

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

CALIBRAÇÃO E APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO
GENESIS NAS PRAIAS DE TRAMANDAÍ E IMBÉ-RS.

CARLA DE ABREU D'AQUINO

ORIENTADOR: ELÍRIO E. TOLDO JÚNIOR
CO-ORIENTADORA: NARA ROSAURO

BANCA EXAMINADORA: Lauro Julio Calliari
Luis Emilio S. Brito
Pedro Cherem de Abreu

Dissertação de Mestrado
apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em
Geociências

Ao meu amor, Fábio
Aos meus pais, Laerzio e Rosane

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela possibilidade de execução deste estudo. Aos professores e funcionários do Centro de Estudo Costeiro e Oceânico (CECO) e do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). Aos meus orientadores Elírio Toldo Júnior e Nara Rosauero, pela paciência e atenção para comigo.

Agradeço ao professor Carlos A. F. Schettini pelo incentivo a este mestrado em todas as etapas, e ao professor Pedro F. C. de Abreu, pelos vários finais de semana de simulações do modelo e discussões.

Em especial, queria agradecer a todos os amigos que participaram de uma forma ou de outra desta etapa da vida: Grazi, Sávio, Rodrigo, Wellington, Silvia, Maria, Rita, Ana Carolina, Manica e toda galera do IPH.

Agradeço do fundo do meu coração ao maridão Fábio e aos meus pais. E em especial a Deus, por fazer com que todas as coisas fossem exatamente como deveriam ser.

RESUMO

O modelo numérico GENESIS (*Generalized Model for Simulating Shoreline Change*) é parte de um sistema de modelagem de linha de praia, o SMS (*Shoreline Modeling System*), desenvolvido pelo CERC (*Coastal Engineering Research Center*), U.S.A. É um modelo genérico, determinístico e bi-dimensional, com grande flexibilidade para ser adaptado a costas abertas, arenosas e sujeitas a intervenção humana. Utilizado na previsão da resposta da linha praia as diversas obras costeiras que podem ser implantadas na mesma. Características estas, que fazem dele uma ferramenta indicada para a o estudo costa do Rio Grande do Sul e para o objetivo deste estudo. A aplicação do modelo de evolução de linha praia – GENESIS neste trabalho, tem como objetivos: calibrar o modelo numérico GENESIS para a costa centro norte do Rio Grande do Sul e avaliar seu uso como ferramenta na previsão de impactos ambientais gerados por obras costeiras, Além de reproduzir as condições do modelo físico reduzido de 1965 e comparar os resultados entre as simulações matemática e física. O modelo foi aplicado num trecho de linha de praia da região centro norte do Rio Grande do Sul, nas praias de Tramandaí e Imbé. As quais já foram alvo de estudos anteriores através de modelo físico reduzido, em função do desejo deste município em construir molhes na desembocadura do canal da Laguna de Tramandaí. Para implementação do modelo numérico GENESIS foram utilizados dados das posições da linha de praia em três diferentes anos, coletados pelo CECO/UFRGS, dados de onda coletados pelo ondógrafo do IPH/UFRGS, e diversos dados sobre as praias e sua história, retirados da extensa bibliografia publicada sobre a região de estudo. A calibração do modelo foi realizada através das linhas de praia medidas em 1997 e em 2000. O modelo foi considerado calibrado quando o mesmo conseguiu reproduzir a linha de praia do ano 2000 a partir da linha de 1997, obtendo um erro máximo de 15 m. Foram realizadas simulações que reproduziam as simulações feitas em modelo físico reduzido do IPH em 1965. Através da comparação dos dados de onda utilizados no modelo físico reduzido de 1965 e dos dados de onda coletados pelo ondógrafo em 1996, pudemos observar a importância do uso de um série de dados de onda neste tipo de estudo, bem como, a desenvoltura e limitações do modelo numérico GENESIS na situações geradas.

ABSTRACT

The GENISES model (Generalized Model for Simulating Shoreline Changes) is part of a shoreline modeling system. The SMS (Shoreline Modeling System) developed by CERC (Coastal Engineering Research Center), U.S.A, is a generic model, deterministic and bi-dimensional, with great flexibility to be adapted to sandy open coasts subjected to human interference. It is used on the shoreline reply prediction for several constructions that could be established on this particular coast. These characteristics make it an appropriate tool for the study of the Rio Grande do Sul coast. The application of the shoreline evolution model, GENESIS, in this work has as objectives: to calibrate the numeric model GENESIS for the center north coast of Rio Grande do Sul, and to evaluate its use as a tool to predict the environmental impact produced by coastal constructions as well as reproducing the reduced physical model conditions from 1965 and comparing the results between mathematical and physical simulations. The model was applied in a section of the shoreline of the center north region of Rio Grande do Sul on Tramandaí and Imbé beach. These beaches have been the target of earlier studies through the reduced physical model based on the will of their municipality in constructing jetties on the outfall of the Tramandaí Lagoon channel. For the implementation of the numeric model GENESIS, shoreline position data, gathered in a period of three years by CECO/UFRGS, was used. Wave data gathered by IPH/URGS wavemeter and several data about the beaches and it's history were taken from the vast published bibliography about the study region. The calibration of the model was accomplished through the shoreline measures in 1997 and in 2000. The model was considered calibrated when it was able to reproduce the shoreline of 2000 from the 1997 shoreline, obtaining a maximum error of the 15m. Simulations were achieved reproducing the simulations done in the IPH reduced physical model in 1965. Through the comparison of the physical model and the data gathered by the wavemeter in 1996, we were able to observe the importance of the use of a series of wave data on this kind of study, as well as, the resourcefulness and limitations of the numeric model GENESIS in the situation created.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	5
3.1.1 HISTÓRICO	6
3.1.2 CANAL DA LAGUNA DE TRAMANDAÍ	8
3.1.3 CLIMA E PARÂMETROS METEOROLÓGICOS	11
3.1.4 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS E OCEANOGRAFIA	12
3.1.5 PRESENÇA E OCUPAÇÃO HUMANA	16
3.2 TÉCNICAS DE PREVISÃO	18
3.2.1 MODELO FÍSICO REDUZIDO	19
3.2.2 MODELO NUMÉRICO GENESIS	23
4. METODOLOGIA	34
4.1 MÉTODOS DE ANÁLISE DE ONDAS	34
4.2 DADOS DE ONDA	39
4.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	50
4.4 LINHAS DE PRAIA	53
4.5 MALHA DO MODELO MATEMÁTICO	56
4.6 MALHA PARA CALIBRAÇÃO	57
4.7 MALHA PARA SIMULAÇÃO	58
4.8 ARQUIVOS DE ENTRADA	59
4.8.1 ARQUIVOS SHORL E SHORM	59
4.8.2 ARQUIVO START	59
4.8.3 ARQUIVO WAVES	60
4.9 CALIBRAÇÃO DO MODELO	60
4.10 SIMULAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE MOLHES DO MODELO FÍSICO	62
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1. CALIBRAÇÃO DO MODELO	63
5.2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	68
5.3. SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO MODELO FÍSICO REDUZIDO ...	69
5.4. INSERÇÃO DOS MOLHES	71
5.5 AVALIAÇÃO DO MODELO NUMERICO GENESIS	84
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXO 1	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Litoral centro norte do Rio Grande do Sul, com localização das praias de Tramandaí e Imbé.	2
Figura 2. Vista aérea das praias de Tramandaí e Imbé, localizadas na margem direita e esquerda, respectivamente, do estuário da Laguna de Tramandaí.....	6
Figura 3. Vista aérea da praia de Tramandaí e da reabertura da barra após extensa migração do canal pára NE.	7
Figura 4. Canal da Laguna de Tramandaí (Fonte: Tabajara & Dillenburg, 1997).....	10
Figura 5: Migração da embocadura da canal da Laguna de Tramandaí reproduzida pelo modelo físico reduzido do IPH.....	21
Figura 6: Processo de teste para fixação da embocadura no modelo físico reduzido da IPH.	22
Figura 7. Sistema de coordenadas do modelo numérico GENESIS.	26
Figura 8. Esquema genérico para formulação matemática do modelo (Hanson e Kraus, 1989).	27
Figura 9. Definição do ângulo de quebra das ondas.....	33
Figura 10. Exemplo de um registro de ondas onde estão identificados a altura e o período da onda, pelo método de análise "downcrossing".....	35
Figura 11. Espectro de energia de onda x frequência.....	38
Figura 12. Espectro direcional de onda.....	38
Figura 13. Localização do ondógrafo e demais equipamentos instalados em 1996, em Tramandaí.	40
Figura 14: Esquema do processo utilizado na obtenção dos dados de onda para entrada do modelo.	40
Figura 15. Série de dados adquiridos em 1996 pelo ondógrafo direcional DATAWELL®.	42
Figura 16. Na parte superior observamos o diagrama de ocorrência conjunta entre altura significativa e período de pico para o mês de junho de 1996.....	43
Figura 17. Histogramas da altura significativa: a) dados do arquivo original e b) arquivo depois de preenchido.	46
Figura 18. Histogramas do período de pico: a) dados do arquivo original e b) arquivo depois de preenchido.....	47
Figura 19. Histogramas da direção de pico: a) dados do arquivo original e b) arquivo depois de preenchido.....	48
Figura 20. Rosa de distribuição das direções do arquivo preenchido.....	49
Figura 21. Sistema de conversão do ângulo de incidência das ondas.....	50
Figura 22. Posição das linhas de praia de 1997 (em vermelho) e 2000 (em azul) para a praia de Imbé, ao norte da embocadura do canal da Laguna de Tramandaí.....	54
Figura 23. Malha utilizada para calibração do modelo numérico GENESIS para região centro-norte do Rio Grande do Sul.	57

Figura 24. Malha utilizada para simulação da alternativa de molhes utilizada no modelo físico.....	58
Figura 25. Desenho esquemático da área de estudo e malha utilizada no processo de calibração.	63
Figura 26. Modelo da área de estudos segundo a configuração informada no arquivo START.....	64
Figura 27. Exemplo de duas posições de linha de praia obtidas durante o processo de calibração do modelo (c01 e c14).	65
Figura 28. Modelo calibrado. A linha calculada c20 foi a que melhor se ajustou à linha final conhecida.....	66
Figura 29. Diferença entre a linha calculada e a linha final conhecida.....	67
Figura 30. Taxa média de transporte de sedimentos longitudinal resultante que atravessam a parede da célula em m ³ /ano.....	68
Figura 31. Desenho esquemático da área de estudo e malha utilizada na configuração do arquivo START.....	69
Figura 32. Área de estudo segundo o arquivo START preparado para simulação das condições do modelo físico reduzido.....	70
Figura 33. Desenho esquemático da área de estudo com a inserção dos molhes retos e paralelos.....	71
Figura 34. Área de estudos segundo o arquivo START preparado para o modelo físico reduzido com a presença dos molhes na embocadura.	72
Figura 35. Simulação das condições do modelo físico reduzido, tempo de simulação: 4 anos – ondas do modelo físico.	73
Figura 36. Diferença entre a linha de praia inicial e final após a simulação – ondas do modelo físico.	73
Figura 37. Simulação para 10 anos, ondas do modelo físico reduzido.	75
Figura 38. Diferença entre a linha inicial e a calculada para 10 anos de simulação – ondas do modelo físico.....	75
Figura 39. Linhas de praia para 4 anos e para 10 anos – ondas de 1996... 76	
Figura 40. Simulação para 4 anos com a série dos dados de onda de 1996.	77
Figura 41. Diferença entre as linhas inicial e calculada, para 4 anos, dados de 1996.....	77
Figura 42. Sobreposição das linhas calculadas nas simulações de 4 anos para o arquivo de ondas do modelo físico e da série de ondas de 1996.	78
Figura 43. Foto ilustrativa da área de estudo com a posição dos molhes convergentes.	79
Figura 44. Desenho esquemático da área de estudo com os molhes segundo a configuração do modelo.	79
Figura 45. Molhes convergentes segundo a saída gráfica do modelo numérico GENESIS.	80
Figura 46. Simulação com molhes convergentes para 4 anos com as ondas do modelo físico reduzido.	81
Figura 47. Diferença entre a linha calculada e a linha inicial – ondas do modelo físico.	81
Figura 48. Simulação dos molhes convergentes com a série de dados de ondas de 1996.	82

Figura 49. Diferença entre a linha calculada e a linha inicial – ondas de 1996.	83
Figura 50. Sobreposição da linha calculada com as ondas do modelo físico e da linha calculada com a série de ondas de 1996, para um período de 4 anos.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo dos principais parâmetros e considerações do modelo físico reduzido para a praia de Tramandaí.....	22
Tabela 2. Valores médios e desvios padrão mensais dos parâmetros de onda para o ano de 1996, série original, onde H_s é a altura significativa, θ é a direção e T_p , corresponde ao período de pico.	42
Tabela 3. Valores médios e desvios padrão mensais dos parâmetros de onda para o ano de 1996, onde H_s é a altura significativa, θ é a direção e T_p , corresponde ao período de pico.	44
Tabela 4. Combinações dos diferentes valores de K_1 e K_2 utilizados no processo de calibração do modelo numérico GENESIS para as praias de Imbé e Tramandaí.	61
Tabela 5. Transporte resultante de sedimentos calculado para a região de Tramandaí e Imbé.	69

1. INTRODUÇÃO

As praias são um dos ambientes mais procurados na atualidade, tanto para lazer quanto por pessoas que desejam se estabelecer em locais com maior qualidade de vida. Segundo Bird (1996), as praias podem ser definidas como depósitos inconsolidados de areia ou cascalho e ocorrem em todas as linhas de praia sedimentares expostas a ondas (Short 1999), sendo as áreas mais dinâmicas da zona costeira (U.S.Army, 1984).

As praias podem ser classificadas segundo seu estado morfodinâmico, associado a diferentes regimes de onda. Esta classificação foi proposta por Wright & Short (1984) que divide-as em refletivas (quando combinam menor energia e sedimentos mais grossos), intermediárias (energia maior do que as refletivas) e dissipativas (alta energia).

A costa do Rio Grande do Sul é caracterizada por uma extensa faixa arenosa contínua, praticamente retilínea, sem reentrâncias e com poucas interrupções, sendo uma praia oceânica exposta, marcada pela atuação das ondas e ventos e com um regime de micro marés. De toda esta extensão de costa a cidade de Tramandaí é um dos balneários mais importantes do litoral norte e foi a região estudada neste trabalho (Figura1). Dividindo os municípios de Imbé (ao norte) e Tramandaí (ao sul) está o canal da Laguna de Tramandaí. Na sua margem esquerda está localizado o trapiche da Petrobrás e uma importante colônia de pescadores.

Por ser uma região bastante procurada, há muito que se pensou na construção de molhes para fixação da posição e profundidade da barra da Laguna de Tramandaí. Um projeto chegou a ser proposto em 1960.

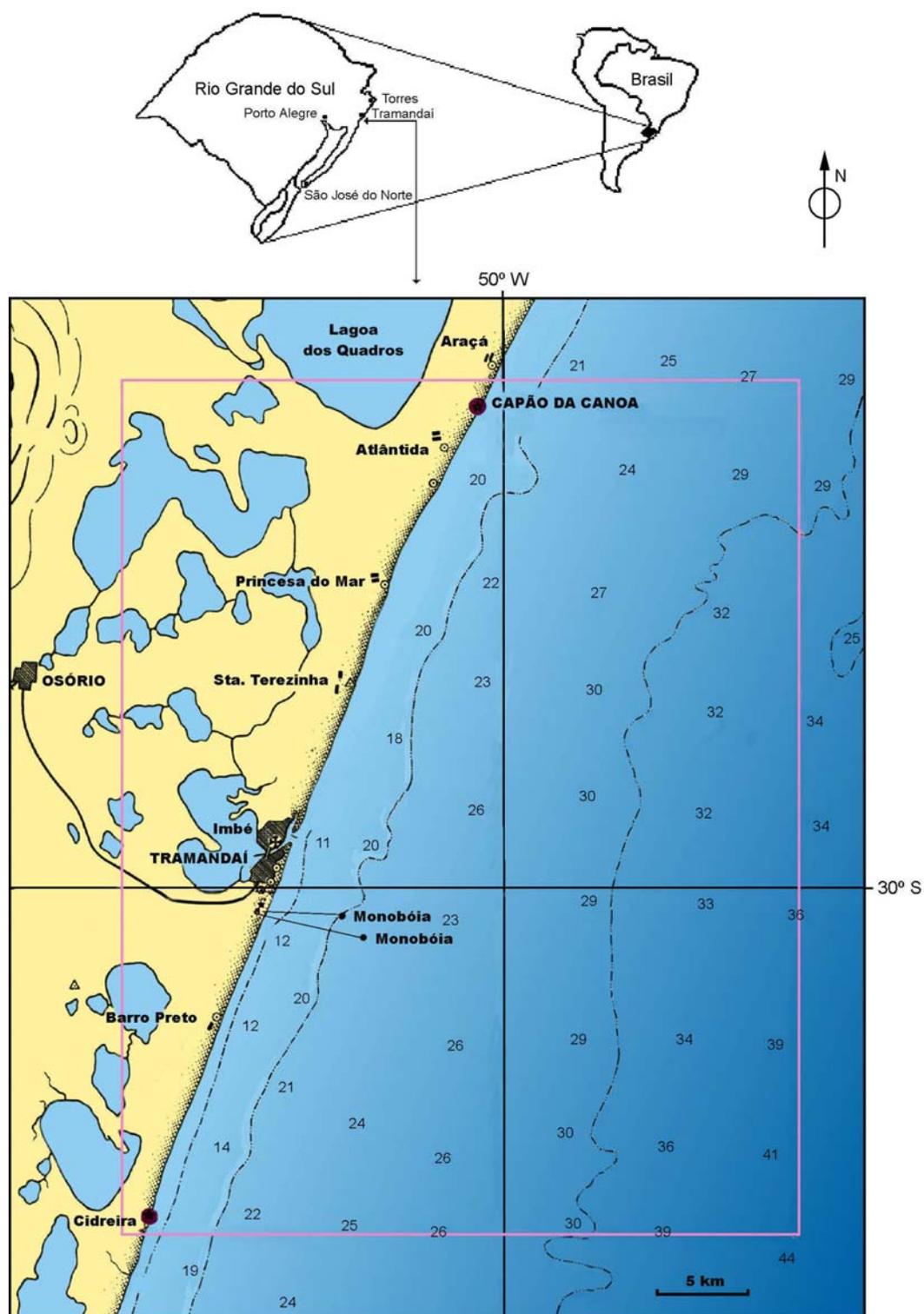


Figura 1. Litoral centro norte do Rio Grande do Sul, com localização das praias de Tramandaí e Imbé.

Como as obras costeiras são intervenções humanas no equilíbrio dinâmico de uma região, é importante considerar o impacto da obra durante o planejamento do mesmo. Os modelos de previsão podem ser importantes aliados no direcionamento de soluções que causem o mínimo de impacto.

Para a região de Tramandaí e Imbé, uma alternativa de previsão do impacto de uma obra já foi utilizada em 1965, através da implantação de um modelo físico no Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, com o objetivo de investigar os efeitos da construção dos molhes na desembocadura do canal da Laguna de Tramandaí e, através dos resultados obtidos naquelas simulações, foi desaconselhada a execução do projeto.

Os modelos físicos são bastante limitados e demandam muito tempo e alto custo de execução. Já os modelos numéricos para previsão da evolução da linha de praia, têm-se mostrado uma ferramenta poderosa no planejamento dos projetos localizados na região litorânea, devido a sua praticidade e baixo custo, podendo ser rodado em PCs comuns, além de considerarem uma quantidade maior de variáveis.

O modelo numérico GENESIS (Generalized Model for Simulating Shoreline Change) é parte de um sistema de modelagem de linha de praia, o SMS (Shoreline Modeling System). É um modelo genérico, determinístico e bi-dimensional, com grande flexibilidade para ser adaptado a costas abertas, características que fazem dele uma ferramenta indicada para a costa do Rio Grande do Sul e para o objetivo deste estudo.

Com isso, e considerando também a importância econômica da região e a disponibilidade de dados na mesma, mostraremos no presente trabalho a calibração e aplicação do modelo nas praias de Tramandaí e Imbé, RS.

2. OBJETIVOS

Calibrar o modelo numérico GENESIS para a costa centro norte do Rio Grande do Sul e avaliar seu uso como ferramenta na previsão de impactos ambientais gerados por obras costeiras.

Reproduzir as condições do modelo físico reduzido de 1965 e comparar os resultados entre as simulações matemática e física.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A zona costeira do Rio Grande do Sul é caracterizada por uma extensa planície arenosa litorânea, com orientação geral NE-SW ao longo de seus quase 630 Km de costa. É constituída predominantemente por depósitos arenosos de origem praial, Lagunar e eólico (Villwock, 1972). A plataforma continental adjacente é extensa e caracterizada por uma grande regularidade em seus elementos morfológicos, com largura aproximada de 125 Km e com gradiente da ordem de 1:1000 (Urien *et al*, 1973). Esse litoral pode ser classificado como dominado por ondas de moderada a alta energia e por ondas de tempestade (Toldo Jr. *et al*, 1996).

Essa extensa praia arenosa possui apenas quatro importantes canais que interrompem sua continuidade, que correspondem ao Arroio Chuí, no limite sul do estado, ao canal de Rio Grande, única ligação da Lagoa dos Patos com o mar, ao canal da lagoa de Tramandaí e, no extremo norte do estado junto à cidade de Torres, à foz do Rio Mampituba (Tomazelli e Villwock, 1992).

O estuário de Tramandaí, que foi o foco do nosso estudo, está localizado na porção centro norte do estado. A Figura 2 mostra o canal da Laguna de Tramandaí e suas praias adjacentes, Imbé ao norte e Tramandaí ao Sul. Podemos observar que são praias bem representativas das características morfológicas das praias do litoral gaúcho.



Figura 2. Vista aérea das praias de Tramandaí e Imbé, localizadas na margem direita e esquerda, respectivamente, do estuário da Laguna de Tramandaí.

3.1.1 HISTÓRICO

Saraiva (1990), faz uma pequena descrição da dinâmica da barra antes de sua fixação: “antes da construção do guia corrente de Imbé, a tendência natural da embocadura do canal era avançar em direção nordeste. O comprimento do rio aumentava uns 3 ou 4 Km. À medida que o rio se deslocava, diminuía a profundidade na embocadura. Quando ocorria esse fenômeno, o canal se lançava ao mar tão obliquamente quanto ia perdendo sua força de vazão. O mar em sua constante luta para formar a praia, conseguia obstruir a saída do canal. Fechava-se a barra. Esse fenômeno repetia-se periodicamente. Lembram-se antigos moradores de haver assistido à reabertura da barra em 1937 e em 1948” (Figura 3).



Figura 3. Vista aérea da praia de Tramandaí e da reabertura da barra após extensa migração do canal para NE.

Na costa, o transporte litorâneo tende a manter a continuidade da praia, fechando as embocaduras, e os escoamentos fluviais tendem a manter as profundidades das embocaduras; são, portanto, tendências opostas. Este fenômeno foi muito bem descrito no Relatório Geral sobre o estudo em modelo reduzido para regularização da embocadura do rio Tramandaí em 1965 (Motta, 1965).

O resultado do encontro entre estas duas tendências contrapostas é a formação de barras arenosas em frente à embocadura, e o desenvolvimento de um sistema de transpasse que permite ao transporte litorâneo alimentar a praia a sotamar da barra. Outra consequência deste embate entre o transporte litorâneo e os escoamentos fluviais, é a migração da embocadura no sentido do transporte litorâneo dominante. No caso de Tramandaí, de sudoeste para nordeste.

Como foi descrito por Saraiva (1990), este último resultado é o que ocorria na região, porém, Tramandaí já tinha na atividade pesqueira uma fonte de renda - era interesse do DEPREC (Departamento Estadual de Portos, Rios e Canais), atual SPH (Superintendência de Portos e Hidrovias) construir um porto de pesca em Tramandaí e manter a profundidade da embocadura em 4 m. Outro forte interessado na regularização da situação da embocadura era a Petrobrás, que necessitava de um acesso para o terminal oceânico de abastecimento - monobóias, precisando de um canal com profundidade mínima de 2,5 m.

Assim, em 1961 o DEPREC construiu um guia corrente ao longo da margem esquerda da embocadura (Figura 2). Desde então a embocadura não mais migrou, mantendo-se fixa. Durante todo o período após esta obra na embocadura, as praias de ambos os lados mantiveram-se em equilíbrio, o que indicava a formação de uma barra em frente à embocadura, servindo de ponte para o transporte litorâneo, e assegurando assim a alimentação da praia a norte da embocadura, a praia de Imbé.

Para realização desta obra costeira foram necessários estudos sobre a região, realizados pela UFRGS, através de um convênio entre o IPH/UFRGS e a Petrobrás. Desde então a região de Tramandaí tem sido foco de diversos estudos, assim como toda a costa do Rio Grande do Sul.

3.1.2 CANAL DA LAGUNA DE TRAMANDAÍ

A Laguna de Tramandaí está localizada na região norte da planície costeira do estado do Rio Grande do Sul. Nesta região, a planície costeira apresenta uma largura média de 20 Km, e está delimitada pelas escarpas da Serra Geral (Planalto), a oeste, e pelo Oceano Atlântico a leste (Dillenburg, 1996). A origem e desenvolvimento da Laguna de Tramandaí vinculam-se aos processos geológicos associados aos eventos holocênicos de transgressão e regressão do nível do mar, responsáveis pelo desenvolvimento do sistema

deposicional Laguna/barreira IV (Tomazelli, 1990; Tomazelli e Villwock, 1991; Dillenburg, 1994).

O canal da Laguna de Tramandaí (Figura 4) consiste de um pequeno canal de ligação entre a Laguna de Tramandaí e o mar. Tem aproximadamente 1000 m de comprimento e 100 m de largura. Várias outras lagoas, de diferentes tamanhos, interligam-se, com a Laguna de Tramandaí formando uma rede de drenagem através de canais e áreas alagadiças (Almeida *et al*, 1997).

A principal fonte de sedimentos que aportam na Laguna de Tramandaí é formada por depósitos costeiros cenozóicos presentes nos terrenos marginais ao corpo Lagunar predominando o material arenoso marinho e o eólico (Martins, 1967; Vilwock, 1978; Tomazelli, 1990 e Tabajara, 1994), redistribuídos pela dinâmica Lagunar ao longo de sua história geológica (Tabajara e Dillenburg, 1997).

Conforme Tabajara e Dillenburg *op cit*, os sedimentos finos (silte e argila) trazidos principalmente pelos rios que drenam a Serra Geral, têm seu fluxo direcionado para sul por um conjunto interligado de lagoas costeiras; e ingressam no corpo marinho através do canal da Laguna de Tramandaí. Todavia, os dados disponíveis indicam que boa parte da carga de sedimentos finos é retida nas Lagunas (Dillenburg, 1994), e também pela entrada de sal através do canal da Laguna de Tramandaí, que acelera a sedimentação dos finos no interior da laguna (Tabajara e Dillenburg, 1997).

A sedimentação na área da embocadura lagunar é controlada por correntes bidirecionais produzidas pelas marés e vazões fluviais, ambas mais atuantes nos canais de maré delimitados pela isóbata de 2 metros (Tabajara e Dillenburg, 1997). Embora o canal apresente uma vazão significativa, que mantém a sua profundidade, quando penetra no mar parece não influenciar de forma significativa o transporte longitudinal de sedimentos. A presença de um banco de areia à frente da embocadura indica o papel hidrodinâmico da

mesma e facilita o transporte longitudinal, funcionando como uma ponte para os sedimentos.

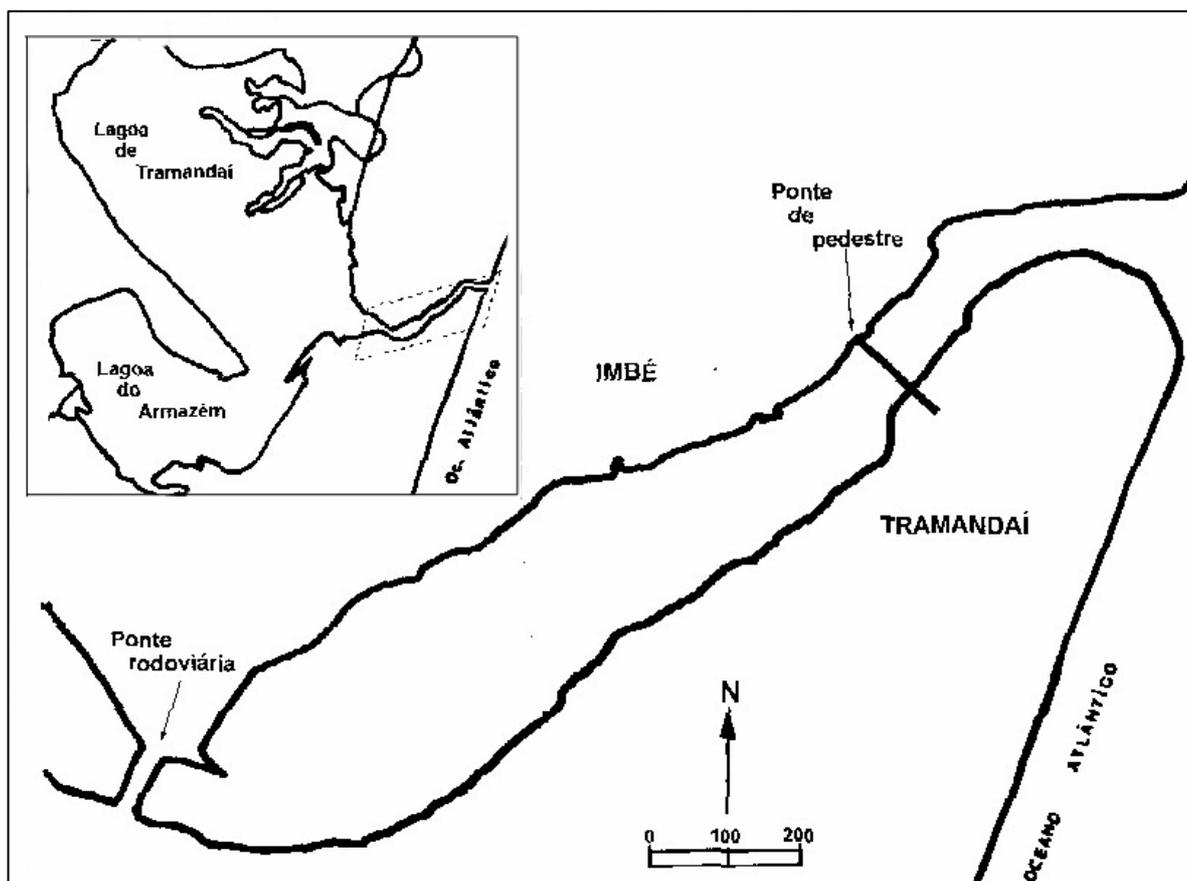


Figura 4. Canal da Laguna de Tramandaí (Fonte: Tabajara & Dillenburg, 1997).

Infelizmente a dinâmica sedimentar entre o canal da Laguna de Tramandaí e o mar ainda não foi suficientemente estudada, ficando comprometido o estabelecimento de uma exata relação entre eles a nível mais quantitativo.

3.1.3 CLIMA E PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

Segundo Machado (1950), o litoral norte do Rio Grande do Sul tem seu clima determinado pela Serra do Nordeste e se apresenta mais chuvoso e mais quente que o litoral sul. A região sul do Brasil, de forma geral, é caracterizada por apresentar uma circulação atmosférica dominada pela ocorrência de sistemas frontais.

