

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANEAMENTO AMBIENTAL  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
MESTRADO EM RECURSOS HÍDRICOS

NILENA BRITO MACIEL DIAS

INFLUÊNCIA DO REGIME ONDULATÓRIO SOBRE “SEA WALL” DE PROTEÇÃO  
NA PRAIA DE IPARANA – CAUCAIA – CEARÁ – BRASIL

FORTALEZA  
2005

NILENA BRITO MACIEL DIAS

INFLUÊNCIA DO REGIME ONDULATÓRIO SOBRE “SEA WALL” DE PROTEÇÃO  
NA PRAIA DE IPARANA – CAUCAIA – CEARÁ – BRASIL

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação “STRICTO SENSU” em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará - UFC, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Oliveira de Souza

FORTALEZA

2005

NILENA BRITO MACIEL DIAS

INFLUÊNCIA DO REGIME ONDULATÓRIO SOBRE “SEA WALL” DE PROTEÇÃO  
NA PRAIA DE IPARANA – CAUCAIA – CEARÁ – BRASIL

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de pós-graduação em Engenharia do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, com Área de concentração em Recursos Hídricos.

Aprovada em 20/09/2005

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raimundo Oliveira de Souza  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. Erasmo da Silva Pitombeira  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lidriana de Souza Pinheiro  
Universidade Estadual do Ceará

Aos meus pais, Nildo Loiola Dias e Enah Brito Maciel Dias, pelo total apoio, pelas palavras de carinho, pelo incentivo e principalmente pelo amor.

Ao meu irmão Nildo Filho e minha irmã Priscila, para que também vejam no saber a fonte da realização pessoal e profissional.

À todos aqueles que ajudaram de alguma forma para realização desse trabalho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre esteve presente me dando força e luz para superar qualquer obstáculo.

Ao prof. Dr. Raimundo Oliveira de Souza, orientador, que me acompanhou durante toda realização deste trabalho, contribuindo de forma imensurável para que eu aprendesse e crescesse profissionalmente.

Ao prof. Dr. Erasmo da Silva Pitombeira, co-orientador, que com sua reconhecida experiência profissional, inteligência e competência me orientou durante a elaboração deste trabalho.

A minha amiga, profa. Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago que me reservou tempo na sua atarefada vida, para se encarregar da revisão ortográfica e gramatical do trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, pela atenção e presteza ao longo do curso.

A biblioteca da Pós-graduação em Engenharia Civil da UFC, na pessoa da Srta. Umbelina Caldas, pela incansável ajuda nas referências bibliográficas.

A todos os colegas do mestrado pela amizade, convivência e troca de experiências.

A todos que me apoiaram, sempre acreditando e incentivando com muito ânimo durante o longo percurso dessa caminhada para o alcance desse objetivo.

Por fim, e nem menos importante, queria agradecer aos meus amigos e a minha família pela paciência, apoio incondicional, amor e motivação que me dedicaram.

## RESUMO

Os ambientes costeiros do Nordeste do Brasil vêm sofrendo um considerável processo de degradação ambiental, gerado pelo crescente impacto das atividades antrópicas sobre os recursos naturais. Nos últimos anos, tem sido observado um contínuo processo de erosão na praia de Iparana, situada no município de Caucaia, região metropolitana de Fortaleza. Este processo erosivo é responsável pelo recuo da linha de costa, exposição de arenito e remoção de duna. Na costa de Fortaleza e municípios adjacentes, a ocupação das áreas costeiras tem promovido mudanças no meio ambiente, assim, seu estudo é de grande importância para compreendermos o processo que ocorre na área de Iparana. Para esta pesquisa foram obtidos dados relacionados ao regime de ondas, marés e ventos ocorrentes na região, além de levantamentos fotográficos e topográficos das seções da “sea wall” em estudo. Neste trabalho foi feito um acompanhamento mensal do comportamento da “sea wall” ao longo de um ano. Nele procurou-se desenvolver estudos comparativos entre diversos levantamentos de perfis de praia de forma a avaliar suas condições de estabilidade e as possíveis mudanças no equilíbrio dinâmico da praia. Observando-se as seções feitas ao longo de toda a parede, pode-se notar que houve uma acomodação normal. Também, vimos que nessa faixa litorânea, apesar do intenso processo erosivo, a “sea wall” tem conseguido controlar a erosão, evitando que a mesma se propague na direção do continente.

## ABSTRACT

The coastal regions of the Northeast of Brazil are suffering a considerable process of environmental degradation, generated by the crescent impact of the human activities on the natural resources. In the last years, it has been observed a continued process of erosion in the beach of Iparana, situated in the city of Caucaia, metropolitan region of Fortaleza. This erosive process is responsible for the recess of the shoreline, sandstone exposure and dune removal. In the coast of Fortaleza and adjacent cities, the occupation of the coastal areas has promoted changes in the environment, thus, its study is of great importance to understand the process that occurs in the area of Iparana. For this research it was collected data related to the regimen of waves, tides and winds occurring in the region, as well as photographic and topographical surveys of the sections of the sea wall in study. In this work it was made an observation of the behavior of the sea wall throughout one year. It was developed comparative studies between different surveys of the beach profiles to evaluate its conditions of stability and the possible changes in their dynamic balance. In observing the sections made throughout the entire wall, it can be noticed that it had a normal accommodation. Also, we saw that in that coastal strip, despite the intense erosive process, the sea wall has been controlling this process, avoiding that it spreads in the direction of the continent.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 –	Mapa de localização da área de estudo .....	2
FIGURA 2.1 –	Nomenclatura descritiva do perfil litorâneo.....	12
FIGURA 2.2 –	Formação de uma onda .....	15
FIGURA 2.3 –	Elementos de onda .....	15
FIGURA 2.4 –	Fenômeno da refração das ondas ao se aproximarem da linha de costa .....	21
FIGURA 2.5 –	Tendência das ondas se tornarem paralelas à costa .....	22
FIGURA 2.6 –	Configuração das ondas que chegarem à praia com suas cristas paralelas à linha de costa.....	23
FIGURA 2.7 –	Configuração de ondas em função da profundidade .....	24
FIGURA 2.8 –	Modificações sofridas pelas ondas quando se aproximam da linha de costa.....	25
FIGURA 2.9 –	Esquema da relação entre comprimento de onda e o ângulo da crista.....	26
FIGURA 2.10 –	Onda em derrame .....	27
FIGURA 2.11 –	Onda em espiral .....	27
FIGURA 2.12 –	Onda em colapso .....	28
FIGURA 2.13 –	Difração de ondas .....	29
FIGURA 2.14 –	Transporte litorâneo de sedimentos em dente de serra .....	33
FIGURA 2.15 –	Maré de lua.....	36
FIGURA 2.16 –	Maré de quadratura .....	36
FIGURA 2.17 –	Perfil de praia típico de bom tempo e de tempestade (ressaca) ....	39
FIGURA 2.18 –	Principais correntes superficiais oceânicas .....	43
FIGURA 2.19 –	Sistema de ventos para uma Terra hipoteticamente recoberta inteiramente por oceanos, mostrando os maiores cinturões de ventos e regiões de elevação e descida de ar.....	46
FIGURA 3.1 –	Localização da Praia de Iparana .....	50
FIGURA 3.2 –	Vista aérea de Iparana .....	52
FIGURA 3.3 –	Muro de Enrocamento (Esquema da Seção Transversal) .....	55
FIGURA 3.4 –	Praia de Iparana antes da construção da “sea wall” (1992) .....	55

FIGURA 3.5 – Praia de Iparana antes da construção da “sea wall” com exposição de rochas (1992) .....	56
FIGURA 3.6 – Implantação da bidin na construção da “sea wall” em 1992 .....	56
FIGURA 3.7 – Vista oeste de Iparana, com exposição das rochas de praia, após a construção da “sea wall”(1992). .....	57
FIGURA 3.8 – Vista leste de Iparana, com exposição das rochas de praia, após a construção do “sea wall” (1992) .....	57
FIGURA 3.9 – Colocação da camada de 1,5 metros de pedra, na construção da “sea wall” (1992) .....	58
FIGURA 3.10 – Foto da “sea wall” dois anos após reparo (2003) .....	60
FIGURA 3.11 – Rosa das ondas para o primeiro semestre 1991 a 1995 .....	64
FIGURA 3.12 – Rosa das ondas para o segundo semestre 1991 a 1995 .....	66
FIGURA 3.13 – Distribuição mensal das velocidades médias dos ventos entre os anos de 1974 a 2000 .....	68
FIGURA 4.1 – Levantamento de 1931 da área costeira de Mucuripe.....	72
FIGURA 4.2 – Levantamento de 1943 da área costeira de Mucuripe.....	72
FIGURA 4.3 – Levantamento de 1944 da área costeira de Mucuripe.....	73
FIGURA 4.4 – Levantamento de 1947 da área costeira de Mucuripe.....	73
FIGURA 4.5 – Levantamento de 1949 da área costeira de Mucuripe.....	74
FIGURA 4.6 – Levantamento de 1950 da área costeira de Mucuripe.....	74
FIGURA 4.7 – Levantamentos de 1951 e 1961 da área costeira de Mucuripe .....	75
FIGURA 4.8 – Levantamento de 1973 da área costeira de Mucuripe.....	76
FIGURA 4.9 – Foto da área quando da construção do espigão de contenção em 1964.....	77
FIGURA 4.10 – Início do processo de formação da Praia Mansa em 1970.....	77
FIGURA 4.11 – Vista superior da região marítima do Porto de Mucuripe com a Praia Mansa consolidada em 1975 .....	78
FIGURA 4.12 – Sistema de difração de ondas na região marítima do Porto do Mucuripe.....	79
FIGURA 4.13 – Batimetria recente da área marítima de Fortaleza através de trabalho com o MIKE 21 .....	80
FIGURA 4.14 – Modelagem de distribuição de ondas tipo sea na área de Fortaleza com o MIKE 21 para Hs 1,75 m e direção de 90° .....	83

FIGURA 4.15 – Modelagem de distribuição de ondas tipo swell na área de Fortaleza com o MIKE 21 para Hs: 3,0 m e Dir. de 30° .....	84
FIGURA 4.16 – Navegação à baixa altitude com vista da Praia Mansa em 2004 ...	85
FIGURA 4.17 – Praia Mansa com vista dos geradores eólicos em 2004 .....	85
FIGURA 4.18 – Vista do quebra-mar da ponta do mucuripe e dos sedimentos retidos ao longo dos anos, em 2004.....	86
FIGURA 5.1 – Perfil de praia da seção S0.....	88
FIGURA 5.2 – Perfil de praia da seção S1.....	89
FIGURA 5.3 – Perfil de praia da seção S2.....	90
FIGURA 5.4 – Perfil de praia da seção S3.....	91
FIGURA 5.5 – Perfil de praia da seção S4.....	92
FIGURA 5.6 – Perfil de praia da seção S5.....	93
FIGURA 5.7 – Perfil de praia da seção S6.....	94
FIGURA 5.8 – Perfil de praia da seção S7.....	95
FIGURA 5.9 – Perfil de praia da seção S8.....	96
FIGURA 5.10 – Perfil de praia da seção S9.....	97
FIGURA 5.11 – Perfil de praia da seção S10 .....	98
FIGURA 5.12 – Vista da evolução da praia na cota zero .....	99
FIGURA 5.13 – Seção 02 nas datas de 07/08/2003, 29/08/2003, 05/10/2003 e 02/11/2003.....	102
FIGURA 5.14 – Seção 02 nas datas de 07/12/2003, 04/01/2004, 07/02/2004 e 09/03/2004.....	103

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Caracterização do problema .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Justificativa do Tema .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Objetivos .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Metodologia .....</b>	<b>5</b>
1.4.1 Fundamentos Teóricos.....	5
1.4.2 Área de trabalho .....	6
1.4.3 Condições atuais.....	6
1.4.4 A área costeira de Mucuripe.....	7
1.4.5 A praia de Iparana.....	9
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Conceitos básicos.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Nomenclatura descritiva do perfil litorâneo.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3 Ondas .....</b>	<b>12</b>
2.3.1 Geração e Propagação .....	13
2.3.2 Característica e Classificação .....	14
2.3.3 Deformação .....	19
2.3.4 Refração.....	21
2.3.5 Shoaling (empinamento) .....	24
2.3.6 Rebentação .....	25
2.3.7 Difração.....	28
2.3.8 Transporte .....	29
<b>2.4 Marés .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5 Características dos Sedimentos .....</b>	<b>37</b>
<b>2.6 Correntes .....</b>	<b>41</b>

2.6.1 Oceânicas .....	41
2.6.2 De maré.....	43
2.6.3 Pelas ondas.....	45
<b>2.7 Ventos .....</b>	<b>45</b>
<b>3 ÁREA DE TRABALHO .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1 Histórico.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2 Condições atuais .....</b>	<b>59</b>
3.2.1 Descrição .....	59
3.2.2 Características físicas e ambientais .....	60
3.2.2.1 Regime de ondas .....	61
3.2.2.2 Ventos .....	67
3.2.2.3 Marés na área em estudo.....	68
3.2.3 Transporte litorâneo de sedimentos .....	69
<b>4 A ÁREA COSTEIRA DE MUCURIBE .....</b>	<b>71</b>
<b>5 A PRAIA DE IPARANA .....</b>	<b>87</b>
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>104</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>106</b>
<b>8 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>107</b>

## 1.0 – INTRODUÇÃO

A construção de “sea wall” em costas arenosas constitui um complexo problema de engenharia costeira que costuma tratar de solucionar problemas relacionados à interação entre mar e a costa, visando a ocupação racional da região litorânea e o melhor aproveitamento dos recursos existentes para o benefício do homem. Nos ambientes litorâneos, tais problemas são impostos tanto pelos agentes continentais, quanto pelos que lhe são impostos pelos oceanos. Um fato importante decorre da multiplicidade de variáveis presentes no processo de transporte de sedimentos.

