean Engineering Report N° 12, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, DE.
- DHN - Carta Náutica 701 (1965), escala 1:13.000, Diretoria de Hidrografia e Navegação. Ministério da Marinha. Rio de Janeiro, RJ.
- DHN - Carta Náutica 700 (1986), escala 1:316.220, Diretoria de Hidrografia e Navegação. Ministério da Marinha. Rio de Janeiro, RJ.
- DHN - Carta Náutica 710 (1995), escala 1:50.000, Diretoria de Hidrografia e Navegação. Ministério da Marinha. Rio de Janeiro, RJ.

DHN, 1974, 1976, 1980, 1986 e 1995. Tábuas de Marés.

DHN, (1998). Comunicação pessoal via e-mail com a Tenente Ana Cláudia de Paula, em 23/01/98.

EBERSOLE, B. A., CIALONE, M. A., PRATER, M. D. 1986. RCPWAVE- A linear wave propagation model for engineering use. Technical Report CERC-86-4, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

GODA, Y., TAKAYAMA, T., SUZUKI, Y. 1978. Diffraction diagrams for diretional random waves. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 16, 1978, Hamburg. Proceedings..., ASCE, p. 628-650.

GOURLAY, M. R. 1982. Nonuniform alongshore currents and sediment transport - a one dimensional approach, Report Rep. No. CE#!, Dept. of Civil Engineering, University of Queensland, Australia, 67 p..

GRAVENS, M. B., SCHEFFNER, N. W., HUBERTZ, J. M. 1989. Coastal processes from Asbury Park to Manasquan, New Jersey. Miscellaneous Paper CERC-89-11. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Ms.

GRIJM, W. 1964. Theoretical forms of shorelines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 9, 1964, Lisboa, ASCE. Proceedings..., p. 219-235.

GUIA QUATRO RODAS DE PRAIAS 1991. Editora Abril.

HALLERMEIER, R. J. 1978. Uses for calculeted limit depth to beach erosion. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 16, 1978, Hamburg. Proceedings..., ASCE, p. 1493-1512.

HALLERMEIER, R. J. 1983. Sand transport limits in coastal structure design. In: COASTAL STRUCTURES, 1983, ASCE. Proceedings..., p. 703-716.

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

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., 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.

HANSON, H., KRAUS, N. C., NAKASHIMA, L. D. 1989. Shoreline change behind transmissive detached breakwaters. In: COASTAL ZONE, 1989, ASCE. Proceedings..., p. 568-582.

- HARMES, V.W., 1979. Diffraction of waves by shore-connected breakwater. Journal of Hydraulics Div., ASCE, 105 (HY12): p.1501-1519.
- HAYES, M.O., 1967. Hurricanes as geologic agents: Case studies of Hurricane Carla, 1961 and Cindy, 1963. University of Texas Bureau of Economic Geology. Rept. Inv. N°. 61, 56p.
- HOUSTON, J.R., 1996. Discussion of Young *et al.* (1995), Journal of Coastal Research 12 (4), 1038 - 1043.
- IBGE (1997). Conversa pessoal com o Geólogo Antônio Carlos Rodrigues - Chefe da Segunda Divisão de Geociências do Nordeste. Fortaleza, agosto/1997.
- INPH 1972. Relatório de Atividades em 1972. Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis, Rio de Janeiro.
- INPH 1991. Relatório de viagem - Domenico Acceta e Paulo Cezar Maiorano. Companhia Docas do Rio de Janeiro, dezembro, Rio de Janeiro.
- INPH 1992a. Parecer Técnico: A erosão litorânea na Praia de Iparana. INPH-22/92, Abril. Rio de Janeiro.
- INPH 1992b. Estudo do transpasse de sedimentos em torno do Porto de Fortaleza. INPH 40/92, Agosto. Rio de Janeiro.
- INPH 1996. Relatório final de medições de onda ao largo de Mucuripe - CE. INPH-68/96, 2 VOLUMES, Rio de Janeiro.
- IJIMA, T. *et al.*, 1961. Litoral transport at the Isohama coast. In: JAPANESE CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 8, 1961. Proceedings..., p. 168-175 (in Japanese).
- KOMAR, P.D., INMAN, D.L. 1970. Longshore sand transport on beaches. Journal of Geophysics Research, 75: p. 5914-5927.
- KONIKOW, L. F., BREDEHOEFT, J. D. 1992. Ground-water models cannot be validated. Advances in Water Resources, 15, p. 75-83.
- KRAUS, N.C. 1981. One-line development and simulation for Oarai Beach. NERC Report No. 13, Cooperative Research of Surf Zone Dynamics, Part 3, Beaches Near Breakwaters and Rocky Coasts, Nearshore Environment Research Center, Tokyo, Japan, p. 155-192.
- 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., 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., 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.
- LARSON, M., HANSON, H., KRAUS, N.C. 1990. Schematized numerical model of three-dimensional beach change. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 22, 1990, Delft, The Netherlands. Proceedings..., ASCE, p.405-408.
- LE MÉHAUTÉ, B., SOLDATE, M. 1977. Mathematical modeling of shoreline evolution. Miscellaneous Report No. 77-10, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Ms.
- LE MÉHAUTÉ, B., SOLDATE, M. 1980. A numerical model for predicting shoreline changes. Miscellaneous Report No. 80 (6), U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Ms, 72 p.
- LE MÉHAUTÉ, B., WANG, J. D., LU, C. C. 1983. Wave discretization for shoreline processes. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. ASCE. Vol. 109, No. WW1, p. 63-78.
- LIMA, E. C., LIMA, E. M., LUSTOSA, J. P. G. *et al.* 1988. Estabilização de dunas móveis com espécies vegetais economicamente exploráveis - Iparana - CE. Relatório Final. Departamento de Geografia /UFC. Fortaleza.
- MELO Fº, E., GUZA, R. T. 1990. Wave propagation in a jettied entrance channel. SIO Reference series no. 90-1, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, EUA.
- MELO Fº, E., ALVES, J.H.G.M. 1993. Notas sobre a chegada de ondulações longínquas à costa brasileira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10, 1993, Gramado, Rio Grande do Sul, ABRH. Anais..., vol. 5, p.362-369.
- MIZUMARA, K. 1982. Shoreline change estimates near Oarai, Japan. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. ASCE. Vol. 108, No. WW1, p. 63-80.
- MOORE, B. 1982. Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height. M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, DE.
- MORTON, R.A. 1981. Formation of storm deposits by wind-forced currents in the Gulf of Mexico and the North Sea. In: NIO, S.D. (ed.), holocene marine sedimentation in the North sea Basin. International Association of Sedimentary Specialist, publication No. 5, p. 385-396.
- MORAIS, J. O. 1972. Processos de assoreamento do Porto de Mucuripe. Arquivo Ciências do Mar, 12(2) : 139 -149, Fortaleza, Dezembro.
- MORAIS, J.O. 1980a. Aspectos do transporte de sedimentos no litoral do município de Fortaleza, Estado do Ceará, Brasil. Arquivos Ciências do Mar, 20(1/ 2): 71-100, Dezembro, Fortaleza.