Os Sistemas Frontais são as perturbações atmosféricas de maior importância para o clima do sul do Brasil e para a geração de tempestades oceânicas. Originários de ondas baroclínicas de latitudes médias, estão imersos nos ventos de oeste. Geralmente após cruzarem os Andes propagam-se de sudoeste para nordeste, ao longo da costa leste da América do Sul, onde chegam a atingir latitudes tropicais (Nobre *et al*, 1986)

Hasenack e Ferraro (1989) estudaram o clima do Rio Grande do Sul. Segundo os autores, na primavera-verão, quando a insolação é mais intensa no Hemisfério Sul e o Anticiclone Subtropical semipermanente do Atlântico Sul está mais deslocado para sul, a área de Tramandaí e Imbé recebem influência da borda instável deste. Os ventos são predominantemente de nordeste e as precipitações são freqüentes. No outono-inverno quando o anticiclone está mais deslocado para norte, a área passa a receber Ciclones e Anticiclones migratórios polares. À medida que se deslocam em direção norte-nordeste instabilizam-se gerando precipitações do tipo frontal. O clima da região é subtropical úmido, onde as temperaturas médias do mês mais quente superam os 22 graus e as do mês mais frio situam-se entre -3 e 18 graus.

O regime de ventos da costa do Rio Grande do Sul é controlado basicamente por dois centros de alta pressão: o Anticiclone do Atlântico Sul – mais ativo durante os meses de verão e o Anticiclone Móvel Polar – mais influente durante os meses de inverno (Tomazelli, 1993), os quais determinam a predominância de ventos do quadrante NE nos meses de primavera e verão, e dos ventos de W-SW nos meses de inverno. Segundo

Tomazelli (1990), análises de ventos caracterizam a região como de alta energia e de baixa variabilidade direcional.

Segundo Homsí (1978), a frequência média mensal dos sistemas frontais que se formam na costa sul brasileira, é maior no inverno, com cinco frentes por mês, de duração média de três dias, decrescendo para duas frentes durante o verão, com uma duração média de cinco dias.

3.1.4 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS E OCEANOGRAFIA

Na área de estudo, o setor praias se caracteriza pela grande homogeneidade e continuidade lateral das feições morfológicas. Weschenfelder (1996) determinou que os sedimentos são essencialmente quartzosos, com grãos bem arredondados e pertencentes à classe textural de areias finas. O sedimento do sistema praias é caracterizado por tamanhos de areia fina a muito fina na praia e antepraia (Gruber e Nicolodi, 1998). A homogeneidade das características e das variações morfológicas é atribuída ao fato de serem praias próximas, sujeitas basicamente ao mesmo regime hidrodinâmico, sem uma variação granulométrica significativa e uma plataforma continental praticamente homogênea Weschenfelder *et al* (1997).

A geomorfologia da barreira atual apresenta dunas com aproximadamente 400 m de largura e 3 m de altura, frente a uma vasta seqüência de cordões litorâneos regressivos de menor elevação, representando o estoque sedimentar acumulado durante o Holoceno (Tomazelli, 1990; Villwock, 1984; Tomazelli e Villwock, 1992).

A praia de Tramandaí ocupa a faixa litorânea numa extensão de 1,8 Km desde a desembocadura do canal da Laguna de Tramandaí em direção ao sul. Corresponde a uma zona praias integrante da planície arenosa litorânea constituída predominantemente de depósitos arenosos. A taxa sedimentar anual é baixa. Os sedimentos trazidos pelos estuários são aprisionados, em sua maioria, nas lagoas costeiras (Alvarez *et al*, 1983).

Tramandaí apresenta-se como uma praia intermediária a dissipativa, em decorrência das seguintes características: praia de areia fina, com baixos gradientes, extensas, com ondas com alturas de quebra (H_b) entre 1,0 a 1,9 m, período (T) entre 6,6 e 12,3 s e parâmetro escalar da zona de surfe (ϵ) maior que 22. As ondas apresentam arrebentação deslizante a mergulhante as quais dissipam-se progressivamente através da extensa zona de surfe até alcançar a face praial com alturas bastante reduzidas (Toldo *et al*, 1993a).

A praia de Imbé comporta-se como intermediária e dissipativa em decorrência dos seguintes aspectos morfodinâmicos: são praias constituídas de areia fina, exibem baixos gradientes e parâmetros morfodinâmicos muito semelhantes à praia de Tramandaí (Toldo *et al*, 1993a; Toldo *et al*, 1993b).

Os parâmetros morfodinâmicos observados na praia de Imbé mostram relação direta com a variabilidade das ondas e, principalmente, com as características morfológicas da praia e plataforma interna (Toldo *et al*, 1993a). Constata-se a tendência bisazonal das características morfológicas do setor praial, condicionadas preponderantemente pela variabilidade no comportamento hidrodinâmico do sistema. A bisazonalidade é evidenciada na predominância do perfil de acreção no verão, e ao perfil de erosão no inverno (Whesenfelder *et al*, 1997). Os altos valores do desvio padrão para os parâmetros morfométricos refletem uma região costeira dinâmica, tendendo constantemente ao equilíbrio em resposta às variações impostas pelo sistema, principalmente às mudanças nas condições hidrodinâmicas (Whesenfelder *et al*, 1997).

Tramandaí e Imbé apresentam uma declividade média do perfil praial variável entre 1/20 e 1/40. Evidências do processo erosivo são observadas nas partes mais elevadas do perfil, onde ocorrem escarpas de abrasão e marcas de ravinamento (Alvarez *et al*, 1983). Gruber *et al* (2000) observaram que estoques de sedimentos subaéreos erodidos durante os eventos de tempestades são recuperados posteriormente durante os eventos normais

de energia de ondas. Para estes autores, a análise comparativa entre os perfis estimados indica que estes sistemas praias se encontram em equilíbrio, ajustados a praias dissipativas.

Segundo Almeida *et al* (1993) a energia moderada das ondas proporciona um perfil de acreção, condicionado principalmente pela energia da ondulação tipo “swell”; a formação do perfil de erosão estaria condicionado a ocorrência de ondas mais elevadas no inverno, e/ou a ondas de tempestades.

Wenchender *et al* (1997) realizou levantamentos com alta frequência que revelam que a face praial apresenta um perfil mutante, modificando-se constantemente para atingir o perfil de equilíbrio dinâmico que deriva basicamente da inter-relação entre as partículas sedimentares disponíveis e o regime hidrodinâmico atuante. Os altos valores do desvio padrão da largura do pós-praia, caracterizam praias móveis e suscetíveis a episódios constantes e significativos de erosão - acreção (Short & Hesp, 1982). A presença de 4 a 5 linhas de arrebenção e linhas de cristas descontínuas indica um fundo ondulado com declividade variável paralelamente à linha de praia (Alvarez *et al*, 1983).

Os dados analisados por Wainer (1963), indicam altura significativa mais freqüente de 1,5 m e período médio de 8 s, valores observados também por Almeida e Toldo (1997). As ondas incidentes no litoral têm duas direções predominantes, NE e SE (Motta, 1969; Tabajara e Martins, 1996). As ondas vindas de NE constituem vagas, originadas pelo vento local com direção NE, o mais freqüente na região. E as ondas de SE, geradas por ação do Anticiclone Móvel Polar, ao largo da costa têm maior período, altura e energia e, conseqüentemente, maior capacidade de transporte de sedimentos (Toldo *et al*, 1993b).

As populares “ressacas” da costa do Rio Grande do Sul são a combinação das ondas com marés meteorológicas, onde o impacto das tempestades

influencia diretamente as características geomorfológicas das praias (Tozzi e Calliari, 2000).

Segundo a classificação de Davies (1980), a região apresenta regime de micro marés, sendo uma costa tipicamente dominada por ondas. A baixa influência de marés astronômicas é compensada pela alta influência de marés meteorológicas, que provocam grandes alterações na morfologia das praias (Calliari *et al*, 1998). Este caráter insignificante das marés astronômicas junto à costa do estado deve-se ao fato de a mesma situar-se próxima a um ponto anfidrômico do Atlântico Sul (Tomazelli e Villwock, 1992).

A profundidade de fechamento ou limite litorâneo (d1) pode ser definida como o limite de influência da zona de arrebentação, ou seja, identifica a fronteira da zona de transporte arenoso longitudinal e transversal ativo, sendo a profundidade para a qual já não ocorrem alterações significativas da cota do fundo (Almeida *et al*, 1999). O mesmo autor ainda define limite oceânico (d2) como sendo a máxima profundidade a partir da qual o transporte de sedimentos sob ação de ondas é praticamente nulo, ou seja, todo transporte arenoso significativo fica restrito a profundidades menores que d2, não ocorrendo a partir daí alterações no fundo. Para Tramandaí, Almeida *et al* (1999), propõe para a profundidade de fechamento (d1) um valor igual a 7,5 m, e para a profundidade do limite oceânico (d2) um valor de 36 m.

Segundo Almeida *et al.*, (1997), a maré prevista em Tramandaí é do tipo mista semi-diurna, com valores de altura da onda máximos e mínimos da ordem de 0,32 e 0,20 m, respectivamente, ao passo que a altura média da maré astronômica é da ordem de 0,30 m. A análise dos registros mostra grandes diferenças entre a maré prevista e a maré registrada, devido a influência dos fatores meteorológicos, principalmente quando da passagem de frentes de baixa pressão que provocam elevações de nível d'água. Estas elevações denominadas de maré meteorológica ou ressacas atingem três vezes o valor dos níveis de preamar normais para a região.

É ainda importante comentar o relevante papel do vento como agente fisiológico na elaboração da paisagem da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Juntamente com as variações relativas do nível do mar, ele é o agente responsável pelos mais significativos processos geomorfológicos que nela atuam. Além de propiciar a formação de um amplo campo de dunas, o vento responde por outros importantes processos como, por exemplo, a geração de ondas locais e correntes marinhas que afetam a deriva litorânea de sedimentos e a configuração das praias, o controle da morfologia dos corpos aquosos costeiros, a criação de lagos rasos e a influência na sedimentação de corpos aquosos, seja pelo suprimento de areia eólica para dentro destes ambientes, ou então, pelo controle de seus regimes de ondas e correntes.

3.1.5 PRESENÇA E OCUPAÇÃO HUMANA

Segundo Moraes (1995), a colonização do Rio Grande do Sul ocorreu de forma mais intensa no interior, o que pode ser sentido até na baixa concentração da população do estado em cidades litorâneas, menos de 5 % (Esteves *et al*, 2000). Porém tem-se observado, principalmente na última década, um aumento da concentração demográfica nos municípios costeiros do estado. Weschenfelder *et al* (1997) observou na região de Imbé, que a planície arenosa encontra-se totalmente urbanizada, tornando as feições morfológicas do campo de dunas frontais condicionada a este processo de urbanização.

Para Weschenfelder *op cit*, o baixo potencial de preservação das feições do campo de dunas frontais e da planície arenosa adjacente é consequência direta do desgaste ambiental a que são submetidas as praias do litoral norte do estado, ocasionado pela acelerada ocupação urbana do espaço geográfico.

Estão associados também a esta acelerada e desordenada urbanização, os processos de erosão costeira como problema erosivo, que segundo Pickey e Thieler (1992), só existe quando o processo de erosão atua sobre áreas ocupadas pelo homem, causando danos aos investimentos por ele efetuados na linha de praia.

Esteves *et al* (2000) classificaram a costa do Rio Grande do Sul em função do atual estado de alteração de suas praias, onde este foi definido a partir das características e distribuição do desenvolvimento urbano e outras atividades antrópicas. Foram definidas 4 Classes: A classe 1, no extremo norte do estado, iniciando no molhe do Rio Mampitupa até Itapeva ao sul, completando 8,4 Km de costa. Das praias presentes neste trecho, 63 % foram consideradas alteradas. A Classe 2, ao sul, inclui os Balneários de Cassino e Querência, compreendendo uma extensão de 11 Km. Nesta faixa, foi observada uma intensa urbanização, sendo que 100% dela foi considerada alterada.

A nossa região de estudo faz parte da Classe 3, na qual estão incluídos 129,6 Km de praias do estado, sendo elas consideradas altamente urbanizadas e alteradas. Esta Classe apresenta 3 segmentos: a) Norte, ao sul da pedra de Itapeva até Dunas Altas; b) Hermenegildo, no extremo sul do estado, 12 Km ao norte da fronteira com o Uruguai; e c) Chuí, um balneário de 900 m que faz fronteira com o Uruguai. O segmento Norte é o mais longo trecho de costa urbanizada do Rio Grande do Sul concentrando a maioria dos centros urbanos costeiros. Cerca de 79 % da extensão de suas praias são urbanizadas. Ainda no estudo de Esteves *et al* (2000), foram encontradas praias predominantemente desabitadas, que foram inseridas na Classe 4.

3.2 TÉCNICAS DE PREVISÃO

Estudos com modelos numéricos são um elemento essencial na maioria das investigações ambientais. Os engenheiros oceânicos dividem seus estudos de modelagem em 3 classes, que seguem: (1) Estudos de modelos hidrodinâmicos, nos quais os movimentos dos fluidos são determinados sobre a área de interesse no ambiente, (2) Estudos de difusão e dispersão, nos quais as conseqüências da movimentação do fluído para o transporte de poluentes, ou seus indicadores, é investigada; (3) Estudos de reações bioquímicas, ou estudos de qualidade da água, no qual a relação entre transporte e difusão dos componentes é modelada. Sendo então chamados de modelos hidrodinâmicos os da primeira classe e modelos de difusão e transporte e modelos de qualidade da água os das últimas duas classes, respectivamente. (Abbott, M.B, 1988)

Segundo Sheng *et al* (1990), um modelo pode ser necessário para as seguintes proposições: investigação teórica, síntese de dados, simulações, análises de impacto e pesquisas de gerenciamento.

Para Motta (1972), todo projeto de engenharia comporta a previsão do comportamento de um sistema a ser construído pelo homem, ou de um sistema natural com o qual ele vai interferir. Assim, um projeto de engenharia será tanto mais seguro, quanto mais se aproximar da realidade o esquema adotado para prever o comportamento da estrutura que se deseja construir ou do sistema que sofrerá a intervenção.

Os meios para prever o comportamento dos sistemas físicos, segundo Motta *op cit*, são: O método analítico, o empírico e o método de previsão por semelhança.

O primeiro consiste em utilizar uma lei geral que permita efetuar previsões dos valores de grandeza com o grau de precisão que se deseja. Nesse caso, quando a previsão acontece a partir do manuseio de um esquema matemático constituído por um conjunto de equações que regem o

funcionamento do sistema considerado, opera-se então o uso de um modelo matemático.

O método empírico consiste em construir o sistema de alguma maneira e prever o comportamento futuro a partir de observações apoiadas na hipótese de que as características essenciais não se alterarão. E o terceiro método de previsão consiste em recorrer a observações efetuadas em outro sistema, que se comporte de modo semelhante ao sistema cujo comportamento se quer prever, mas apresente menores dimensões, no qual seja mais fácil introduzir modificações ou variar sob controle os valores das grandezas a serem consideradas. Diz-se então que neste último método descrito estamos trabalhando com modelos físicos.

Trataremos a seguir da aplicação de um modelo físico reduzido na desembocadura da Laguna de Tramandaí, e também da descrição do modelo numérico GENESIS, que será calibrado e aplicado à mesma região.

3.2.1 MODELO FÍSICO REDUZIDO

A inserção de obras costeiras na praia acarreta alterações na dinâmica da mesma e conseqüentes alterações no transporte de sedimentos e mudanças nas ondas incidentes. Após a instalação de qualquer estrutura costeira pode-se esperar a desestabilização de praias próximas ou mesmo distantes do local do projeto, com ocorrência de erosão ou deposição ao longo da praia (Salim, 1998).

Visando avaliar este tipo de impacto foi desenvolvido em 1965 no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) um projeto de investigação dos efeitos da construção de molhes para regularizar a desembocadura do canal da Laguna de Tramandaí, nas praias de Tramandaí e Imbé.

Este projeto consistiu em um modelo físico reduzido das praias de Tramandaí e Imbé, o qual reproduziu 4,5 Km de costa, o fundo do mar até a

batimetria de -15 m e todo o comprimento da desembocadura do canal da Laguna de Tramandaí. O modelo físico foi construído em uma cuba de 500 m², simulando uma área de 7 Km². Ele foi construído à escala horizontal de $1/300$ e vertical de $1/50$.

O modelo foi equipado com um gerador de ondas capaz de produzir ondulações monocromáticas com 20 m de frente e altura máxima de 7 cm. As vazões fluviais foram reproduzidas utilizando-se um vertedor com capacidade para 5 l/s.

O fundo do modelo na embocadura lagunar foi representado fixo; a área marítima, onde foram estudados os fenômenos morfológicos costeiros ligados ao transporte de sedimentos produzidos pelas ondas, representou-se através de fundo móvel. O material de fundo móvel foi constituído por areia de granulometria bastante homogênea, com diâmetro médio de $0,19$ mm, oriundo da própria região costeira de Tramandaí.

A maré, por ser de pequena amplitude, não foi representada no modelo. As correntes litorâneas, afora as geradas pelas ondas, por serem de origens eólica e predominantemente paralelas à linha de praia, ocorrendo em ambos os sentidos, também não foram representadas no modelo.

Neste modelo foi realizada a simulação da migração da desembocadura do canal da Laguna de Tramandaí (Figura 5) e sua fixação (Figura 6), e também de molhes para regularização da mesma. A migração obtida pelo modelo correspondeu à observada na região e serviu como fator de calibração para o modelo. A Tabela 1 resume os parâmetros utilizados no modelo físico.

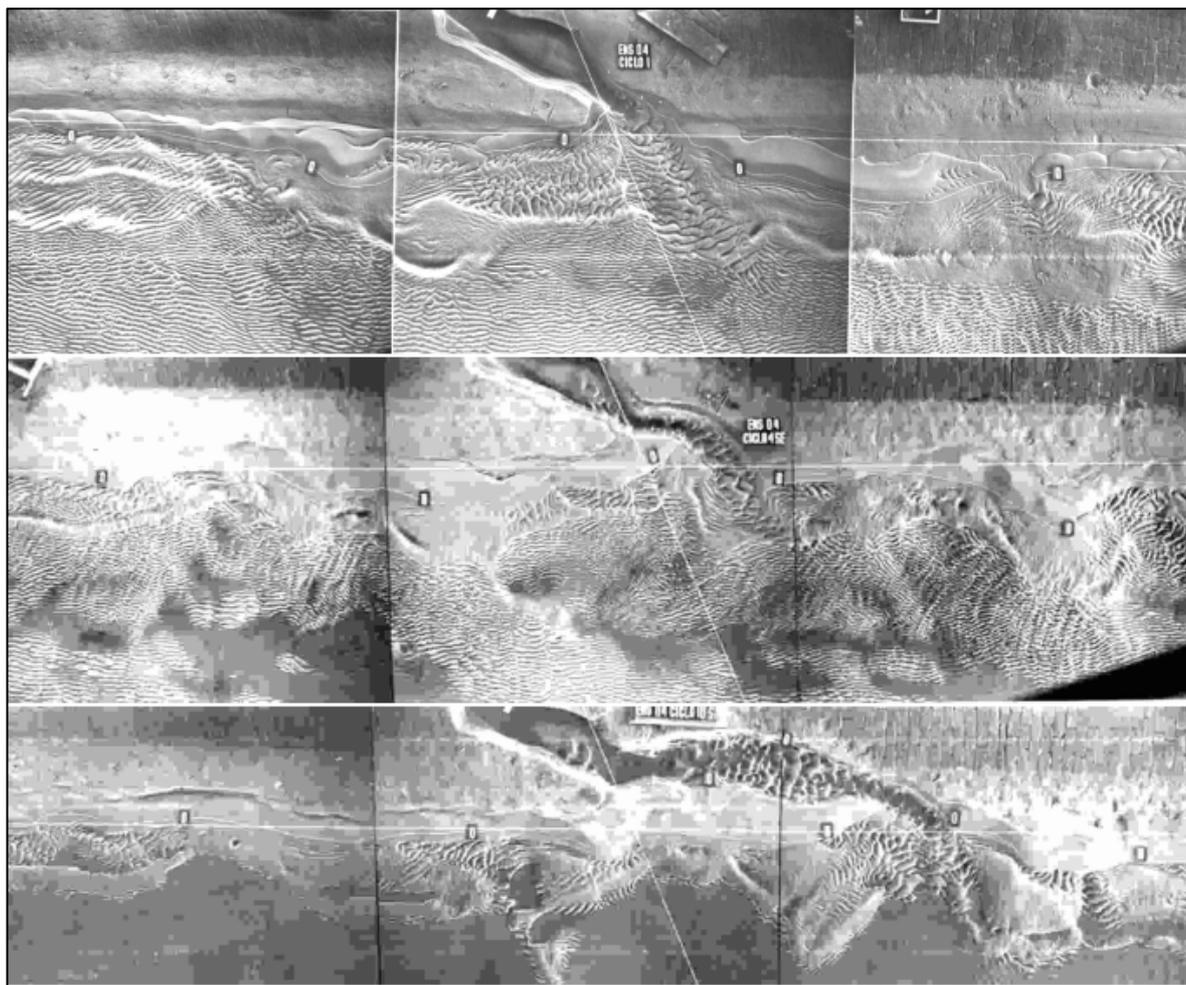


Figura 5: Migração da embocadura da canal da Laguna de Tramandaí reproduzida pelo modelo físico reduzido do IPH.

Quanto à construção dos molhes para regularização da desembocadura, o modelo mostrou uma grande variação da linha de praia, apresentando durante os ensaios uma erosão máxima no protótipo de 160 m (reco da cota zero) para 10 anos na praia a norte da embocadura (Imbé) e um pequeno engorde de 50 m na praia de Tramandaí. Com estes resultados recomendou-se o embargamento da obra de construção dos molhes. Maiores detalhes sobre o modelo físico reduzido de Tramandaí podem ser encontrados em Motta (1965) “Relatório geral sobre o estudo em modelo reduzido para regularização da embocadura do rio Tramandaí”.

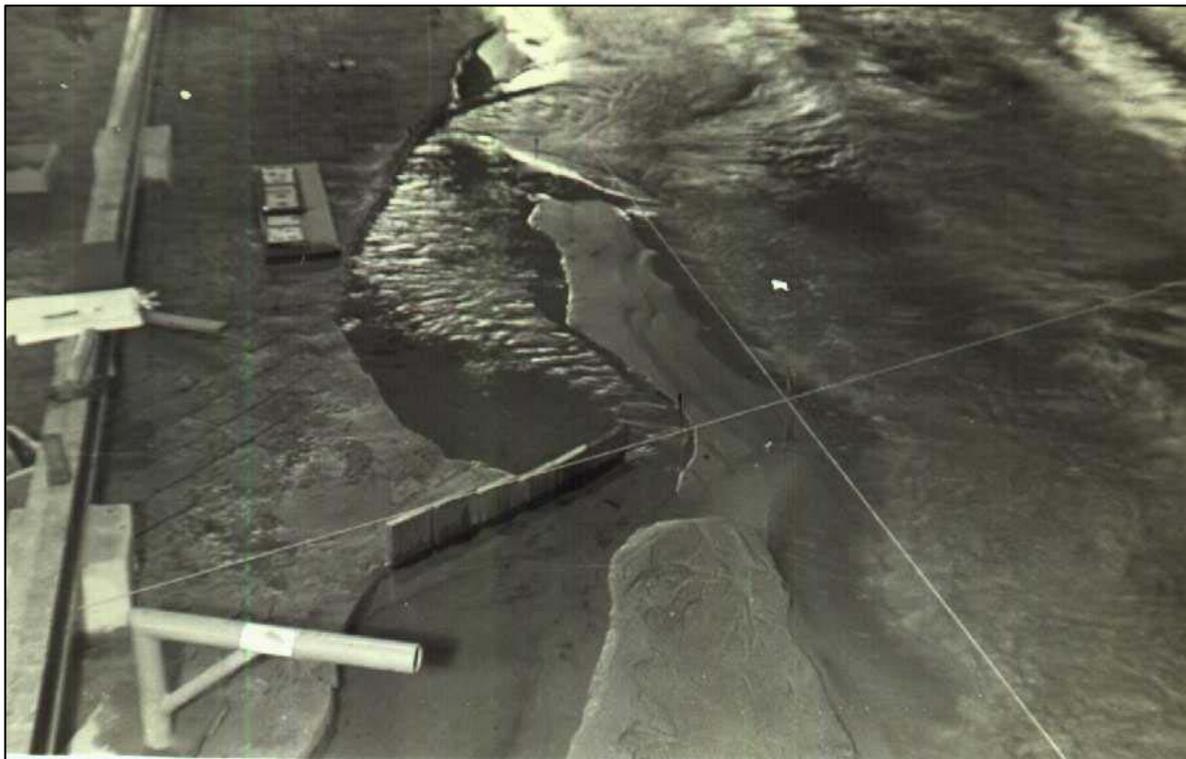


Figura 6: Processo de teste para fixação da embocadura no modelo físico reduzido da IPH.

Tabela 1. Resumo dos principais parâmetros e considerações do modelo físico reduzido para a praia de Tramandaí.

Principais Parâmetros	Valores
Declividade da Praia	3 a 4 % até a profundidade de -1 m e de 0,8 a 1 % além desta profundidade
Granulometria	Areia fina $d_{50} = 0,19$ mm muito homogênea
Vazão fluvial	Média de $130 \text{ m}^3/\text{s}$
Comprimento de praia representado	6,5 Km, com a embocadura no meio
Limite marítimo	-15 m
Limite de terra	Aproximadamente 2 m
Escala horizontal	1/300
Escala vertical	1/50
Escala de tempo	5 ciclos modelo= dois anos protótipo
Variação do nível de água	0 m (sem maré)

Algumas vantagens do uso de modelos físicos são: não há necessidade do estabelecimento de uma equação de previsão; é apenas necessário conhecer as grandezas a considerar, mesmo que se ignore a função que as liga entre si.

As principais desvantagens são: alto custo; necessidade de grande infraestrutura para execução do modelo; limitação do número de variáveis envolvidas (a serem modeladas); problemas gerados pelo próprio método, como as distorções.

3.2.2 MODELO NUMÉRICO GENESIS

A idéia central do modelo vem da teoria de evolução da linha de praia. Pelnard-Considère (1956) apud Lima (2002), foi quem formulou as primeiras teorias de evolução de linha de praia. Ele derivou um modelo analítico de 1-linha de evolução do acúmulo provocado pela obstrução do transporte de areia por um espigão, solução que foi posteriormente verificada em laboratório.

Segundo Salim (1998) a denominação modelo de 1 – linha dada aos modelos de evolução de linha praia é originada pelo fato de que nestes modelos a forma do perfil de praia é mantida constante ao longo de toda a praia. Este perfil é apenas deslocado, em direção à praia ou ao mar, representando a perda ou ganho de volume de sedimentos. Esta teoria se apóia no transporte longitudinal de sedimentos gerado pelas ondas como principal fator controlador das mudanças na linha de praia em longo prazo.

O modelo numérico GENESIS, desenvolvido por Hanson (1987), é parte de um sistema de modelagem de linha de praia, SMS, composto de dois modelos numéricos principais, o GENESIS e o RCPWAVE (Regional Coastal Processes Wave Model). Este sistema derivou dos estudos realizados por Kraus e Harikai (1983), Kraus *et al* (1984), Hanson *et al* (1986), e foi

otimizado mais tarde por Hanson e Kraus (1989). O módulo auxiliar RCPWAVE, desenvolvido por Ebersol *et al* (1986) apud Salim (1998), foi inserido para realizar a propagação das ondas considerando a batimetria real da área modelada.

O modelo de mudança de linha de praia GENESIS parte dos seguintes pressupostos:

- a forma do perfil de praia e seus limites (altura da berma e profundidade ativa) são constantes;
- O sedimento é transportado ao longo da costa pela ação da quebra das ondas;
- Existe uma tendência clara da evolução da linha de praia a longo prazo;

E tem como principais limitações:

- não simula a reflexão de ondas;
- não permite formação de tómbolo;
- não considera as mudanças de nível d'água devido à maré;
- o transporte de sedimentos é somente gerado pelas ondas;

As principais limitações do modelo têm sua origem nas suas próprias considerações (Presti 1994). Isso também foi observado pelos próprios autores Hanson & Kraus (1989). Eles destacam como principais limitações para a aplicação do modelo: a não existência de dados históricos de onda e de posição de linha de praia na maioria das situações; às dificuldades para determinar com precisão a profundidade de fechamento; a transmissividade da energia das ondas pelos quebra-mares; a permeabilidade das estruturas; a não consideração da maré e a má definição das condições de contorno por não haver em geral conhecimento preciso do transporte de sedimentos nesses limites.

Hanson e Kraus *op cit*, recomendam reserva quanto aos resultados apresentados pelo modelo visto que, além do ataque oblíquo das ondas, outros fatores são também responsáveis pelo transporte litorâneo de sedimentos. No entanto, dada a complexidade e variabilidade dos processos costeiros, estes não representados em sua totalidade, e o resultado único apresentado pelo modelo determinístico tem imperfeições (Salim, 1998).

Conforme descrito por Hanson & Kraus (1989) a equação que governa a mudança na linha de praia foi formulada pela conservação do volume de sedimento. O sistema cartesiano de coordenadas considerado tem o eixo Y apontando para águas profundas e o eixo X orientado paralelamente à tendência da linha de costa (Figura 7).

A quantidade Y neste caso denota a posição da linha de praia, e X a distancia ao longo da costa. Assume-se que o perfil praial se movimenta em direção ao mar ou à costa, sem mudar sua forma, quando uma quantidade de areia entra ou sai da seção durante um intervalo de tempo Δt .

A mudança na posição da linha de praia é Δy , o comprimento do seguimento de costa é Δx , e o perfil move-se dentro de uma extensão vertical definida pela elevação da berma (D_B) e profundidade de fechamento (D_C), ambos medidos por um datum vertical (Figura 8).

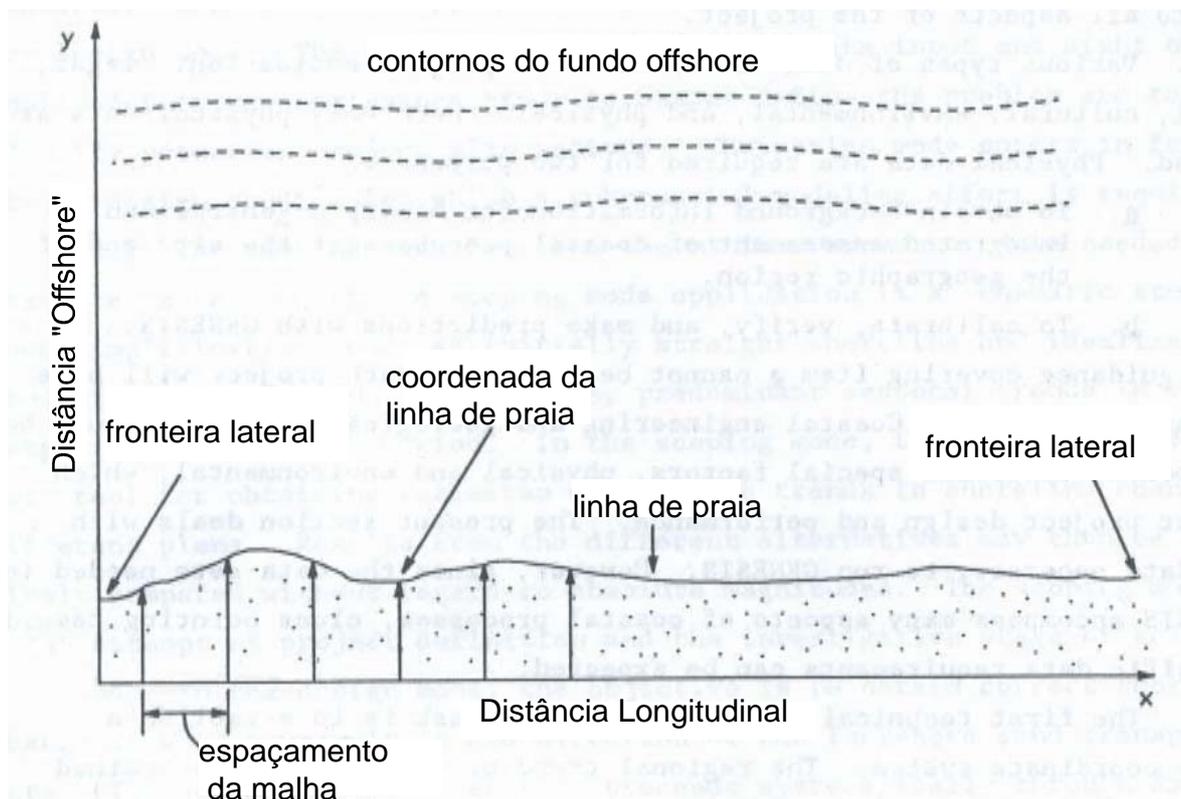


Figura 7. Sistema de coordenadas do modelo numérico GENESIS.