O conhecimento dos fatores climáticos, oceanográficos e continentais (ventos, ondas, correntes, e marés) envolvidos na atuação dos processos costeiros, é pré-condição para estudos mais precisos. Tais conhecimentos têm sido cada vez mais solicitados pela sociedade brasileira, na medida em que esta descobre que o desenvolvimento de áreas costeiras, requer soluções técnicas apropriadas. Como exemplo, podemos citar, construções de portos, obras de proteção de costa, entre outros.

Decorre daí a demanda crescente por técnicas capazes de projetar e monitorar obras marítimas, além de compreender os fenômenos de interação do mar com a costa e as conseqüências da intervenção humana nesse ambiente.

Este trabalho tem por objetivo discutir as condições do ambiente natural costeiro em uma área do litoral do estado do Ceará e identificar os impactos oriundos de atividades antrópicas. A área enfocada compreende segmento da costa do município de Fortaleza e partes do litoral do município de Caucaia.



A costa do estado do Ceará, de uma maneira geral, tem conformação arenosa com segmentos retilíneos, apresentando em espaços pequenas mudanças de alinhamentos. Por esta característica anatômica, a costa cearense não apresentando baías nem enseadas de grande vulto mostra condições de mar aberto. Estas condições da linha de costa, sedimentares e de alinhamento, dão meio a que se desenvolva um alentado transporte de sedimentos, que se mostra responsável pela conformação das praias.

Nos últimos anos, tem sido observado um contínuo processo de erosão nessa região, responsável pela destruição de diversas propriedades e pela alteração da paisagem como exposição de arenito, remoção de dunas, com conseqüente recuo da linha de costa. Na faixa de praia defronte à colônia do SESC, o recuo da linha de costa é da ordem de 250 m, o que provocou a destruição de benfeitorias que haviam sido construídas no local.

## **1.2 – Justificativa do Tema**

A região costeira está situada na fronteira dos dois maiores ambientes do planeta: continente e oceano. É uma região de numerosas interações biológicas, químicas, físicas, geológicas e meteorológicas.

Este ambiente é uma região de mudança, no qual o mar atua alterando a forma e a configuração do continente. Algumas vezes ocorrem alterações bastante rápidas; outras vezes, lentas a ponto de não serem percebidas por uma pessoa durante toda a sua vida; mas do ponto de vista do tempo geológico, estas lentas alterações tornam-se muito expressivas.

Grande parte das regiões costeiras do mundo possui sua configuração atual devido a processos decorrentes dos fenômenos de separação do supercontinente Pangéia, há cerca de 225 milhões de anos. No caso do litoral brasileiro, uma série de eventos estruturais ocorreu quando da separação do continente africano e sul-americano há cerca de 150 milhões de anos.

Na verdade são vários os fatores que determinam a evolução de cada uma das regiões litorâneas. Estes fatores apresentam variações temporais e espaciais distintas e vão desde fatores climáticos até fenômenos tectônicos de escala global.

A região de interface entre o continente e o oceano pode ser dividida em costa, praia e costa afora. A costa é definida como uma faixa que se estende do limite entre o continente e o mar indo para o interior continental até as primeiras mudanças significativas nas feições fisiográficas; faixa que varia normalmente de poucos a algumas dezenas de quilômetros. A costa afora é a região desde a zona de arrebenção das ondas até a borda da plataforma continental.

Na região da praia de Iparana procura-se esclarecer a origem do processo de erosão que vem se verificando de forma mais evidente, causando a destruição da praia. Esta destruição se dá, em forma de alteração da paisagem da região com a exposição de arenito, remoção de dunas e recuo da linha de costa na ordem de 250 m. É importante entender as causas de tais fatos para então, estabelecer metas de não somente impedir o avanço da erosão, como também reestruturar o local.

### **1.3 – Objetivos**

#### *Objetivo Geral*

Com base nas mudanças da linha de costa de Fortaleza, em virtude da construção do Porto do Mucuripe procurou-se desenvolver estudos na zona costeira de Iparana e acompanhar o comportamento do muro localizado na faixa de praia defronte à colônia do SESC, ao longo de um ano, ou seja doze meses, de modo a observar qualquer mudança que venha a ocorrer no mesmo, devido ao impacto do regime de ondas incidentes na área.

### *Objetivos Específicos*

- Avaliar as possíveis mudanças no equilíbrio dinâmico nas praias arenosas de Iparana;
- Levantar dados sobre os perfis de praia e analisá-los;
- Analisar as linhas de costas, em Iparana, e monitorar sua evolução ao longo de um ano;
- Observar as condições da praia em si, detectando-se processos de engordamento ou de emagrecimento, ou até mesmo a continuidade das condições sem mudanças, conforme o que acontece na prática.

## **1.4 – Metodologia**

### 1.4.1 – Fundamentos Teóricos

O uso adequado da zona costeira implica necessariamente no conhecimento dos agentes que atuam sobre ela e que determinam os processos dinâmicos que, em último lugar, controlam a sua evolução ao longo do tempo. Este fator básico permite prever o comportamento da costa, tanto em condições naturais, como sob a influência humana.

Para casos de controle de erosão é necessária, primeiramente, a compreensão adequada do papel que desempenham as características costeiras no problema da erosão, a interação entre os agentes dinâmicos e os diversos processos físicos básicos de transporte que atuam na costa.

Assim, uma breve explanação do conhecimento das condições meteorológicas é de fundamental importância para a análise do comportamento dos agentes da dinâmica costeira.

Quando da elaboração e constituição da revisão bibliográfica procurou-se abranger da melhor forma possível todas as literaturas nacionais e estrangeiras referentes ao ambiente costeiro. Procurou-se verificar também a atualidade dos livros e a clareza da redação dos textos para uma melhor transmissão da informação relatada.

#### 1.4.2 – Área de trabalho

Em processo de evolução morfológica, sempre se faz necessário o conhecimento e a compreensão das transformações pelas quais o ambiente já passou. Para tanto, é necessário que se faça um levantamento das informações sobre o passado da região, ou seja, um levantamento de dados históricos. Sob o ponto de vista da engenharia a escala de tempo envolvida é de algumas décadas, pois na maioria das vezes o interesse principal do problema está voltado para processos de transformações lentas, em escala geológica.

Essas informações podem estar contidas em documentos diversos tais como depoimentos, mapas, cartas náuticas, levantados em diferentes épocas cuja comparação permite inferir, ao menos em nível qualitativo, sobre a dinâmica do processo. A análise de tais informações será feita adiante.

#### 1.4.3 – Condições atuais

Como a praia de Iparana fica a uma distância de 16 km do Porto de Mucuripe, o levantamento de dados feito observando-se toda informação existente sobre o ambiente costeiro levantado por ocasião de sua construção e ampliação, foi aproveitado para o estudo da erosão na praia de Iparana. Tais informações se referem aos dados de ondas (altura, período e direção), batimetria em diferentes épocas, topografia da linha de costa, levantamentos de perfis de praia.

Essas informações estão disponíveis basicamente em duas instituições: no programa de trabalho proposto pelo grupo de trabalho do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, através da COPPETEC, e no Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH), órgão esse responsável pela maioria dos projetos de engenharia costeira e portuária na região. Especificamente, os dados de batimetria e de maré são sistematicamente levantados e tratados pela Diretoria de Hidrologia e Navegação (DHN) da Marinha, onde podem ser encontrados. Também, foi consultado o Instituto de Ciência do Mar para obtenção de dados de correntes da região.

#### 1.4.4 – A área costeira de Mucuripe

Antes de analisarmos a área de Iparana, é essencial conhecer a área costeira de Fortaleza. A evolução dos processos de assoreamento na região do Mucuripe é de fundamental importância para compreendermos melhor o que ocorre na região costeira de Iparana.

As praias situadas à oeste de Fortaleza apresentam uma perda significativa de material sedimentar, bem como, modificações na paisagem litorânea decorrente de várias estruturas rígidas implantadas nas praias de Fortaleza.

Para esta pesquisa utilizamos dados que vem sendo levantados fazendo uso de ferramentas sofisticadas e de alta precisão, tais como o Waverider Direcional e o correntógrafo eletromagnético S4, além dos modelos numéricos, MIKE 21 e LITPACK desenvolvidos pelo Danish Hydraulic Institute – DHI, da Dinamarca.

As simulações, utilizando os modelos matemáticos de impacto costeiro, foram realizadas por técnicos e engenheiros da Universidade Federal do Ceará, em parceria com o Instituto de Pesquisas Hidroviárias – INPH e o Danish Hydraulic Institute – DHI.

LITPACK é um sistema integrado de modelagem de processos litorâneos e da dinâmica da linha de costa.

O software LITPACK emprega uma formulação completamente determinística, baseada no conhecimento teórico dos processos físicos, sendo, por este motivo, uma ferramenta poderosa para gerenciar intervenções na linha de costa. Ele permite:

- Avaliar o impacto causado por obras costeiras;
- Otimizar projetos de criação de praias;
- Otimizar obras de proteção costeira;
- Projetar e otimizar a recuperação de praias por alimentação artificial;
- Prever o assoreamento em canais de acesso e sedimentação em recintos portuários.

#### MIKE 21 é o Sistema de Modelagem para Estuários e Zonas Costeiras

É um pacote profissional de softwares em Engenharia Hidráulica, contendo um sistema de modelagem, a duas dimensões (2D), de escoamentos de superfície livre. Ele é aplicável à simulação de fenômenos hidráulicos em lagos, estuários, baías, regiões costeiras e oceanos, onde a estratificação do meio possa ser negligenciada. O MIKE 21 é o resultado de mais de 20 anos de contínuo desenvolvimento na área da modelagem matemática e da experiência ganha em mais de 400 aplicações em diversos projetos de engenharia. Ele apresenta uma concepção modular, desenvolvida em torno das quatro principais áreas da aplicação:

- Hidráulica costeira e oceanografia
- Hidráulica ambiental
- Processos sedimentológicos
- Ondas

#### 1.4.5 – A praia de Iparana

A área de estudo, Iparana, está localizada na faixa costeira do Município de Caucaia situada a oeste de Fortaleza. Esta região costeira vem, ao longo dos anos, sofrendo problemas de erosão e recuo da linha de costa, e para contê-las foi executado um trabalho de defesa sob a forma de um muro longitudinal.

No capítulo anterior foi caracterizada a praia de Mucuripe, para que uma análise conjunta relacionando dados de ventos, marés, ondas e sedimento possa ser suporte para uma avaliação da situação atual na região. Assim, avaliar também a estrutura da “sea wall”.