- MORAIS, J. O. 1980b. Aspectos de geologia ambiental costeira no município de Fortaleza. Tese para concurso de professor titular, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- NAGAI, K. 1972. Diffraction of the irregular sea due to breakwaters. Coastal Engineering in Japan. JSCE, 15: p. 59-67.
- OZASA, H., BRAMPTON, A. H. 1980. Mathematical modelling of beaches backed by seawalls, Coastal Engineering, Vol. 4, No. 1, p. 47-64.
- PELNARD-CONSIDÈRE, 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.
- PERLIN, M., DEAN, R.G. 1983. A numerical model to simulate sediment transport in the vicinity of coastal structures. Miscellaneous Report No. 83 (10), U.S. Army Corps of Engineers, Fort Belvoir, Coastal Engineering Research Center, VA., EUA.
- PERSON, D.R., RIGGS, S.R. 1981. Relationship of surface sediments on the lower forebeach and nearshore shelf to beach nourishment at Wrigtsville Beach, North Carolina. Shore and Beach, 49, p. 26-31.
- PITOMBEIRA, E. S. 1995. Litoral de Fortaleza - Ceará - Brasil: um exemplo degradação. – In: SIMPÓSIO SOBRE PROCESSOS SEDIMENTARES E PROBLEMAS AMBIENTAIS NA ZONA COSTEIRA NORDESTE DO BRASIL, 1, 1995, Recife. Anais..., Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, 1995. 176 p., p. 59 -62.
- PITOMBEIRA, E. S. 1997. Sistema de “by pass” de areia em decorrência da construção do quebra-mar protetor do embarcadouro provisório do porto do Pecém, Ceará - Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, 1997, Vitória/ES. Anais..., 1997.
- PITOMBEIRA, E. S., Vieira, L. A. A. 1995. Processos litorâneos na costa do município de Fortaleza. --In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2, 1995, Fortaleza, Ceará. Anais..., p. 410 - 419.
- PORTOBRAS 1979. Plano Diretor Portuário do Brasil, Parte A - Cadastro, Porto de Fortaleza, CE, vol. 7, Empresa de Portos do Brasil S.A., Ministério dos Transportes.
- PRICE, W. A , TOMLINSOM, K.W., WILLIS, D.H. 1972. Predicting changes in the plan shape of beaches. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 13, 1972, Vancouver, Canada. Proceedings..., Vol. II, p. 1321-1329.
- SAVILLE, T. 1953. Wave and water level statistics for Lake Erie. Technical Memorandum No. 37. Beach Erosion Board, US Army Corps of Engineers.

- SMITH, A. J., MORAIS, J. O. 1984. Estudos preliminares sobre a geologia ambiental costeira do Estado do Ceará, nordeste do Brasil. Arquivo Ciências do Mar, 23: p. 85-96, Fortaleza, Julho.
- SNEDDEN, J.W., NUMMEDAL, D., AMOS, A.F. 1988. Storm and fair-weather combined flow on the central Texas continental shelf. Journal of Sedimentary Petrology, 58, p. 580-595.
- SWART, D. H. 1986. Prediction of wind-driven transport rates. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 20, 1986, Taipei, Coreia. Proceedings..., p. 1595-1611.
- U.S.ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) 1984. Shore protection manual. Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA, USA. 3 v. U.S. Govt. Printing Office.
- U.S.ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) 1991. Folly Beach General Design Memorandum. Charleston, South Carolina, 50p.
- U.S. ARMY ENGINEER DISTRICT, BUFFALO. 1975. Cooperative beach erosion control project for Lakeview Park, Lorain, Ohio. General Design Memorandum, Phase II, Project Design, Buffalo, NY.
- VALENTINI, E. 1994. Avaliação de processos litorâneos e consequências para o gerenciamento costeiro no Ceará. Tese D.Sc.. Programa de Engenharia Oceânica. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- VALENTINI, E., ROSMAN, P. C. C. 1993. Subsídios técnicos para o gerenciamento costeiro no Ceará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10, 1993, Gramado, Rio Grande do Sul, ABRH Anais..., vol. 2, p. 51-62.
- VEMULAKONDA, S.R., SCHEFFNER, N.W., EARICKSON, J.A. *et al.* 1988. Kings Bay coastal processes numerical model. Technical Report CERC-88-3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- WANG, H., DALRYMPLE, R.A., SHIAU, C.J. 1975. Computer simulation of beach erosion and profile modification due to waves. In: SYMPOSIUM ON MODELING TECHNIQUE. Proceedings..., ASCE, p. 1369-1384.
- WATANABE, A. 1982. Numerical models of nearshore currents and beach deformation. Coastal Engineering in Japan. Vol 25, p. 147-161.
- WATANABE, A. 1988. Part III: Numerical Model of Beach Topography Change, Chapter 5, In: K. Horikawa Ed., Nearshore Dynamics and Coastal Processes: Theory, Measurement and Predictive Models, University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, p. 303-308.
- WATANABE, A., MARUYAMA, K., SHIMIZU, T. *et al.* 1986. Numerical prediction model of three-dimensional beach deformation around a structure. Coastal Engineering in Japan, JSCE, 29, p. 179-194.

- WILLIS, D.H., PRICE, W.A. 1975. Trends in the application of research to solve coastal engineering problems. In: J. Hails and A. Carr (Editors), Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation. Wiley, New York, N.Y., p. 111-121.
- YAMAGUCHI, M., NISHIOKA, Y. 1984. Numerical simulation on the change of bottom topography by the presence of coastal structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 19, 1984. Proceedings..., ASCE, p. 526-527.
- YOUNG, R. S., PILKY, O. H., BUSH, D. M. *et al.* 1995. A discussion of Generalized Model for Simulating Shoreline Change (GENESIS). Journal of Coastal Research, 11(3), p. 875-886. Fort Lauderdale (Florida).

APÊNDICE A

ESTRUTURA DO SISTEMA DE MODELAGEM DA LINHA DE PRAIA

O sistema computacional para a modelagem da linha de praia (SMS - Shoreline Modeling System), desenvolvido pelo Coastal Engineering Research Center (CERC/USA), é constituído por dois modelos numéricos principais, GENESIS e RCPWAVE, 12 programas de suporte, 2 arquivos de edição, dois programas para visualização de resultados e um programa para geração de gráficos.

A estrutura computacional do sistema, representada pelo diretório, sub-diretórios e arquivos-programas, pode ser visualizada na Figura A₁.