A mudança no volume da seção é $\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C)$ e é determinada pela quantidade líquida de areia que entra ou sai da seção por ambos os lados. Uma contribuição no resultado da mudança de volume ocorre quando uma diferença ΔQ na taxa de transporte longitudinal de areia nas paredes laterais da célula, então a mudança do volume líquido resultante é:

$$\Delta Q \Delta t = (\partial Q / \partial x) \Delta x \Delta t \quad (1)$$

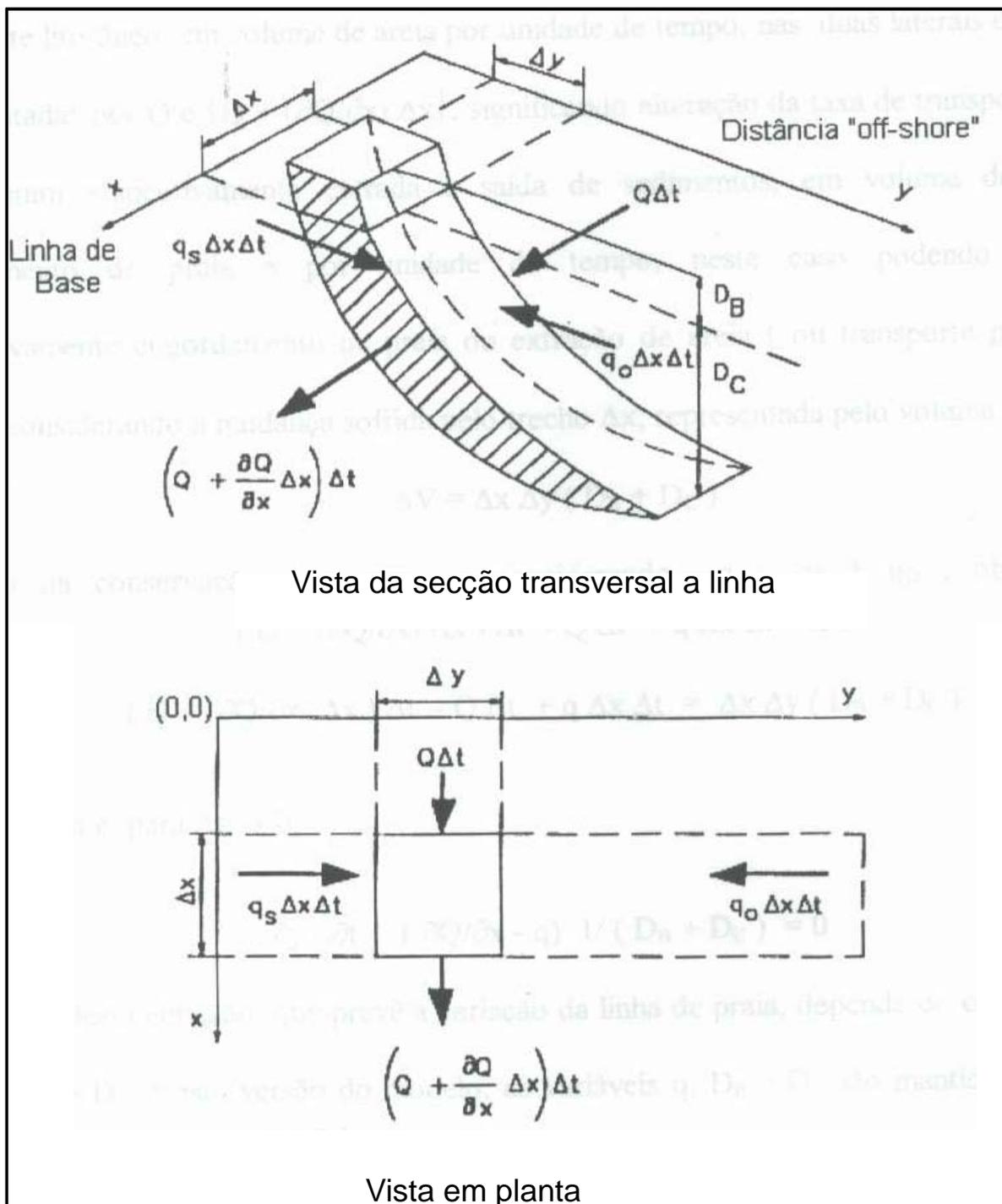


Figura 8. Esquema genérico para formulação matemática do modelo (Hanson e Kraus, 1989).

Outra contribuição pode aparecer quando existe uma linha de fonte ou sumidouro de areia, dada por:

$$q = q_s + q_o. \quad (2)$$

que adiciona ou remove um volume de areia por unidade de praia em direção à terra à taxa q_s ou em direção ao mar a taxa q_o . Isto produz uma mudança de volume $q\Delta x\Delta t$. Adicionando estas contribuições à equação (1), a mudança no volume é dada por:

$$\Delta V = \Delta x\Delta y (D_B + D_C) = (\partial Q/\partial X) \Delta x\Delta t + q\Delta x\Delta t. \quad (3)$$

Rearranjando os termos e levando até o limite, quando $\Delta t \Rightarrow 0$ a equação governante da taxa de mudança da posição da linha de praia é dada por:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left[\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right] = 0 \quad (4)$$

O transporte de sedimentos ao longo da costa tem fundamental importância na estimativa da mudança da linha de praia. O modelo GENESIS utiliza a seguinte fórmula empírica, descrita por Hanson e Kraus (1989):

$$Q = (H^2 C_g)_b \left[a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos \theta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_b \quad (5)$$

Onde H é a altura de onda, C_g é a celeridade de grupo dada pela teoria linear de ondas; b subscrito denota a condição de quebra de onda; θ_{bs} é o ângulo de quebra da onda com a linha de praia local.

Os parâmetros adimensionais a_1 e a_2 são dados por:

$$a_1 = \frac{K_1}{16(\rho_s / \rho - 1)(1 - p)(1.416)^{5/2}} \quad (6)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8(\rho_s / \rho - 1)(1 - p) \tan \beta (1.416)^{7/2}} \quad (7)$$

onde K_1 e K_2 são coeficientes empíricos tratados como parâmetros de calibração; ρ_s é a massa específica da areia; ρ é a massa específica da água do mar; p é a porosidade da areia no fundo e, $\tan \beta$ é a declividade média do fundo para profundidade ativa no transporte de areia ao longo da costa. O fator 1.416 é usado para converter a altura significativa de ondas (H_s), que é requerida pelo GENESIS, em altura de onda média quadrática (H_{rms}).

O primeiro termo da equação 5 corresponde a fórmula do CERC, descrita no U.S.Army (1984) e vale para o transporte longitudinal de areia produzido pela quebra de onda que incide obliquamente a costa.

O segundo termo da equação não faz parte da fórmula do CERC e é utilizado para descrever o efeito de um outro mecanismo gerador de transporte longitudinal de sedimentos, o gradiente de quebra das alturas de onda ao longo da costa $\partial H / \partial x$, e foi introduzido por Ozasa & Brampton (1980).

No GENESIS, o algoritmo que calcula o by-passing de areia requer a profundidade ativa de transporte longitudinal a qual está relacionada à largura da zona de surf, na suposição de que o perfil é uma função da distância ao largo. A profundidade ativa do transporte longitudinal é descrita como:

$$D_{LT} = \frac{1.27}{\gamma} (H_{1/3})_b \quad (8)$$

onde 1.27 é o fator de conversão entre as alturas de onda em um-décimo maiores ($H_{1/10}$) e a altura significativa (H_s); γ razão entre a altura de onda e a

profundidade onde estão quebrando; $(H_{1/3})_b$ altura significativa de onda na quebra.

O GENESIS usa outra profundidade característica, chamada máxima profundidade do transporte longitudinal, calculada:

$$D_{LTo} = (2.3 - 10.9H_o) \frac{H_o}{L_o} \quad (9)$$

onde H_o/L_o é a esbeltez da onda em águas profundas, H_o é a altura significativa de onda em águas profundas e, L_o o comprimento de onda em águas profundas (calculado pela teoria linear de ondas). Esta equação foi inserida por Hallermeier (1983) para estimar uma profundidade limite anual no litoral durante o ataque de ondas extremas. Sabendo que as características de onda variam sazonalmente, esta definição de profundidade máxima de transporte longitudinal vem refletir mudanças no formato médio e inclinação do perfil da praia.

A equação de mudança na linha de praia não precisa de especificação sobre o formato do perfil de fundo já que assume-se que este perfil se movimenta paralelo a ele mesmo. Entretanto, para determinar a posição da quebra de ondas ao longo da costa, e calcular a declividade média do fundo próximo à praia usada na equação do transporte longitudinal, o formato do perfil deve ser especificado. Por esta razão, a forma do perfil de equilíbrio deduzido por Bruun (1954) e Dean (1977) é utilizada. Eles demonstraram que a forma média do perfil para uma grande variedade de praias pode ser representada por:

$$D = Ay^{2/3} \quad (10)$$

Onde D é a profundidade da água; e A é um parâmetro empírico de escala. Este parâmetro depende do tamanho de grão da praia, como foi mostrado

por Moore (1982). O tamanho de grão fornecido ao modelo GENESIS irá produzir um valor de A que mostrará a forma do perfil mais representativo.

O sistema de modelagem GENESIS é composto por dois submodelos maiores. Um deles calcula a taxa de transporte ao longo da costa e a mudança na linha de praia. O outro submodelo é um modelo de ondas que calcula a altura da quebra e o ângulo das ondas ao longo da costa, conforme a informação de onda fornecida ao modelo na profundidade de referência ao largo. Este submodelo é chamado de modelo interno de transformação de ondas.

O modelo interno é aplicável quando o fundo apresenta batimétricas aproximadamente retas e paralelas, e a altura e quebra das ondas são calculadas em pontos da malha ao longo da costa a partir da profundidade de referência dos dados de onda ao largo. Se o modelo externo é utilizado, considera-se a batimetria atual (irregular) da área, iniciando na profundidade de referência ao largo.

A transformação de ondas a partir da profundidade de referência ao largo é inicialmente feita sem considerar a difração em estruturas costeiras. Omitindo-se a difração, existem três incógnitas no cálculo da quebra de onda: a altura da onda, o ângulo e a profundidade de quebra. São necessárias 3 equações para a obtenção desses valores. Essas equações são dadas abaixo, sendo uma delas relativa a altura de quebra de ondas (equação 11), a outra correspondente a um critério de profundidade limite de quebra (equação 12) e a terceira sendo uma equação de refração de onda (equação 14). A equação usada para calcular a altura de quebra das ondas é:

$$H_2 = K_R K_S K_{ref} \quad (11)$$

Onde H_2 é a altura de quebra da onda em um ponto arbitrário ao longo da costa; K_R é o coeficiente de refração; K_S o coeficiente de deslizamento

(quebra) e, H_{ref} é a altura de onda ao largo, na profundidade de referência. As equações que descrevem K_R e K_S são descritas por Hanson e Kraus (1989).

A equação para profundidade limite da quebra de ondas é dada por:

$$H_b = \gamma D_b \quad (12)$$

sendo D_b a profundidade na quebra e γ o índice de quebra que é função do empinamento de onda em águas profundas e da inclinação média da praia (Smith e Kraus in preparation apud Hanson e Kraus, 1989), sendo dada por:

$$\gamma = b - a \frac{H_o}{L_o} \quad (13)$$

com $a = 5 [1 - \exp(-43 \tan\beta)]$ e $b = 1.12 / [1 + \exp(-60 \tan\beta)]$.

E por fim, o ângulo da onda na quebra é calculado pela lei de Snell:

$$\frac{\sin\theta_b}{L_b} = \frac{\sin\theta_1}{L_1} \quad (14)$$

sendo que θ_b e L_b são o ângulo e comprimento de onda no ponto de quebra e θ_1 e L_1 são as quantidades correspondentes no ponto ao largo.

O modelo de refração fornece o ângulo de quebra de onda sem difração θ_b num sistema de coordenadas fixo. Como mostra a Figura 9, o ângulo de quebra da onda necessário para o cálculo da taxa de transporte de areia ao longo da costa (equação 5), e é obtido como:

$$\theta_{bs} = \theta_b - \theta_s \quad (15)$$

onde $\theta_s = \tan^{-1}(\partial y/\partial x)$ é o ângulo da linha de praia com o eixo x. No GENESIS, um ângulo de 0 graus significa onda incidente normal à costa.

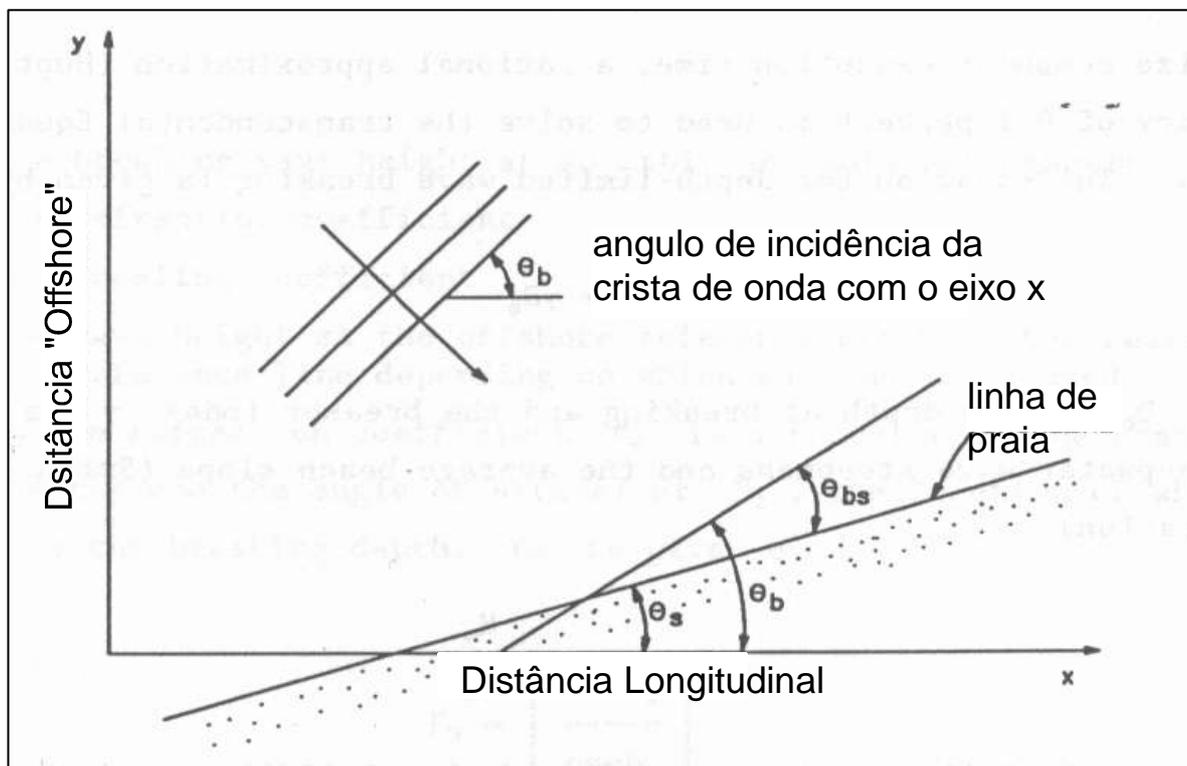


Figura 9. Definição do ângulo de quebra das ondas.

A metodologia utilizada na aplicação dos dados ao modelo é apresentada no capítulo 4.

4. METODOLOGIA

O procedimento necessário nas etapas de preparação dos dados de onda para entrada no modelo numérico GENESIS, preparação das linhas de praia, geração das malhas utilizadas pelo modelo, organização de todas as variáveis para o formato de leitura do modelo e, por fim, a calibração do modelo para a região centro norte do Rio Grande do Sul, será descrito a seguir.

4.1 MÉTODOS DE ANÁLISE DE ONDAS

Dois métodos distintos podem ser usados para análise dos dados de onda, um método direto de cálculo através dos registros e um através da análise do espectro de onda. O primeiro método foi utilizado por Motta em 1963 para estudo das ondas a serem utilizadas no modelo físico reduzido e o outro foi o utilizado neste trabalho.

Quando o registro de ondas é utilizado diretamente, as ondas são inicialmente identificadas através do método de “upcrossing” ou “downcrossing” que consiste em assumir que uma onda começa e termina em pontos nos quais o registro cruza a linha média, no sentido ascendente, ou descendente, respectivamente. Por exemplo, na Figura 10 algumas ondas foram identificadas pelo método de “downcrossing”, e a altura e o período de uma delas está identificada:

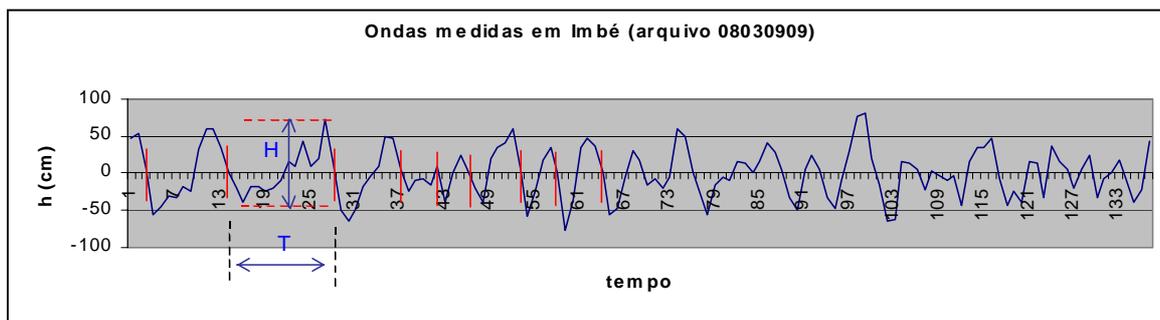


Figura 10. Exemplo de um registro de ondas onde estão identificados a altura e o período da onda, pelo método de análise "downcrossing".

A partir dessa análise obtém-se uma lista de n ondas com suas alturas e períodos. Classificando essas ondas em ordem decrescente de altura, podemos calcular facilmente algumas alturas características de onda que são:

$$H_{\max} = \text{valor máximo de altura de onda registrado} \quad (16)$$

$$H_{1/3} = \text{altura média das } n/3 \text{ maiores ondas do registro} \quad (17)$$

$$H_{1/10} = \text{altura média das } n/10 \text{ maiores ondas do registro} \quad (18)$$

$$H_{\text{rms}} = \text{altura média quadrática} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_i^n H_i^2} \quad (19)$$

$$\bar{H} = \text{altura média} = \frac{1}{n} \sum_i^n H_i \quad (20)$$

Em 1947, Sverdrup e Munk usaram uma descrição estatística do estado do mar introduzindo um parâmetro chamado de altura significativa H_s , que é igual à altura $H_{1/3}$ dada acima. A onda significativa representa a altura de onda que um observador experiente estimaria ao analisar, sem equipamento, o estado do mar. Em termos de energia, a altura significativa é a melhor representação de uma onda irregular, e por isso ela é usada quando se necessita de um valor apenas de altura de onda, como é o caso, por exemplo, da aplicação da equação de conservação de energia para estudo das transformações da onda.

Também podemos calcular os períodos associados a essas ondas, ou seja:

$$T_{\max} = \text{máximo valor de período registrado} \quad (21)$$

$$T_{1/3} = \text{período médio das } n/3 \text{ maiores ondas} \quad (22)$$

$$T_{1/10} = \text{período médio das } n/10 \text{ maiores ondas} \quad (23)$$

$$\bar{T} = \text{período médio} = \frac{1}{n} \sum_i^n T_i \quad (24)$$

Como as ondas do mar seguem uma distribuição estatística conhecida, que é a distribuição de Rayleigh, as alturas de onda acima identificadas podem ser relacionadas entre si, desde que se tenha uma altura de referência. A altura de onda usada como referência é normalmente a H_{rms} , e essas relações são dadas por:

$$H_s = H_{1/3} = 1,416 H_{\text{rms}} \quad (25)$$

$$H_{1/10} = 1,275 H_s = 1,805 H_{\text{rms}} \quad (26)$$

No método de análise manual, como o descrito acima, não é possível obter-se um dado importante, que é a direção da onda. Os primeiros ondógrafos utilizados não eram direcionais, ou seja, eles mediam apenas a oscilação do nível de água, e a direção era obtida visualmente por um observador. Nesses casos, portanto, a única direção que se obtinha era a direção da onda predominante, e esse valor era usado como sendo o período da onda com altura significativa H_s .

Com o advento dos computadores e o desenvolvimento de vários equipamentos confiáveis de registro de onda a tendência passou a ser o uso do espectro de onda para o cálculo dos parâmetros de onda. As ondas irregulares podem ser decompostas em infinitas séries sinoidais de ondas com diferentes períodos (freqüências) e direções. A distribuição da energia de cada onda individual sobreposta às várias freqüências e direções é chamada de espectro direcional de energia de onda.

A altura significativa (H_s) passou a ser estimada a partir do espectro de frequência da onda registrada, usando-se a equação:

$$H'_s = 4 \sqrt{m} \quad (27)$$

aonde m é a área sob o espectro.

Ou seja, esse novo valor H'_s é uma altura significativa baseada na energia total da onda, mas seu valor é praticamente igual ao antigo valor de H_s , ou seja, $H'_s \cong H_{1/3}$, exceto nos casos em que a profundidade da lâmina de água é muito pequena ou as ondas são muito esbeltas. Uma vez conhecida a estimativa do valor da altura significativa H'_s , podemos usar a equação (25) para estimar a H_{rms} , e a partir dessa, os outros valores de alturas características de onda ($H_{1/10}$, etc).

O problema passa a ser o cálculo do período $T_{1/3}$, que é o período médio das $n/3$ maiores ondas registradas. Isso não pode ser feito com o uso do espectro. Passou-se então a usar, como período característico do registro de onda, o período de pico do espectro (T_{pico}). Na Figura 9 podemos identificar alguns picos, que representam as frequências nas quais existe uma maior quantidade de energia.

Nos modelos matemáticos nos quais a entrada é uma onda monocromática (uma altura e um período), esses são os valores utilizados (H'_s e T_{pico}) quando os dados foram obtidos a partir do espectro de onda (Figura 11). Esses valores são normalmente calculados por softwares fornecidos pelos fabricantes dos ondógrafos.

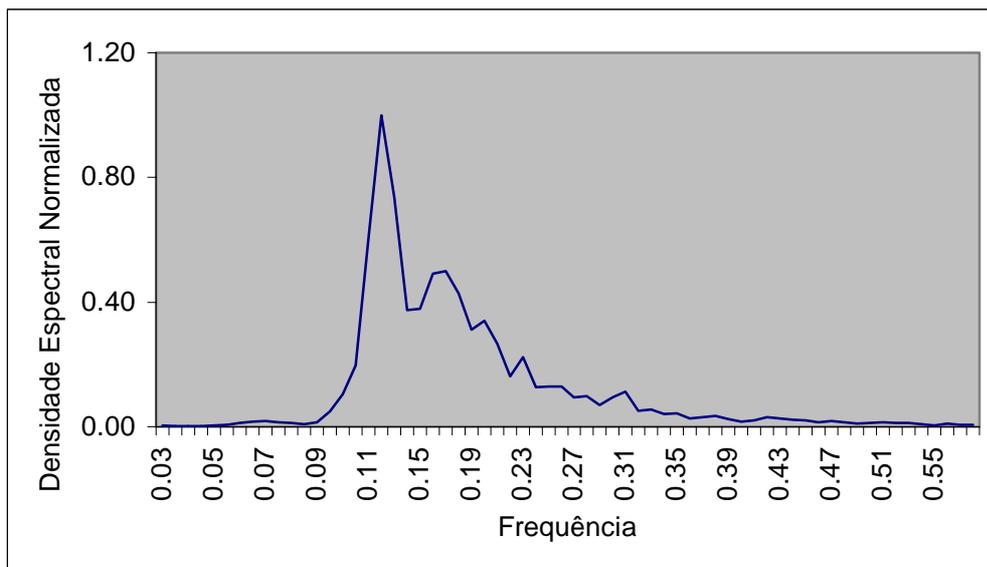


Figura 11. Espectro de energia de onda x frequência.

No espectro apresentado acima falta uma informação importante que é a direção da onda. Esse dado, no entanto, é normalmente fornecido pelo software de um ondógrafo direcional, que calcula o espectro direcional da onda. Esse espectro informa, além da energia contida em cada frequência, também a direção média das ondas em cada frequência. Na Figura 12 estão plotadas as direções médias para cada frequência do espectro. A partir daí, obtemos os dados característicos dessa onda que são: H_s , f_{pico} ; T_{pico} , θ_{pico} .

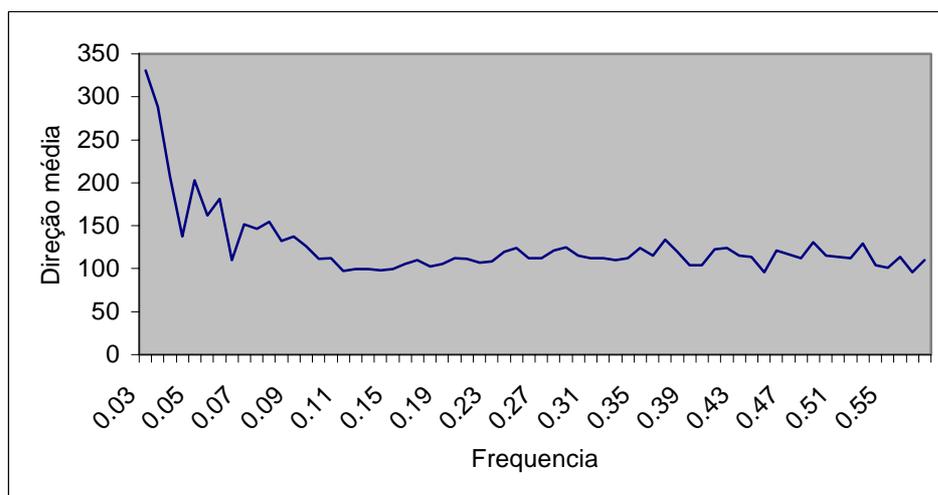


Figura 12. Espectro direcional de onda.

4.2 DADOS DE ONDA

As ondas são os agentes mais importantes no transporte de sedimentos na zona costeira, e a sua caracterização tem papel fundamental na aplicação de modelos de evolução de linha de praia com ênfase no transporte longitudinal de sedimentos, como é o caso do modelo numérico GENESIS. A série de dados de onda utilizada no presente estudo foi adquirida em 1996, no litoral centro norte do Rio Grande do Sul, durante o desenvolvimento do “Convênio Petrobrás/FURG/UFRGS/UFSC/ UFPR”, através da instalação de um ondógrafo direcional de bóia, da marca DATAWELL[®], fundeado na zona de influência do Terminal Marítimo Almirante Soares Dutra, a uma profundidade de 18m. A Figura 13 mostra a localização do ondógrafo e demais equipamentos instalados durante o projeto em Tramandaí.

O ondógrafo direcional DATAWELL[®] é uma bóia esférica de 0,9 m de diâmetro que obtém medidas da altura, do período e da direção de ondas. As medidas de direção são baseadas no princípio de translação, onde as médias dos deslocamentos horizontais, aos quais a bóia está submetida na passagem do trem de ondas, são medidas (Coli, 2000). Para fundear o ondógrafo escolheu-se um ponto a aproximadamente 2500m da praia, distante 1000m da monobóia de atracação da Petrobrás, de coordenadas 30°00'42"S 50°06'21"W.

Os registros de onda foram realizados a cada 3 horas, iniciando à meia-noite, totalizando 8 registros diários de 20 segundos cada um, que formaram os dados brutos. Para processar os dados brutos fornecidos pelo ondógrafo direcional foi preciso convertê-los em parâmetros de onda e posteriormente separar os parâmetros que eram necessários para a entrada no modelo numérico GENESIS. A Figura 14 mostra o esquema de processamento dos dados.

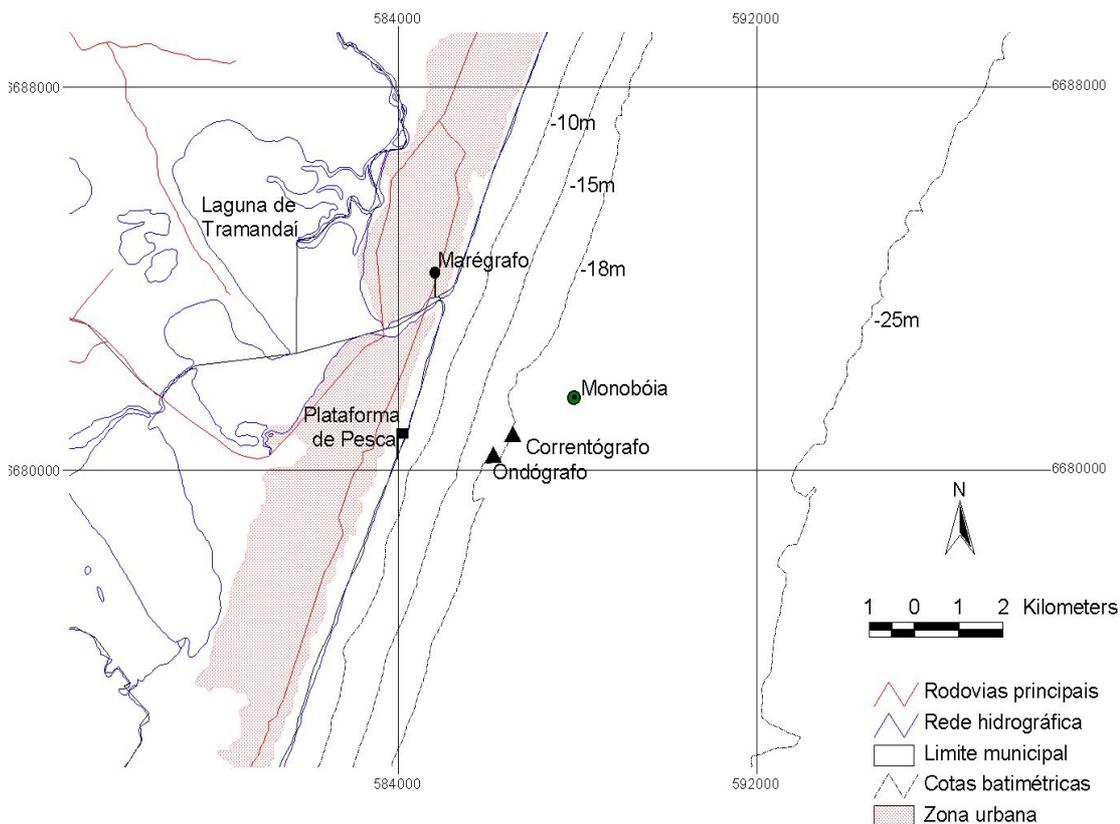


Figura 13. Localização do ondógrafo e demais equipamentos instalados em 1996, em Tramandaí.