Diante de tais decisões de acompanhamento e controle, foi programado um trabalho de levantamento de perfis de praia ao longo da costa, partindo tal procedimento da praia a barlar do ponto de fixação do porto até à praia a sotamar do mesmo. Com estes levantamentos, programados e efetuados ao longo de um ano, temos condições de avaliar as mudanças que venham a ocorrer, detectando-se processos erosivos ou de assoreamento e definindo-se a origem de tais comportamentos costeiros, como também, definir a evolução dos meios costeiros litorâneos da praia de Iparana e adjacências. Os controles destas mudanças darão condições de se tomar providências no sentido de defender ou recuperar qualquer área costeira que sofra influências da obra em questão.

## **2.0 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1 - Conceitos básicos**

A faixa de praia representa um dos sistemas ambientais mais dinâmicos do planeta. Intervenções antrópicas vêm alterando a dinâmica das dunas e promovendo o aumento da erosão costeira, com avanço do mar em algumas regiões e aumento dos desequilíbrios ambientais.

As feições geomorfológicas estão sujeitas à uma complexa interação de agentes naturais como: marés, correntes de maré, ondas, entre outras. A interação desses fatores resulta em uma dinâmica expressiva, que torna os fenômenos de erosão e sedimentação muito mais intensos, implicando muitas vezes em assoreamento e variações da linha de costa.

É interessante observar que as costas apresentam processos de erosão e sedimentação sazonais devido à mobilidade dos sedimentos encontrada em ambientes como praias arenosas, os quais se ajustam as condições das marés e correntes.

O estudo da zona litorânea, onde também se observa a ação de agentes climáticos, é chamado de geomorfologia litorânea. Ela estuda a ação erosiva do mar, formando diversos tipos de costas, como as de acumulação, ou praias, perfil das costas, as zonas litorâneas e a ação humana (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Os principais agentes naturais de dinâmica costeira são gerados por forças astronômicas, impulsivas, meteorológicas. As forças são responsáveis pelas marés, que causam mudanças periódicas no nível do mar, e portanto, modificam as larguras das faixas de praia nas quais atuam outros processos. As forças impulsivas são responsáveis pelos terremotos, deslizamentos subaéreos e erupções vulcânicas que podem provocar, por exemplo, tsunamis que podem ocasionar mudanças catastróficas na zona costeira. As ondas são os principais agentes ligados as forças meteorológicas que, por sua vez, podem ser refratadas, difratadas ou refletidas ou

mesmo absorvidas durante a sua propagação na zona costeira. Por outro lado, o homem é hoje em dia um agente muito importante da dinâmica costeira. No Japão, por exemplo, mais de 25% da linha de costa são providos de algum tipo de estrutura artificial construída pelo homem, tais como, diques, espigões, quebra-mares e portos (SUGUIO, 1992).

Em seguida, mostraremos como se dá a atuação desses elementos da dinâmica costeira sobre o perfil de praia.

## **2.2 - Nomenclatura descritiva do perfil litorâneo**

Uma forma de descrever o perfil litorâneo está mostrado na figura 2.1. Ainda não existe uma nomenclatura precisa do perfil litorâneo, no idioma português. Pela necessidade, Chagas (2000) adotou uma nomenclatura apropriada que corresponde aos mesmos conceitos na língua inglesa. Entende-se como zona intertidal a que se estende entre a maré baixa e a linha de costa que é o nível da efetiva ação das ondas nas marés altas. Esta zona ainda é dividida em zona intertidal maior ou pós-praia e zona intertidal menor ou estirâncio. Segundo Christofolletti (1980), a linha de costa é considerada como o limite terrestre da zona intertidal maior, e independe da oscilação das marés.

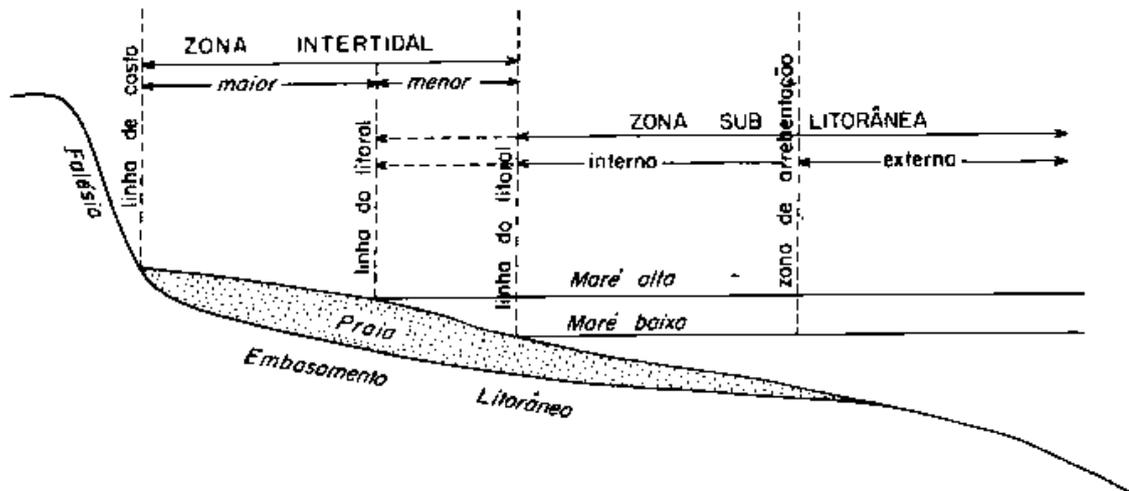


FIGURA 2.1 - Nomenclatura descritiva do perfil litorâneo (Fonte: Christofolletti, 1980).

### 2.3 - Ondas

As ondas como sendo o principal agente da dinâmica costeira, têm um papel fundamental na conformação da linha de costa. Assim, o entendimento do clima de ondas é de maior importância para estudos da dinâmica costeira.

Com poucas exceções, tais como atividade sísmica e força da maré, as ondas são geradas pelos ventos, que no contato, transferem energia para a superfície da água. Essas desempenham importante papel no transporte litorâneo de sedimentos, tendo em vista que o mesmo é muito sensível às características como altura, período e direção de ondas.

Para um melhor entendimento, é fundamental ter conhecimento do comportamento mecânico da geração e propagação das ondas marítimas, bem como conhecer melhor sua forma de incidência na linha de costa.

### 2.3.1 - Geração e Propagação

O movimento mais evidente da superfície do Oceano é o das ondas.

As ondas podem ser geradas por forças distintas como: ventos (ondas de ventos), atividades sísmicas (Tsunamis) e oscilação de pressão atmosférica (ondas de tormenta), entre outras.

Os fenômenos ondulatórios transmitem energia através da matéria. As partículas materiais apenas giram ou oscilam para frente e para trás, ou para cima e para baixo, transmitindo energia de uma partícula à outra. Existem 3 tipos fundamentais de movimentos ondulatórios (CHRISTOFOLETTI, 1980):

- Ondas longitudinais, tal como nas ondas sonoras; as partículas movimentam-se para frente e para trás na mesma direção da propagação da energia, tal como uma mola, alternadamente distendida e comprimida. A energia pode ser transmitida em todos os estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) através deste movimento longitudinal das partículas.
- Ondas transversais; a energia viaja perpendicular à direção de vibração das partículas. Este tipo de movimento transmite-se apenas nos sólidos.
- Ondas orbitais transmitem energia ao longo da interface entre 2 fluidos de densidades diferentes e têm um movimento que combina o das ondas longitudinais e transversais. O caso mais típico é a da interface atmosfera/oceano. As partículas movem-se em trajetórias circulares.

É importante notar que em uma onda não há necessariamente um movimento de água; o que há é um movimento de partículas em órbitas fechadas, onde o diâmetro está relacionado com a altura das ondas.

Sob a influência dos ventos, as ondas no processo de sua formação vão passando pelos estágios ditos (PITOMBEIRA, 2005):

- Instável: fase de geração definida apenas pelo vento, com estado de agitação intermediário;
- Estável: fase de geração com estado de agitação dependendo da distância do ponto considerado dentro da área de atuação do vento e o “fetch” (distância do ponto considerado dentro da área de atuação do vento e o limite de barlavento desta mesma área);
- Pleno crescimento: à proporção que se afasta do limite de barlavento, as características da agitação vão se modificando até um ponto em que se tornam definitivas quando então, a energia cedida pelo vento é dissipada sob forma de turbulência.

Os primeiros estágios correspondem às ondas ainda em fase de geração, portanto, têm seus parâmetros definidores ainda vulneráveis às mudanças. Normalmente, dizemos que são ondas com características de vagas (sea), apresentando pequenos comprimentos e grandes alturas relativas; portanto, maiores declividades. Este tipo de onda aparece com frequência na linha de costa formada em regiões próximas da praia, especificamente na costa cearense, geradas pelo vento nordeste.

### 2.3.2 - Característica e Classificação

Ao passar uma onda, objetos flutuantes na superfície do mar deslocam-se para cima e para baixo em movimento circular. Isso ocorre por as partículas de água mover-se em órbitas circulares, que diminuem de diâmetro com a profundidade. Os círculos são órbitas que descrevem as partículas de água ao passar da onda. As órbitas circulares das partículas de água têm um diâmetro igual à altura da onda. Quando uma partícula está na crista da onda, move-se no mesmo sentido da propagação da energia. Quando está na cava, move-se no sentido inverso. Os diâmetros das órbitas das partículas diminuem com a profundidade abaixo do nível da água parada (nível médio entre a crista e cava), até que a movimentação das partículas numa onda ideal cessa completamente a uma profundidade igual à

metade do comprimento de onda. As figuras 2.2 e 2.3 ilustram os elementos geométricos relativos às ondas.

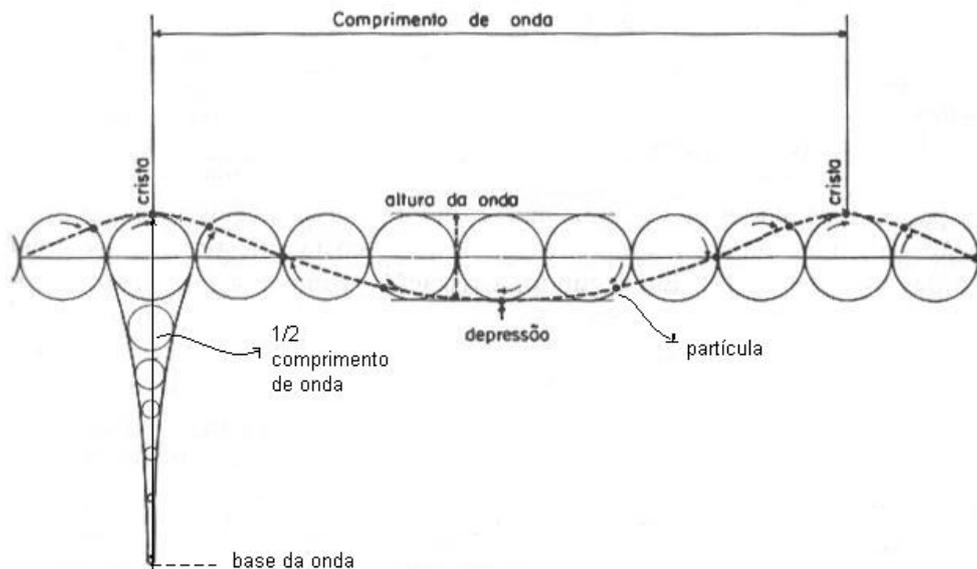


FIGURA 2.2 - Formação de uma onda. (Fonte: Christofolletti, 1980)

A profundidade máxima de movimentação da água equivale à metade do comprimento de onda, na qual o diâmetro orbital das partículas é 25 vezes menor que na superfície. Esta profundidade é conhecida como base da onda, e é definida, portanto, como a profundidade máxima na qual a onda pode mover partículas e erodir os sedimentos finos do assoalho marinho.

As principais características das ondas e os conceitos associados a elas estão descritos a seguir.