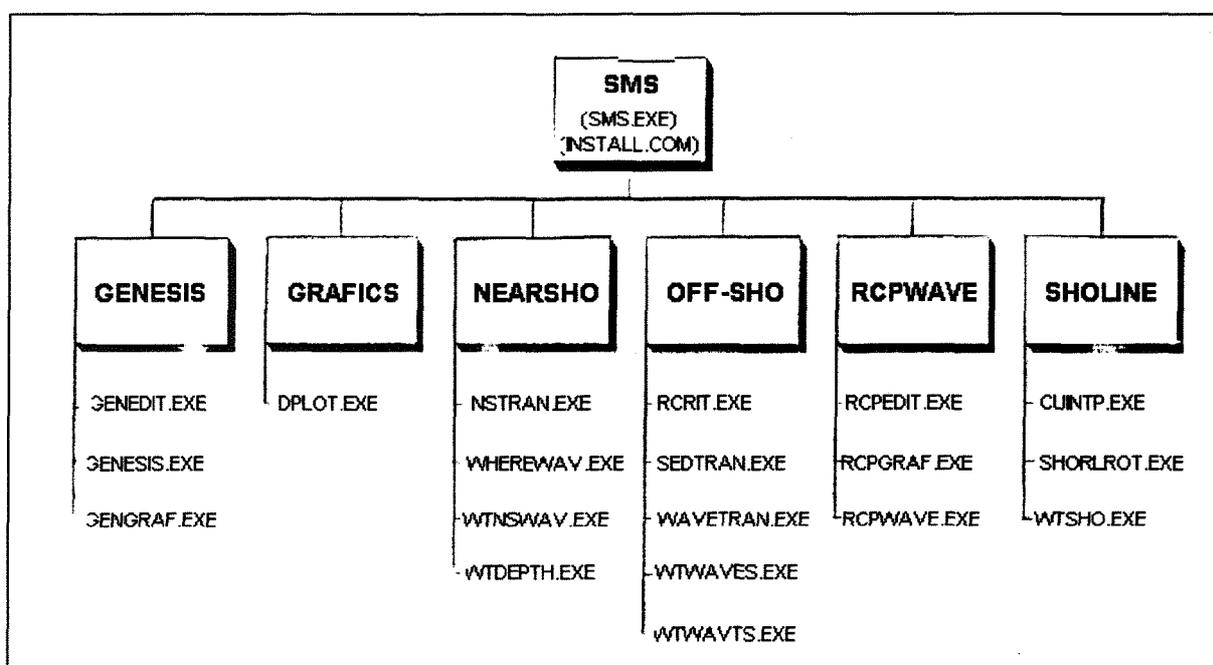


Figura A₁: Estrutura do diretório e programas do sistema de modelagem.

Dentro do diretório SMS existem dois arquivos - programas: INSTALL.COM, que permite compatibilizar o “software” gráfico do sistema com o “hardware” disponível e, SMS.EXE, um programa controlador que permite ao usuário se mover dentro de um menu de vários níveis para executar qualquer dos programas disponíveis (Figura A₁).

O sub-diretório GENESIS contém o programa de mesmo nome que implementa o método numérico do modelo GENESIS (Figura A₂), cujos arquivos de entrada e saída são

descritos a seguir.

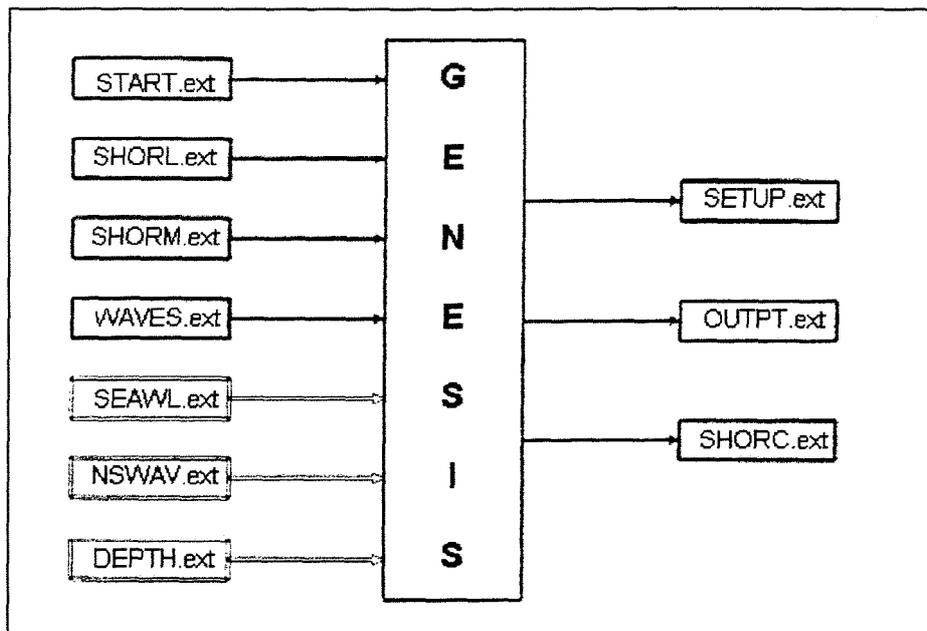


Figura A₂: Estrutura dos arquivos de entrada e saída do modelo GENESIS.

START.ext é um arquivo de dados de entrada onde estão caracterizados todos os parâmetros, tempo de simulação e componentes físicos da área em estudo: estruturas costeiras, atividades humanas, dimensões da área modelada, sedimento de praia, altura da berma, etc.

SHORL.ext é um arquivo que contém os dados referentes à posição inicial da linha de praia. Esta posição é determinada a partir da linha de base (eixo x). A cada célula (sub-divisão da linha de base) deve corresponder uma posição da linha de praia. A preparação desse arquivo é auxiliada pelos três programas constantes do sub-diretório SHOLINE.

SHORM.ext é um arquivo que deve conter a posição real da linha de praia, atingida em uma data idêntica a aquela definido como o término para a simulação. Da mesma forma, a preparação desse arquivo é auxiliada pelos programas do sub-diretório SHOLINE.

SEAWL.ext é o arquivo que define a posição das muralhas de contenção(seawall) ou afloramentos rochosos, caso existam, em relação à linha de base. A representação dessas estruturas é a mesma da posição da linha de praia; no centro de cada célula abrangida pela estrutura. Para as células não atingidas por essas estruturas deve-se creditar o valor -9999.

A utilização dos demais arquivos de entrada de dados descritos a seguir depende do tipo de modelo de propagação de onda utilizado. Se for utilizado o modelo interno do GENESIS, de propagação da onda, onde o fundo é considerado regular (linhas isobatimétricas paralelas entre si e a linha de praia) desde a região “off-shore” até as proximidades da linha de arrebentação, somente o arquivo WAVES.ext é acrescido aos quatro arquivos já mencionados. Esse arquivo deve conter os parâmetros ondulatórios: altura significativa, período e direção de propagação da onda, inseridos nessa ordem em uma mesma linha e com formato livre. A cada intervalo de tempo estipulado para a simulação, deve existir estes três parâmetros. Caso exista dados para tipos distintos de onda, ondulações e vagas, estes poderão constar simultaneamente no arquivo. No arquivo WAVES a direção de propagação da onda deve estar referenciada a perpendicular à linha de base, segundo os sinais negativo e positivo, de acordo com a representação da Figura A₃.