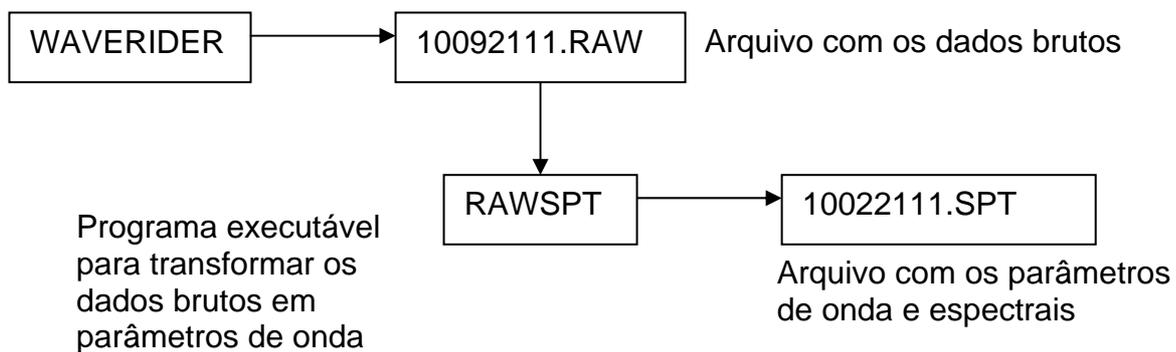


Figura 14: Esquema do processo utilizado na obtenção dos dados de onda para entrada do modelo.

Os arquivos com os dados brutos contêm quatro colunas de dados para cada registro, onde a primeira coluna representa a qualidade dos dados, acusando se os dados coletados apresentam-se sem erros, com erros que foram corrigidos, ou com erros que não podem ser corrigidos. A segunda coluna é referente ao deslocamento vertical, a terceira ao deslocamento na direção norte e, a quarta coluna, pelo deslocamento na direção oeste, todos em cm. Um programa em Fortran, RAWSPPT, que é fornecido com os demais programas do ondógrafo, converte os dados brutos em parâmetros espectrais de onda, gerando um arquivo com terminação *.SPT (Figura 12).

O novo arquivo de saída gerado (*.SPT) nos dá os seguintes parâmetros de ondas: altura significativa, período de pico, frequência, densidade espectral normalizada, direção de pico, espalhamento direcional, assimetria e curtose do espectro. A partir deste arquivo foram então retirados os parâmetros de onda necessários para o modelo numérico GENESIS que são: altura significativa, direção de pico e período de pico. De posse destes parâmetros foi possível gerar os histogramas e gráficos de ocorrência conjunta, bem como fazer correlações, para melhor avaliar a agitação marítima durante o período.

A série de dados coletados inicia em fevereiro de 1996 e vai até outubro deste mesmo ano, possuindo muitas falhas devido a imprevistos sofridos durante a manutenção do ondógrafo. A Figura 15 mostra a série de dados com as falhas e a Tabela 2, os valores médios de altura significativa, período de pico e direção de pico.

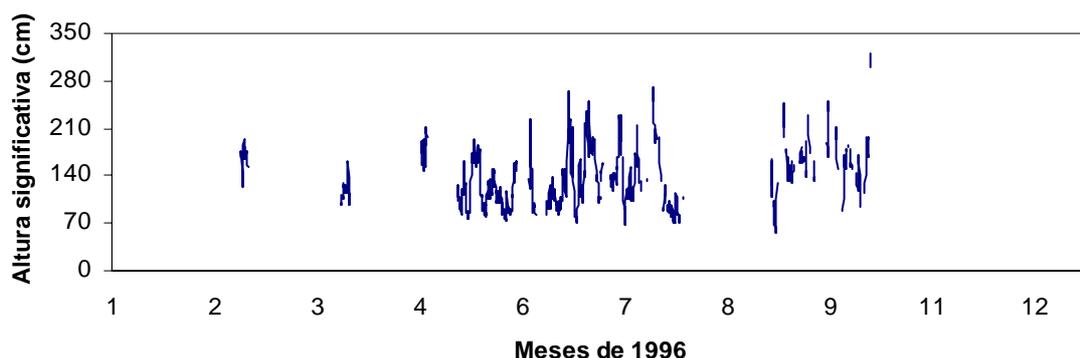


Figura 15. Série de dados adquiridos em 1996 pelo ondógrafo direcional DATAWELL®.

Tabela 2. Valores médios e desvios padrão mensais dos parâmetros de onda para o ano de 1996, série original, onde Hs é a altura significativa, θ é a direção e Tp, corresponde ao período de pico.

	Hs (cm)	θ (graus)	Tp (s)
Fevereiro	166 ± 18	120 ± 14	8 ± 0,6
Março	114 ± 26	138 ± 32	10 ± 3
Abril	173 ± 20	154 ± 7	10 ± 1
Mai	117 ± 29	143 ± 15	11 ± 2
Junho	137 ± 43	122 ± 20	10 ± 2
Julho	132 ± 43	137 ± 21	10 ± 2
Agosto	116 ± 18	132 ± 1	10 ± 0,8
Setembro	154 ± 41	110 ± 18	9 ± 1
Outubro	147 ± 60	110 ± 40	9 ± 8

Para utilizarmos a série de dados coletada em 1996 no modelo numérico GENESIS foi necessário preencher as falhas da série de dados original. O preenchimento das lacunas foi realizado através da análise de diagramas de ocorrência conjunta entre altura significativa e período de pico. Os diagramas foram feitos mês a mês, e depois um percentual de ocorrência para cada onda foi calculado, seguindo este percentual as lacunas foram

então preenchidas. É importante ressaltar que cada onda é composta de uma altura significativa, um período de pico e uma direção de pico, e estes parâmetros se mantiveram juntos, identificada a altura e o período do diagrama tínhamos a direção associada. A Figura 16 mostra um dos diagramas de ocorrência conjunta para o mês de junho e o percentual de ocorrência sobre o qual a série de dados foi preenchida.

Ocorrência Conjunta de período de pico (s) e Altura significativa (cm) mês de junho														Total	%	T med		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16				17	
0 - 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
20 - 40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
40 - 60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
60 - 80	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	4	2.3	11
80 - 100	0	1	7	10	8	6	1	3	0	0	0	0	0	0	36	20.6	8.5	
100 - 120	0	0	5	15	6	1	3	3	3	1	0	0	0	0	37	21.1	9.9	
120 - 140	0	0	0	5	2	3	1	5	9	5	0	0	0	0	30	17.1	10.3	
140 - 160	0	0	0	1	3	1	1	3	3	5	0	0	0	0	17	9.7	10.5	
160 - 180	0	0	0	0	3	0	1	4	4	2	0	0	0	0	14	8	11.3	
180 - 200	0	0	0	0	0	1	0	2	2	6	6	0	0	0	17	9.7	12.2	
200 - 220	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	3	2	2	0	10	5.7	13.2	
220 - 240	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	3	1	1	0	8	4.6	12.4	
240 - 260	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.6	7.1	
260 - 280	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0.6	16.7	
280 - 300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Total		1	12	33	22	15	10	22	22	19	12	3	4		175			

Percentual de ocorrência de cada onda em relação ao total de ondas ocorridas no mês														
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0 - 20														
20 - 40														
40 - 60														
60 - 80						0.57	0.57	0.57	0.57					
80 - 100		0.57	4.00	5.71	4.57	3.43	0.57	1.71						
100 - 120			2.86	8.57	3.43	0.57	1.71	1.71	1.71	0.57				
120 - 140				2.86	1.14	1.71	0.57	2.86	5.14	2.86				
140 - 160				0.57	1.71	0.57	0.57	1.71	1.71	2.86				
160 - 180					1.71		0.57	2.29	2.29	1.14				
180 - 200						0.57		1.14	1.14	3.43	3.43			
200 - 220						0.57	1.14				1.71	1.14	1.14	
220 - 240				0.57		0.57		0.57			1.71	0.57	0.57	
240 - 260				0.57										
260 - 280													0.57	
280 - 300														

Figura 16. Na parte superior observamos o diagrama de ocorrência conjunta entre altura significativa e período de pico para o mês de junho de 1996. Na parte inferior, está apresentado o percentual de ocorrência de cada onda em relação ao total de ondas do mês.

Porém, após este procedimento, ainda continuávamos com os meses de novembro, dezembro e janeiro sem dados. Para completar estes meses da série, utilizamos o mesmo procedimento descrito acima, porém os diagramas foram confeccionados para cada estação do ano de forma a reunirmos maior número de ocorrência de dados. A Tabela 3 resume os parâmetros de onda, mês a mês dos dados preenchidos.

Tabela 3. Valores médios e desvios padrão mensais dos parâmetros de onda para o ano de 1996, onde Hs é a altura significativa, θ é a direção e Tp, corresponde ao período de pico.

	Hs (cm)	θ (graus)	Tp (s)
Janeiro	161 \pm 22	121 \pm 16	8 \pm 1
Fevereiro	166 \pm 18	120 \pm 14	8 \pm 0,6
Março	114 \pm 26	138 \pm 32	10 \pm 3
Abril	173 \pm 20	154 \pm 7	10 \pm 1
Mai	117 \pm 29	143 \pm 15	11 \pm 2
Junho	137 \pm 43	122 \pm 20	10 \pm 2
Julho	132 \pm 43	137 \pm 21	10 \pm 2
Agosto	116 \pm 18	132 \pm 1	10 \pm 0,8
Setembro	154 \pm 41	110 \pm 18	9 \pm 1
Outubro	147 \pm 60	110 \pm 40	9 \pm 8
Novembro	155 \pm 47	104 \pm 25	8 \pm 1
Dezembro	161 \pm 22	121 \pm 16	8 \pm 1

As Figuras 17, 18 e 19 apresentam os histogramas de altura significativa, período de pico e direção de pico para o ano de 1996, dos arquivos com falhas (original) e sem falhas (preenchido). Nestes histogramas podemos observar principalmente que o padrão das distribuições dos parâmetros de onda se manteve mesmo após o preenchimento dos dados. Outros autores como Salim (1998) e Lima (2002), também utilizaram o preenchimento de lacunas nos dados de onda para aplicação do modelo numérico GENESIS.

Motta (1963) observou que as alturas significativas com maior frequência de ocorrência eram de 150 cm na região de Tramandaí. Na Figura 17a a altura significativa que mais ocorre é de 120 cm. Nos histogramas de altura significativa de onda (Figura 17) observamos que o padrão de distribuição geral se mantém, havendo um aumento de 20 % na frequência de ocorrência das ondas com alturas entre 160 e 180 cm na série de dados preenchida.

A Figura 18a mostra uma distribuição da frequência de ocorrência do período de pico, onde se pode observar dois picos, um para 8 s e outro para 12 s. Motta *op cit* e Hosmi (1978) verificaram períodos médios em torno de 7 e 8 s para Tramandaí. Cabe ressaltar que no presente trabalho os dados foram coletados por um ondógrafo direcional, e nos trabalhos citados anteriormente (Motta, 1963 e Hosmi, 1978) os dados foram adquiridos por registro de onda em papel através de uma eco-sonda e as direções por observações visuais. Na figura 18, podemos perceber um aumento na ocorrência de ondas com período de 8 s no arquivo preenchido, o que está de acordo com observado por Hosmi (1978), onde a distribuição dos períodos médios teve a máxima frequência entre 7 e 8 s.

Na distribuição das direções (Figura 19a), observamos que a direção de maior ocorrência foi a de 150 graus (sudeste). As ondas de leste apresentam-se bem significativas e as de nordeste ocorreram em menos de 5 % dos registros. Tal situação já foi constatada por outros autores. Motta (1963) observou que 60 % das ondas eram provenientes de leste-sudeste, e resalta que, mesmo com o vento dominante e predominante ocorrendo de nordeste, menos de 24 % das ondas observadas por ele em Tramandaí tiveram esta direção.

Algo semelhante foi notado por Coli (2000) na cidade de Rio Grande. Ele trabalhou com dois arquivos de ondas diferentes, um histórico com dados entre 1854 e 1979, e outro instrumental, coletado por um ondógrafo direcional em 1996 – 1997. Nos dados do arquivo histórico, as maiores ocorrências foram em 90 graus (leste) e apenas 20 % para norte, noroeste e oeste. E no arquivo instrumental trabalhado por Coli *op cit* não foram observadas ondas provenientes de nordeste, norte e noroeste, sendo as ondas predominantes de sudeste. Podemos observar que as diferenças entre os histogramas não foram superiores a 10 % e que os parâmetros se mantiveram bastante aproximados entre os dados brutos e preenchidos, com isso consideramos satisfatória a série preenchida para os objetivos propostos nesta dissertação.

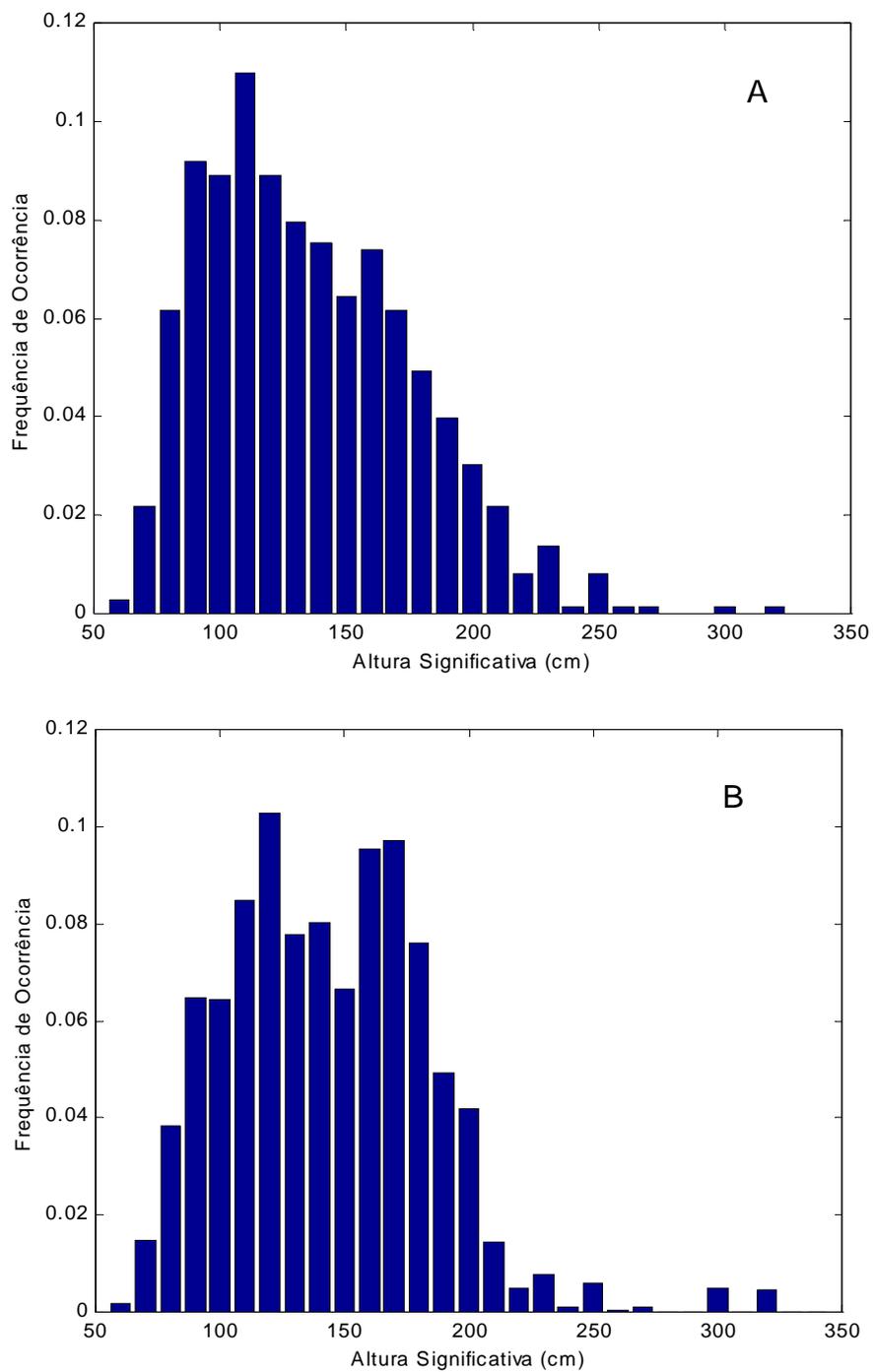


Figura 17. Histogramas da altura significativa: a) dados do arquivo original e b) arquivo depois de preenchido.

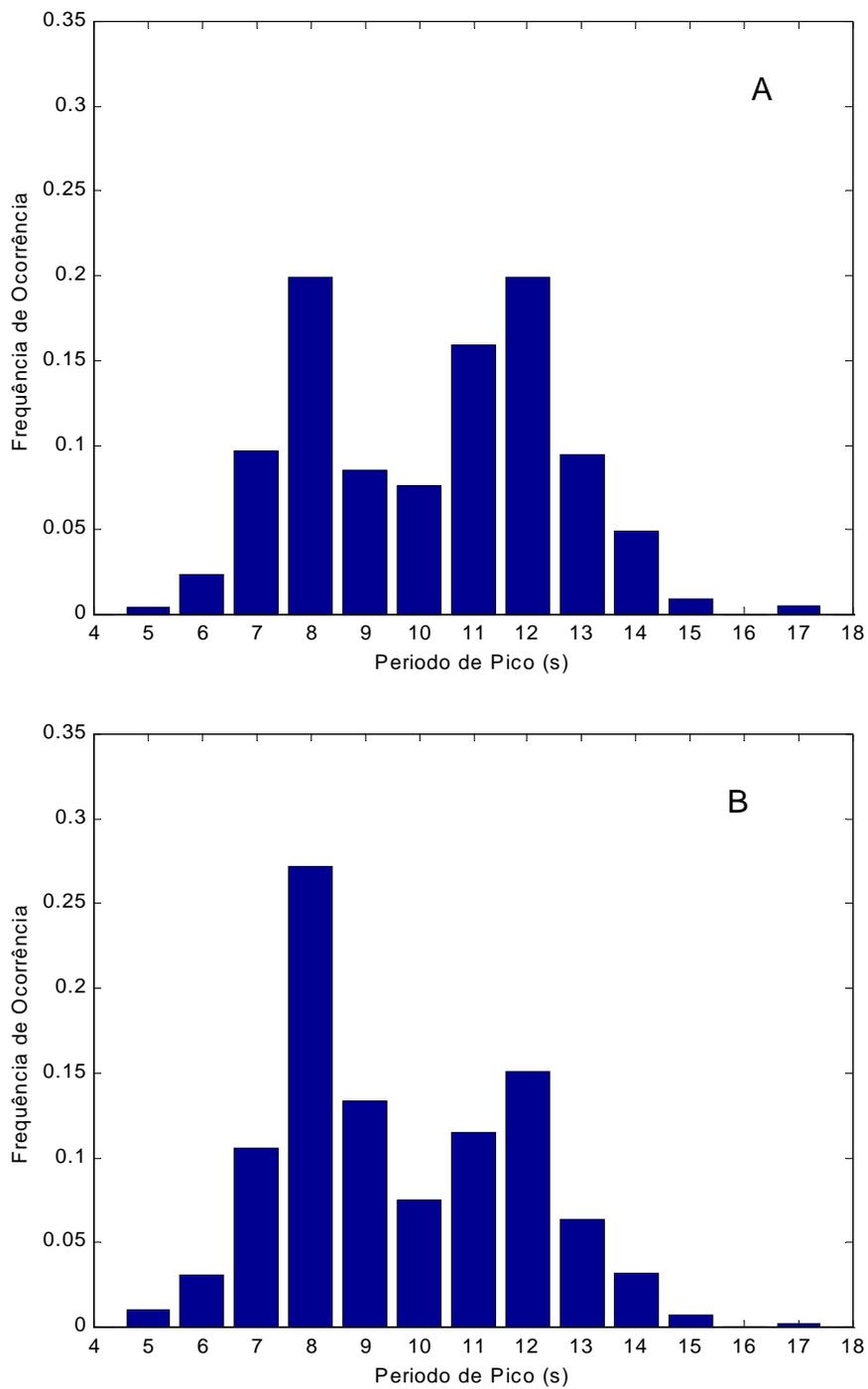


Figura 18. Histogramas do período de pico: a) dados do arquivo original e b) arquivo depois de preenchido.

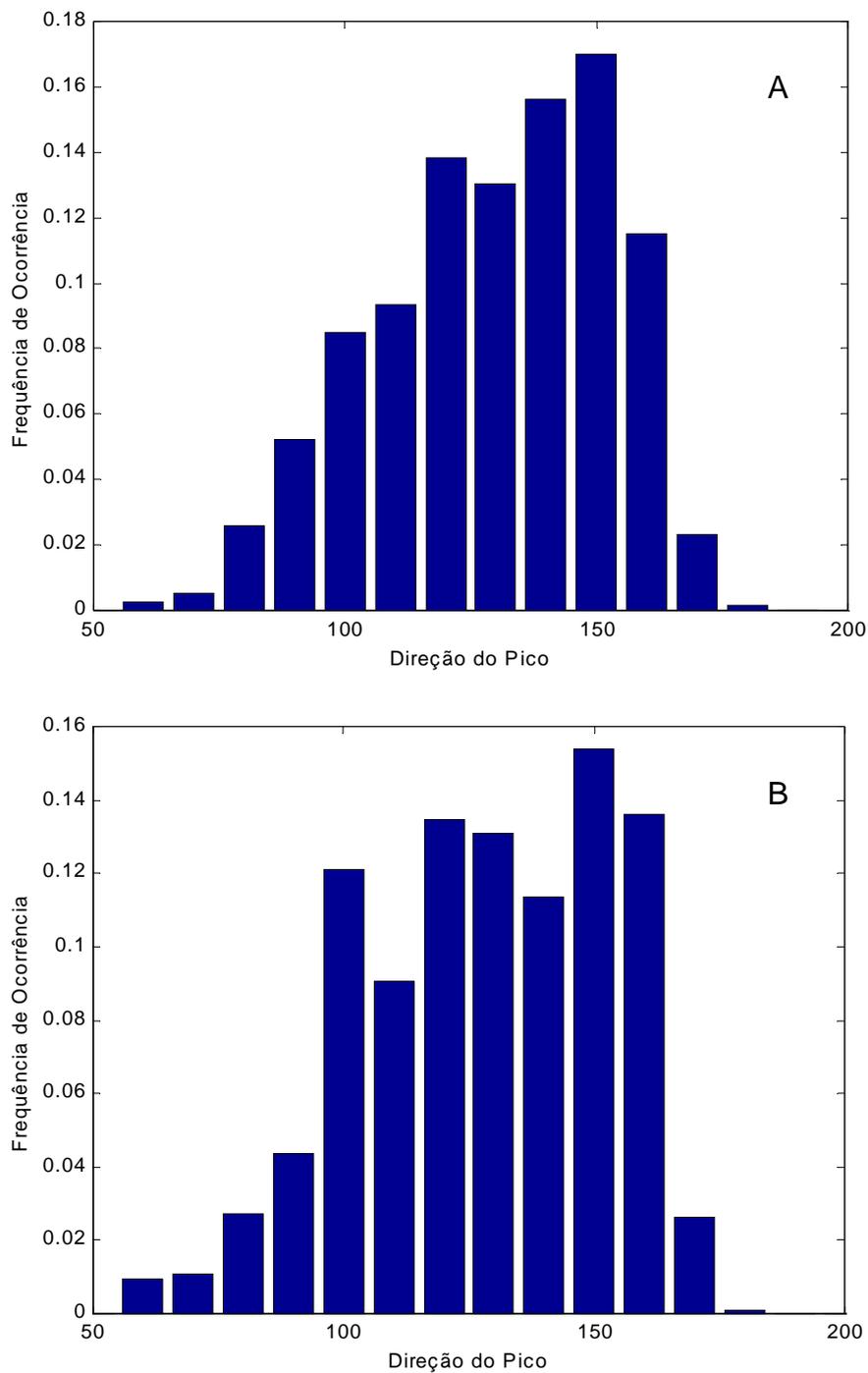


Figura 19. Histogramas da direção de pico: a) dados do arquivo original e b) arquivo depois de preenchido.

Ainda quanto à direção, houve um acréscimo na ocorrência das ondas de E (leste) no arquivo preenchido, que pode ser observado na Figura 19. A distribuição das direções no arquivo final pode ser melhor visualizada na rosa de distribuição (Figura 20).

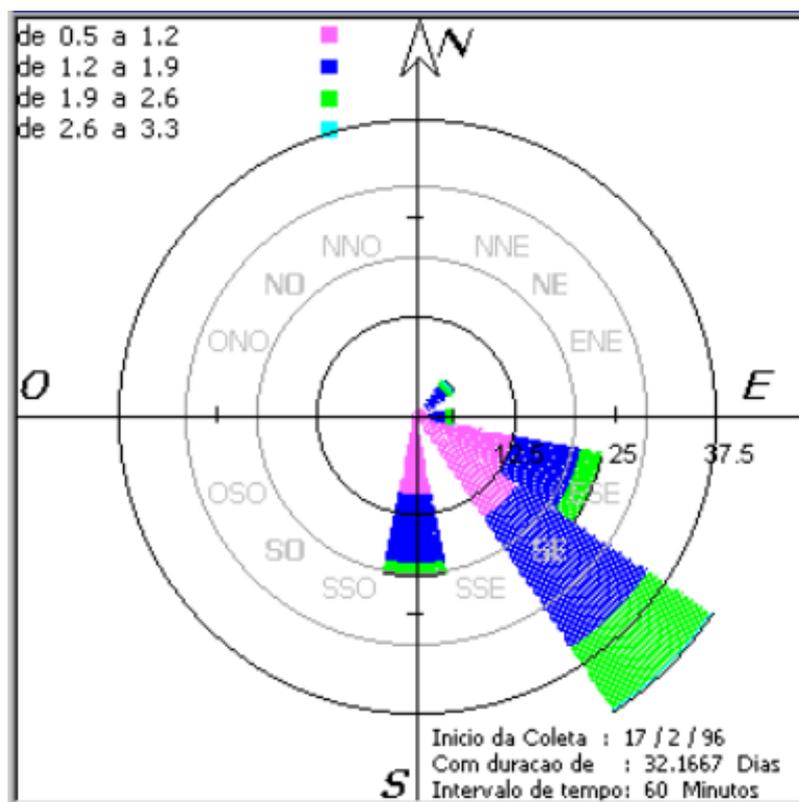


Figura 20. Rosa de distribuição das direções do arquivo preenchido.

O modelo numérico GENESIS trabalha com as direções de ondas definidas a partir da perpendicular a praia, onde todas as ondas vindas da direita são positivas e variam de 90 a 0 (na perpendicular) e as ondas vindas da esquerda são negativas e variam de zero a - 90 (Figura 21). Para adaptar a série de ondas ao arquivo de entrada do modelo foi feito um programa em Fortran que calcula a direção das ondas para o padrão estabelecido.

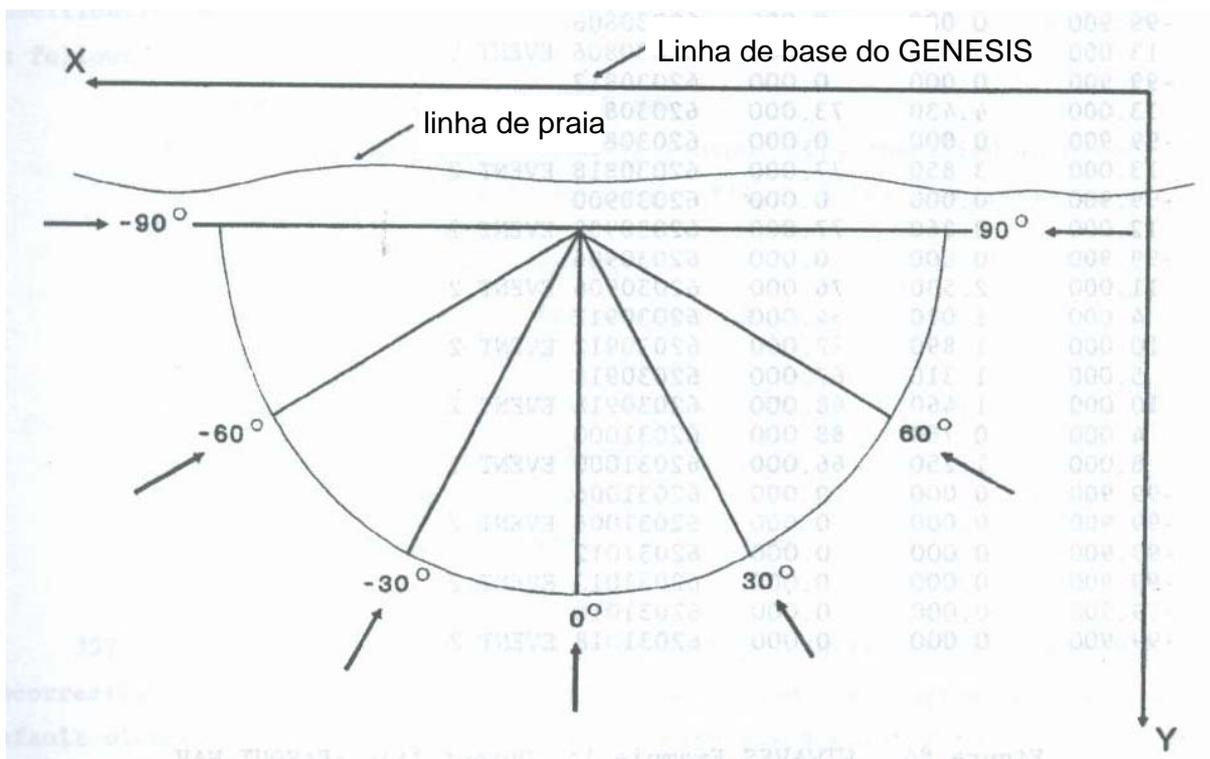


Figura 21. Sistema de conversão do ângulo de incidência das ondas.

Outro fator que indica preenchimento satisfatório dos dados de onda é o transporte de sedimentos, que será apresentado a seguir.

4.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O movimento longitudinal de sedimentos na zona de surfe é muito estudado. Ele é gerado principalmente pela incidência de ondas oblíquas sobre a costa, as quais induzem uma corrente longitudinal que transporta os sedimentos. Existem muitas formulações propostas para estimar o transporte longitudinal de sedimentos. Um dos métodos mais conhecidos é a fórmula do CERC, que foi calibrada inicialmente em 1966 (Prestil, 1994), e sofreu várias reinterpretações e modificações, que buscavam lhe dar sustentação teórica. Entre todos os trabalhos os mais conhecidos seriam os trabalhos de Komar e Inman (1970), Luguët-Higgins (1970) e Ozasa e Brampton (1984).