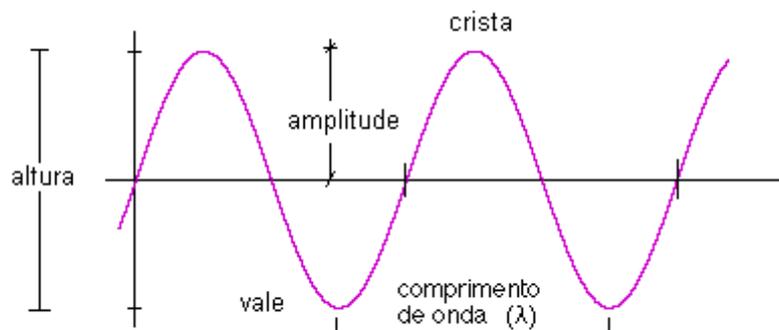


FIGURA 2.3 - Elementos de onda

Altura da onda: Distância vertical entre a crista de uma onda e a calha da onda adjacente.

Amplitude de onda: Distância vertical máxima da superfície do mar a partir do nível da água em repouso. Equivale à metade da altura da onda.

Calha, Cavado ou Depressão: Porção mais inferior da onda.

Celeridade da onda: Velocidade de propagação da onda.

Comprimento de onda: Distância horizontal entre dois pontos homólogos consecutivos; ou seja, é a distância entre dois pontos com as mesmas características da superfície ondular.

Crista de onda: Porção mais superior da onda.

Energia da onda: É a energia contida na propagação de uma onda.

Esbeltez ou declive: É a relação entre a altura e o comprimento da onda.

Fetch: É a área em mar aberto sobre a qual o vento sopra com velocidade e direção constante, criando um sistema de ondas; portanto, é uma área de geração de ondas.

Formação de ondas: É resultado da ação do vento.

Freqüência: É o número de cristas ou cavados que passa num dado ponto fixo por unidade de tempo.

Período de onda: O tempo que leva para uma onda completar um comprimento de onda; para passar por um ponto estacionário.

Velocidade da onda: Velocidade na qual uma onda individual avança sobre a superfície da água.

As ondas que ocorrem nos oceanos variam significativamente quanto a comprimento e período. As menores, chamadas de capilares, têm comprimento de poucos centímetros e período de frações de segundos. Já as maiores são as marés, cujo comprimento alcança a circunferência da Terra com períodos de até 24 horas.

Entre as ondas mais comuns nos oceanos estão as chamadas *swell*. Deslocam-se por milhares de quilômetros, a partir dos locais onde foram originadas. Ao se afastarem de seu local de origem tornam-se muito uniformes, com grandes comprimentos de onda e pequenas amplitudes.

Já outro tipo de onda, a *sea*, é muito irregular, com diversos períodos e várias direções. Encontra-se este tipo de onda em locais onde são geradas, ou seja, onde o vento está soprando.

As ondas tendem a ser maiores quando próximas às regiões nas quais os ventos são mais fortes. São geralmente menores na região equatorial e maiores em altas latitudes, como no sul da África e da América do Sul, Austrália e Groenlândia.

Segundo Stokes in Ippen (1966):

A onda irrotacional, de princípio foi imaginada para ser aplicada às ondas de pequena amplitude em relação ao comprimento da onda e à profundidade da água em que ela se propagava. Depois se viu que as suas equações continuavam válidas para ondas não só de pequenas amplitudes. O perfil destas ondas é representado pela curva seno sendo, por isto, conhecida também pela designação de ondas sinusoidais. Estas ondas apresentam como parâmetros definidores além daqueles já enumerados, a celeridade, sendo também definidora de suas características a profundidade da água em que ela se propaga.

Em cima dos estudos da onda irrotacional, conforme informa Castanho (1966), temos que: “o comprimento da onda e a celeridade (velocidade de propagação) são representados pelas seguintes expressões matemáticas”:

Comprimento de onda:

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \cdot \operatorname{tgh} \left( \frac{2\pi d}{L} \right) \quad (2.1)$$

Celeridade

$$C = \sqrt{\frac{g \cdot L_0}{2\pi} \cdot \operatorname{tgh}\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (2.2)$$

Onde,

L: comprimento de onda;

tgh: tangente hiperbólica;

g: aceleração da gravidade;

$L_0$ : comprimento de onda em profundidade infinita;

T: período da onda;

d: profundidade da água.

C: celeridade da onda;

*Relacionando a profundidade da água em que se propaga a onda (d), com o comprimento da mesma (L), tem-se que se:*

$$\frac{d}{L} \geq \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{2\pi d}{L} \geq \pi \Rightarrow \operatorname{tgh}\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \approx 1 \quad (2.3)$$

*Nesse caso, quando  $d \geq \frac{L}{2}$ , a onda se propaga em águas que definimos ter profundidade infinita. Calculamos em função do período (que permanece constante ao longo da propagação), o comprimento da onda  $L_0$  e a celeridade da onda  $C_0$  que se propaga nestas águas com profundidades ditas infinitas.*

Portanto: 
$$L_0 = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (2.4)$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{g \cdot L_0}{2\pi}} = \frac{L_0}{T} \quad (2.5)$$

Se for válida a condição da equação (2.3), então a onda se propaga em águas intermediárias, sofrendo influência do fundo do mar e exercendo influência sobre este local.

Das equações 2.1 e 2.2 tem-se que:  $L = gT^2/2\pi \cdot \operatorname{tgh}(2\pi d/L) \Rightarrow L = f(d, L)$

$$C = \sqrt{\frac{g \cdot L_0}{2\pi} \cdot \operatorname{tgh}\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \Rightarrow C = f(d, L) \quad (2.6)$$

$$\text{Se: } \frac{d}{L} < \frac{1}{25} \Rightarrow \frac{2\pi d}{L} < \frac{1}{4} \Rightarrow \operatorname{tgh}\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \approx \frac{2\pi d}{L}$$

Nesta situação a onda se propaga em águas rasas, e tem-se utilizado a equação 2.6 nas equações 2.1 e 2.2 (CASTANHO, 1966):

$$L = \left(\frac{g \cdot T^2}{2\pi}\right) \cdot \frac{2\pi d}{L} = T \cdot \sqrt{gd} \quad (2.7)$$

$$C = \sqrt{gd} \quad (2.8)$$

### 2.3.3 - Deformação

Em seu curso de propagação, segundo Castanho (1966), as ondas podem sofrer processos de deformação devido a dois fatores principais:

- i. Diminuição da profundidade da água na zona de propagação da onda;
- ii. Encontro de obstáculos no seu percurso de caminamento.

(i) Referente à influência da diminuição de profundidade, estas são definidas relativamente às características das ondas que se propagam na superfície.

Dependendo dos parâmetros definidores da onda na superfície, as profundidades podem ser definidas, como:

- Águas Profundas (profundidade infinita)
- Águas Intermediárias
- Águas Rasas

A profundidade  $d = L_0/2$  é considerada o limite das profundidades infinitas. As ondas de águas profundas ocorrem quando metade de seu comprimento é menor que a profundidade; assim, as ondas se propagam livremente, sem exercer influência no fundo do mar e sem sofrer influência deste fundo. As ondas de águas rasas ocorrem quando metade de seu comprimento é maior que a profundidade passando a sofrer influência da proximidade do fundo marinho, aparecendo então deformações nas ondas devido à diminuição das profundidades. Como efeito deste fato físico, pode-se ter dois tipos de deformações da onda por influência da proximidade do fundo marinho: refração, “shoaling” e rebentação.

Ondas de pequeno comprimento podem ser consideradas de águas profundas, mesmo em águas com poucos centímetros de profundidade. As maiores ondas dos oceanos, como os tsunamis e as marés, são sempre ondas de águas rasas, mesmo sobre as mais profundas fossas submarinas.

Em geral, ondas com períodos maiores que 14 segundos são capazes de mover sedimentos em profundidades maiores que a onda da borda da plataforma continental.

(ii) A performance das ondas sobre a linha de costa depende também de alguns obstáculos, naturais ou artificiais, que perturbem sua propagação. A influência de pontais, ilhas, entre outros acidentes naturais, interferem significativamente na atuação das ondas no litoral. Entre os obstáculos artificiais, pode-se citar quebra-mares, que geralmente provocam mudanças nas condições hidráulicas da região.

Difração e refração são as principais deformações das ondas causadas por encontros de obstáculos, os quais são de extrema importância no processo de transporte litorâneo.

### 2.3.4 - Refração

Quando as ondas formadas em oceano aberto aproximam-se de águas rasas, progressivamente se reorientam para permanecerem paralelas à linha de costa. Tal fenômeno é chamado de refração e é função da diminuição da profundidade. Tem-se a impressão que as ondas vêm nesta forma, sem que a direção na qual o vento esteja soprando tenha influência na propagação das ondas. Na realidade, as ondas têm a mesma direção dos ventos que as geram, e ao se aproximarem do litoral, onde o mar é mais raso sofrem a interferência do fundo cujo efeito é tornar a propagação perpendicular à costa, ou tornar as ondas quase paralelas à costa. Este efeito físico é conhecido como refração de onda similarmente à refração de um raio de luz, que muda de direção quando o meio de propagação é alterado, (Figuras 2.4 e 2.5).

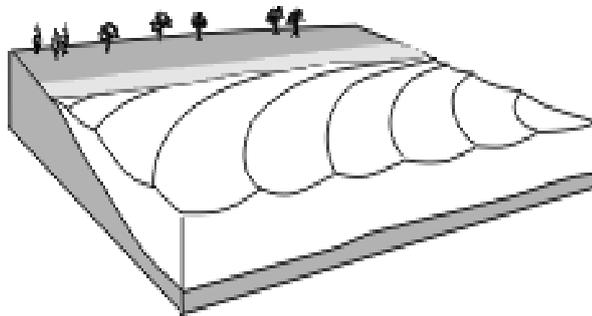


FIGURA 2.4 - Fenômeno da refração das ondas ao se aproximarem da linha de costa.

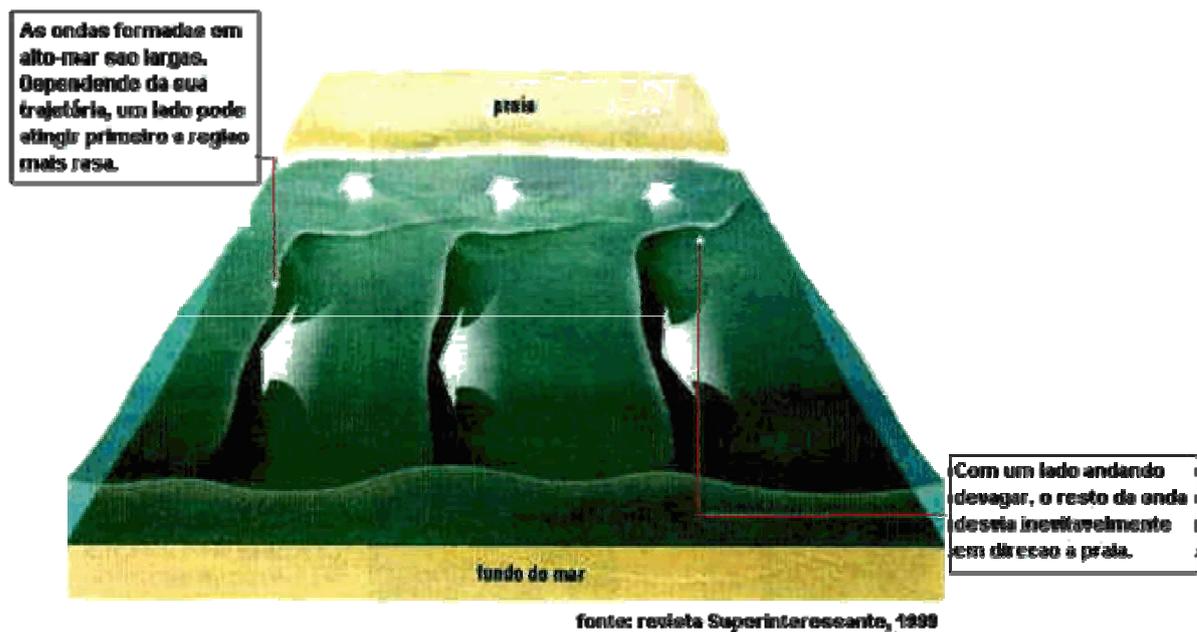


FIGURA 2.5 - Tendência das ondas se tornarem paralelas à costa.