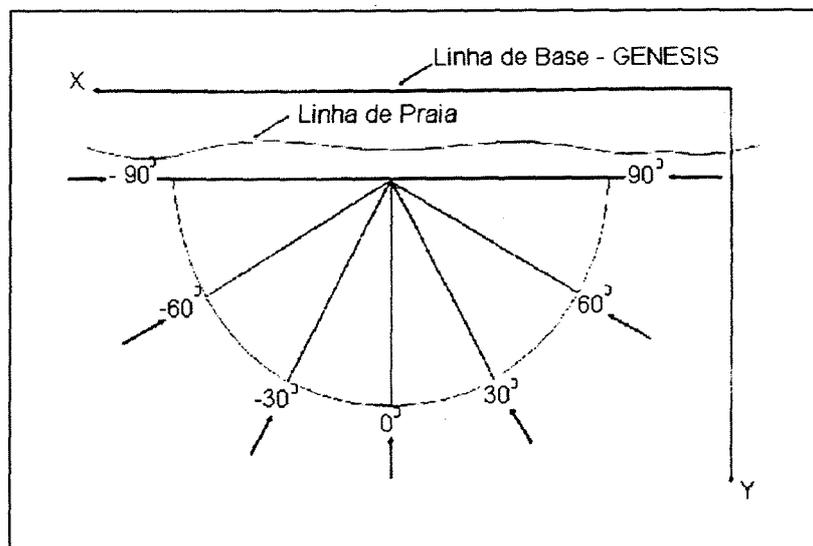


Figura A₃: Convenção para a direção de propagação das ondas

Na existência de maiores irregularidade do fundo na área em estudo, utiliza-se o modelo RCPWAVE para a propagação das ondas “off-shore” até a linha de referência, nas proximidades da linha de arrebentação. Com os dados da onda transformada e as profundidades ao longo da linha de referência são construídos os arquivos de entrada

NSWAV.ext e DEPTH.ext. O arquivo NSWAV deve conter o coeficiente de transformação da altura da onda e a direção de propagação para cada ponto estipulado na linha de referência próxima à linha de arrebentação. O período da onda, que é constante, é obtido através do arquivo WAVES. O arquivo-programa WTNSWAV, existente no sub-diretório NEARSHO, auxilia na criação do arquivo NSWAV.ext com formato compatível ao exigido pelo modelo GENESIS.

O sub-diretório GENESIS dispõe de mais dois programas: GENGRAF e GENEDIT.

O GENEDIT é um programa para facilitar a geração e modificação do arquivo de dados de entrada, START.ext, do programa GENESIS.

O terceiro arquivo-programa do sub-diretório GENESIS, GENGRAF, tem a finalidade de permitir a visualização dos resultados do programa GENESIS: posição da linha de praia calculada pelo modelo, contida no arquivo de saída - SHORC.ext, taxa de transporte litorâneo líquida e total, registradas no arquivo OUTPUT.ext e as diferenças entre a posição calculada e aquela real contida no arquivo de dados SHORM.ext.

O arquivo SETUP.ext contém a posição da linha de praia calculada em um determinado tempo estipulado pelo usuário e as variações entre a posição dessa linha e a linha inicial do período de simulação.

É importante lembrar que o nome dos arquivos de entrada do programa GENESIS não podem ser alterados. Entretanto, a extensão desses arquivos é critério do usuário e deve ser a mesma para todos os arquivos.

Os arquivos-programas contidos no sub-diretório SHOLINE tem a finalidade de preparar os dados de posição da linha de praia, extraídos geralmente de levantamentos topográficos ou levantamentos aerofotogramétricos, para o programa GENESIS. Inicialmente a digitalização da posição da linha de praia é realizada segundo um sistema de coordenadas retilíneas (projeção MERCATOR). Em seguida esse sistema deve ser transformado, através de

rotação e translação dos eixos, em um sistema de coordenadas compatível para o programa GENESIS. Isto significa que o novo sistema de coordenadas deve ter seu eixo X orientado segundo a linha de praia e o eixo Y, orientado no sentido “off-shore”. Essa transformação é realizada pelo programa SHORLROT. O passo seguinte é obter posições da linha de praia (coordenada Y), no novo sistema, segundo posições igualmente espaçadas no eixo X. Considerando que a digitalização da linha de praia é realizada de forma discreta, haverá sempre posições faltosas para um determinado X escolhido. Essas lacunas são preenchidas pela interpolação entre pontos existentes, pelo programa CUINTP. Finalmente, para atingir o formato dos arquivos de entrada do programa GENESIS, onde somente as coordenadas Y da posição da linha de praia são definidas, utiliza-se o programa WTSHO.

O arquivo-programa RCPWAVE, que implementa o método numérico de propagação das ondas, juntamente com os programas RCPGRAF e RCPEDIT compõem o sub-diretório RCPWAVE. O programa RCPEDIT permite editar o arquivo com dados de entrada para o programa RCPWAVE e seus parâmetros de entrada são: dados de onda “off-shore”, classificados segundo bandas de direção e período, dimensões da malha XY sobre a qual o método numérico se baseia, posição da linha de referência e sobretudo as profundidades batimétricas da área modelada segundo a malha XY definida. Na Figura A₄ pode-se visualizar as oito maneiras distintas de entrar com os dados de batimetria e o código correspondente exigido pelo programa RCPEDIT.

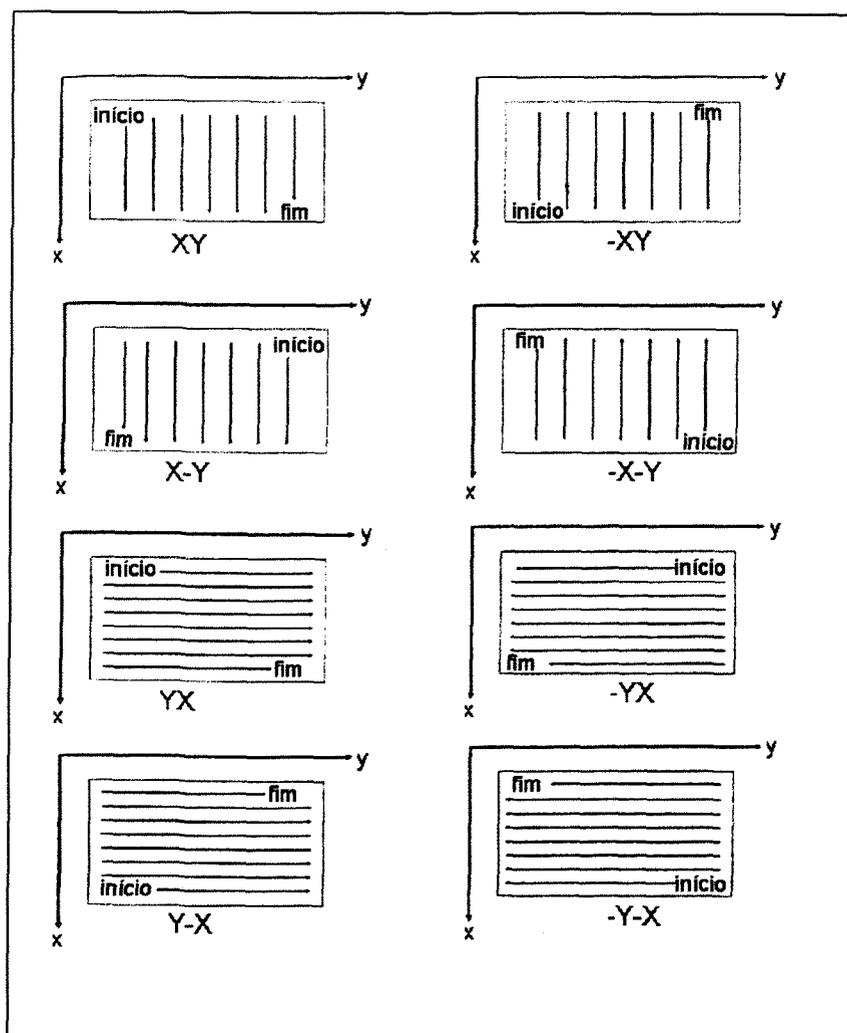


Figura A4: Convenção para a entrada dos dados de profundidade no modelo RCPWAVE.