Neste trabalho o transporte de sedimentos foi calculado pela fórmula do CERC que utiliza o método do fluxo de energia (U.S. Army, 1984), seguindo o método proposto no trabalho de Lima *et al* (2001), o qual consiste em estimar a capacidade de transporte de sedimento para cada evento de onda (sua altura e direção de origem) registrado durante um período representativo. Calculados os respectivos potenciais, estes foram somados, resultando em duas frações, uma positiva indicando deslocamento para SW e outra negativa indicando sentido para NE. Segundo Lima *op cit* o transporte total foi obtido pela fórmula:

$$Q_{\alpha_o, H_o} = \frac{K}{a(\rho_s - \rho)} 0,05 \rho g^{1/2} f H_o^{5/2} F(\alpha) \quad (28)$$

$$F(\alpha_o) = \frac{1}{\Delta\alpha} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^{1/4}(\alpha_o) \text{sen}(2\alpha_o) d\alpha \quad (29)$$

Onde, Q_{α_o, H_o} é a taxa de transporte de sedimentos correspondente ao evento; α_o é o ângulo central de uma faixa de incidência de ondas, que tem como limites as direções α_1 e α_2 em águas profundas; H_o é a altura da onda ao largo no evento considerado; K é o coeficiente adimensional de calibração; a é a porosidade do sedimento (0,6); ρ_s é a massa específica do sedimento (2.650 Kg/m³); ρ é a massa específica da água do mar (1.025 Kg/m³); g é a aceleração da gravidade; f é a frequência de ocorrências do evento e $F(\alpha_o)$ é o termo direcional do evento.

O coeficiente de calibração K relaciona diretamente a taxa longitudinal de sedimentos não coesivos com o fluxo de energia de ondas (Lima et al 2001). Diversos autores vêm estudando a respeito do coeficiente K , alguns deles seriam: Thornton (1972), Dean (1973), Walton & Chiu (1979), Bailard (1981), Dean et al (1982) e Dean (1983) apud U.S. Army (1985). O que se conclui de maneira geral é que este coeficiente vai ser diferente para cada praia dependendo do tamanho de grão do sedimento e de sua densidade, que

podem ser representados pela velocidade de decantação dos grãos. Prestil (1994), apresenta uma boa revisão sobre os diferentes valores de K encontrados desde 1953.

Segundo U.S.Army (1985), adimensionalizando-se a velocidade de queda do grão pode se chegar à expressão $Pa = g H_b/w^2$, onde Pa é um parâmetro adimensional, H_b é a altura de arrebentação das ondas; w é velocidade de queda do sedimento no meio. Plotando K e Pa em escala logarítmica os autores obtiveram uma relação linear descrita pela equação:

$$K = 6.1637 \text{Log}\left(\frac{gH_b}{w^2}\right) - 0.0773 \quad (30)$$

Possibilitando o cálculo de um K específico para cada praia. Lima *et al* (2001), aplicou este método para diversas áreas do litoral gaúcho, encontrando um K igual a 0,64. Este foi o valor de K aplicado para o cálculo do transporte de sedimentos a partir dos dados de onda que foram utilizados no modelo numérico GENESIS.

O transporte longitudinal de sedimentos foi estimado para os dados de onda medidos e para o arquivo preenchido. Com os dados medidos o transporte resultante foi aproximadamente 7.100.000 m³/ano com sentido predominante para NE. Para os dados preenchidos encontramos um valor de transporte longitudinal resultante igual a 7.750.000 m³/ano também com sentido resultante para NE. Estes valores de transporte estão bem próximos do calculado por Lima *et al* (2001) para a região de Tramandaí, que foi de aproximadamente 6.500.000 m³/ano com sentido resultante também para NE.

A diferença quantitativa entre os resultados é relativamente pequena, e pode ser explicada pela diferença entre os dados de onda utilizados. Lima *et al* (2001), recorreu a dados obtidos por navios *ao largo*, organizados por Hogben e Lumb (1967), enquanto no presente trabalho os dados foram coletados por um ondógrafo direcional posicionado ao largo, mas não tão

distante da costa. A direção resultante está de acordo com trabalhos realizados recentemente, Lima *et al* (2001), Esteves *et al* (2001) e Toldo *et al* (2002). Estes resultados obtidos para o transporte de sedimentos, tanto de forma quantitativa como qualitativa, confirmam que a série de ondas é satisfatória, e corresponde às principais características da região e atende às exigências do modelo numérico GENESIS dentro da realidade de dados de onda existentes na região centro norte do Rio Grande do Sul.

4.4 LINHAS DE PRAIA

Para calibração do modelo numérico GENESIS duas posições de linha de praia se fazem necessárias, elas foram obtidas na costa do Rio Grande do Sul nos anos de 1997 e 2000.

A posição da linha de praia no ano de 1997 foi determinada nos dias de 26 e 28 de novembro com a utilização de dois Sistemas de Posicionamento Global (GPS), modelo Garmin *GPS 100 Personal Surveyors* com precisão de 10 m para o modo de navegação e 3 m para o modo estático. Um dos GPS foi instalado em um veículo que se movimentava a velocidade de 50 Km/h ao longo da linha de água enquanto o outro, no modo estático, foi posicionado em locais previamente estabelecidos a cada 100 Km, com objetivo de aumentar a precisão das leituras. As leituras foram realizadas a cada 5 s, permitindo que, após o processamento dos dados, a posição da linha de praia fosse mostrada com precisão de 3 m (Toldo *et al* 1999).

No ano de 2000, a linha de praia foi determinada no mês de Junho através de equipamento modelo Trimble *GPS 4600* com precisão no modo de navegação de 1 m. Os procedimentos adotados para aquisição dos dados foram os mesmo do ano de 1997, sendo modificado apenas a taxa de leitura que passou a ser de 3 s (Esteves *et al* 2001, Esteves *et al* 2002). A Figura 22 mostra as linhas de 1997 e 2000.

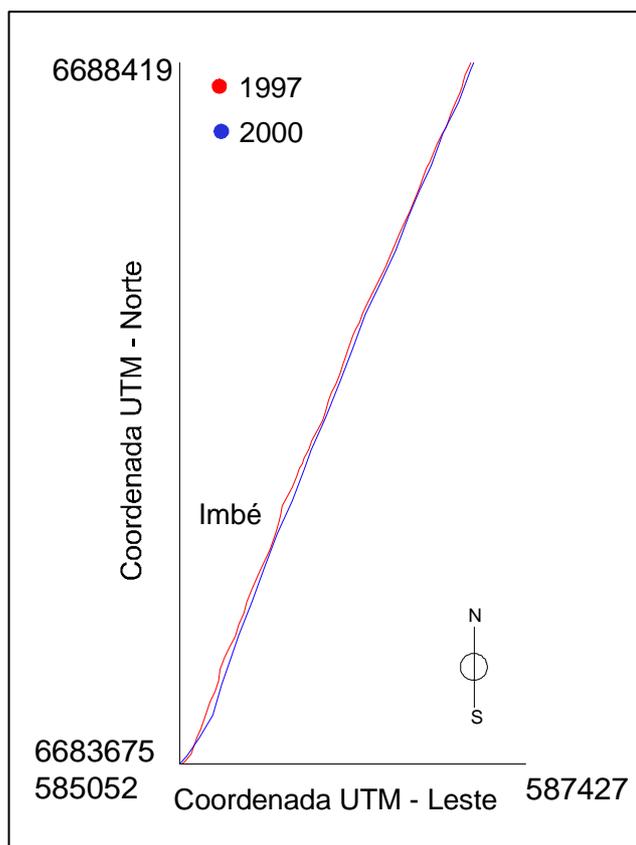


Figura 22. Posição das linhas de praia de 1997 (em vermelho) e 2000 (em azul) para a praia de Imbé, ao norte da embocadura do canal da Laguna de Tramandaí.

Toldo & Almeida (2003), descrevem os principais erros decorrentes do levantamento da linha de praia, com base no indicador linha d'água, que são associados à amplitude da maré astronômica e da maré meteorológica, do "run up" e da declividade da face praia. A amplitude da maré astronômica tem valor médio de 0,30 m e pode gerar um deslocamento de 9 m no plano horizontal, pois o levantamento é realizado sobre uma face de praia com declividade média de 1/30 ao longo de um intervalo de tempo de 10 horas. O erro está associado à ocorrência dos valores máximos ou mínimos da maré, da ordem de 0,32 a 0,20 m respectivamente, durante o levantamento e campo. Este fator de erro pode ser monitorado através de instrumentação no campo, ou por consulta ao modelo de previsão de maré astronômica.

A amplitude da maré meteorológica de 1,2 m pode gerar um erro maior que 35 m no plano horizontal, para uma declividade média da face praial de 1/30. Entretanto, este fator de erro pode ser monitorado através do uso de informações sobre a entrada de frentes frias ou tempestades no litoral do sul do país, em consulta ao modelo de previsão de marés meteorológicas, antes de iniciar a coleta de dados. O “run-up” da onda para as praias do Rio Grande do Sul apresenta valor aproximado de 0,55 m, que associada à declividade média da face praial, resulta em um espraiamento da onda com valor médio de 16 m. Este fator de erro está associado às variações da altura de onda durante o levantamento da linha de praia (Toldo & Almeida, *op cit*).

As variações médias da declividade da face da praia entre 1/20 e 1/40, induzidas por fatores sazonais ou pelas modificações locais do fluxo de energia das ondas incidentes, constituem-se num fator de erro de difícil monitoramento para levantamentos em áreas com centenas de quilômetros de extensão, como no caso das praias do Rio Grande do Sul (Toldo & Almeida, *op cit*). Apesar da possibilidade de monitoramento dos erros associados a essa metodologia, nem todos podem ser corrigidos, mas segundo Esteves *et al* (2001), eles ficam dentro de uma margem de ± 25 m incluída na classe de praias estáveis.

A linha adquirida no ano de 1997 será a linha inicial e a linha de 2000 será a linha final do modelo no processo de calibração, o qual consiste, de forma resumida, em fazer com que a forma da linha de 1997 se aproxime da forma da linha de 2000 em três anos de simulação com os dados de onda disponíveis para a região.

4.5 MALHA DO MODELO MATEMÁTICO

Conforme Hanson e Kraus (1989) a malha é discretizada ao longo da costa (eixo x), enquanto a posição da linha de praia é especificada ao longo do eixo y que avança em direção ao mar.

No sistema de coordenadas é desenhado o eixo x (linha base) que é paralelo à linha de praia e o eixo y perpendicular a ele. A partir da extensão longitudinal do trecho a ser modelado e do comprimento da célula define-se o número de células N. As posições da linha de praia y_i são definidas na posição central de cada célula, a uma distância $\Delta x/2$ das paredes das células. As distâncias são lidas na malha a partir da célula 1 como a origem, por isso o eixo y intercepta o eixo x na célula 1 da malha e não no “zero”.

O GENESIS usa uma malha uniforme ao longo da costa, e o espaçamento entre todas as posições de linha de praia é Δx . O GENESIS possui dois tipos de condição de contorno lateral a serem implementadas: aberta (quando ocorre trânsito de areia pela fronteira) ou fechada (quando a posição da linha permanece estável ao longo do tempo).

Durante a execução deste estudo foi necessária a geração de duas malhas diferentes, uma para calibração e outra para simulação. O principal motivo para estas duas malhas foi a falha na linha de praia de 2000 na região ao sul da embocadura do canal da Laguna de Tramandaí. Como para calibração do modelo pode-se usar apenas uma parte da linha de praia total a ser simulada, assim o procedimento de aplicação do modelo não foi prejudicado.

4.6 MALHA PARA CALIBRAÇÃO

A malha para calibração foi estabelecida ao norte da embocadura do canal da Laguna de Tramandaí com extensão de 4 Km, sendo dividido em 80 células de 50 m cada uma. A borda direita da malha (sul) foi posicionada num ponto de encontro entre as linhas de praia de 1997 e 2000, onde portanto não houve variação da posição da praia, dando assim a condição de contorno fechada (Figura 23). Na borda esquerda a condição de contorno foi considerada aberta e a distância entre as linhas, inicial (1997) e final (2000), informada no arquivo START.

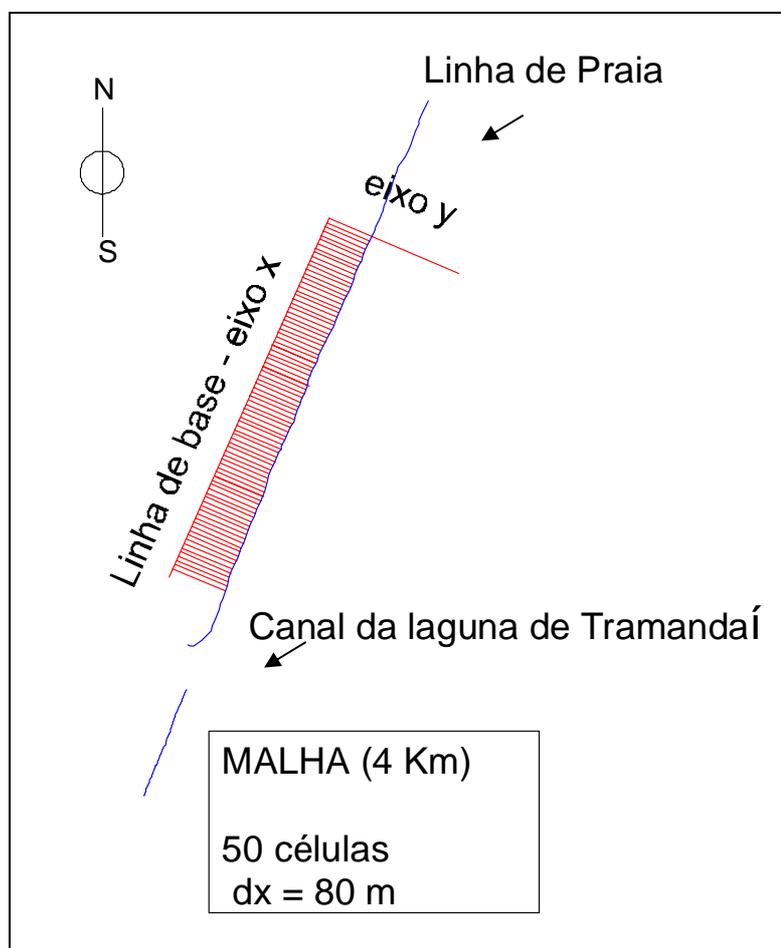


Figura 23. Malha utilizada para calibração do modelo numérico GENESIS para região centro-norte do Rio Grande do Sul.

4.7 MALHA PARA SIMULAÇÃO

A malha para simulação foi estabelecida colocando a embocadura do canal da Laguna de Tramandaí no centro da malha, que tem uma extensão de 10 Km, sendo dividido em 100 células de 100 m cada uma (Figura 24). As duas fronteiras foram consideradas fechadas para aproximar as condições de contorno do modelo físico, onde não havia perda de volume de sedimentos para fora da área simulada.

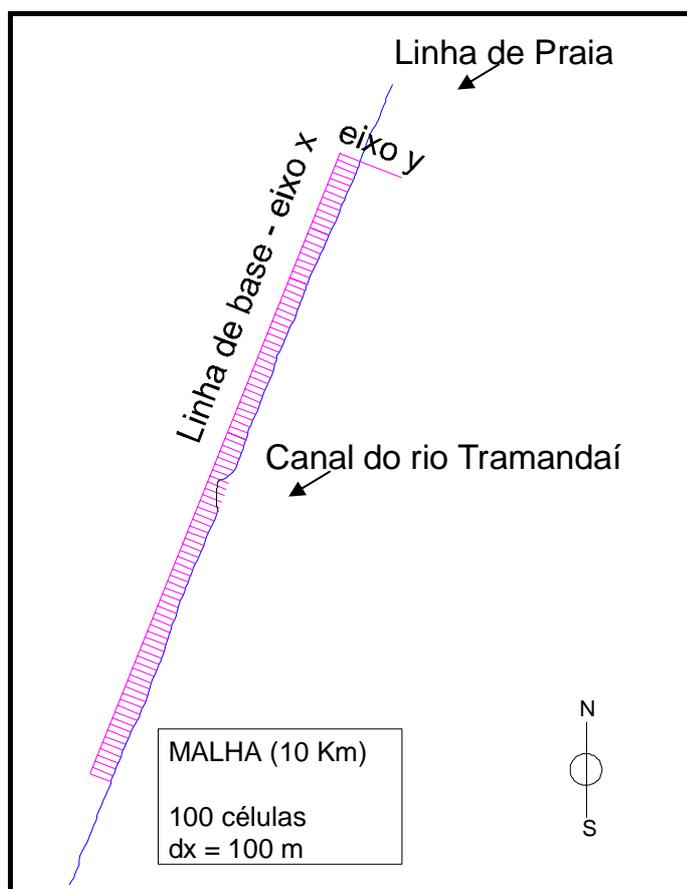


Figura 24. Malha utilizada para simulação da alternativa de molhes utilizada no modelo físico.

Uma das grandes limitações do modelo numérico GENESIS é a sua inabilidade de representar a desembocadura de rios, por isso durante a preparação da malha de calibração a embocadura está excluída da área. Já na malha de simulação a embocadura está localizada bem no centro, porém entre duas estruturas. O que vamos observar é o efeito dessas estruturas na linha de praia, desconsiderando qualquer influência da embocadura.

4.8 ARQUIVOS DE ENTRADA

O modelo numérico GENESIS é operado através de quatro arquivos de entrada principais: START, SHORM, SHORL e WAVES. Os arquivos devem seguir as exigências do código, onde os nomes têm cinco letras e a extensão três letras, sendo que os nomes dos arquivos já são determinados previamente pelo modelo e devem ser respeitados. Apenas a extensão desses arquivos fica por conta do modelador e deve ser única para todos os arquivos (por exemplo, WAVES.ext, SHORM.ext). Utilizamos como extensão a letra c e dois algarismos. Os arquivos de entrada serão descritos a seguir.

4.8.1 ARQUIVOS SHORL E SHORM

SHORL é o arquivo de entrada de dados da posição inicial da linha de praia, e será a linha utilizada para início dos cálculos do GENESIS. Neste estudo, SHORL é a linha de 1997. O arquivo de entrada SHORM é o arquivo de dados da posição final conhecida da linha de praia a ser reproduzida no processo de calibração do modelo, que neste caso é referente ao ano de 2000. Estes arquivos devem respeitar o número de células descrito no arquivo START.

4.8.2 ARQUIVO START

O arquivo de entrada START contém as instruções que controlam a simulação da mudança da linha de praia, e define a configuração da área modelada. É dividido em dez partes que tratam de diferentes aspectos, desde configuração da área modelada até o preenchimento de praias. O Anexo 1 apresenta o arquivo START configurado para a calibração do modelo neste estudo.

4.8.3 ARQUIVO WAVES

O arquivo de entrada WAVES fornece as informações de onda necessárias para o cálculo da taxa de transporte longitudinal durante a simulação da mudança da linha de praia. Este arquivo é composto por três parâmetros de onda: altura significativa, direção de pico e período de pico da onda ao largo. No presente trabalho utilizamos dois arquivos WAVES diferentes, um com a série de dados de 1996, e outro com os parâmetros de onda (altura significativa, direção de pico e período de pico da onda ao largo) utilizados no modelo físico reduzido. O arquivo WAVES usado na calibração foi o aquele que contém a série de dados de onda de 1996.

4.9 CALIBRAÇÃO DO MODELO

O processo de calibração consiste no ajuste dos valores de K_1 e K_2 , chamados coeficientes de calibração. Ambos os coeficientes são estimados empiricamente. Segundo Hanson e Kraus (1989) o parâmetro de transporte K_1 controla a escala de tempo na simulação da mudança da linha de praia, assim como a magnitude da taxa de transporte longitudinal. O valor de K_2 é tipicamente 0.5 a 1 vez o valor de K_1 . Não é recomendado pelos autores que K_2 varie muito próximo de $1 \cdot K_1$, o que pode trazer instabilidade numérica para o modelo.

A única maneira de ajustar os valores de K_1 e K_2 é testando valores definidos empiricamente e observando a resposta da linha de praia a cada alternativa. Na calibração efetuada para a praia de Imbé-Tramandaí foram realizadas 25 combinações destes coeficientes (Tabela 4) com as quais obtivemos diferentes posições da linha de praia.

Tabela 4. Combinações dos diferentes valores de K1 e K2 utilizados no processo de calibração do modelo numérico GENESIS para as praias de Imbé e Tramandaí.

Alternativa	K1	K2
c01	0.1	0.1
c02	0.1	0.3
c03	0.1	0.5
c04	0.1	0.7
c05	0.1	0.9
c06	0.3	0.3
c07	0.3	0.5
c08	0.3	0.7
c09	0.3	0.9
c10	0.5	0.5
c11	0.5	0.7
c12	0.5	0.9
c13	0.7	0.7
c14	0.7	0.9
c15	0.9	0.9
c16	0.3	0.1
c17	0.5	0.1
c18	0.7	0.1
c19	0.9	0.1
c20	0.5	0.3
c21	0.7	0.3
c22	0.9	0.3
c23	0.7	0.5
c24	0.9	0.5
c25	0.9	0.7

O modelo foi considerado calibrado quando a linha de praia gerada pelo modelo se aproximou o máximo da linha final conhecida. Essa avaliação foi feita visualmente pelo programa de saída gráfica do modelo, GENGRAF. Os resultados obtidos no processo de calibração serão descritos no capítulo 5.

4.10 SIMULAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE MOLHES DO MODELO FÍSICO

Para realizar a simulação da alternativa de molhes do modelo físico, uma nova malha foi gerada (descrita no item 4.3.2 deste capítulo), e um novo arquivo WAVES, onde foram colocadas as características de onda utilizadas no modelo físico. O arquivo START foi modificado conforme as alterações na malha, nos dados de onda e no tempo de simulação, porém os parâmetros de calibração (K1 e K2) foram mantidos. Também no arquivo START foram inseridas as características dos molhes conforme descritas no modelo físico. Os resultados obtidos serão descritos no capítulo a seguir.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pela aplicação da metodologia descrita anteriormente serão apresentados e discutidos dentro dos subitens que seguem:

5.1. CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo numérico GENESIS foi realizada em duas etapas principais: inserção da área de estudos no arquivo START e ajuste da linha de praia gerada pelo modelo (linha calculada) com a linha de praia medida (linha final, ano 2000) a partir da linha de praia inicial (1997). A Figura 25 apresenta a área de estudo e a malha utilizada na configuração do arquivo START. A malha contém 50 células de 80 m cada, num total de 4 Km.

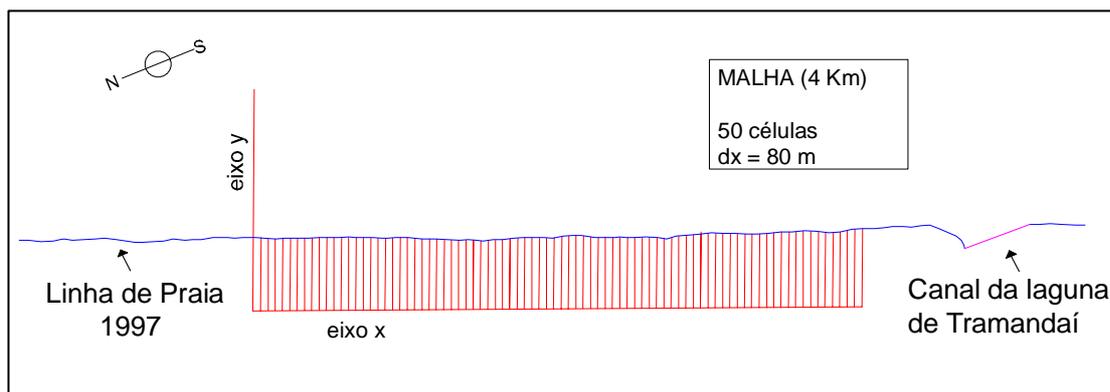


Figura 25. Desenho esquemático da área de estudo e malha utilizada no processo de calibração.

Os resultados serão apresentados segundo a saída gráfica do programa GENGRAF, que faz parte do pacote SMS (*Shoreline Modelling System*). A Figura 26 apresenta o modelo da área de estudo através do arquivo START, onde observamos a linha de praia inicial (1997) e a linha de praia final (2000).

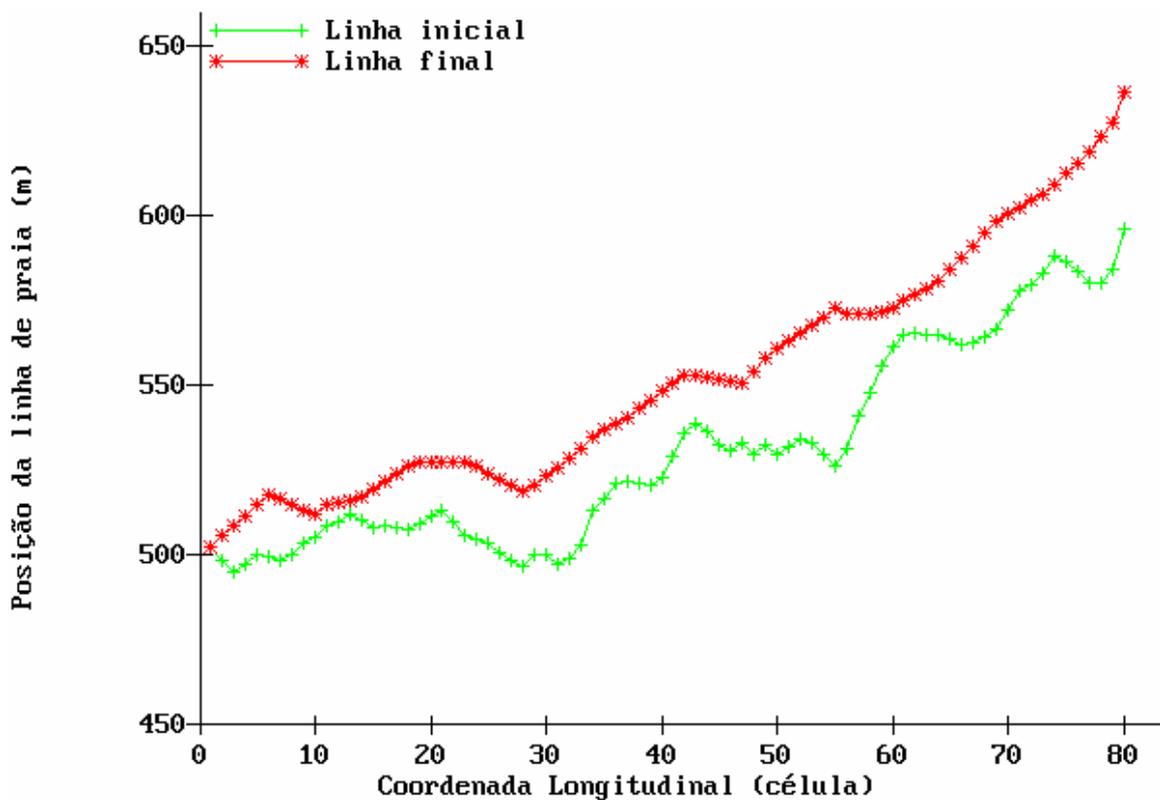


Figura 26. Modelo da área de estudos segundo a configuração informada no arquivo START.

O processo de calibração dá-se pelas tentativas de reproduzir a linha final conhecida partindo da linha inicial medida através do arquivo de ondas fornecido ao modelo. As diferentes linhas geradas para cada combinação de K_1 e K_2 eram colocadas sobre a linha final conhecida e visualmente eram descartadas ou mantidas, até que uma com melhor ajuste surgisse. O modelo foi considerado calibrado quando uma das linhas alcançou o desenho mais próximo possível da linha final conhecida.

A Figura 27 apresenta duas linhas geradas durante o processo de calibração. A linha calculada c01 que está posicionada abaixo da linha final conhecida (medida), e a linha calculada c14, que já alcança a altura da linha final desejada, mas não ainda com o melhor ajuste. Os valores de K_1 e K_2 utilizados nestas linhas estão apresentados na Tabela 5 no capítulo 4.

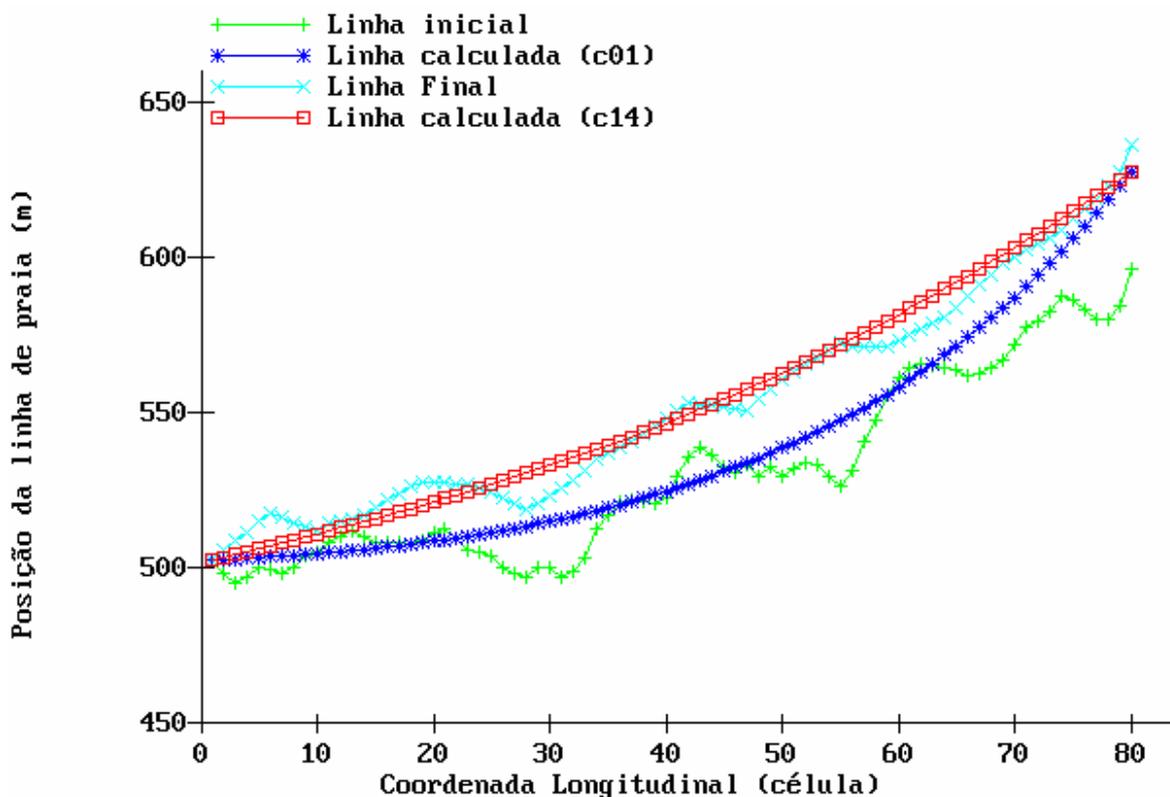


Figura 27. Exemplo de duas posições de linha de praia obtidas durante o processo de calibração do modelo (c01 e c14).

A linha de praia que melhor se ajustou ao modelo foi à linha calculada c20 (Figura 28), onde os valores de K_1 e K_2 foram respectivamente 0,5 e 0,3. Estes valores além de apresentarem a melhor resposta gráfica, também se ajustam à regra proposta por Hanson e Kraus (1989) para praias arenosas, onde $0,1 < K_1 < 1,0$ e $0,5K_1 < K_2 < 1,5K_1$.

Observando as figuras apresentadas notamos que as linhas de praia medidas, tanto a inicial quanto a final, apresentam ondulações. Estas ondulações são inerentes à metodologia utilizada para sua inserção na malha e ficam mais aparentes em função do tipo de plotagem feita pelo programa. Apesar de não aparecerem ondulações na linha calculada pelo modelo, elas não invalidam a movimentação da linha de praia e o processo de calibração, o que fica ainda mais claro observando-se as diferenças entre as linhas calculada e medida.