Com a redução na profundidade, começa a ocorrer atrito das partículas da água com o fundo, reduzindo a velocidade das ondas nas porções que primeiro se aproximam da costa e deixando mais livres as regiões das ondas que ainda se deslocam em águas mais profundas. Esta refração que precede a quebra das ondas é acompanhada da diminuição da velocidade e do comprimento de onda e aumento da altura.

Segundo C. L. Bretschneider, in Ippen (1966) (Figura 2.6):

A onda, que tem sua crista situada em diferentes profundidades, sofre na parte da crista em que a profundidade é menor uma redução na velocidade de propagação e no comprimento de onda. Este fato faz com que esta parte da crista com velocidade reduzida desloque-se mais lentamente que a parte que se encontra em águas mais profundas, o que dará como resultado o encurvamento das cristas das ondas e a motivação natural da configuração das cristas ficarem semelhantes ao das isóbatas. Esta semelhança de configuração leva as ondas à tendência de chegarem à praia com suas cristas paralelas à linha de costa.

Se uma onda se propaga em profundidades infinitas com celeridade  $C_0$  e com celeridade  $C$  à profundidade  $d$ , admitindo-se que as isóbatas são retilíneas e

paralelas, pela lei de Snell, a mudança de direção de propagação da crista será dada pôr:

$$\frac{C_0}{C} = \frac{\text{sen}(\alpha_0)}{\text{sen}(\alpha)}, \quad (2.9)$$

Sendo:

$C_0$ : celeridade da onda à profundidade infinita;

$C$  : celeridade da onda em profundidades  $d < L_0/2$ ;

$\alpha_0$ : ângulo de direção de propagação de onda à profundidade infinita;

$\alpha$  : ângulo de direção de propagação de onda à profundidade  $d < L_0/2$ ;

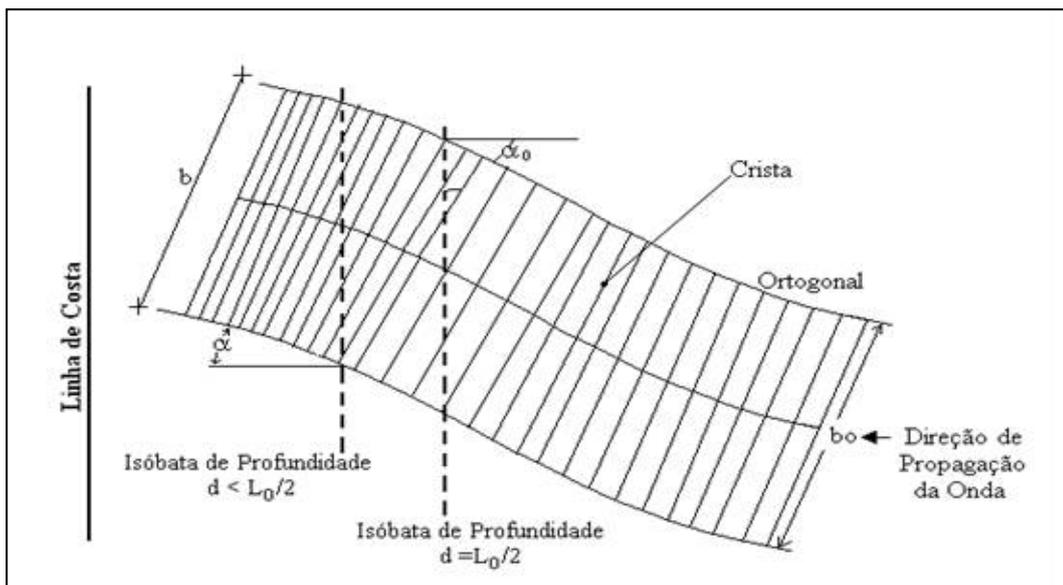


FIGURA 2.6 - Configuração das ondas que chegam à praia com suas cristas paralelas à linha de costa (  $b_0$ : distância entre ortogonais em  $d > L_0/2$ ;  $b$  : distância entre ortogonais em  $d < L_0/2$ ;  $k_r$ : coeficiente de refração =  $(b_0/b)^{1/2}$ ) (Fonte: Pitombeira, 2005)

### 2.3.5 - Shoaling (empinamento)

Segundo o princípio de conservação do fluxo de energia, a diminuição da velocidade de propagação (celeridade) das ondas, conseqüente da diminuição da profundidade, provoca um aumento da energia de onda, expresso fisicamente através de seu crescimento em altura, o que caracteriza o processo de empinamento (Figura 2.7). Os estudos de Castanho (1966) mostram que: “Os valores de  $H$  modificados pelo Shoaling, podem ser calculados através do coeficiente de Shoaling, dado pela expressão”:

$$K_s = H/H_0 = \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{2\pi d/L}{\sinh(2\pi d/L)}, \tanh(2\pi d/L)\right)}}, \quad (2.10)$$

Sendo:  $K$ : coeficiente de refração

$H$ : altura da onda à profundidade  $d$

$H_0$ : altura da onda à profundidade infinita considerando que ocorreu apenas shoaling.”

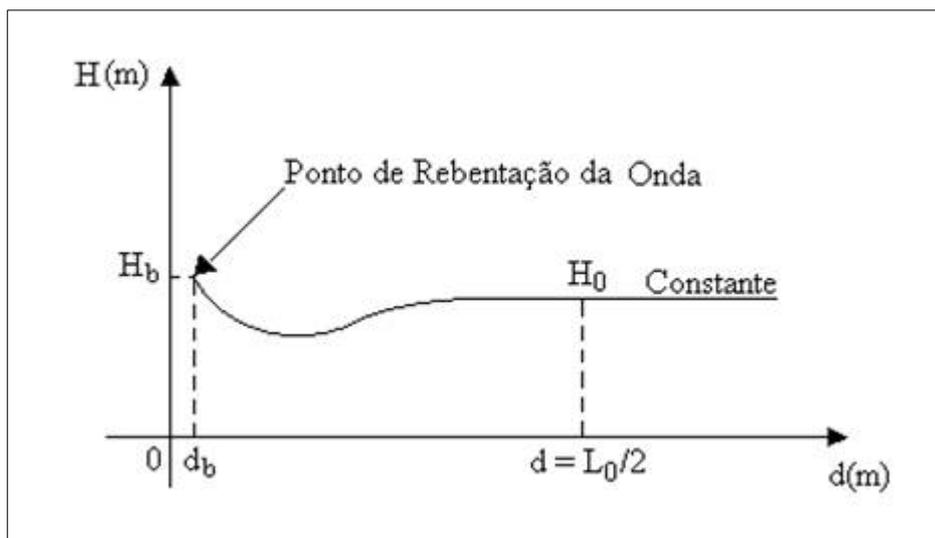


FIGURA 2.7 - Configuração de ondas em função da profundidade (Fonte: Pitombeira, 2005)

### 2.3.6 - Rebentação

Conforme já descrito, as partículas de água descrevem movimentos circulares, sendo estes menores conforme a profundidade, até que na metade do comprimento de onda, estes praticamente cessam. Os movimentos das partículas de água transformam-se em elipses achatadas ao entrarem em contato com o fundo. Assim, as partículas movem-se para frente e para trás junto ao fundo marinho e não mais circularmente. A quebra da onda ocorre por que o contato das partículas que se movimentam próximas ao fundo faz com que haja um atraso destas em relação às da superfície, que se movem mais livremente, impelindo desta forma, a região superior da onda para frente, ocasionando a quebra (Figura 2.8). Neste momento, as oscilações das partículas cessam e a movimentação é toda em direção à praia. Como regra geral, a profundidade de quebra é cerca de 1,3 vezes a altura da onda, ou seja, uma onda de 1,5 metro deve quebra-se quando a profundidade local atinja cerca de 2 metros.

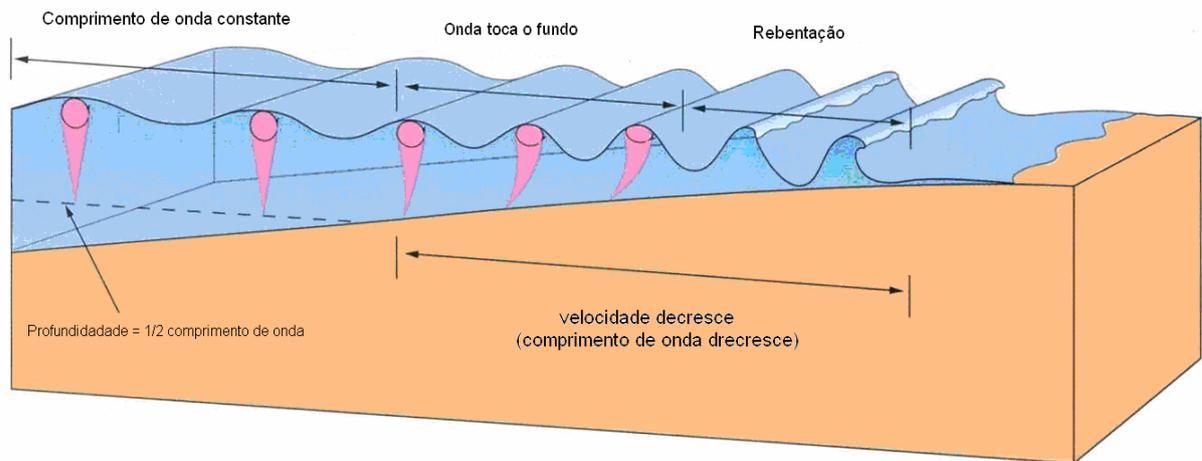


FIGURA 2.8 - Modificações sofridas pelas ondas quando se aproximam da linha de costa (Modificada de Thurman, 1997).

As ondas podem se quebrar quando, em águas profundas, a razão entre a altura e o comprimento da onda ultrapassar  $1/7$  ou quando a crista da onda aproximar-se de um ângulo de  $120^\circ$  (Figura 2.9). Quando isso ocorre, a configuração da onda torna-se instável e ela se quebra.

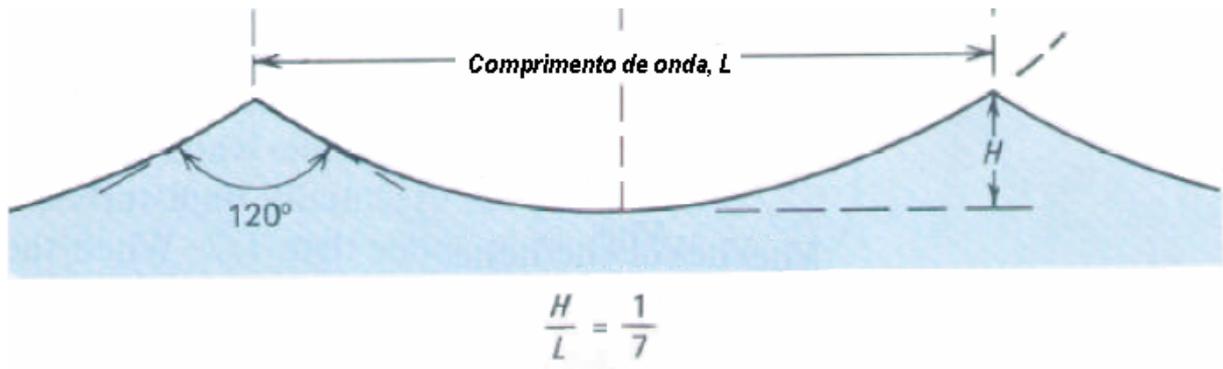


FIGURA 2.9 – Esquema da relação entre comprimento de onda e o ângulo da crista (Modificada de Thurman,1997).

Conforme é explanado por Abecasis (1957):

Superando a fase de shoaling, quando uma onda se aproxima de uma praia o seu comprimento vai diminuindo como conseqüência da diminuição da velocidade de propagação ao mesmo tempo que sua altura vai aumentando. A onda vai a cada momento aumentando sua declividade, relação entre a altura e o comprimento, tornando-se instável e a parte superior da crista começa a se desagregar com uma conseqüente formação de espuma. Esta desagregação vai progredindo, a energia da onda vai se dissipando no seio da massa líquida e a onda acaba por desaparecer. Este conjunto de fenômenos recebe o nome de rebentação. Hoje se sabe que os efeitos do atrito têm importância mínima na rebentação e que esta é devida, fundamentalmente, à modificação da forma da onda provocada pela diminuição da profundidade.