O programa RCPGRAF gera os gráficos que permitem visualizar os dados de entrada e saída do programa: a posição das linhas isobatimétricas, a altura e direção das ondas ao largo e a altura e direção das ondas próximas à linha de arrebentação.

Anteriormente à edição do arquivo de dados de entrada para o programa RCPWAVE, há necessidade de preparar os dados de onda “off-shore” pelo programa WHEREWAV, do sub-diretório NEARSHO. Nele as ondas são classificadas, pela sua direção de propagação e período, segundo bandas definidas pelo intervalo de variação desses parâmetros. O número de bandas disponíveis para classificar a direção de propagação totalizam 16 (Figura A5). Para o período das ondas existem 9 bandas de classificação. As bandas 1 e 8 compreendem

respectivamente os intervalos de 0 a 5 segundos, aberto nos limites, e 17 a 23 segundos, fechado no limite inferior e aberto no limite superior. A banda 9 classifica os períodos maiores ou igual a 23 segundos. As demais bandas tem um intervalo de variação de 2 segundos e são fechadas no limite inferior a partir de 5 segundos.

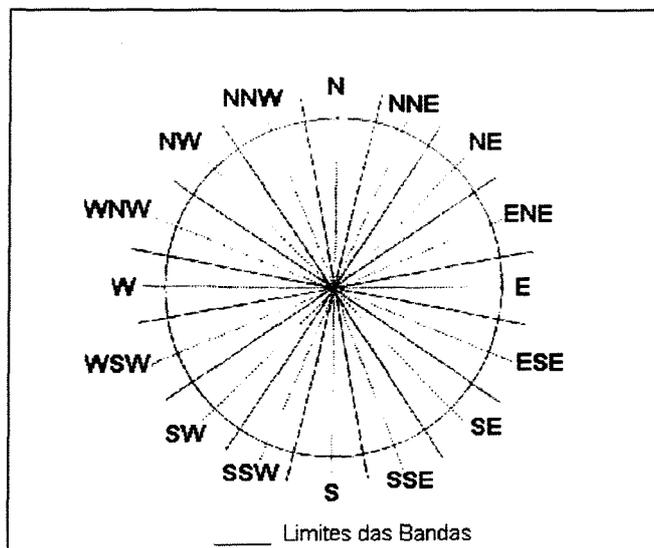


Figura A5 : Padrão de classificação da direção de propagação da onda.

Um outro arquivo do sub-diretório NEARSHO, o programa WTNSWAV, constrói o arquivo de entrada, NSWAV, do programa GENESIS. O arquivo NSWAV contém, em forma codificada, os dados de entrada e saída do programa RCPWAVE: período e direção de propagação da onda “off-shore”, o coeficiente de transformação da altura da onda e a sua direção de propagação na linha de referência. Ainda dentro desse sub-diretório existe o programa WTDEPTH. Ele constrói o arquivo de entrada, DEPTH, do programa GENESIS, reformatando as profundidades da linha de referência, disponíveis no arquivo de saída do programa RCPWAVE.

O programa NSTRAN estima o potencial de transporte litorâneo, com base nos dados de onda na linha de referência, independentemente do programa GENESIS.

Os arquivos-programas constantes no sub-diretório OFF-SHO foram desenvolvidos para realizar a propagação das ondas “off-shore”, estimadas principalmente através de modelos

de previsão do clima de ondas a partir de dados de vento e pressão atmosférica, até águas rasas. Permitem também avaliar, de maneira genérica, a capacidade de transporte dessas ondas.

O arquivo-programa RCRIT avalia a capacidade de cada onda produzir transporte litorâneo.

SEDTRAN é o programa que permite estimatimar aproximadamente o transporte resultante de um determinado clima de ondas "off-shore", independentemente do uso do modelo GENESIS.

Os demais programas, WAVETRAN, WTAVES E WTAVTS, realizam respectivamente a propagação das ondas, considerando somente o fenômeno da refração, a redefinição de intervalo de tempo e a formatação dos dados da onda para a criação do arquivo de entrada, WAVES, do programa GENESIS.

O sub-diretório GRAFICS contém o programa DPLOT que permite gerar gráficos bidimensionais de maneira genérica. Para isto basta ter um arquivo com dados, distribuídos segundo um sistema de coordenadas XY, em qualquer dos formatos permitidos pelo programa DPLOT.

Um aspecto importante a ressaltar é quanto aos diversos padrões americanos de formato dos arquivos de dados de onda permitidos pelos programas de suporte acima mencionados. No presente trabalho os arquivos de dados de onda seguem o padrão SEAS (Sea-State Engineering Analysis) - Fase I. A formatação dos dados nesse padrão segue a seguinte disposição:

- 1) Na primeira linha, a primeira coluna é deixada em branco; as colunas 2 a 6 são preenchidas com dados alfanuméricos caracterizando a posição de monitoração das ondas e o espaço compreendido pelas colunas 16 a 22 é preenchido com o número de linhas de dados de onda;
- 2) As demais linhas são preenchidas com o ano, mês, dia e hora, nessa ordem, onde são reservadas duas colunas para cada ítem e os dados de onda: altura, período e direção de

propagação da onda são digitados nessa ordem nas colunas, cuja disposição obedecem a seguinte formatação na linguagem de programação FORTRAN:

FORMAT(1X,5H*****,I7) (1ª LINHA)

FORMAT(1X,I2,I2,I2,I2,I2,1X,F11.2,2X,F4.1,1X,F8.1) (2ª linha até o final dos dados)

Ainda segundo o padrão SEAS a direção de propagação da onda deve estar referenciada ao norte geográfico e o ângulo da linha de base, que representa a linha de praia, deve ser referenciado segundo a representação da Figura A6.

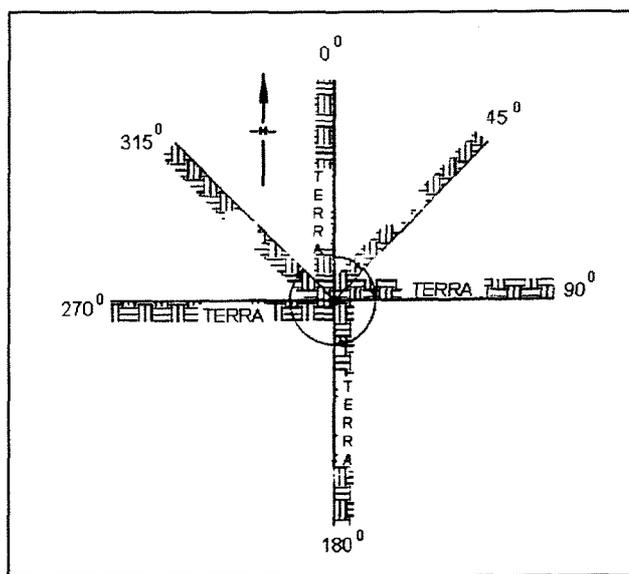


Figura A6: Representação esquemática da orientação da linha de praia.