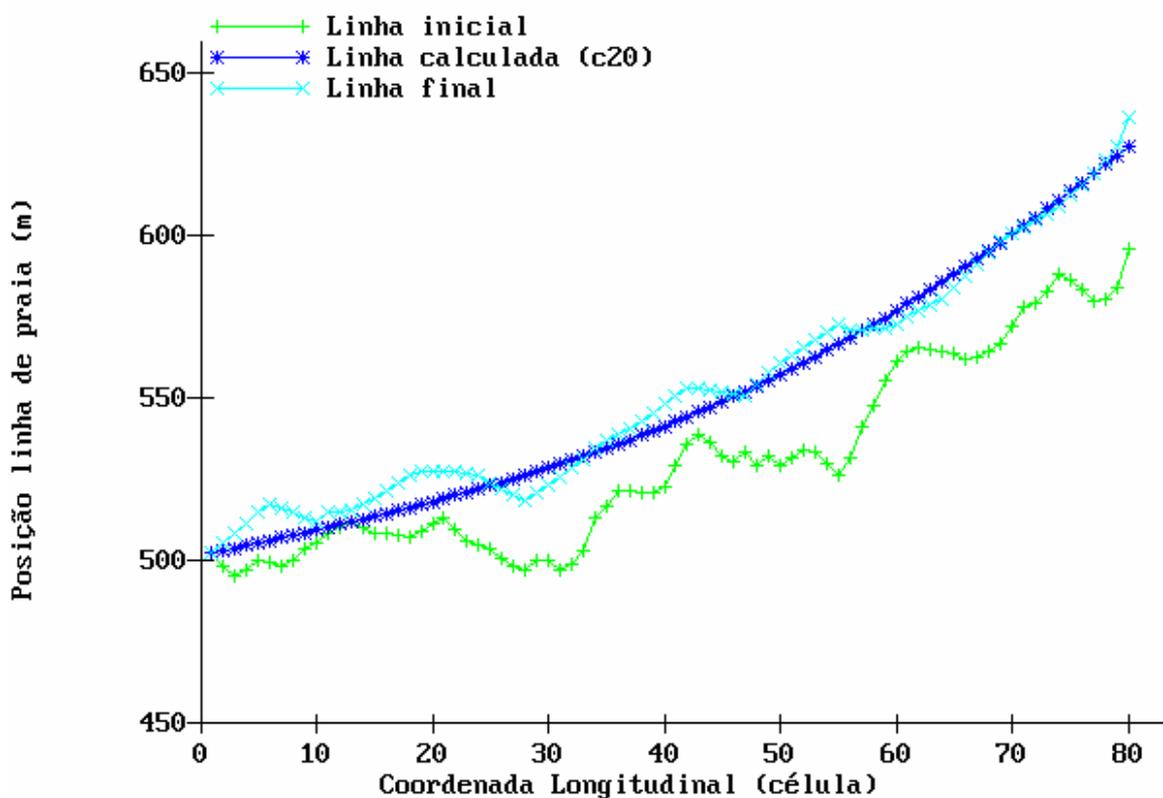


Figura 28. Modelo calibrado. A linha calculada c20 foi a que melhor se ajustou à linha final conhecida.

Na Figura 29 podemos observar a diferença entre a linha calculada e a linha final conhecida. A máxima diferença não ultrapassou 15 m, o que pode ser considerado como um resultado bastante satisfatório, observando-se, por exemplo, o erro do GPS durante a obtenção da linha de praia, que foi de ± 10 m para o modo de navegação e ± 3 m para o modo estático. Segundo Esteves *et al* (2001), que utilizou as mesmas linhas de 1997 e 2000, a variação de ± 25 m incluída na classe de praias estáveis é menor do que erro decorrente da qualidade dos dados disponíveis. Salim (1998) aplicando o modelo numérico GENESIS no litoral do Ceará obteve um erro maior que 30 m em alguns trechos. Lima (2002) observou uma diferença média entre as linhas calculadas e a linha medida de 68 m também em praias do Ceará. Os resultados de ambos autores foram bastante satisfatórios e representaram consideravelmente as tendências evolutivas locais.

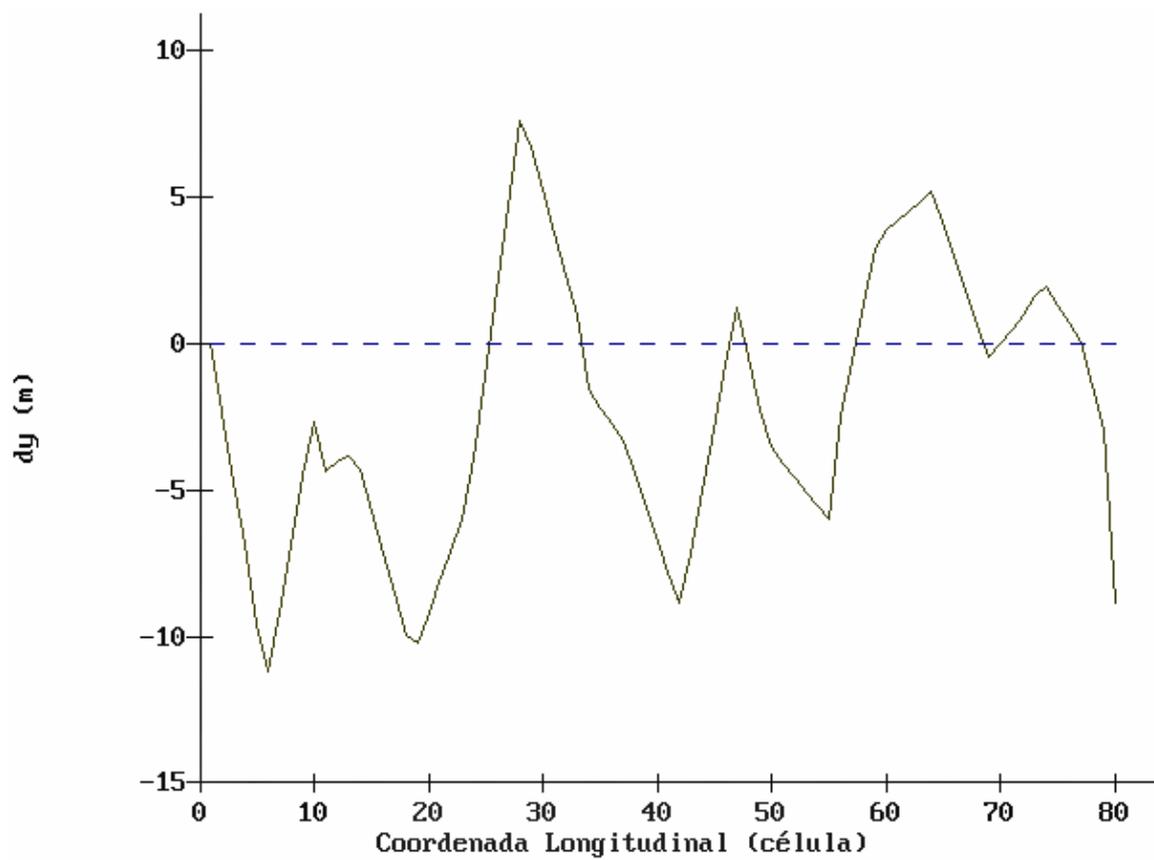


Figura 29. Diferença entre a linha calculada e a linha final conhecida.

5.2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A Figura 30 apresenta a taxa média de transporte longitudinal de sedimentos que atravessam a parede da célula.

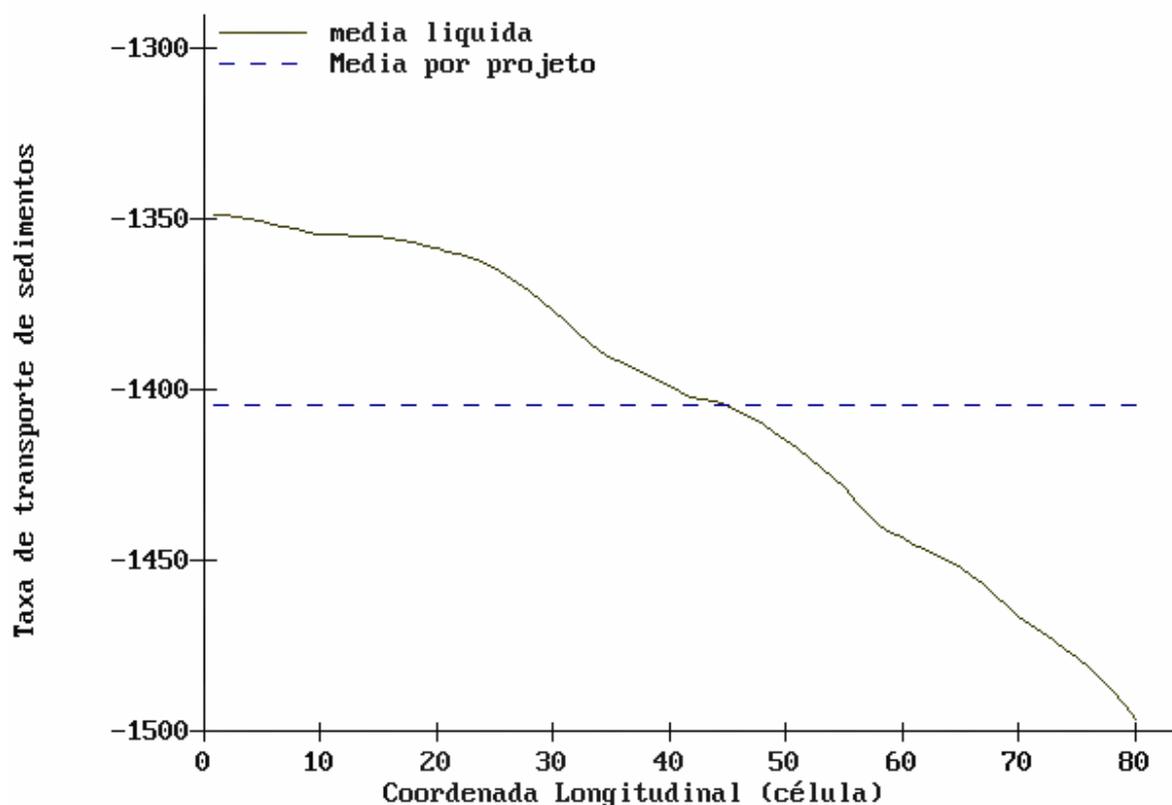


Figura 30. Taxa média de transporte de sedimentos longitudinal resultante que atravessam a parede da célula em m³/ano. O sinal negativo (-) indica que a direção resultante do transporte é de SW para NE.

O transporte resultante de sedimentos calculado pelo modelo foi de 6.100.000 m³/ano com sentido predominante para NE, sendo um valor subestimado em relação ao calculado pela fórmula do CERC para os mesmo dados, que foi de 7.750.000 m³/ano. Porém, este valor calculado pelo modelo é bastante próximo ao calculado por Lima *et al* (2001) para a região de Tramandaí e Imbé, que foi de 6.500.000 m³/ano (Tabela 5). Essas diferenças entre os valores podem ser atribuídas aos diferentes dados de onda utilizados por Lima *et al* (2001) e também ao preenchimento dos dados realizado no presente trabalho. Com isso, podemos considerar que o cálculo

de transporte longitudinal de sedimentos realizado pelo modelo numérico GENESIS corresponde ao transporte conhecido e estimado na área de estudos, fato que vem a confirmar o processo de calibração.

Tabela 5. Transporte resultante de sedimentos calculado para a região de Tramandaí e Imbé.

Transporte resultante de sedimentos (m^3/ano)		
GENESIS	Fórmula do CERC	Lima <i>et al</i> , 2001
6.100.00	7.750.000	6.500.000

5.3. SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO MODELO FÍSICO REDUZIDO

A Figura 31 apresenta a área de estudo e a malha utilizada na configuração do arquivo START para as simulações das condições do modelo físico reduzido (descrito no Capítulo 3, item 3.2.1).

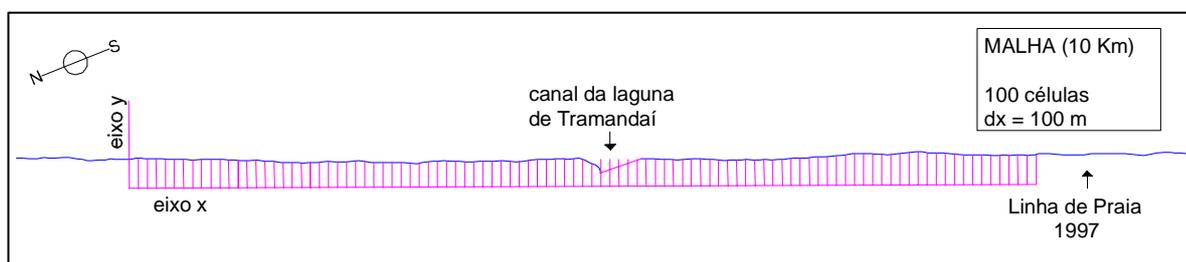


Figura 31. Desenho esquemático da área de estudo e malha utilizada na configuração do arquivo START.

A Figura 32 mostra a área de estudo segundo o arquivo START preparado para simulação das condições do modelo físico reduzido. As principais diferenças são a extensão da linha de praia, que passa de 4 Km na calibração para 10 Km, o tamanho das células que mudam de 50 para 100 m e as fronteiras que são fechadas. O trecho utilizado na calibração compreende as células 1 até 40. A embocadura está localizada entre as células 51 e 52.

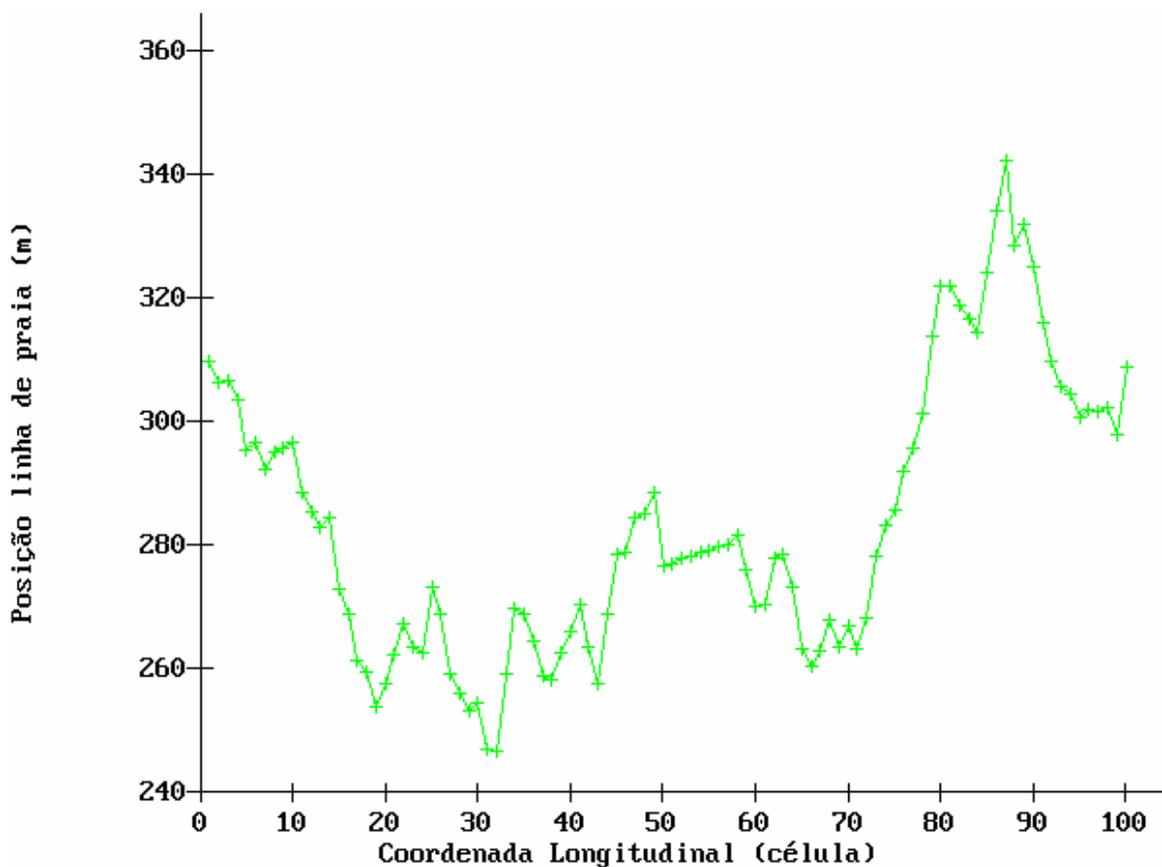


Figura 32. Área de estudo segundo o arquivo START preparado para simulação das condições do modelo físico reduzido.

Uma das grandes limitações do modelo é sua inabilidade de representação de embocaduras, fato que foi determinante na escolha do trecho de calibração, o qual ficou a norte da embocadura. Em função da não representação da embocadura não será possível discutir dois aspectos importantes observados no modelo físico reduzido: a migração da embocadura e as profundidades do canal após a inserção dos molhes.

5.4. INSERÇÃO DOS MOLHES

A simulação do modelo físico reduzido a ser reproduzida no modelo numérico GENESIS, é o teste do "Ensaio E5.4" descrito no relatório do IPH (Motta, 1965). Esta alternativa sugere molhes retos e paralelos, perpendiculares à praia e com espaçamento interno na cota zero de 116 m, alcançando a cota -4 m em direção ao mar. Os molhes eram impermeáveis. A Figura 33 apresenta a área de estudo com a inserção dos molhes de forma esquemática. A Figura 34 apresenta a área de estudo com a inserção dos molhes conforme a saída gráfica do modelo numérico GENESIS.

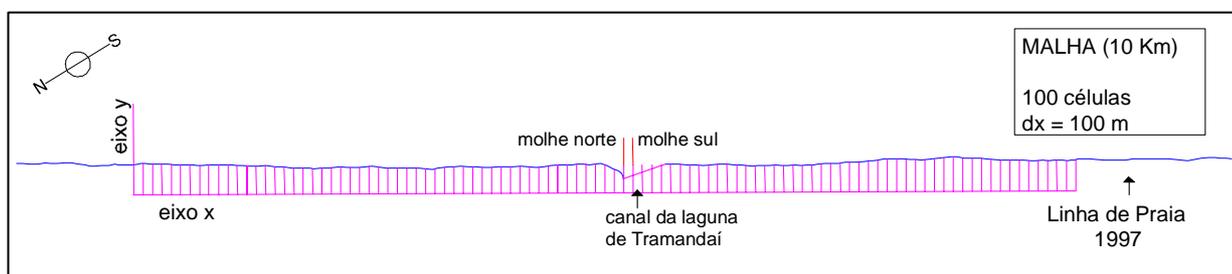


Figura 33. Desenho esquemático da área de estudo com a inserção dos molhes retos e paralelos.

A primeira simulação realizada foi para 4 anos, considerando a entrada de ondas a 15 m de profundidade, como no modelo físico, e um novo arquivo WAVES, com as duas ondas utilizadas no modelo físico reduzido. Utilizamos os molhes calculados com difração e posicionados na parede das células 51 e 53. Na Figura 35 podemos observar a simulação realizada e a resposta da linha de praia a esta obra costeira.

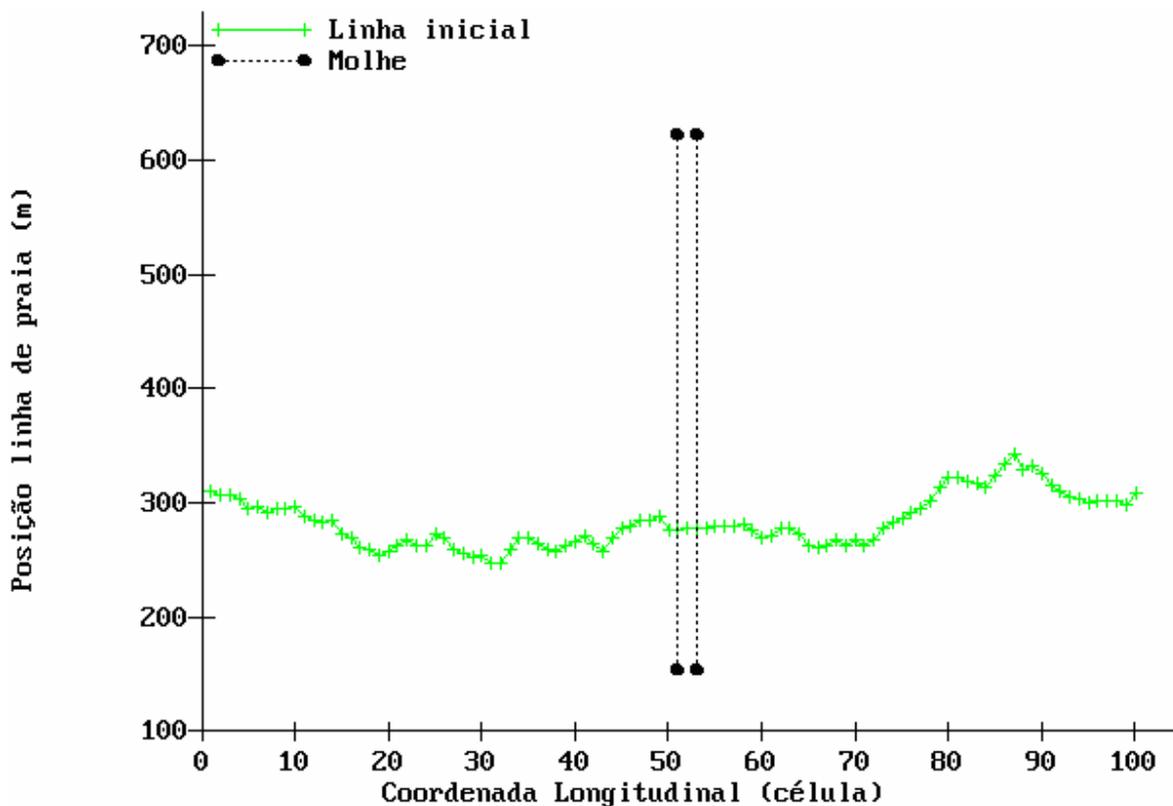


Figura 34. Área de estudos segundo o arquivo START preparado para o modelo físico reduzido com a presença dos molhes na embocadura.

O modelo numérico GENESIS respondeu de forma semelhante ao modelo físico reduzido do IPH, apresentando um grande acúmulo de sedimentos na praia sul (células de 53 a 100) e um recuo na linha de praia a norte da embocadura (células de 1 a 50). A Figura 36 apresenta a diferença entre a linha inicial e a linha de praia calculada pelo modelo numérico GENESIS com os molhes.

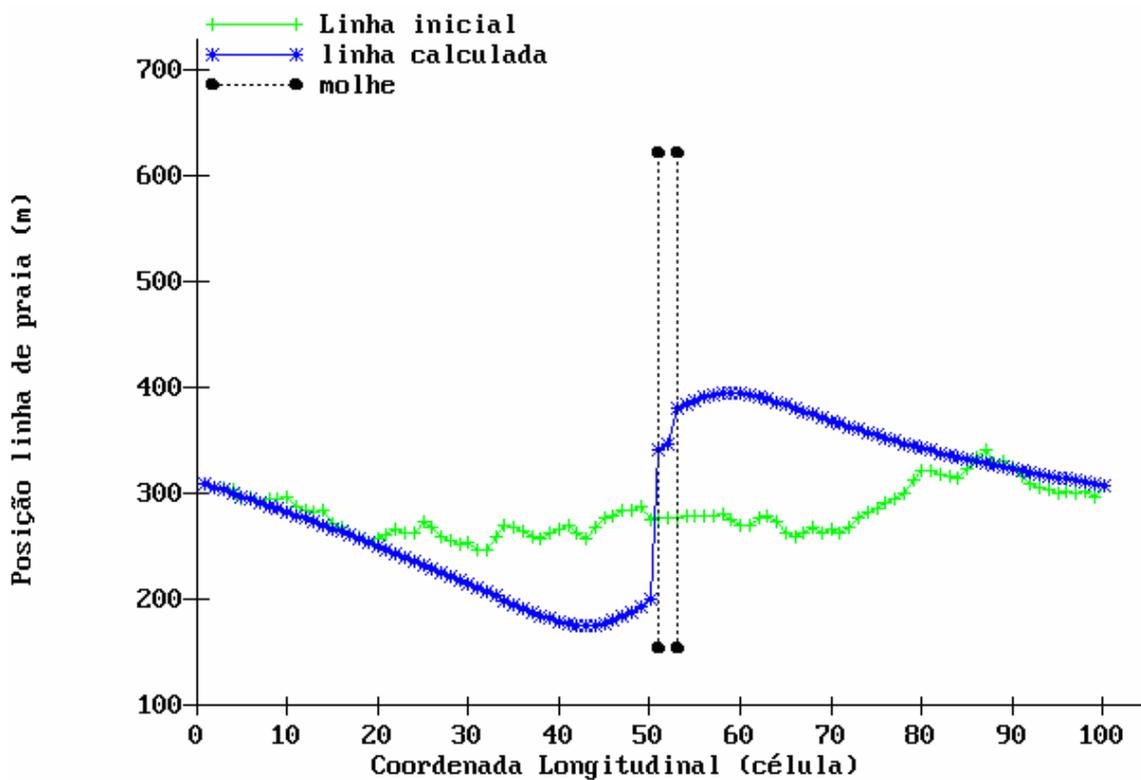


Figura 35. Simulação das condições do modelo físico reduzido, tempo de simulação: 4 anos – ondas do modelo físico.

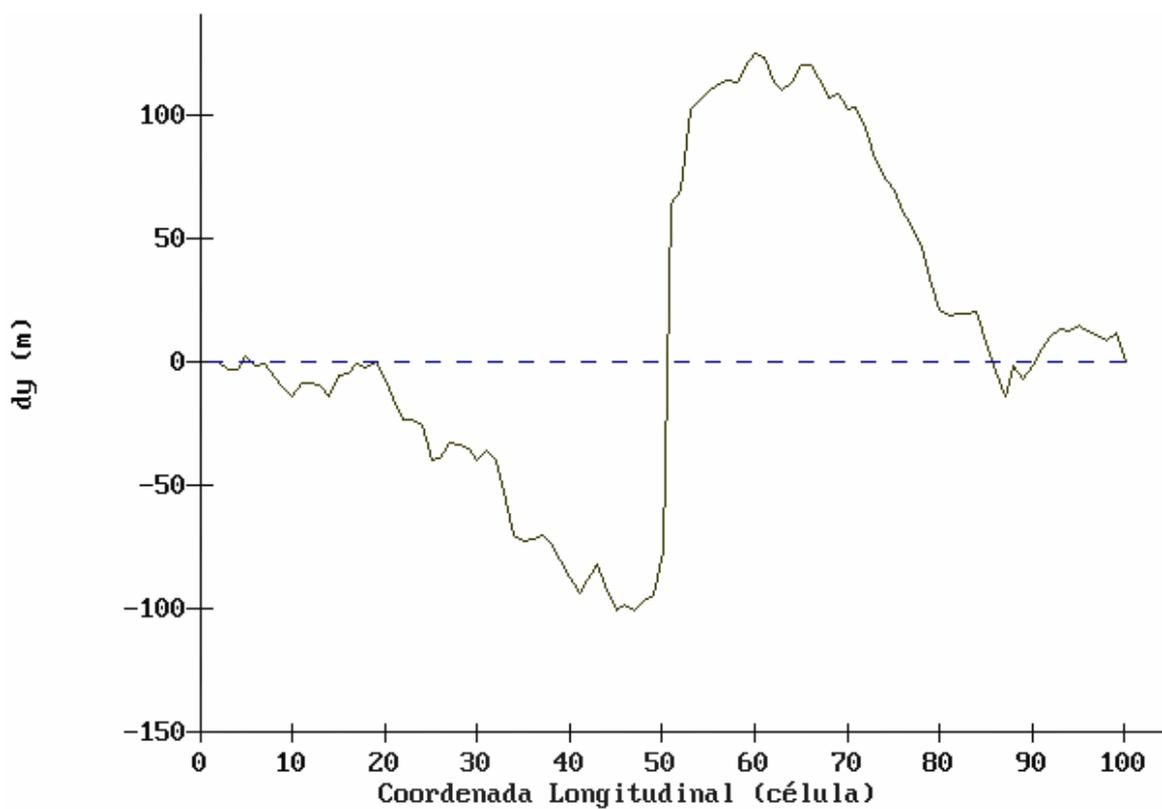


Figura 36. Diferença entre a linha de praia inicial e final após a simulação – ondas do modelo físico.

No modelo físico reduzido a simulação desta mesma hipótese gerou um recuo da linha de praia na porção norte e um acúmulo na porção sul, que não foi quantificado para esta alternativa no período de 4 anos. O modelo numérico GENESIS apresentou um recuo de aproximadamente 100 m da linha de praia a norte dos molhes, e um engorde de aproximadamente 140 m na linha de praia a sul dos molhes. O fato de o engorde ser mais significativo do que o recuo da linha é explicado pelo transporte longitudinal de sedimentos resultante ser de SW para NE, porém o transporte em si ocorre nos dois sentidos, proporcionando depósito de sedimentos na porção norte que atenuam a erosão causada pelo aprisionamento dos sedimentos na porção sul dos molhes.

A mesma simulação foi repetida utilizando-se agora um período de dez anos (Figura 37). A Figura 38 apresenta a diferença entre a linha inicial e a linha de praia calculada pelo modelo numérico GENESIS para o período de dez anos. Observamos que as mesmas tendências se mantêm, apenas há um aumento no acúmulo de sedimentos na praia sul, que foi aproximadamente 150 m, enquanto o valor de recuo manteve-se em torno dos 100 m na praia norte. O valor quantificado pelo modelo físico reduzido para 10 anos foi de 130 m para o acúmulo na praia sul, e de 100 m para recuo da praia norte. Com isso, notamos que o modelo numérico GENESIS reproduziu as condições do modelo físico reduzido de forma bastante eficiente.

A Figura 39 apresenta a sobreposição das linhas calculadas para 4 e 10 anos de simulação. Observamos de forma mais clara que a tendência da linha de praia se mantêm alterando apenas o volume de sedimentos depositados.