As ondas apresentam tipos diferentes de rebentação entre eles: em derrame, em espiral, em colapso e em vagalhão. Embora ventos e correntes possam ter algum efeito no tipo de rebentação que uma onda originará na linha de costa, a principal influência será mesmo da topografia do fundo. Em praias muito planas, as ondas se quebram lentamente a partir da crista, continuando o processo por longas distâncias enquanto se aproximam da praia; este tipo de rebentação é chamado em derrame, (Figura 2.10). Encontrada predominantemente em Iparana.



FIGURA 2.10 - Onda em derrame (Fonte: <http://www.clicksurf.com.br>)

A rebentação em espiral é a mais apreciada pelos surfistas, pois forma o chamado tubo, em sua gíria. Se a praia é relativamente inclinada, a crista da onda se rompe com relativa rapidez após enrolar-se em espiral (Figura 2.11).



FIGURA 2.11 - Onda em espiral (Fonte: <http://creative.gettyimages.com/>)

Em colapso (collapsing) é similar à rebentação em espiral, exceto pelo fato que ao invés do pico formar uma espiral, a face frontal da onda desmorona. Esta rebentação ocorre em praias com inclinação moderadamente íngreme, e sobre moderadas condições de vento (Figura 2.12).



FIGURA 2.12 - Onda em colapso (Fonte: <http://surfreporter.cidadeinternet.com.br/>)

Finalmente, quando o fundo é muito inclinado, a onda não se quebrará até que alcance a praia. Este caso, no qual a onda se forma muito rapidamente e se quebra diretamente sobre a praia, é denominada de rebentação em vagalhão, típico das chamadas praias de tombo.

### 2.3.7 - Difração

Segundo os trabalhos apresentados no Shore Protection Manual(1984) (Figura 2.13):

[...] quando ao propagar-se, uma onda encontra um obstáculo que se interpõe ao seu caminhamento, após o mesmo se gera uma zona abrigada. Teoricamente, esta zona abrigada estaria imune à chegada das ondas, portanto seria uma zona de mar calmo. Como apenas uma parte da crista da onda incide com o obstáculo, se destruindo ou se refletindo, a outra parte que não colidiu continua se propagando segundo a direção de ataque da onda. Verifica-se então o fenômeno denominado difração. Desenvolve-se um processo de expansão lateral de energia, aparecendo na zona de sombra uma extensão das cristas sobreviventes, as quais originam ondas

de iguais períodos e comprimentos, porém com alturas e energias por unidade de comprimento da crista, menores. Estas ondas difratadas, criadas na zona de sombra do obstáculo, apresentam cristas curvas, com direção de propagação compreendida angularmente entre a direção de ataque da onda incidente e a direção de locação do obstáculo.

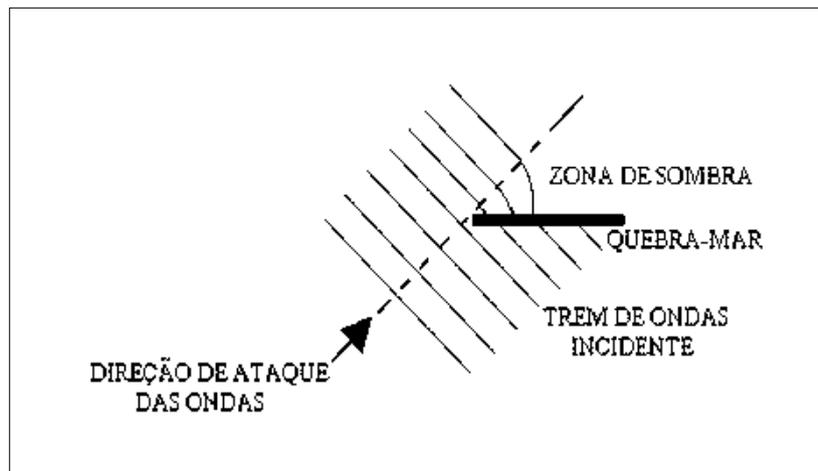


FIGURA 2.13 - Difração de ondas (Fonte: Shore Protection Manual,1984).

### 2.3.8 – Transporte

Ao se propagar em direção à costa, as ondas encontram profundidades cada vez menores. Aumentando assim, as tensões oscilatórias tangenciais ao fundo por elas geradas. Dependendo da intensidade destas tensões, os sedimentos do fundo são movimentados, resultando numa nova configuração do mesmo conforme o clima de ondas. A movimentação de sedimentos pelas ondas ocorre de modo mais visível nas praias, pois estas são as estruturas naturais, e mais eficientes, de dissipação de energia das ondas. Tal dissipação se dá não apenas no mecanismo de rebentação das ondas em si, mas também no carreamento de sedimentos, que pode envolver enormes volumes, processo este comum na região entre a linha de rebentação e a berma da praia. Deve-se ressaltar que os sedimentos envolvidos com os processos em questão, são sedimentos não coesivos e desagregados, constituídos fundamentalmente por areia.

O transporte litorâneo de sedimentos é responsável pelo comportamento das regiões costeiras e trabalha como fator de conformação da linha de costa. Os estudos desenvolvidos sobre o transporte de sedimentos se reportam desde o reconhecimento dos acontecimentos no campo, a elaboração de modelos físicos reduzidos até o estabelecimento de formulações matemáticas que expressem suas modelagens numéricas.

O transporte de sedimentos pode ser:

- i. Longitudinal
- ii. Frontal.

(i) Segundo a concepção de Castanho (1966), *“na zona costeira os movimentos das águas decorrentes da ação combinada de ondas e correntes criam uma força de atrito no fundo do mar. Uma fina camada limite se desenvolve no fundo do mar, na qual as velocidades do escoamento aumentam de zero, no leito, até um valor máximo, no topo. A espessura dessa camada não é constante, mas cresce a partir de zero após cada reversão do escoamento durante um período da onda. Se a tensão cisalhante no leito do mar excede um certo valor crítico, inicia-se o movimento do sedimento. A velocidade com que os grãos se movem é determinada pelo balanço entre a força de arrasto devida à velocidade do escoamento e a força originada do leito.*

*Dentro da camada limite é gerada turbulência, que propicia ao sedimento se manter em suspensão. Se ocorrer a arrebentação da onda, grandes quantidades de turbulência são geradas na superfície, a qual se propaga para a parte de baixo da coluna de água por difusão.*

*Na análise do transporte de sedimentos é usualmente feita uma distinção entre transporte por arrasto e transporte em suspensão. O transporte por arrasto é definido como a parte do transporte total de sedimentos que fica mais ou menos em contato contínuo com o leito, enquanto que o transporte em suspensão é a parte que se move devido às interações fluido – partícula.*

*Em águas rasas o movimento orbital da onda não é senoidal. As velocidades sob a crista da onda são maiores e de menor duração do que sob o cavado da onda.*

*As forças de fricção no leito do mar variam exponencialmente com as velocidades do escoamento. Isto resulta, geralmente, num transporte de sedimentos que é dirigido para a costa fora da zona de arrebentação. Na zona de arrebentação as forças associadas com a arrebentação da onda causam uma distribuição não uniforme das velocidades do escoamento ao longo da coluna d'água. Próximo à superfície d'água o escoamento médio está dirigido para a costa, enquanto que próximo ao leito do mar ocorre um escoamento dirigido para o largo. Esse fenômeno é usualmente chamado de corrente de retorno”.*

Na zona litorânea o transporte de sedimentos é quase sempre dominado pelo transporte em suspensão, devido aos altos níveis de turbulência causados pela arrebentação da onda.

Conforme os estudos de Motta (1967), “se as ondas se aproximam da costa com um determinado ângulo, as forças associadas à arrebentação da onda irão criar uma corrente litorânea ao longo da costa. Devido aos níveis de turbulência na zona de arrebentação, grandes quantidades de sedimentos são colocadas em suspensão e transportadas ao longo da costa pela corrente litorânea. O transporte de sedimentos através desse mecanismo é chamado de transporte litorâneo de sedimentos, ou deriva litorânea. A deriva litorânea é, usualmente, o mais importante parâmetro no balanço de sedimentos. A sua magnitude é muito sensível ao ângulo entre as cristas das ondas e a costa. Uma pequena variação ao ângulo da onda dá origem à variações consideráveis no transporte litorâneo de sedimentos. Em geral, o transporte litorâneo máximo ocorre num ângulo de 50 graus entre a linha de costa e as cristas das ondas.

Este transporte de sedimentos é efetivado de duas maneiras: uma parte se faz carrear pelas “longshore currents” e a outra se transporta em dente de serra, quando da elevação da massa água perfil acima após o processo de rebentação. As praias mantêm uma superfície equilibrada e contínua; entretanto, este equilíbrio é dinâmico. Mesmo as praias se mostrando conformadas, elas estão com uma continuada mudança nos sedimentos ali localizados. “Cada sedimento que é tirado por uma onda que rebenta é imediatamente repostado pela onda que lhe seqüência, não havendo naturalmente perda de volume de sedimentos no local” (Figura 2.14).

O planejamento e projeto de estruturas costeiras, a conservação e melhoria das praias, exigem uma avaliação cuidadosa deste transporte de sedimentos, sendo necessário o conhecimento dos volumes transportados na unidade de tempo e da direção em que se faz o transporte. A movimentação de sedimentos ao longo de uma praia, é função de vários fatores intervenientes, ligados às características dos sedimentos, à declividade do perfil de praia, ao regime de marés, ao regime de ventos e principalmente ao regime de ondas incidente. A direção do ataque da onda com relação à linha de costa, aliada aos parâmetros das ondas incidentes definem a componente do fluxo de energia encarregada de promover o transporte litorâneo de sedimentos. De uma maneira geral, pode-se dizer que o volume de sedimentos transportados depende de dados da onda e de dados de sedimentos, sendo:

$$Q = f(H, T, \alpha, D, \gamma),$$

onde:

Q: volume de sedimentos transportados ao longo da praia.

Dados da onda:

H : altura da onda incidente;

T : período da onda incidente;

$\alpha$  : direção de ataque da onda sobre a praia.

Dados do sedimento:

D: diâmetro representativo do sedimento;

$\gamma$  : peso específico do sedimento.

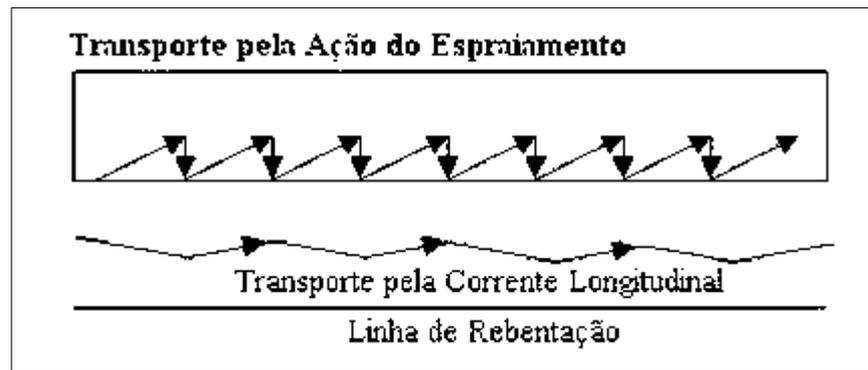


FIGURA 2.14 - Transporte litorâneo de sedimentos em dente de serra (Fonte: Pitombeira, 2005).

(ii) O transporte de sedimentos na direção perpendicular à costa, em geral, é um fenômeno periódico. Sob condições severas (mar de tempestade), as correntes de retorno geradas pela onda irão causar um transporte dirigido para o largo, o qual resulta numa migração no sentido do mar do sistema de barra e um achatamento geral do perfil de praia. Em alguns locais, fortes correntes dirigidas para o largo, as assim chamadas correntes de retorno, podem transportar grandes quantidades de sedimentos para o interior do corpo d'água marítimo. Sob condições amenas (mar calmo), o sedimento é gradualmente transportado de volta para a costa, devido ao movimento assimétrico da onda.