APÊNDICE B

PROGRAMA FORTRAN PARA A COMPLEMENTAÇÃO DOS DADOS DE ONDA
PARA O CONJUNTO DE MESES IDÊNTICOS DOS ANOS DE 1991 A 1995

```

10 INTEGER L,C,LK,CK,NK,INE(25,15),N,IFIM(25,15),NDADOS,CO,LI,IQ,
   *J,NAD,INAD(25,7),LK1,LL1,IC1,A1,L1,LL,AA,DDIR(25,
   *7)
20 REAL VAR,TIM,ALT,ANG,DADA(1300,3),AR
30 DOUBLE PRECISION RNE(25,15),PERD(25,7)
35 DATA INE,DDIR,IFIM,DADA,RNE,PERD/925*0,4450*0.0/
40 NDADOS=992
42 LK=0
43 CK=0
44 NK=0
50 N=0
60 OPEN(5,FILE='janeir.txt',STATUS='OLD',FORM='FORMATTED')
70 OPEN(6,FILE='janeirF.txt',STATUS='NEW')
C  LEITURA E ARMAZENAGEM DOS DADOS
80 DO 200 I=1,NDADOS
90 FORMAT(F4.1,F11.2,F8.1)
100 READ(5,90)TIM,ALT,ANG
110 DADA(I,1)=TIM
120 DADA(I,2)=ALT
130 DADA(I,3)=ANG
200 CONTINUE
C  CONTAGEM DE DADOS POR INTERVALO DE VALORES DOS PARÂMETROS(
ALTURA X PERÍODO DA ONDA)
400 DO 500 IB=1,NDADOS
410 IF(DADA(IB,1).EQ.0.0) GO TO 500
420 N=N+1
430 L= INT(10*DADA(IB,2))
440 C= INT(DADA(IB,1))
450 INE(L,C)=INE(L,C)+1
500 CONTINUE
C  PERCENTUAL POR INTERVALO DE VALORES DOS PARÂMETROS( ALTURA
X PERÍODO DA ONDA)
510 DO 524 J=1,15
520 DO 524 K=1,20
522 RNE(K,J)=(FLOAT(INE(K,J)))/(FLOAT(N))
524 CONTINUE
C  QUANTIDADE DE LACUNAS A SER PREENCHIDA POR INTERVALO
525 DO 530 CO=1,15
527 DO 530 LI=1,20
528 IQ=NINT((NDADOS-N)*RNE(LI,CO))
529 IFIM(LI,CO)=IQ
530 CONTINUE

```

C ROTINA PARA PREENCHIMENTO DE DADOS ISOLADOS, NAS LACUNAS SITUADAS ENTRE DADOS EXISTENTES

```
535 DO 565 IA=2,(NDADOS-1)
540 IF(DADA(IA,1).NE.0.0) GO TO 565
545 IF(DADA((IA-1),1).EQ.0.0) GO TO 565
550 IF(DADA((IA+1),1).EQ.0.0) GO TO 565
555 DADA(IA,1)=(DADA((IA-1),1)+DADA((IA+1),1))/2
560 DADA(IA,2)=(DADA((IA-1),2)+DADA((IA+1),2))/2
565 CONTINUE
```

C PREENCHIMENTO DAS LACUNAS COM BASE NA ESTATÍSTICA DOS DADOS EXISTENTES

```
610 CALL SEED(-1)
620 DO 800 IC=1,NDADOS
625 PRINT*,IC
630 IF(DADA(IC,1).NE.0.0) GO TO 800
640 CALL RANDOM(VAR)
660 LK=INT((100.0*VAR)/5.0)+1
670 CALL RANDOM(VAR)
680 CK=INT((100.0*VAR)/7.0)+1
710 IF((IFIM(LK,CK)).EQ.0) GO TO 640
720 DADA(IC,1)=CK+0.5
730 DADA(IC,2)=(LK/10.0)+0.05
732 IF(IC.EQ.1) GO TO 750
750 IFIM(LK,CK)=IFIM(LK,CK)-1
800 CONTINUE
```

C CONTAGEM DE DADOS POR INTERVALOS DE ALTURA X DIREÇÃO

```
810 DO 870 JK=1,NDADOS
820 IF(DADA(JK,3).EQ.0.0) GO TO 870
830 NK=NK+1
840 LL=INT(10*DADA(JK,2))
850 AA=INT(DADA(JK,3)/15.0)
860 DDIR(LL,AA)=DDIR(LL,AA)+1
870 CONTINUE
```

C PERCENTUAL POR INTERVALO DE ALTURA X DIREÇÃO

```
875 DO 910 A1=1,7
890 DO 910 L1=1,20
900 PERD(L1,A1)=(FLOAT(DDIR(L1,A1)))/(FLOAT(NK))
910 CONTINUE
```

C QUANTIDADE DE LACUNAS A SER PREENCHIDA POR INTERVALO

```
920 DO 960 A1=1,7
930 DO 960 L1=1,20
940 NAD=NINT((NDADOS-NK)*PERD(L1,A1))
950 INAD(L1,A1)=NAD
960 CONTINUE
970 DO 1000 I=1,20
980 PRINT*,(INAD(I,J), J=1,7)
1000 CONTINUE
```

C PREENCHIMENTO DE LACUNAS ISOLADAS DE DIREÇÃO

```
1290 DO 1340 IA=2,(NDADOS-1)
```

```
1300 IF(DADA(IA,3).NE.0.0) GO TO 1340
1310 IF(DADA((IA-1),3).EQ.0.0) GO TO 1340
1320 IF(DADA((IA+1),3).EQ.0.0) GO TO 1340
1330 DADA(IA,3)=(DADA((IA-1),3)+DADA((IA+1),3))/2
1340 CONTINUE
```

CC PREENCHIMENTO DAS LACUNAS COM BASE NA ESTATÍSTICA DOS DADOS
EXISTENTES

```
1610 CALL SEED(-1)
1620 DO 1950 IC1=1,NDADOS
1630 IF(DADA(IC1,3).NE.0.0) GO TO 1950
1650 CALL RANDOM(AR)
1660 LK1=INT((100.0*AR)/15.0)+1
1700 CALL RANDOM(AR)
1840 LL1=INT(100.0*AR/5.0)+1
1850 IF(INAD(LL1,LK1).EQ.0) GO TO 1650
1860 DADA(IC1,3)=(LK1*15.0)+7.5
1870 IF(IC1.EQ.1) GO TO 1950
1890 PRINT*,DADA(IC1,1),DADA(IC1,3)
1895 INAD(LL1,LK1)=INAD(LL1,LK1)-1
1950 CONTINUE
1960 DO 1990 I=1,NDADOS
1970 FORMAT(F4.1,F11.2,F8.1)
1980 WRITE(6,1970)DADA(I,1),DADA(I,2),DADA(I,3)
1990 CONTINUE
1995 END
```