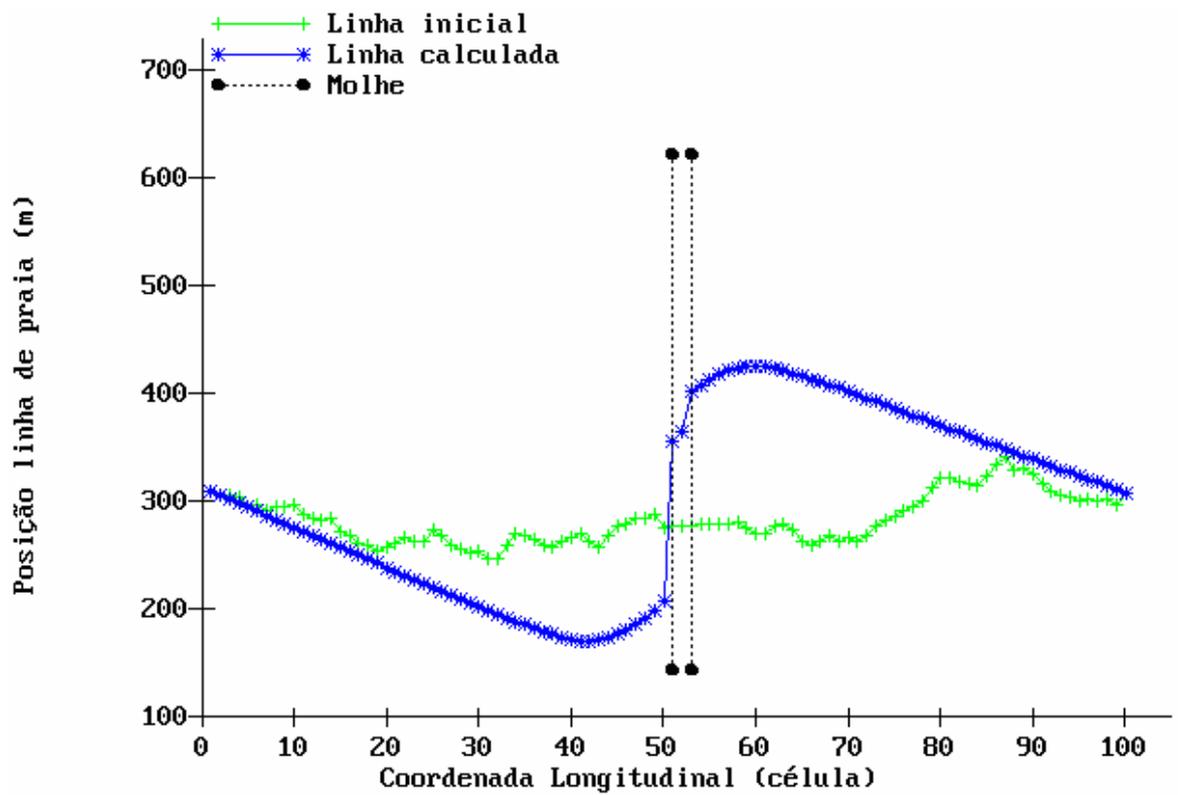


Figura 37. Simulação para 10 anos, ondas do modelo físico reduzido.

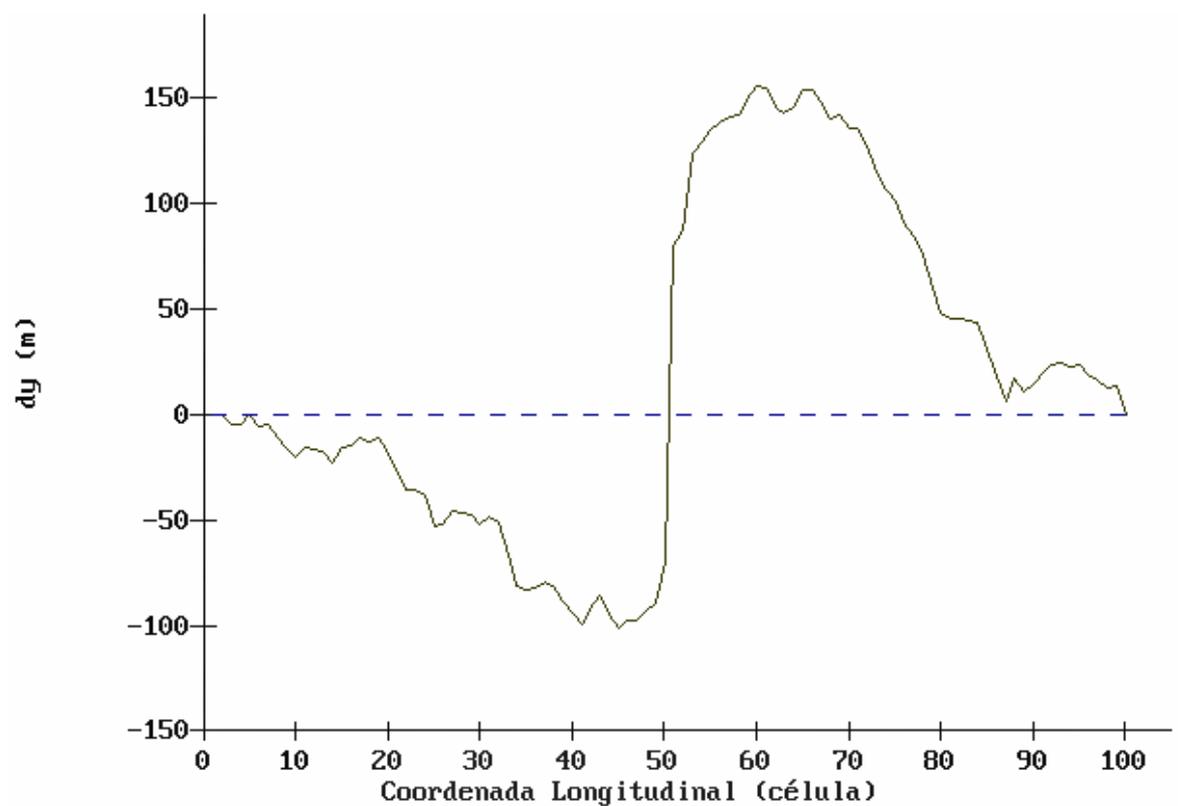


Figura 38. Diferença entre a linha inicial e a calculada para 10 anos de simulação – ondas do modelo físico.

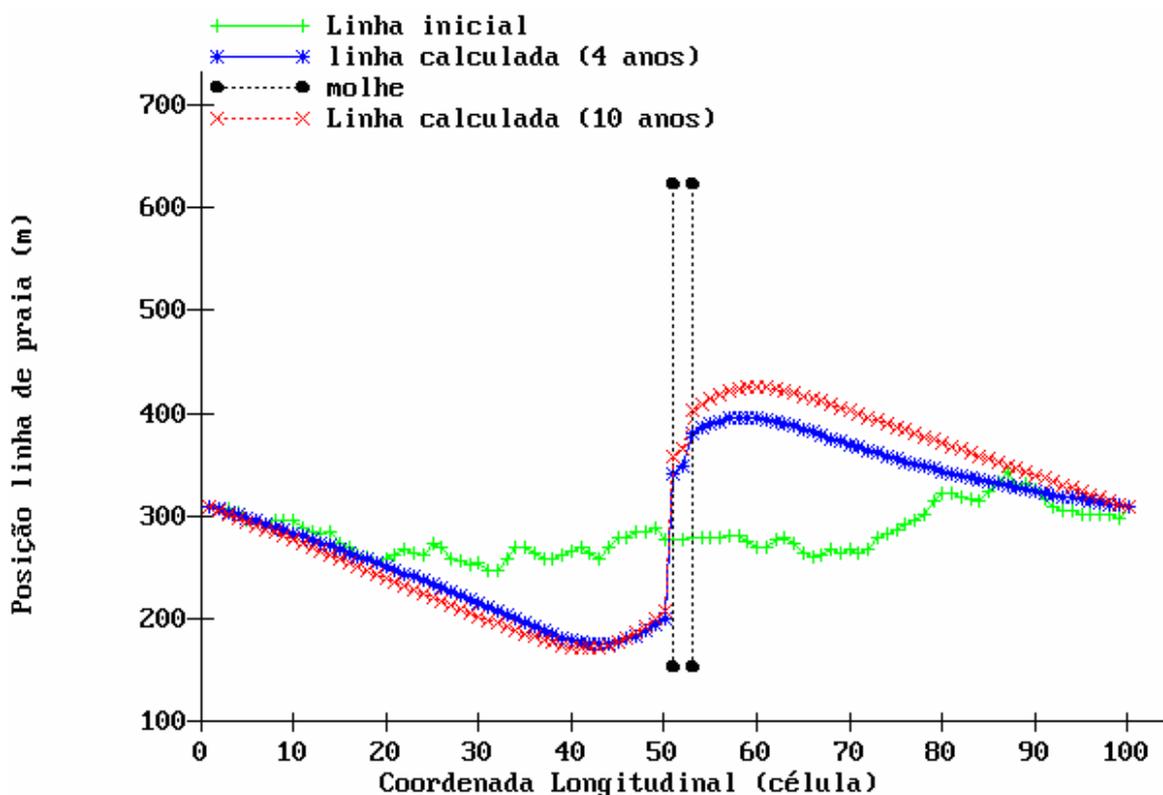


Figura 39. Linhas de praia para 4 anos e para 10 anos – ondas de 1996.

A Figura 40 apresenta a simulação do mesmo arquivo START que reproduz as condições do modelo físico reduzido, porém, com o arquivo WAVES utilizado na calibração do modelo, que contém a série dos dados de onda de 1996. Simulação realizada para 4 anos. A Figura 40 mostra a diferença entre a linha inicial e a linha calculada pelo modelo nos 4 anos simulados com as ondas de 1996.

Utilizando a série de dados de onda na simulação encontramos uma acentuação dos efeitos esperados. Os valores de recuo e avanço da linha de praia dobraram, passando de 100 para 255 m no recuo da praia norte, e de 130 para 264 no avanço da praia sul. Este fato reforça a importância do uso de uma ferramenta que possibilite a melhor reprodução possível do ambiente a ser estudado e das variáveis que atuam nele, principalmente na questão de intervenções humanas no ambiente, e da importância do uso de uma série de dados de onda neste tipo de estudo.

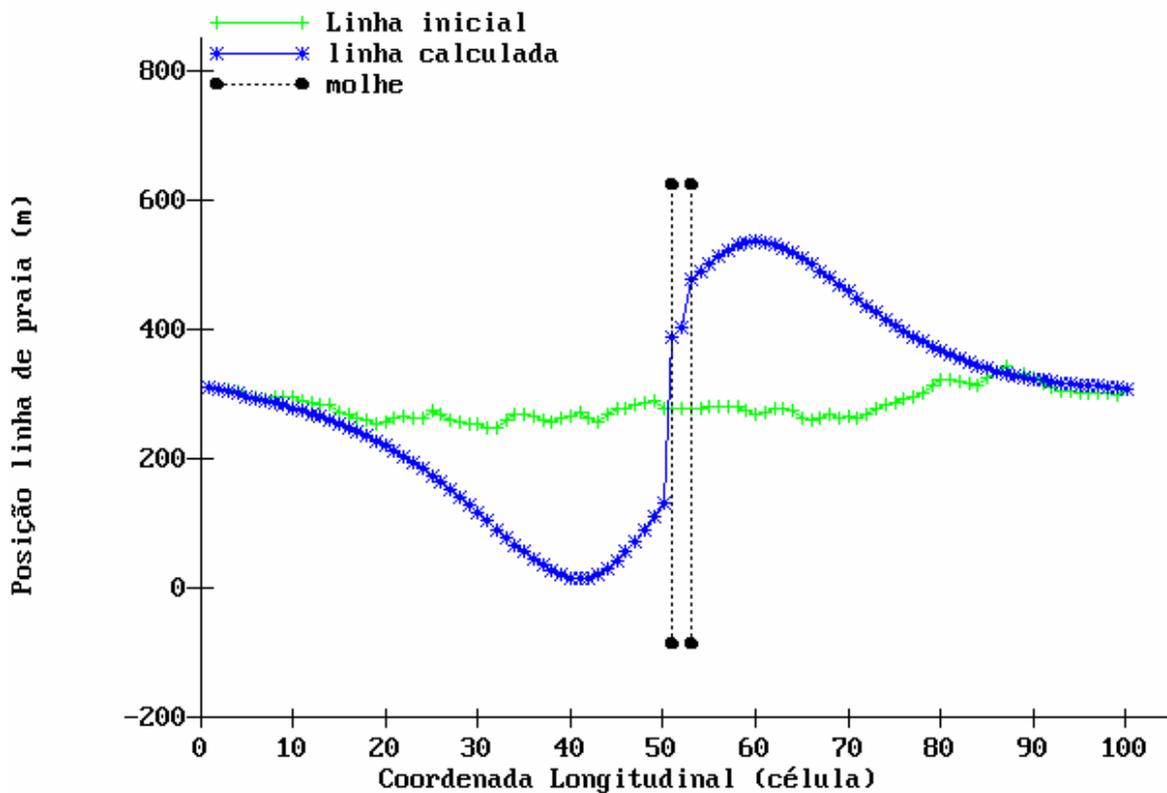


Figura 40. Simulação para 4 anos com a série dos dados de onda de 1996.

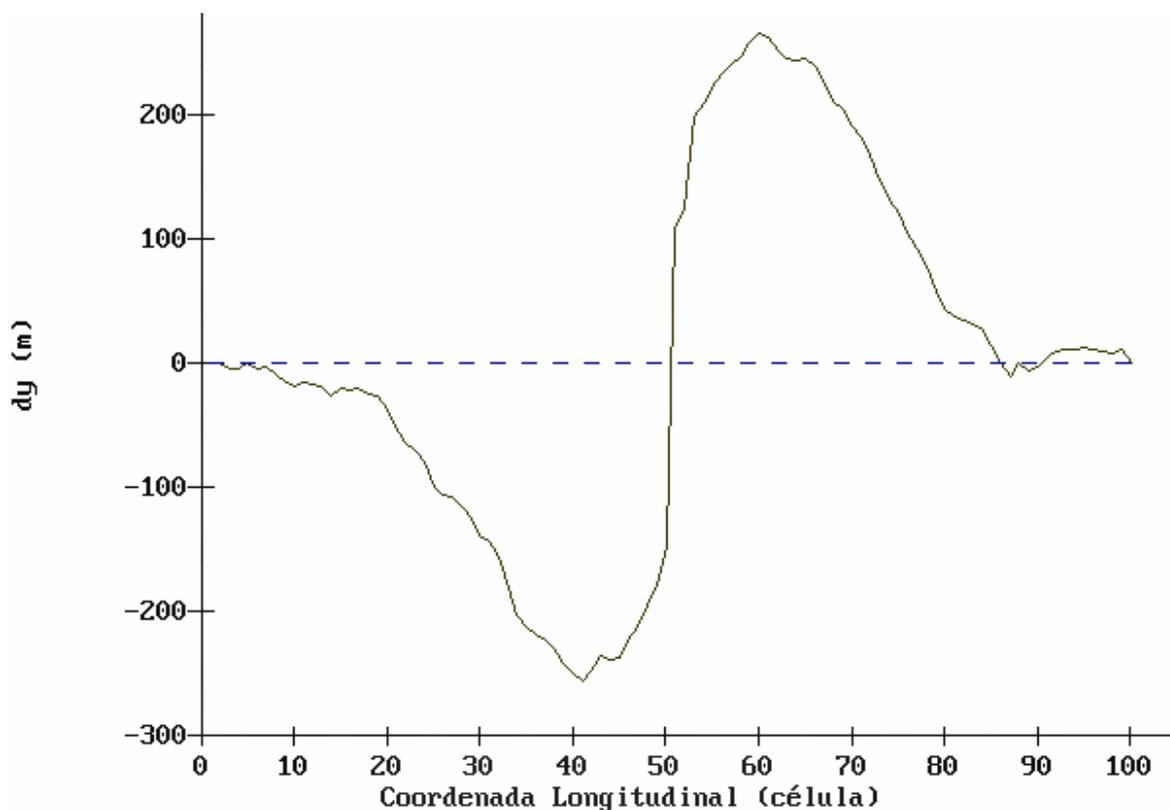


Figura 41. Diferença entre as linhas inicial e calculada, para 4 anos, dados de 1996.

A Figura 42 apresenta a sobreposição das linhas calculadas nas simulações de 4 anos para o arquivo de ondas do modelo físico e da calibração.

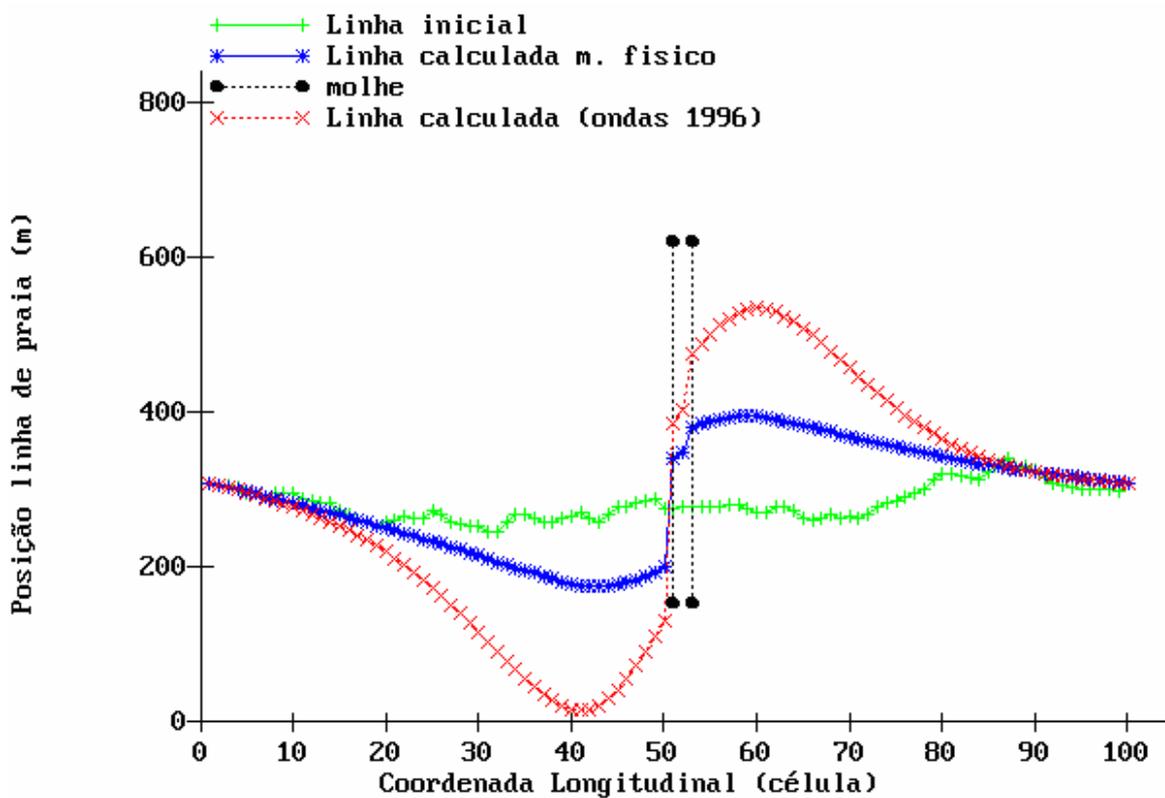


Figura 42. Sobreposição das linhas calculadas nas simulações de 4 anos para o arquivo de ondas do modelo físico e da série de ondas de 1996.

Outra alternativa de molhe proposta no modelo físico reduzido foi simulada no modelo numérico GENESIS. Esta alternativa foi o “Ensaio E5.10” do relatório do IPH (Motta, 1964) e propõe molhes convergentes (Figura 43). O molhe sul tem uma inclinação de 8 graus e o molhe norte de 42 graus.



Figura 43. Foto ilustrativa da área de estudo com a posição dos molhes convergentes.

No modelo numérico GENESIS não há a possibilidade de inserir molhes inclinados. Para reproduzir o efeito deste tipo de estrutura é necessário unir um molhe perpendicular à praia com um molhe paralelo à praia (“Breakwater”), de modo que formem um triângulo onde a hipotenusa tem a inclinação desejada. O molhe norte foi considerado perpendicular à praia. A Figura 44 mostra as estruturas adaptadas na área de estudo.

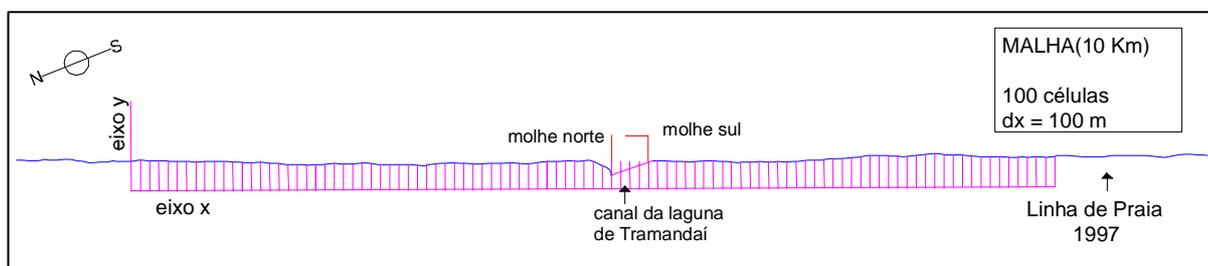


Figura 44. Desenho esquemático da área de estudo com os molhes segundo a configuração do modelo.

A Figura 45 apresenta o molhes convergentes segundo a saída gráfica do modelo numérico GENESIS.

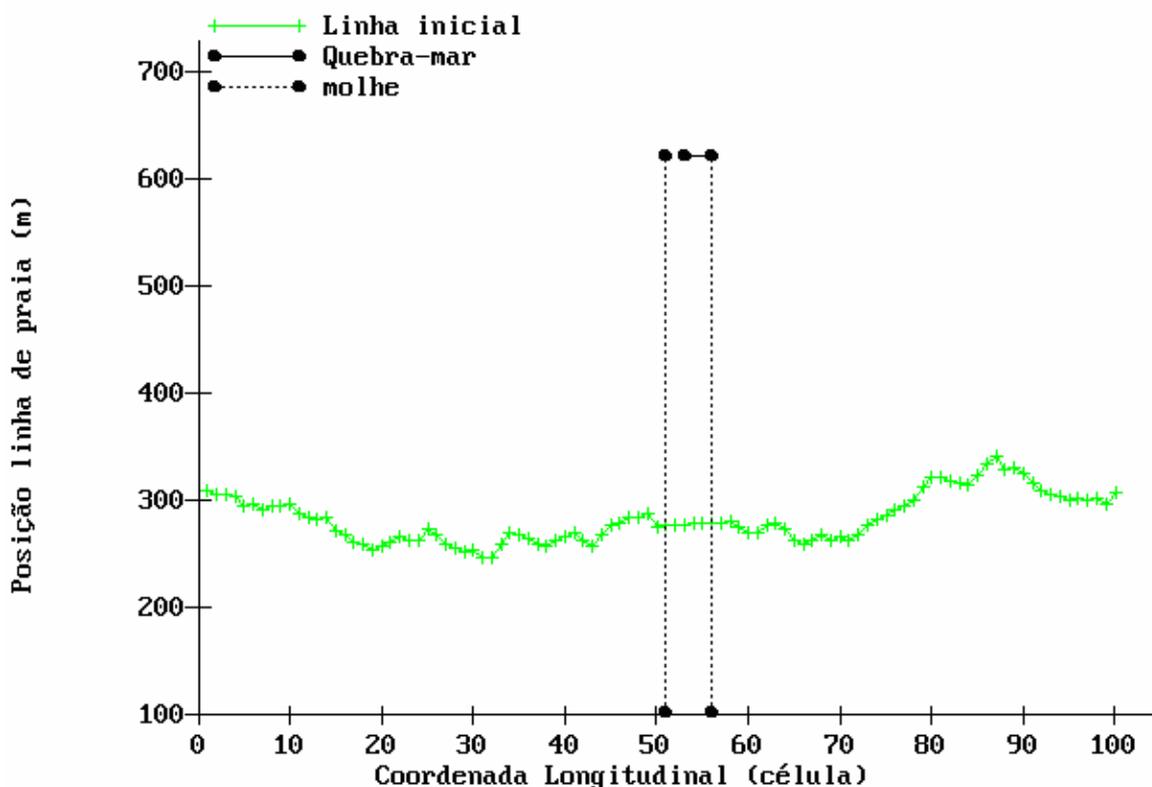


Figura 45. Molhes convergentes segundo a saída gráfica do modelo numérico GENESIS.

Esta simulação foi realizada para um período de 4 anos utilizando-se as ondas do modelo físico reduzido. A Figura 46 apresenta a simulação realizada. E a Figura 47 apresenta a diferença entre a linha calculada e a linha inicial para esta simulação.

Podemos observar que esta alternativa de molhe respondeu de forma semelhante aos molhes paralelos, para as ondas do modelo físico num período de 4 anos de simulação. As diferenças foram de um recuo de 110m na praia norte e um acréscimo de 130 m na praia sul para os molhes convergentes, e de 100 e 130 m respectivamente para os molhes paralelos.

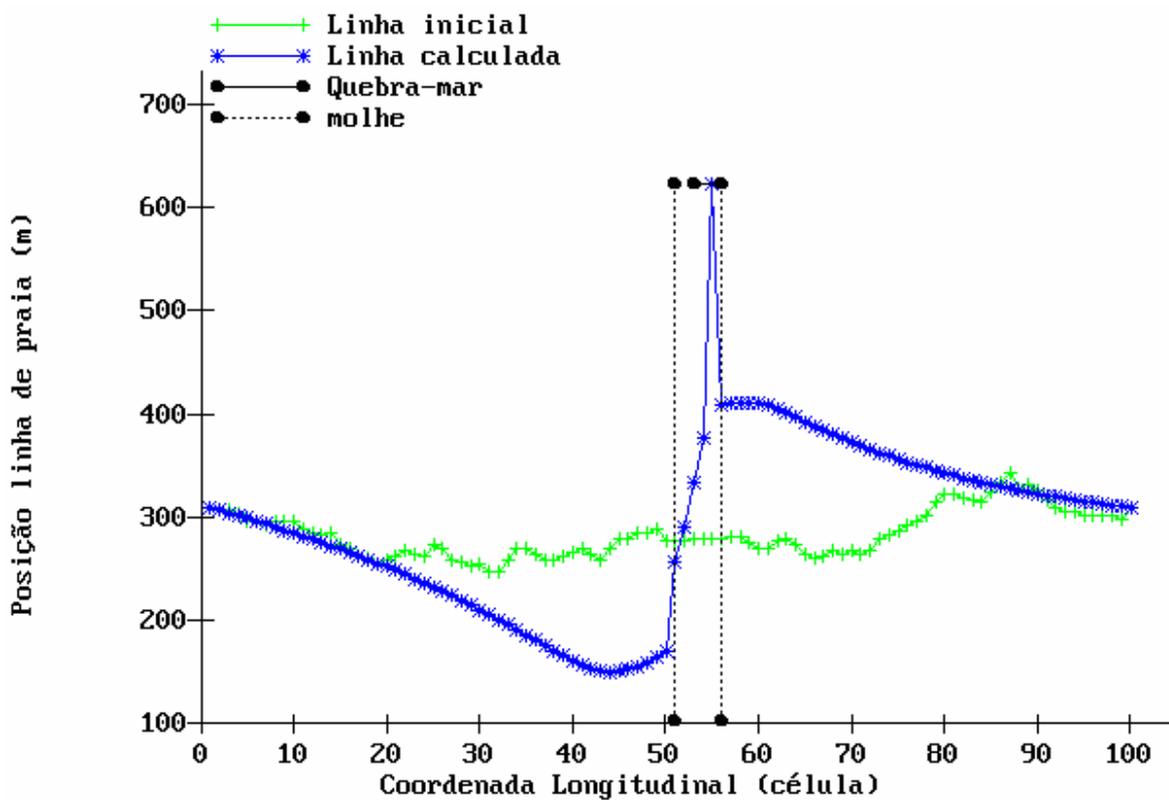


Figura 46. Simulação com molhes convergentes para 4 anos com as ondas do modelo físico reduzido.

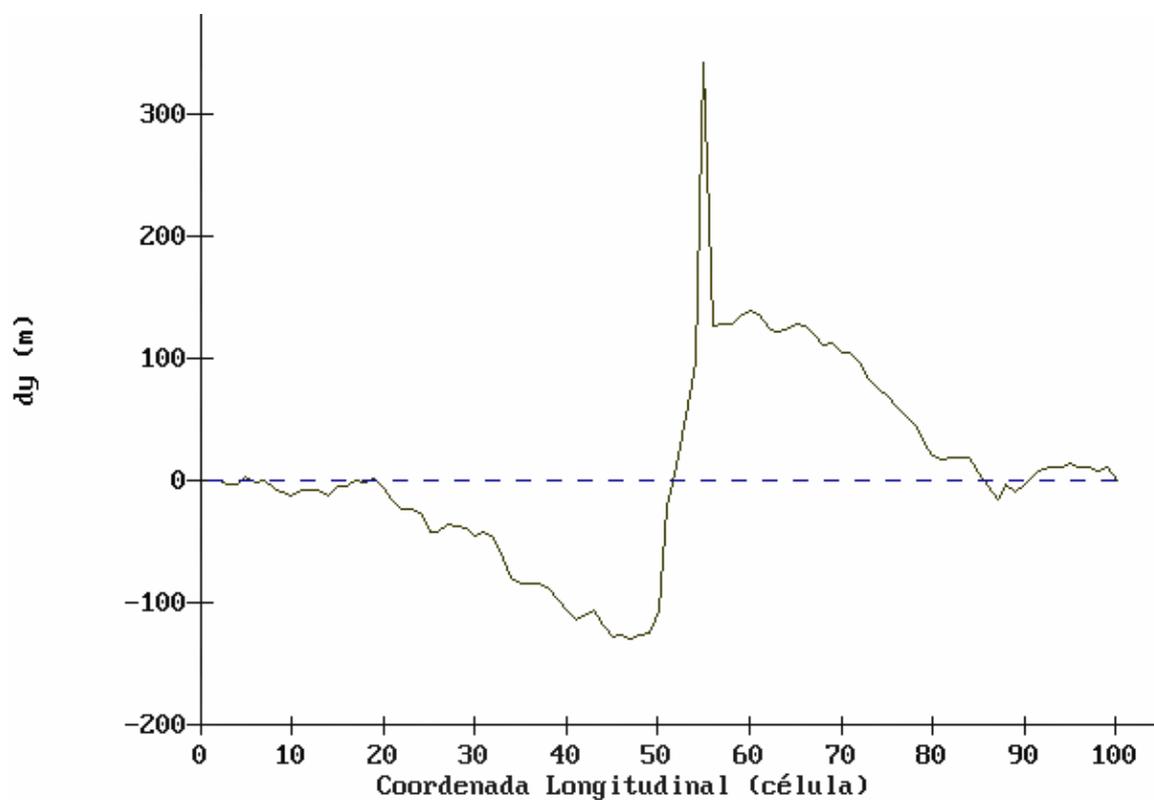


Figura 47. Diferença entre a linha calculada e a linha inicial – ondas do modelo físico.

A simulação com molhes convergentes foi repetida porém utilizando-se a série de dados de onda de 1996. A Figura 48 apresenta a simulação dos molhes convergentes com a série de dados de ondas de 1996. A Figura 49 apresenta a diferença entre as linhas calculada e inicial.