Como se pode denotar, a partir do conhecimento do transporte litorâneo de sedimentos, qualquer empecilho, artificial ou natural, que venha a interferir no transporte litorâneo, quebrará o equilíbrio do mesmo, fazendo com que se tenha um saldo positivo ou negativo no segmento de costa em questão, resultando em processos erosivos ou de assoreamento. Na tentativa de avaliar tais ocorrências, os técnicos no assunto buscam informações de diversas maneiras, de modo a entender o processo que está a se desenvolver no campo, organizar um programa de defesa da praia que está apresentando tais modificações ambientais e reproduzir, por meios físicos ou virtuais, os acontecimentos no protótipo de modo a ter uma visão do futuro e definir atitudes e atividades a serem desencadeadas para evitar novos problemas de desequilíbrio. Neste sentido, vários autores desenvolveram estudos, tendo vários

trabalhos sucesso reconhecido e formulações que realmente desempenham seu papel com acerto.

Segundo Pitombeira (1995), *“os primeiros trabalhos de que se tem notícia no que se refere à modelagem de ondas para a obtenção de conhecimentos sobre transporte litorâneo de sedimentos foram executados no Waterloopkundig Laboratorium em Delft, quando dos estudos para a embocadura de Abdijan, na Costa do Marfim, África equatorial. Nesse trabalho, se estabelecia a proporcionalidade entre a capacidade de transporte de uma onda e sua energia em água profunda, bem como estabelecia uma relação entre essa capacidade de transporte e a direção de ataque da mesma”*. Ainda, segundo o mesmo autor, os trabalhos neste campo foram seqüenciados por Laval (1956-1957) e Larras (1957).

Na continuação dos estudos sobre transporte de sedimentos, Castanho (1996), Caldwell (1956) e Bijker (1968) desenvolveram trabalhos semelhantes, sempre procurando aprimorar os cálculos matemáticos.

Castanho (1966) estudou o mecanismo do transporte litorâneo de sedimentos partindo de princípios físicos relacionando a capacidade de transporte da onda com a energia transmitida devido à rebentação oblíqua. Relacionou fatores importantes, como sejam, declividade de praia, rugosidade de fundo, esbeltez, tudo com base em princípios físicos, explicando a participação de cada parâmetro na marcha geral de cálculo.

Caldwell (1956) partiu de medições na natureza e através de métodos empíricos, relacionou, de uma maneira não homogênea, a capacidade de transporte com a energia transmitida paralelamente à costa durante a rebentação. A postulação de Caldwell é questionada quando ele despreza a influência da esbeltez.

Em seus estudos, Bijker (1968) partiu tendo como marco inicial a influência das ondas e correntes nas tensões tangenciais de fundo e conseguiu expressar uma relação final entre os parâmetros em jogo, de modo a definir o transporte litorâneo.

Os estudos sobre transporte de sedimentos continuaram sendo executados pelos técnicos no assunto, tendo-se uma grande contribuição no equacionamento do problema quando o Laboratório de Grenoble, na França, conseguiu reconhecer o relacionamento entre a capacidade de transporte de uma onda e a sua esbeltez.

Estes estudos de Grenoble foram seqüenciados por Larras e confirmados por Motta(1967) em trabalho desenvolvido no IPH do Rio Grande do Sul em 1964.

Também, o CERC - Coastal Engineering Research Center, do Corpo de Engenheiros dos EUA, desenvolveu formulação de reconhecimento do transporte litorâneo de sedimentos, baseando-se assim, formalmente para os diversos estudos da linha de costa.

## **2.4 – Marés**

Os principais agentes naturais de dinâmica costeira são gerados por forças astronômicas, impulsivas, meteorológicas. As forças são responsáveis pelas marés, que causam mudanças periódicas no nível do mar, e portanto, modificam as larguras das faixas de praia nas quais atuam outros processos. Assim, a influência das marés na esculturação litorânea é indireta e relaciona-se com as variações do nível do mar que lhe são implicadas. Pode-se definir onda de marés como sendo a crista e o cavado de uma onda cujo comprimento é de centenas de quilômetros. A crista da onda é o que normalmente chama-se de maré alta, enquanto que o cavado da onda é o que se chama de maré baixa.

O fenômeno das marés já era conhecido na Antiguidade, mas a explicação do fato só foi possível depois de Newton ter formulado a Lei da Gravitação Universal em 1687. Qualquer corpo exerce sobre um outro uma força gravitacional que o atrai. Essa atração é diretamente proporcional às massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância. Porém, no processo gerador de marés, a proporcionalidade refere-se ao cubo da distância. A força exercida pela Lua e pelo Sol atrai a água dos oceanos provocando o fenômeno das marés; mas, apesar da imensa massa do Sol, o fato desta se encontrar mais próxima da Terra faz com que a influência da Lua seja mais do dobro da do Sol. São as variações das posições do Sol e da Lua que comandam o ciclo das marés.

Quando as atrações do sol e da lua estão em fase, elas se somam e agem em linha reta sobre a Terra. Essas atrações provocam a maré direta (atração lunar)

e a maré indireta (atração solar). Este fenómeno leva o nível do mar a maiores valores; são as marés vivas ou mares de lua (ocorrem na lua cheia e na lua nova) (Figura 2.15).

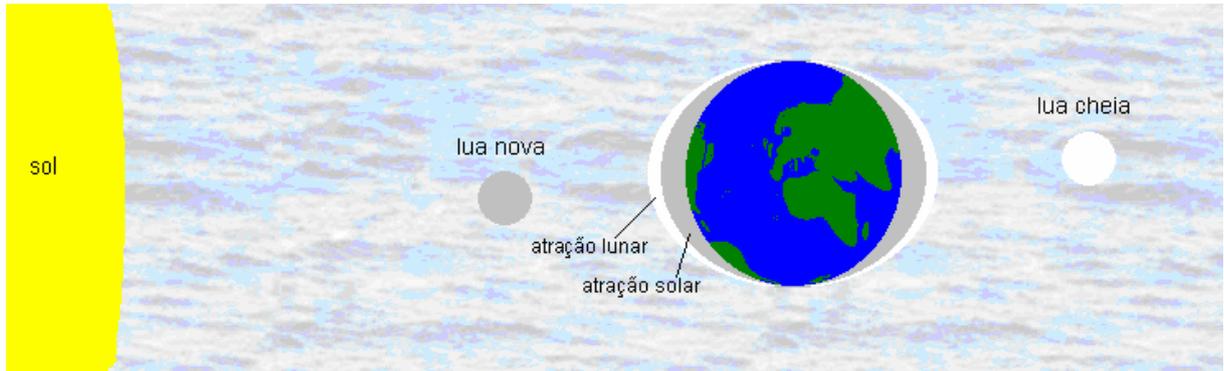


FIGURA 2.15 - Maré de lua (Modificada de: <http://www.edinfor.pt>)

O Sol e a Lua encontram-se em quadratura quando as forças atrativas se encontram defasadas em  $90^\circ$ . É durante este período, quarto minguante e quarto crescente, que as marés atingem a amplitude mínima chamando-se assim, de marés mortas ou marés de quadratura (Figura 2.16).

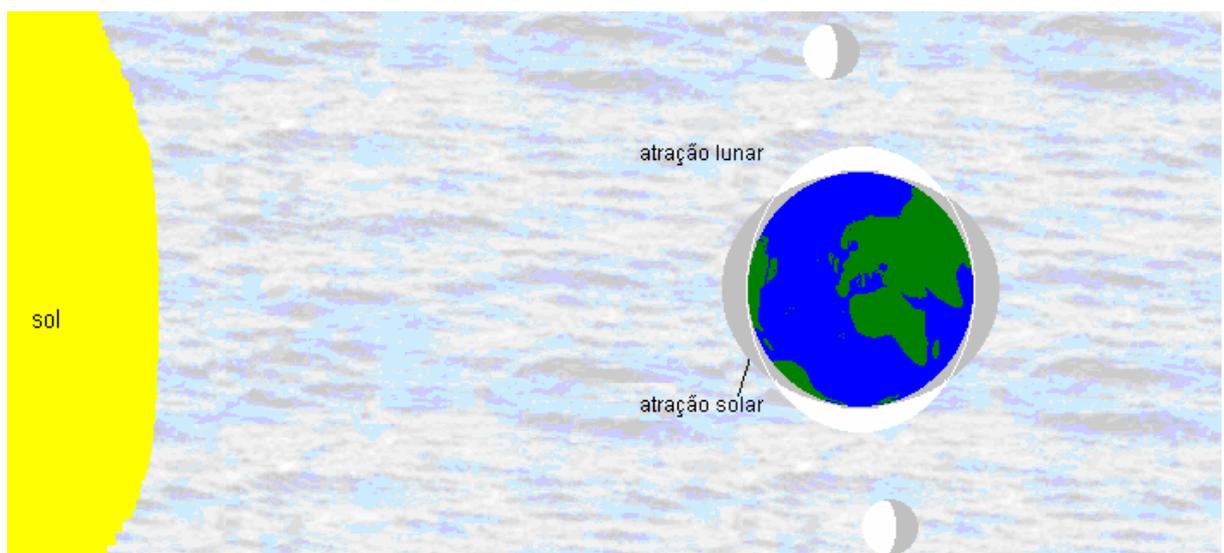


FIGURA 2.16 - Maré de quadratura (Modificada de: <http://www.edinfor.pt>)

Todo o fenômeno das marés é de extrema importância para a navegação. O cálculo das marés é complexo; usam-se tabelas para determinar as horas e alturas das marés. Para determinar a altura da maré num dado momento usa-se um ábaco (método gráfico). Se não tiver um ábaco à mão pode usar a *regra dos dezesseis avos* que nos diz que na 1ª e 6ª hora de enchente ou vazante a altura da maré é de 1/16 dessa amplitude; na 2ª e na 5ª de 3/16 e na 3ª e 4ª hora de 4/16 da amplitude. Isto ocorre apenas em lugares de marés regulares.

## 2.5 – Características dos Sedimentos

O transporte de sedimentos por ação das ondas ocorre tanto na direção paralela quanto na perpendicular à praia, os quais são chamados respectivamente, de transporte longitudinal e transversal (na literatura técnica inglesa “longshore” e “cross-shore”). Em ambos os casos, material mais pesado deposita-se próximo à fonte ou em regiões onde há grande dissipação de energia (na zona de arrebatamento das ondas por exemplo); o material mais fino, sendo mais facilmente transportado a distâncias maiores da fonte, deposita-se em regiões de baixa dissipação de energia (ao largo da zona de arrebatamento ou regiões de baixa atividade dos agentes hidráulicos).

Na região costeira, os sedimentos estão em constante movimentação procurando sua posição de equilíbrio em função da ação dos agentes hidráulicos reinantes. Se ocorrer uma modificação do clima de ondas, como a entrada de uma frente fria, por exemplo, os sedimentos são transportados gerando uma nova conformação para os fundos e para a linha de praia. Estes processos litorâneos são os responsáveis pelos diferentes feitos do perfil de praia ao longo do tempo. Se as mesmas condições de onda prevalecem por tempo suficientemente grande, atinge-se uma situação de equilíbrio onde os grãos de areia posicionam-se conforme sua mobilidade em locais dinamicamente estáveis.

Nas condições normais de agitação tem-se, portanto, um perfil de equilíbrio de praia típico de bom tempo. Quando entra uma frente fria, ou uma tempestade,

ocasionando uma ressaca, as ondas tornam-se mais altas e esbeltas, o nível médio do mar junto à costa sobe devido à efeitos meteorológicos e às forças que as ondas exercem sobre a massa líquida na zona de arrebatamento, “wave set-up” . Em decorrência, a altura de espraiamento aumenta consideravelmente, causando erosão na parte alta da praia. Devido a grande intensidade do transporte de sedimentos durante as ressacas, um novo perfil de praia típico de ressaca é rapidamente formado.

A figura 2.17 mostra um perfil de praia normal ou típico de bom tempo e um perfil de ressaca. Note que a erosão das bermas, existentes nas condições de bom tempo, resulta na formação de uma barra (ou banco de areia) na zona de arrebatamento das ondas de tempestade, gerando um perfil típico de ressaca. Persistindo o mar de bom tempo, o perfil original é paulatinamente reconstruído através do deslocamento do material depositado na barra em direção à praia. No caso da costa cearense, esse mecanismo de transporte transversal é pouco significativo, pois a condição de mar de tempestade, tal como aqui entendida, é pouco freqüente na região.