APÊNDICE C

ARQUIVO "START" PARA A CALIBRAÇÃO (PERÍODO PARCIAL)

```

*****
*   INPUT FILE START.DAT TO GENESIS VERSION 3.0   *
*****
A----- MODEL SETUP -----A
A.1 RUN TITLE
    CALIBRAÇÃO
A.2 INPUT UNITS (METERS=1; FEET=2): ICONV
    1
A.3 TOTAL NUMBER OF CALCULATION CELLS AND CELL LENGTH: NN, DX
    180  65
A.4 GRID CELL NUMBER WHERE SIMULATION STARTS AND NUMBER OF CALCULATION
    CELLS (N = -1 MEANS N = NN): ISSTART, N
    1  180
A.5 VALUE OF TIME STEP IN HOURS: DT
    3
A.6 DATE WHEN SHORELINE SIMULATION STARTS
    (DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501): SIMDATS
    780815
A.7 DATE WHEN SHORELINE SIMULATION ENDS OR TOTAL NUMBER OF TIME STEPS
    (DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501): SIMDATE
    950815
A.8 NUMBER OF INTERMEDIATE PRINT-OUTS WANTED: NOUT
    0
A.9 DATES OR TIME STEPS OF INTERMEDIATE PRINT-OUTS
    (DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NOUT VALUES): TOUT(I)

A.10 NUMBER OF CALCULATION CELLS IN OFFSHORE CONTOUR SMOOTHING WINDOW
    (ISMOOTH = 0 MEANS NO SMOOTHING, ISMOOTH = N MEANS STRAIGHT LINE.
    RECOMMENDED DEFAULT VALUE = 11): ISMOOTH
    11
A.11 REPEATED WARNING MESSAGES (YES=1; NO=0): IRWM
    1
A.12 LONGSHORE SAND TRANSPORT CALIBRATION COEFFICIENTS: K1, K2
    0.10  0.10
A.13 PRINT-OUT OF TIME STEP NUMBERS? (YES=1, NO=0): IPRINT
    1
B----- WAVES -----B
B.1 WAVE HEIGHT CHANGE FACTOR. WAVE ANGLE CHANGE FACTOR AND AMOUNT (DEG)
    (NO CHANGE: HCNGF=1, ZCNGF=1, ZCNGA=0): HCNGF, ZCNGF, ZCNGA
    1  1  0
B.2 DEPTH OF OFFSHORE WAVE INPUT: DZ
    17.47
B.3 IS AN EXTERNAL WAVE MODEL BEING USED (YES=1; NO=0): NWD
    1
B.4 COMMENT: IF AN EXTERNAL WAVE MODEL IS NOT BEING USED, CONTINUE TO B.9
B.5 NUMBER OF SHORELINE CALCULATION CELLS PER WAVE MODEL ELEMENT: ISPW
    10
B.6 NUMBER OF HEIGHT BANDS USED IN THE EXTERNAL WAVE MODEL TRANSFORMATIONS
    (MINIMUM IS 1, MAXIMUM IS 9): NBANDS
    1
B.7 COMMENT: IF ONLY ONE HEIGHT BAND WAS USED CONTINUE TO B.9

```

- B.8 MINIMUM WAVE HEIGHT AND BAND WIDTH OF HEIGHT BANDS: HBMIN, HBWIDTH
0 0
- B.9 VALUE OF TIME STEP IN WAVE DATA FILE IN HOURS (MUST BE AN EVEN MULTIPLE OF, OR EQUAL TO DT): DTW
3
- B.10 NUMBER OF WAVE COMPONENTS PER TIME STEP: NWAVES
1
- B.11 DATE WHEN WAVE FILE STARTS (FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501): WDATS
720815
- C----- BEACH -----C
- C.1 EFFECTIVE GRAIN SIZE DIAMETER IN MILLIMETERS: D50
0.12
- C.2 AVERAGE BERM HEIGHT FROM MEAN WATER LEVEL: ABH
2
- C.3 CLOSURE DEPTH: DCLOS
4.4
- C.4 ANY OPEN BOUNDARY? (NO=0, YES=1): IOB
0
- C.5 COMMENT: IF NO OPEN BOUNDARY, CONTINUE TO D.
- C.6 TIME BASE IN BOUNDARY MOVEMENT SPECIFICATION(S)?
(SIMULATION PERIOD = 1, DAY = 2, TIME STEP = 3): ITB
1
- C.7 OPEN BOUNDARY ON LEFT-HAND SIDE? (NO=0, YES=1): IOB1
1
- C.8 COMMENT: IF A GROIN ON LEFT-HAND BOUNDARY, CONTINUE TO C.10
- C.9 BOUNDARY MOVEMENT PER TIME BASE ON LEFT-HAND BOUNDARY, IN SYSTEM OF UNITS SPECIFIED IN A.2 (PINNED BEACH => YC1 = 0): YC1
0.0
- C.10 OPEN BOUNDARY ON RIGHT-HAND SIDE? (NO=0, YES=1): IOBN
0
- C.11 COMMENT: IF A GROIN ON RIGHT-HAND BOUNDARY, CONTINUE TO D.
- C.12 BOUNDARY MOVEMENT PER TIME BASE ON LEFT-HAND BOUNDARY, IN SYSTEM OF UNITS SPECIFIED IN A.2 (PINNED BEACH => YCN = 0): YCN
0
- D----- NON-DIFFRACTING GROINS -----D
- D.1 ANY NON-DIFFRACTING GROINS? (NO=0, YES=1): INDG
1
- D.2 COMMENT: IF NO NON-DIFFRACTING GROINS, CONTINUE TO E.
- D.3 NUMBER OF NON-DIFFRACTING GROINS: NNDG
10
- D.4 GRID CELL NUMBERS OF NON-DIFFRACTING GROINS (NNDG VALUES): IXNDG(I)
1 11 19 25 32 52 59 66 73 78
- D.5 LENGTHS OF NON-DIFFRACTING GROINS FROM X-AXIS (NNDG VALUES): YNDG(I)
250 486 425 362 394 713 777 856 854 849
- E----- DIFFRACTING (LONG) GROINS AND JETTIES -----E
- E.1 ANY DIFFRACTING GROINS OR JETTIES? (NO=0, YES=1): IDG
1
- E.2 COMMENT: IF NO DIFFRACTING GROINS, CONTINUE TO F.
- E.3 NUMBER OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES: NDG
4
- E.4 GRID CELL NUMBERS OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES (NDG VALUES): IXDG(I)
85 118 135 181
- E.5 LENGTHS OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES FROM X-AXIS (NDG VALUES): YDG(I)
1074 1670 2665 5747
- E.6 DEPTHS AT SEAWARD END OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES(NDG VALUES): DDG(I)

3.0 2.0 4.0 6.0

F----- ALL GROINS/JETTIES -----F

F.1 COMMENT: IF NO GROINS OR JETTIES, CONTINUE TO G.