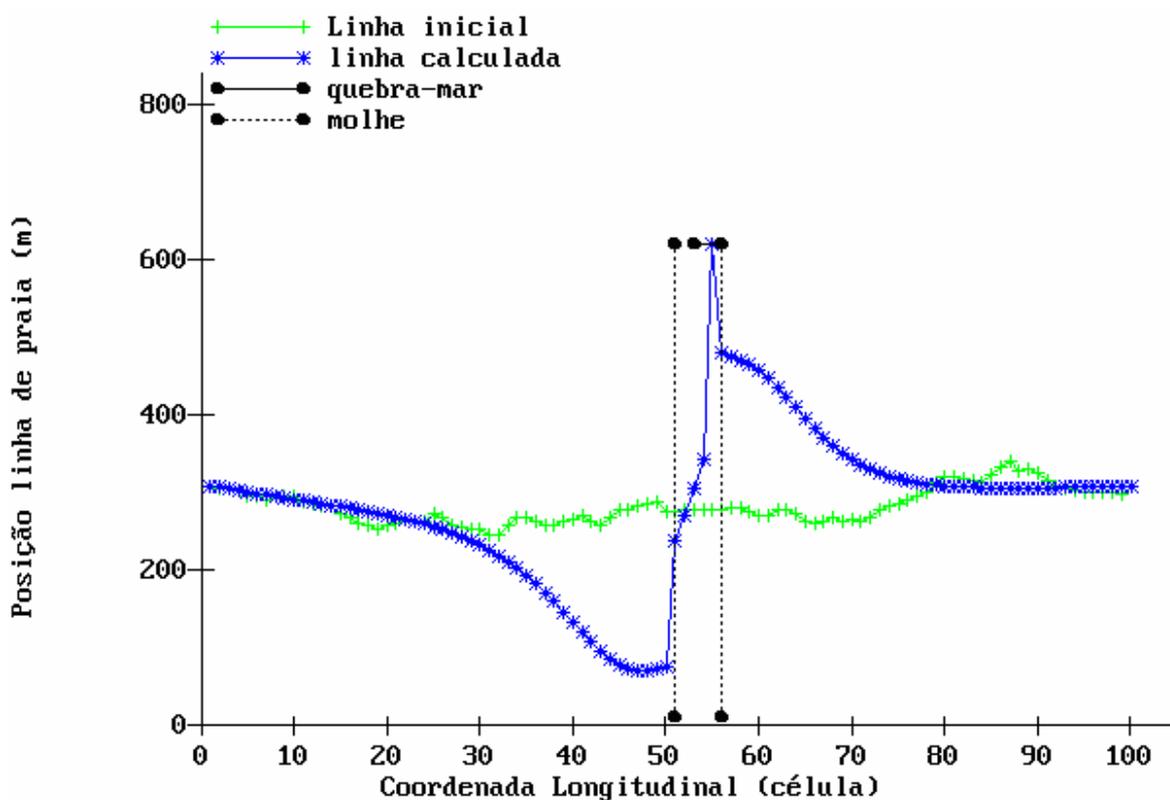


Figura 48. Simulação dos molhes convergentes com a série de dados de ondas de 1996.

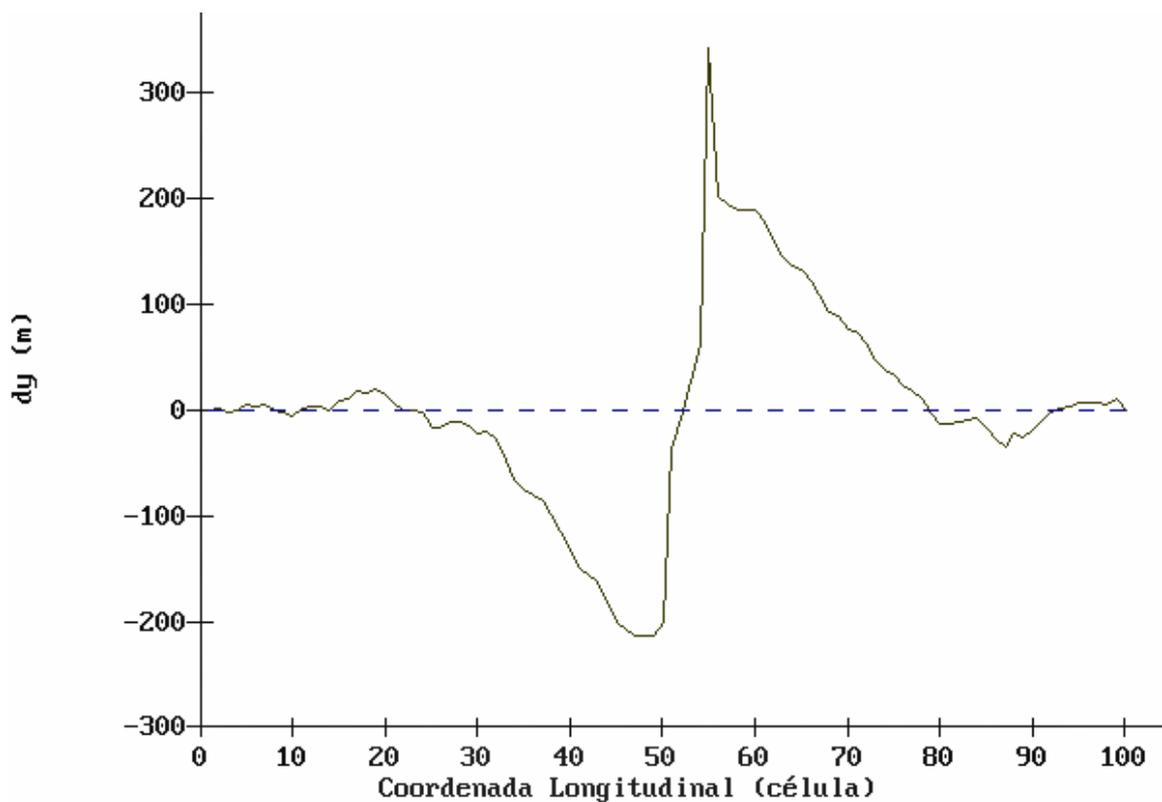


Figura 49. Diferença entre a linha calculada e a linha inicial – ondas de 1996.

A Figura 50 apresenta a sobreposição da linha calculada com as ondas do modelo físico e da linha calculada com a série de ondas de 1996. Podemos observar que novamente houve uma acentuação dos efeitos das estruturas na linha de praia quando se utilizou a série de dados de onda de 1996. As diferenças dobraram passando para 200 m de recuo na praia norte e 200 m de avanço na praia sul.

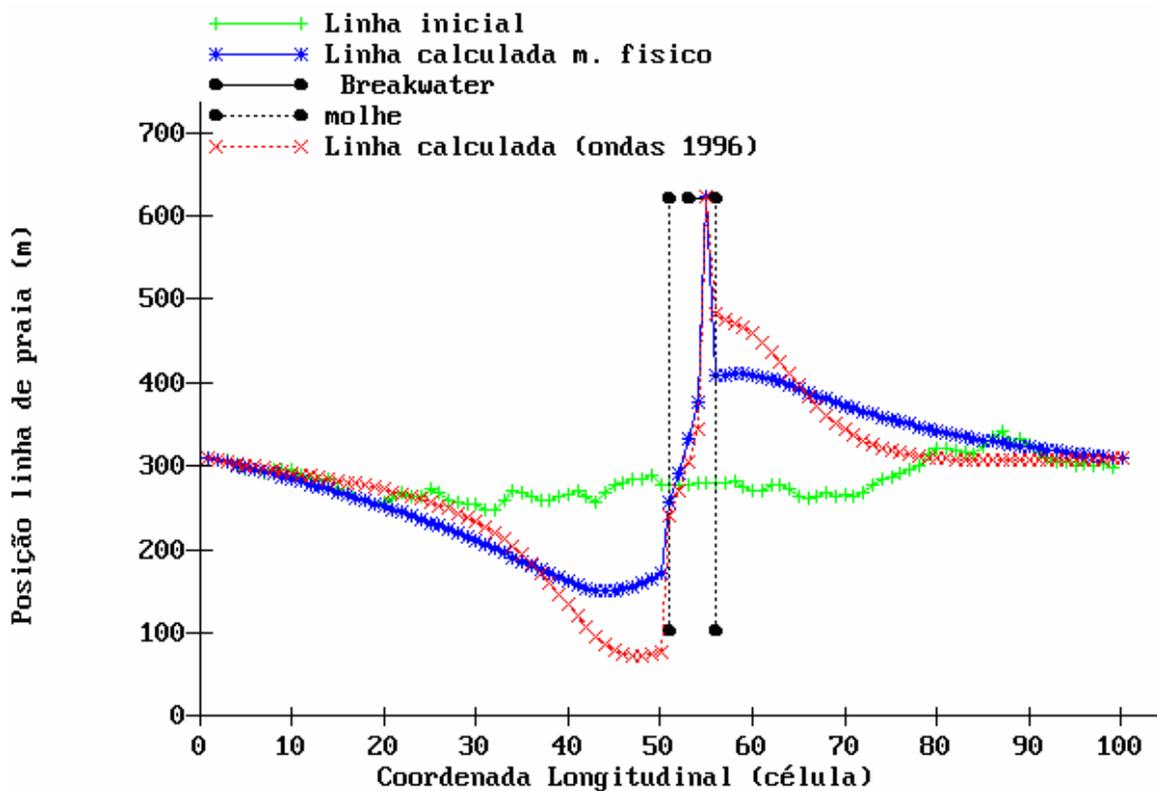


Figura 50. Sobreposição da linha calculada com as ondas do modelo físico e da linha calculada com a série de ondas de 1996, para um período de 4 anos.

5.5 AVALIAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO GENESIS

Observando as simulações realizadas podemos avaliar o comportamento do modelo numérico GENESIS como ferramenta para previsão da evolução da linha de praia para região centro norte do Rio Grande do Sul, quanto aos aspectos de área de estudos, calibração, inserção das estruturas e resposta aos dados de onda.

O modelo reproduziu de forma bastante satisfatória a área de estudo, tendo como grande limitação a não representação de embocaduras, fato que limita a análise de uma embocadura como espigão hidráulico e sua interferência no transporte longitudinal de sedimentos através do modelo.

Também a de se ressaltar que durante o processo de calibração do modelo o mesmo apresentou sensibilidade aos parâmetros altura da berma e profundidade de fechamento, porém quanto ao tamanho de grão o modelo não mostrou sensível. Outro fator é a tendência de alisamento da linha de praia pelo modelo, que é inerente ao esquema de solução matemática e limitação a reprodução fiel de uma linha medida em campo.

O modelo permite a inserção de uma grande quantidade de estruturas, porém algumas precisam ser adaptadas ao seu esquema de solução matemática. Fato que a princípio, conforme observado neste trabalho, não impede a observação da resposta da linha de praia a presença de estruturas.

Durante a aplicação do modelo numérico GENESIS, apresentada neste estudo, pudemos observar a importância da obtenção de uma série de dados de onda para aplicação do modelo numérico. Observamos a atenuação dos efeitos na linha de praia causados por estruturas em função de uma representação simplificada das ondas da região. Onde vale ressaltar que a série utilizada neste trabalho também não era a ideal, apresentando bastante falhas e um período inferior a 1 ano.

Apesar das diversas limitações do modelo, sua principal vantagem é a observação de uma região em escala de anos a décadas, de 1 a 100 Km, de forma ampla, onde se pode observar, mesmo que de maneira limitada, as tendências gerais de evolução da linha de praia da mesma.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Observando-se os resultados obtidos e os objetivos propostos neste trabalho, pode concluir-se que:

- o modelo numérico GENESIS foi calibrado para a costa centro norte do estado do Rio Grande do Sul de forma satisfatória, confirmando a indicação de ser utilizado em linhas de praia arenosas e expostas;
- o cálculo do transporte longitudinal de sedimentos realizado pelo modelo numérico GENESIS correspondeu ao estimado para a região;
- o modelo numérico GENESIS reproduziu de forma bastante eficiente as condições simuladas no modelo físico reduzido da região de Imbé e Tramandaí;
- o modelo numérico GENESIS reproduziu de forma bastante eficiente o efeito das estruturas utilizadas no modelo físico reduzido da região de Imbé e Tramandaí;
- a importância do uso de uma ferramenta mais eficiente na introdução das variáveis que atuam em determinado ambiente pode ser observada de forma bastante clara, quando comparou-se as simulações geradas com as duas ondas do modelo físico e com uma série de dados de onda;
- os objetivos propostos para este trabalho foram alcançados com sucesso, através da calibração do modelo para a região de estudo, e da comparação entre o modelo numérico e o modelo físico reduzido.
- muitas outras hipóteses de molhes são apresentadas por Motta (1965) e poderiam ter sido testadas para a região, mas em função da falta de detalhes sobre os molhes, elas não seriam executadas com o mesmo êxito.

No interesse da continuidade de estudos na região utilizando-se modelos numéricos recomenda-se a aquisição de uma série de dados de onda de no mínimo 3 anos, a coleta de dados batimétricos mais detalhados e um estudo mais aprofundado sobre as estruturas costeiras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M.B. 1988. *Specifications for two and three dimensional models for environmental applications*. Computer modelling in ocean engineering, Schrefler & Zienkewicz (eds). Balkema, Rotterdam. 3-8.

ALMEIDA, L.E.S.B. & TOLDO Jr, E.E. 1997. Relatório técnico – Projeto Estudos Ambientais em Áreas Costeiras e Oceânicas na Região Sul do País – Região de Osório, RS – Grupo de Física. Porto Alegre (RS) IPH/UFRGS.

ALMEIDA, L.E.S.B.; ROSAURO, N.M.L. & TOLDO JR, E.E. 1997. Análise preliminar das marés na barra do rio Tramandaí (RS-Brasil). XIII Simpósio de Recursos Hídricos, Brasil. *Anais...*p559-566.

ALMEIDA, L.E.S.B., ROSAURO, N.L., TOLDO JR, E.E. & GRUBER, N.L.S. 1999. Avaliação da profundidade de fechamento para o litoral norte do Rio Grande do Sul. Congresso Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH)

ALVAREZ, J.A., ROCHA GRÊ, J.C. & TOLDO JR, E.E. 1983. Estudos oceanográficos e sedimentológicos preliminares da praia da Tramandaí – RS. Instituto de Geociências/UFRGS, Porto Alegre, Brasil. *Pesquisas*, 15:66-85.

BIRD, E.C.F. 1996. *Beach Management*. Ed Wily. England v.1.

BRUUN, P. 1954. Coast erosion and development of beach profile. U.S. Army Beach Er. B. Tech. Mem, nº 44.

CALLIARI, L.J., TOZZI, H.A.M. & KLEIN, A.H.F. 1998. Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in southern Brazil – Rio Grande to Chuí, RS. *Acad. Bras.* 70 (2).

COLI, A.B. 2000. Estudo sobre o clima de ondas em Rio Grande, RS. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em engenharia oceânica. FURG. 79p.

DAVIES, J.L. 1980. Geographical variation in coastal development. 2º ed., Logman, Londres. 212 p.

DEAN, R.G. 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Ocean Engineering Report, nº 12. University of Delaware, Newark.

DILLENBURG, S.R. 1994. A Laguna de Tramandaí: evolução geológica e aplicação do método geocronológico de termoluminescência na datação de depósitos sedimentares Lagunares. Instituto de Geociências, UFRGS. Porto Alegre, tese de doutorado, 142p.

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.

ESTEVES, L.S., PIVEL, M.A.G., VRANJAC, M.P., AREJANO, T.B. & SILVA, A.R.P. 2000. Beachfront owners perception of erosion along an armored shoreline in southern Brazil. Pesquisas, 27(2):97-109.

ESTEVES, L.S., TOLDO Jr, E.E., ALMEIDA, L.E.S.B. & NICOLODI, J.L. 2001. Variações da linha de praia no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. In: Congresso do Quaternário de países de línguas ibéricas. Lisboa, Portugal. 194-197p.

ESTEVES, L.S., TOLDO Jr, E.E., DILLENBURG,S.R. & TOMAZELLI, L.J. 2002. Long and short-term coastal erosion in southern Brazil. Journal of Coastal Research, Proceedings of ICS'02, SI 36:273-282.

GRUBER, N.L.S. & NICOLODI, J. 1998. Limites externos da antepraia da plataforma continental de Tramandaí – RS. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, II.Ed. Especial GEOSUL, UFSC. Florianópolis. 235-238p.

GRUBER, N.L.S., TOLDO JR, E.E., BARBOZA, E. & NICOLODI, J. 2000. Perfil praial de equilíbrio das praias do litoral norte do RS. XIII Semana Nacional de Oceanografia (SNO). *Anais...Itajaí*, p461-463.

HALLERMEIER, R.J. 1978. Sand transport limits in coastal structure design. In: Coastal Structures, ASCE, pp1493-1512.

HANSON, H. 1987. GENESIS A Generalized Shoreline Change Numerical Model for Engeneering. Use Report n°1007, Department of Water Resources Engineering, University of Lund, Sweden.

HANSON, H. & KRAUS, N.C. 1986. Forecast of shoreline change behind multiple coastal structures. Coastal Engeneeringin Japan, vol 29, pp 195-213.

HANSON, H. & KRAUS, N.C. 1989. GENESIS A Generalized model fro Simulating Shoreline Change. Technical Report CERC-89-19. U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

HASENACK, H. & FERRARO, L.W. 1989. Considerações sobre o clima de Tramandaí, RS. Instituto de Geociências/UFRGS, Porto Alegre, Brasil. *Pesquisas*, 22:53-70.

HOGBEN, N. & LUMB, F.E. 1967. Ocean wave Statistics. London: National Physical Laboratory. Ministry of Technology.

HOSMI, A. 1978. Wave climate in surf zones off the brazilian coast. Coastal Engineering, pp.117-133.

KOMAR, P.D. & INMAN, D.L. 1970. Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysics Research*, 75:5914-5927.

KRAUS, N.C. & HARIKAI, S. 1983. Numerical model of the shoreline change at Oarai beach. *Coastal Engineering*, 7:1-28. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam.

KRAUS, N.C., HANSON, H. & HARIKAI, S. 1984. Shoreline change at Oarai beach, Japan – past, present and future. In: *International Conference on Coastal Engineering*, 19, Houston. Proceedings..., ASCE, pp.2107-2123.

LIMA, S.F. 2002. Modelagem numérica da evolução da linha de praia das praias localizadas a oeste da cidade de Fortaleza, Ceará. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, UFRGS. 92p.

LIMA, S.F., ALMEIDA, L.E.S.B. & TOLDO, E.E. 2001. Estimativa da capacidade do transporte longitudinal de sedimentos a partir de dados de ondas para a costa do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 28(2):99-107. Porto Alegre.

LUGUET-HIGGINS, M.S. 1970. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. *Journal of Geophysical Research*, 75:6778-6789.

MARTINS, L.R. 1967. Aspectos texturais e deposicionais dos sedimentos praias e eólicos da planície costeira do Rio Grande do sul. *Publicação Especial*. Escola de Geologia, UFRGS, Porto Alegre, 102p.

MACHADO, F.P. 1950. Contribuição ao estudo do clima do Rio Grande do Sul. IBGE, Rio de Janeiro. 91p.

MORAES, A.C.R. 1995. Os impactos da política urbana sobre a zona costeira. Ministério do meio ambiente, dos recursos hídricos e da Amazônia legal, Secretaria de coordenação dos assuntos do meio ambiente, MMA. Brasília 33p.

MOORE, B.D. 1982. Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height. Master thesis, Newark: University of Delaware, Department of civil engineering.

MOTTA, V.F. 1963. Relatório – análise e previsão de alturas de onda em Tramandaí. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, Porto Alegre, 30p.

MOTTA, M.V. 1965. Relatório geral sobre o estudo em modelo reduzido para regularização da embocadura do rio Tramandaí. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. Porto Alegre, 56p.

MOTTA, V.F. 1969. Relatório diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela barra do Rio Grande. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. Porto Alegre, 144p.

MOTTA, V.F. 1972. Curso de teoria da semelhança. Editora da UFRGS. UFRGS, Porto Alegre. 145p.

NOBRE, L.C., CAVALCANTI, M.A.G., NOBRE, P., KAYANO, M.T., RAO, V.B., BONATTI, J.P., UVO, C.B. & COHEN, J.C. 1986. Aspectos da climatologia dinâmica do Brasil. Climanálise, Número Especial.

OZASA, H. & BRAMPTON, A.H. 1980. Mathematical modelling of beaches backed by seawalls. Coastal engineering, vol 14, (1):47-64.

PELNARD-CONSIDÈRE, R. 1956. Essai de théorie de l'évolution des forms de rivege en plages de sable et de galets. In: 4ème Journées de l'Hydraulique, Les Energie de la Mer, Question III, Rapport n°1, pp 289-298.

PILKEY, O.H. & THIELER, E.R. 1992. erosion of the United States Shoreline. *In: Quaternary Coasts of United States: Marine and Lacustrine Systems*. SEPM Special Publication n. 48, 7p.

PRESTIL, A.C. 1994. Modelado del transporte longitudinal de sedimentos: aplicacion a la costa catalana. Tese doutorado, Universidade Politecnica de Catalunya, Barcelona. 355p.

Relatório Interno 1996. IG/CECO/UFRGS.

SALIM, L.H. 1998. Implementação do modelo numérico de evolução de praia – GENESIS – em um trecho litorâneo da cidade de Fortaleza, Ceará. Dissertação de Mestrado – UFRGS/IPH. Porto Alegre, RS.

SARAIVA, L.S. 1990. Imbé – Histórico turístico. Ed. Com e Representações Ltda. Porto Alegre, RS.

SHENG, Y.P., LEE, H.K. & WANG, K.H. 1990. *On numerical strategies of estuarine and coastal modeling*. Estuarine and Coastal Modeling. ACSE, 291-301.

SHORT, A.D. 1999. Handbook of beach and shoreface morphodynamics. Ed. John Wiley & Sons Ltd. Sydney, Australia.

SHORT, A.D. & HESP, P.A. 1982. wave, beach and dune interactions in south-eastern Australia. *Marine Geology*. 48:259-284.

TABAJARA, L.L. & ALMEIDA, L.E. 1999. Variações da temperatura, salinidade e material em suspensão em um ciclo de maré semidiurna no estuário de Tramandaí. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte. *Anais*, ABRH.

TABAJARA, L.L. & DILLENBURG S.R. 1997. Batimetria e sedimentos de fundo da Laguna de Tramandaí – RS. *Notas Técnicas*, UFRGS. 10:21-33.

TABAJARA, L.L.C.A. & Martins, L.R.S. 1996 Sub-Projeto: DINÂMICA SEDIMENTAR DA ANTE PRAIA E ZONA DE SURFE DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL.

TABAJARA, L.L. & WOLF, I.M. 1997. Sedimentology of the inlet of Tramandaí, RS, Brazil. In: I Congresso Latinoamericano de Sedimentologia. Venezuela. *Anais*, 2:291-298.

TOLDO Jr, E.E., ALMEIDA, L.E.S.B., DILLENBURG, S.R., TABAJARA, L.L., FERREIRA, E.R. & BORGHETTI, C. 1993a. Parâmetros morfodinâmicos e deriva litorânea da praia de Tramandaí, RS. *GeoSul*, 15:75-86.

TOLDO JR, E.E., DILLENBURG, S.R., ALMEIDA, L.E.S.B., TABAJARA, L.L., MARTINS, R.R. & CUNHA, L.O.B.P. 1993b. Parâmetros morfodinâmicos da praia de Imbé, RS. Instituto de Geociências/UFRGS, Porto Alegre, Brasil. *Pesquisas*, 20(1):27-32.

TOLDO Jr, E.E., ALMEIDA, L.E.S.B. & CORREA, I.C.S. 1996. Produção de sedimentos no sistema Lagunar da Lagoa do Patos, RS. In: II Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Rio de Janeiro, Brasil. ABRH, 261-268p.

TOLDO JR, E.E., ALMEIDA, I.E.S.B., BARROS, C.E., MARTINS, L.R.S. & NICOLODI, J.L.. 1999. *Retreat of the Rio Grande do Sul Coastal Zone, Brazil*. In: Non Living Resoucers of the Southern Brazilian Coastal Zone and Continental Margin – Intergovernmental Oceanographic Commission / IOC-UNESCO. Ed. Porto Alegre: CECO/UFRGS, 62-68p.

TOLDO Jr, E.E., ALMEIDA, L.E.S.B., ESTEVES, L.S. & NICOLODI, J.L. 2002. Shoreface width as a function of longshore transport. ICS.; *Anais...*

TOMAZELLI, L.J. 1990. Contribuição ao estudo de sistemas deposicionais holocênicos do nordeste da província costeira do Rio Grande do Sul – com ênfase no sistema eólico. Tese de doutorado, Instituto de Geociências da UFRGS, 270p.

TOMAZELLI, L.J. & VILLWOCK, J.A. 1991. Geologia do sistema Lagunar holocênico do litoral norte do Rio Grande do Sul. Pesquisas. Porto Alegre, 18(1): 13-24.

TOMAZELLI, L.J. & VILLWOCK, J.A. 1992. Considerações sobre o ambiente praial e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. Instituto de Geociências/UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Pesquisas, 19(1):3-12.

TOMAZELLI, L.J. 1993. O regime de ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. Instituto de Geociências/UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Pesquisas, 20(1):18-26.

TOZZI, H.A.M. & CALLIARI, L.J. 2000. Morfodinâmica da praia do Cassino, RS. Pesquisas em Geociências, UFRGS. Porto Alegre. 27(1):29-42.

URIEN, C.M., MARTINS, L.R. & BUTLER, L.W. 1973. Fisiografia da margem continental atlântica sul americana e unidades morfo-estruturais. Série Mapas. Instituto de Geociências, UFRGS, n.6.

U.S. ARMY ENGINEERS (USAGE) 1984. Shore Protection Manual. Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA, USA. Govt. Printing Office.

U.S. ARMY ENGINEERS (USAGE) 1985. Sediment grain size and fall velocity effects on longshore sediment transport. Fort Belvoir: Coastal Engineering Research Center.

VILLWOCK, J.A. 1972. Contribuição à geologia do Holoceno da Província Costeira do Rio Grande do sul. Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS. Dissertação de Mestrado. 133p.

VILLWOCK, J.A. 1978. Aspectos da sedimentação na região nordeste da Lagoa dos Patos: Lagoa do casamento e Saco do cocuruto, RS. Pesquisas, Porto Alegre, 11:193-233.

VILLWOCK, J.A. 1984. Geology of the coastal providence of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A Synthesis. Pesquisas, 16:5-49.

WAINER, I.J. 1963. Análise e Previsão das Alturas de onda em Tramandaí. Relatório Técnico. Porto Alegre (RS) IPH/UFRGS

WESCHENFELDER, J. 1996. Variabilidade morfodinâmica das praias entre Imbé e Arroio do Sal, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Dissertação de mestrado; Curso de Pós- Graduação em Geociências/UFRGS. 132p (inédito).

WESCHENFELDER, J., ZOUAIN, R.N.A., ZOMER, S.L.C. & SOUTO, R.P. 1997. Caracterização morfológica das praias oceânicas entre Imbé e Arroio do Sal, RS. Instituto de Geociências/UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Notas Técnicas, 10:35-48.

WRIGHT, L.D. & SHORT, A.D. 1984. Morphodynamics variability of surf zones and beaches: a synthesis. Mar. Geol., 53:93-118.

ANEXO 1

* INPUT FILE START.DAT TO GENESIS VERSION 3.0 *

A----- MODEL SETUP -----A

A.1 RUN TITLE

simulacao 97 00 DT 3 D50 0.19 grid ao norte do rio tramandai

A.2 INPUT UNITS (METERS=1; FEET=2): ICONV

1

A.3 TOTAL NUMBER OF CALCULATION CELLS AND CELL LENGTH: NN,
DX

80 50

A.4 GRID CELL NUMBER WHERE SIMULATION STARTS AND NUMBER
OF CALCULATION

CELLS (N = -1 MEANS N = NN): ISSTART, N

1 80

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

960101

A.7 DATE WHEN SHORELINE SIMULATION ENDS OR TOTAL NUMBER
OF TIME STEPS

(DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501): SIMDATE

991231

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

0

A.12 LONGSHORE SAND TRANSPORT CALIBRATION COEFFICIENTS:
K1, K2

0.5 0.3

A.13 PRINT-OUT OF TIME STEP NUMBERS? (YES=1, NO=0): IPRINT

0

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

18

B.3 IS AN EXTERNAL WAVE MODEL BEING USED (YES=1; NO=0): NWD

0

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

0

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: N WAVES

1

B.11 DATE WHEN WAVE FILE STARTS (FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501): WDATS

960101

C----- BEACH -----C

C.1 EFFECTIVE GRAIN SIZE DIAMETER IN MILLIMETERS: D50

0.19

C.2 AVERAGE BERM HEIGHT FROM MEAN WATER LEVEL: ABH

0.2

C.3 CLOSURE DEPTH: DCLOS

7.6

C.4 ANY OPEN BOUNDARY? (NO=0, YES=1): IOB

1

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

0

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

C.10 OPEN BOUNDARY ON RIGHT-HAND SIDE? (NO=0, YES=1): IOBN

1

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

32

D----- NON-DIFFRACTING GROINS -----D

D.1 ANY NON-DIFFRACTING GROINS? (NO=0, YES=1): INDG

0

D.2 COMMENT: IF NO NON-DIFFRACTING GROINS, CONTINUE TO E.

D.3 NUMBER OF NON-DIFFRACTING GROINS: NNDG

0

D.4 GRID CELL NUMBERS OF NON-DIFFRACTING GROINS (NNDG VALUES): IXNDG(I)

D.5 LENGTHS OF NON-DIFFRACTING GROINS FROM X-AXIS (NNDG VALUES): YNDG(I)

E----- DIFFRACTING (LONG) GROINS AND JETTIES -----

-E

E.1 ANY DIFFRACTING GROINS OR JETTIES? (NO=0, YES=1): IDG

0

E.2 COMMENT: IF NO DIFFRACTING GROINS, CONTINUE TO F.

E.3 NUMBER OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES: NDG

0

E.4 GRID CELL NUMBERS OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES (NDG VALUES): IXDG(I)

E.5 LENGTHS OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES FROM X-AXIS (NDG VALUES): YDG(I)

E.6 DEPTHS AT SEAWARD END OF DIFFRACTING GROINS/JETTIES(NDG VALUES): DDG(I)

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)

F.3 IF GROIN OR JETTY ON LEFT-HAND BOUNDARY, DISTANCE FROM SHORELINE

OUTSIDE GRID TO SEAWARD END OF GROIN OR JETTY: YG1

0

F.4 IF GROIN OR JETTY ON RIGHT-HAND BOUNDARY, DISTANCE FROM SHORELINE

OUTSIDE GRID TO SEAWARD END OF GROIN OR JETTY: YGN

0

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

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

0

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

G.3 NUMBER OF DETACHED BREAKWATERS: NDB

0

G.4 ANY DETACHED BREAKWATER ACROSS LEFT-HAND CALCULATION BOUNDARY

(NO=0, YES=1): IDB1

0

G.5 ANY DETACHED BREAKWATER ACROSS RIGHT-HAND CALCULATION BOUNDARY

(NO=0, YES=1): IDBN

0

G.6 GRID CELL NUMBERS OF TIPS OF DETACHED BREAKWATERS

(2 * NDB - (IDB1+IDBN) VALUES): IXDB(I)

G.7 DISTANCES FROM X-AXIS TO TIPS OF DETACHED BREAKWATERS

(1 VALUE FOR EACH TIP SPECIFIED IN G.6): YDB(I)

G.8 DEPTHS AT DETACHED BREAKWATER TIPS (1 VALUE FOR EACH TIP

SPECIFIED IN G.6): DDB(I)

G.9 TRANSMISSION COEFFICIENTS FOR DETACHED BREAKWATERS

(NDB VALUES): TRANDB(I)

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

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

0

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 80

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

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

IBF

0

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

I.3 NUMBER OF BEACH FILLS DURING SIMULATION PERIOD: NBF

0

I.4 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE FILLS START

(DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBF VALUES):
BFDATS(I)

I.5 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE FILLS END

(DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBF VALUES):
BFDATE(I)I.6 GRID CELL NUMBERS OF START OF RESPECTIVE FILLS (NBF
VALUES): IBFS(I)I.7 GRID CELL NUMBERS OF END OF RESPECTIVE FILLS (NBF
VALUES): IBFE(I)I.8 ADDED BERM WIDTHS AFTER ADJUSTMENT TO EQUILIBRIUM
CONDITIONS

(NBF VALUES): YADD(I)

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

1

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

0

J.9 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE OPERATIONS START

(DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBP VALUES):
BPDATS(I)

J.10 DATES OR TIME STEPS WHEN THE RESPECTIVE OPERATIONS END

(DATE FORMAT YYMMDD: 1 MAY 1992 = 920501, NBP VALUES):
BPPATE(I)

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

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

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)

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 -----