F.2 PERMEABILITIES OF ALL GROINS AND JETTIES (NNDG+NDG VALUES): PERM(I)
0.0 0.3 0.00 0.0 0.1 0.1 0.1 0.2 0.05 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0F.3 IF GROIN OR JETTY ON LEFT-HAND BOUNDARY, DISTANCE FROM SHORELINE
OUTSIDE GRID TO SEAWARD END OF GROIN OR JETTY: YG1
250F.4 IF GROIN OR JETTY ON RIGHT-HAND BOUNDARY, DISTANCE FROM SHORELINE
OUTSIDE GRID TO SEAWARD END OF GROIN OR JETTY: YGN
500

G----- DETACHED BREAKWATERS -----G

G.1 ANY DETACHED BREAKWATERS? (NO=0, YES=1): IDB
1

G.2 COMMENT: IF NO DETACHED BREAKWATERS, CONTINUE TO H.

G.3 NUMBER OF DETACHED BREAKWATERS: NDB
5G.4 ANY DETACHED BREAKWATER ACROSS LEFT-HAND CALCULATION BOUNDARY
(NO=0, YES=1): IDB1
0G.5 ANY DETACHED BREAKWATER ACROSS RIGHT-HAND CALCULATION BOUNDARY
(NO=0, YES=1): IDBN
0G.6 GRID CELL NUMBERS OF TIPS OF DETACHED BREAKWATERS
(2 * NDB - (IDB1+IDBN) VALUES): IXDB(I)
7 12 45 53 114 118 140 154 159 181G.7 DISTANCES FROM X-AXIS TO TIPS OF DETACHED BREAKWATERS
(1 VALUE FOR EACH TIP SPECIFIED IN G.6): YDB(I)
700 700 1300 1100 1670.0 1670.0 3320 3680 5687.0 5747.0G.8 DEPTHS AT DETACHED BREAKWATER TIPS (1 VALUE FOR EACH TIP
SPECIFIED IN G.6): DDB(I)
1.0 1.0 2.5 2.5 4.5 2.0 6.5 6.5 11.5 6.0G.9 TRANSMISSION COEFFICIENTS FOR DETACHED BREAKWATERS (NDB VALUES): TRANDB(I)
0.65 0.63 0 0.4 0 0

H----- SEAWALLS -----H

H.1 ANY SEAWALL ALONG THE SIMULATED SHORELINE? (YES=1; NO=0): ISW
1

H.2 COMMENT: IF NO SEAWALL, CONTINUE TO I.

H.3 GRID CELL NUMBERS OF START AND END OF SEAWALL (ISWEND = -1 MEANS
ISWEND = N): ISWBEG, ISWEND
1 180

I----- BEACH FILLS -----I

I.1 ANY BEACH FILLS DURING SIMULATION PERIOD? (NO=0, YES=1): IBF
1

I.2 COMMENT: IF NO BEACH FILLS, CONTINUE TO K.

I.3 NUMBER OF BEACH FILLS DURING SIMULATION PERIOD: NBF
3I.4 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE FILLS START
(DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBF VALUES): BFDATS(I)
801120 810420 920101I.5 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE FILLS END
(DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBF VALUES): BFDATE(I)
810420 950815 950815I.6 GRID CELL NUMBERS OF START OF RESPECTIVE FILLS (NBF VALUES): IBFS(I)
150 1 1I.7 GRID CELL NUMBERS OF END OF RESPECTIVE FILLS (NBF VALUES): IBFE(I)
181 90 90

I.8 ADDED BERM WIDTHS AFTER ADJUSTMENT TO EQUILIBRIUM CONDITIONS

(NBF VALUES): YADD(I)
18.8 24.0 3.44

J----- BYPASSING -----J

J.1 ANY BYPASSING OPERATIONS DURING SIMULATION PERIOD? (NO=0, YES=1): IBP
0

J.2 COMMENT: IF NO BYPASSING OPERATIONS, CONTINUE TO K.

J.3 READ BYPASSING RATES FROM A FILE OR SPECIFY BELOW?
(FILE=1, BELOW=2): IBPF
2

J.4 COMMENT: IF BYPASSING OPERATIONS ARE SPECIFIED BELOW, CONTINUE TO J.8
-- BYPASSING OPERATIONS SPECIFIED IN SEPARATE DATA FILE --

J.5 DATE OR TIME STEP WHEN BYPASS DATA FILE STARTS AND ENDS, RESPECTIVELY
(FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501): QQDATS QQDATE
0 0

J.6 CELL NOS. WHERE BYPASS FILE STARTS AND ENDS, RESPECTIVELY: IQQS, IQQE
0 0

J.7 COMMENT: END OF BYPASS DATA FILE SECTION. CONTINUE TO K.
-- BYPASSING OPERATIONS SPECIFIED IN THIS FILE --

J.8 NUMBER OF BYPASSING OPERATIONS DURING SIMULATION PERIOD: NBP
6

J.9 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE OPERATIONS START
(DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBP VALUES): BPDATS(I)
801120 810701 820601 860825 910401 920701

J.10 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE OPERATIONS END
(DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBP VALUES): BPDAT(E) (I)
810630 811231 831231 870415 910831 950801

J.11 GRID CELL NUMBERS OF START OF RESPECTIVE OPERATIONS (NBP VALUES): IBPS(I)
136 30 30 30 30 30

J.12 GRID CELL NUMBERS OF END OF RESPECTIVE OPERATIONS (NBP VALUES): IBPE(I)
170 60 60 60 60 60

J.13 BYPASSING RATES AS TOTAL AVERAGE VOLUME PER HOUR (CY/HR OR M3/HR,
ACCORDING TO UNITS GIVEN IN A.2) FOR RESPECTIVE OPERATIONS
(NBP VALUES): QBP(I)
66.71 66.71 17.23 18.03 50.0 4.17

K----- COMMENTS -----K

- * ALL COORDINATES MUST BE GIVEN IN THE "TOTAL" GRID SYSTEM
- * ONE VALUE FOR EACH STRUCTURE, TIP ETC. ESPECIALLY IMPORTANT FOR COMBINED STRUCTURES, E.G., TWO DBW'S WHERE THE LOCATION WHERE THEY MEET HAS TO BE TREATED AS TWO TIPS.
- * ANY GROIN CONNECTED TO A DETACHED BREAKWATER MUST BE REGARDED AS DIFFRACTING
- * CONNECTED STRUCTURES MUST BE GIVEN THE SAME Y AND D VALUES WHERE THEY CONNECT
- * IF DOING REAL CASES, THE WAVE.DAT FILE MUST CONTAIN FULL YEARS DATA
- * DATA FOR START OF BEACH FILL IN SPACE AND TIME SHOULD BE GIVEN IN INCREASING/CHRONOLOGICAL ORDER. DATA FOR END OF BEACH FILL MUST CORRESPOND TO THESE VALUES, AND NOT NECESSARILY BE IN INCREASING ORDER.
- * DON'T CHANGE THE LABELS OF THE LINES SINCE THEY ARE USED TO IDENTIFY THE LINES BY GENESIS.

----- END -----