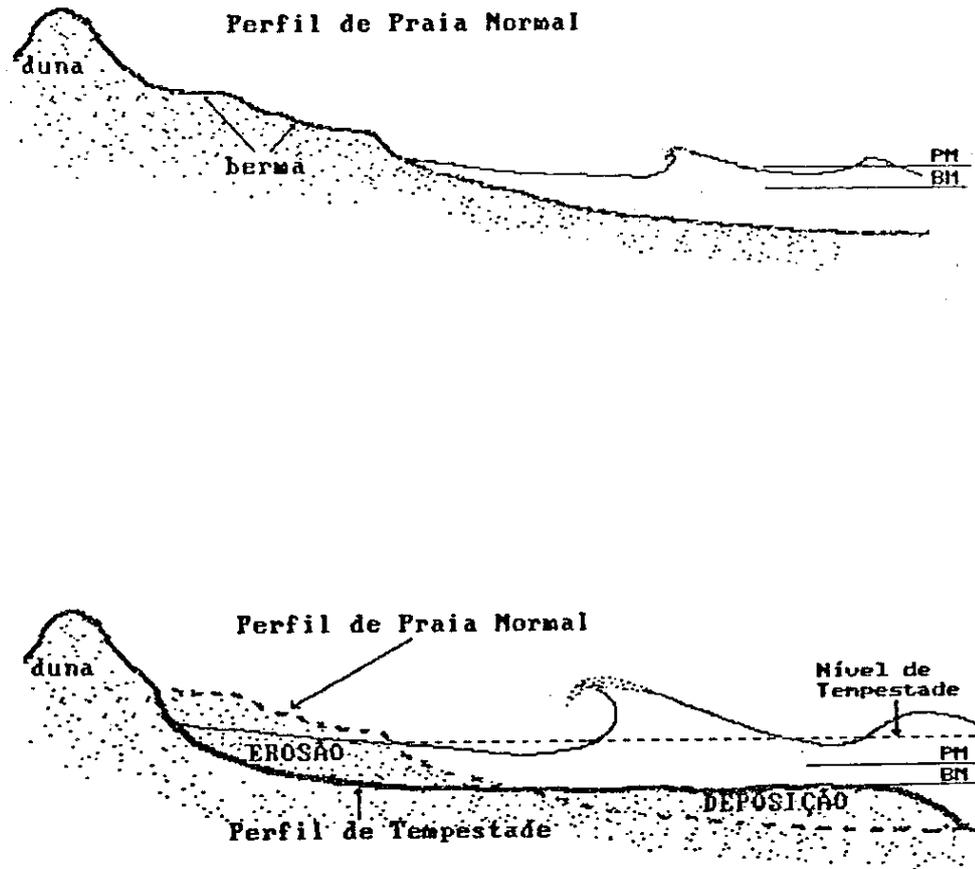


FIGURA 2.17 - Perfil de praia típico de bom tempo e de tempestade (ressaca)  
(Fonte: Rosman, 1989).

Além do trabalho transversal em resposta às solicitações dos agentes hidráulicos, brevemente descrito acima, as praias também respondem longitudinalmente. O transporte longitudinal de sedimentos resulta principalmente do ataque obliquo de ondas, que gera uma corrente paralela à costa devido à componente nessa direção da tensão de radiação (Figura 2.17). Tal transporte é obviamente proporcional à energia das ondas, implicando que ondas maiores e mais obliquas causarão uma vazão sólida maior. É importante notar que mesmo com ataque frontal é impossível haver transporte longitudinal, bastando para tal que haja um fluxo lateral de energia em decorrência da variação da altura da onda ao longo da crista. Tal variação pode ser conseqüência de transformações devido à topografia do fundo (refração), ou de difração em obstáculos rígidos como ilhas, quebra-mares,

etc., alterando sua altura e direção de propagação. Assim, nas regiões de sombra as ondas terão alturas menores no sentido da região de maior energia (maior altura) para a de menor energia (menor altura).

O transporte litorâneo é portanto fundamentalmente dependente do regime de ondas junto à costa. O ângulo de incidência das ondas determina o sentido do transporte, que por convenção, é positivo se para a direita, e negativo para a esquerda de um observador de costa para a terra e de frente para o mar. Dessa forma, para uma região de estudo (chamado volume de controle) são possíveis três situações: transporte positivo (i.e. para a direita), negativo (i.e. para a esquerda) ou nulo (i.e. a quantidade de sedimento que entra é igual à que sai da região). Nos problemas onde o interesse reside em áreas de assoreamento como canais de navegação, recintos portuários, embocaduras, etc., trabalha-se com o transporte total que é pela soma dos transportes positivos e negativos em valores absolutos.

No caso da costa cearense, é evidente pelo exame da morfologia costeira, tal como linhas batimétricas, embocaduras, etc., que o transporte longitudinal é o mecanismo determinante na dinâmica sedimentológica costeira; ou seja, basicamente todo sedimento transportado por ondas é feito na direção paralela à costa. A morfologia costeira também nos indica que o transporte residual deve se dar de Leste para Oeste. Tais constatações devem ser comprovadas pelo regime de ondas, pois, como foi dito acima, a intensidade e o sentido desse transporte é determinado pelo clima de ondas local que é o agente governante do processo.

Um outro tipo de transporte de sedimentos que pode ocorrer nas regiões costeiras e muitas vezes contribuir de forma expressiva para o balanço sedimentológico local é o transporte eólico, isto é o transporte feito pelo vento. Em regiões como dunas, como é o caso do Ceará, geralmente ocorre uma interação entre os transportes litorâneo e eólico. Ou seja, o vento leva material das dunas para zona de arrebatamento e as ondas depositam sedimentos na face da praia, que depois de secos são novamente levados pelo vento para as dunas. Com essa intervenção o material das dunas passa a ser uma das fontes de material para o balanço sedimentológico.

Os rios também podem constituir uma fonte de material para o balanço sedimentológico de uma região sempre que apresentar vazão significativa, trazendo

material de montante para a foz e/ou litoral adjacente à foz. No caso do litoral da costa nordeste do Brasil, essa contribuição não é muito significativa uma vez que seus rios são pouco caudalosos, quase sempre de regime intermitente, apresentando, com raras exceções, inexpressiva contribuição sólida.

## **2.6 – Correntes**

Os oceanos e a atmosfera apresentam comportamentos semelhantes e grande interação, pois ambos são fluidos que estão em contato físico. O aquecimento da superfície oceânica e terrestre pelo sol, nas diferentes latitudes do globo, gera as diferenças de temperatura responsáveis pelas diferenças de pressão que proporcionam a ocorrência de ventos e correntes marinhas.

As correntes marítimas são conhecidas há muito tempo, mas sua influência no clima e nas variações meteorológicas só foi reconhecida em época mais recente. Elas são extremamente importantes, porque garantem o equilíbrio climático da Terra e carregam a energia solar concentrada nas águas do Equador até as latitudes em que o sol incide com menos intensidade.

As ondas que chegam à praia geram uma série de correntes, cujo padrão depende do ângulo de incidência que fazem com a linha de praia. As mais importantes são as correntes oceânicas, as correntes de marés e as geradas pelas ondas.

### **2.6.1 – Oceânicas**

As correntes marítimas correspondem aos deslocamentos das águas oceânicas, continuamente, na mesma direção e velocidade. Essas grandes massas de água salgada que correm na superfície dos oceanos e em águas profundas,

percorrendo cursos bastante regulares, são considerados verdadeiros rios oceânicos (Figura 2.18).

O principal fator responsável pela existência dessas correntes é a diferença da densidade das águas que é provocada pela diferença de temperatura, ou seja, as temperaturas; extremamente baixas nas regiões polares afetam consideravelmente a densidade da água do mar nas altas latitudes, sendo este fato muito importante para desencadear o processo de correntes frias e profundas. Conseqüentemente, provocam o deslocamento da água superficial e quente na direção das altas latitudes para suprir o espaço liberado pelo deslocamento das correntes frias e profundas na direção das baixas latitudes e Equador.

Na costa do Brasil, encontram-se correntes quentes e frias. A corrente oceânica Sul Equatorial, ao encontrar a costa norte/nordeste do Brasil, bifurca-se na corrente do Brasil, na direção sul, e na corrente das Guianas, na direção norte. Ambas são correntes superficiais quentes e se deslocam próximo à costa, sendo freqüentemente observadas pelos navegantes. Na costa sul e sudeste do Brasil, observa-se, em alguns pontos, o surgimento de água fria e profunda proveniente da corrente das Malvinas, chegando até a região de Cabo Frio.



importância. As correntes de maré, embora ocorram em todo o oceano, podem ser observadas com mais facilidade na linha da costa.

Na prática, se não se leva em consideração o perfil da costa e o regime de ventos, pode-se dizer que a direção da corrente é no sentido "mar para terra", denominada corrente de enchente; no sentido "terra para mar", denominada corrente de vazante.

As correntes de maré são fortemente influenciadas pela geografia da região. As características geográficas que influenciam na direção e velocidade de uma corrente de maré são: profundidade, largura da barra (entrada), comprimento do canal de acesso, existência ou não de ilhas e pontas entre outras.

Em suma, são vários os aspectos que influenciam a circulação das águas durante a ocorrência das marés, tanto nas marés de enchente quanto nas marés de vazante.

Além disso, observa-se que a variação na intensidade da velocidade é proporcional à amplitude da maré, ou seja, quanto maior for a amplitude, maior será o volume de água e, conseqüentemente, maior será a intensidade da velocidade da corrente; assim como, quanto menor for a amplitude, menor será a intensidade da velocidade da corrente.

Outros fatores podem influenciar na direção e velocidade da corrente de maré, como o próprio regime de ventos.

As correntes de marés, normalmente, não têm influência sobre o transporte de sedimentos em linhas de praias ininterruptas, só passam a influir quando a amplitude da maré é muito grande (acima de 4,00 m), ou perto dos braços de mar.

### 2.6.3 – Pelas ondas

Como se sabe as ondas transportam energia para a costa, mas não é a energia da onda que move os grãos sedimentares e altera a morfologia, mas sim o movimento da água.

Há muitas correntes na zona costeira, de variadas forças e direções e estas interagem umas com as outras tornando sua análise muito difícil, sendo classificadas em correntes longitudinais à costa e correntes transversais à costa.

Normalmente, as correntes longitudinais crescem em intensidade, da costa em direção ao mar. Estas correntes transportam sedimentos colocados em suspensão pelas ondas incidentes, potencialmente podendo movê-los ao longo de vários quilômetros através do processo de meso-escala temporal conhecido como deriva litorânea (litoral drift). Existem dois mecanismos básicos que explicam a formação de correntes longitudinais à costa: Incidência Oblíqua de Ondas sobre a Praia; e Variação Longitudinal da Altura da Arrebentação.

Correntes de retorno ou rips são caracterizadas por fluxos estreitos, posicionados normal ou obliquamente em relação à costa. Parte da energia dissipada pelas ondas incidentes na zona de surfe é transferida para a geração de correntes costeiras tanto longitudinais (longshore currents) como transversais (correntes de retorno ou rip-currents) as quais, necessariamente, tem sua ocorrência limitada à zona de surfe. Estas correntes representam importantes agentes transportadores de sedimento na zona de surfe, gerando campos de velocidade efetivos na modificação do relevo praial.

## 2.7 – Ventos

Os ventos são os grandes responsáveis pela dinâmica costeira, tendo um papel importante na sedimentação litorânea. Sua presença é determinante na

formação e na intensidade de determinadas ondas marítimas, bem como nos aspectos de energia, e também no processo de alimentação e equilíbrio das praias.

Existem na atmosfera feições relativamente permanentes: centros de alta pressão ocorrem sobre os pólos e em latitudes tropicais; já em regiões equatoriais e subpolares ocorrem centros de baixa pressão. Essas diferentes pressões geram 3 sistemas gerais de ventos na atmosfera (Figura 2.19): ventos alísios, que ocorrem entre 0° e 30° de latitude, soprando do leste para o oeste; ventos do oeste, entre 30° e 60° de latitude e que sopram do oeste para o leste; e, por último, vento do leste nas regiões polares, do leste para o oeste (na meteorologia, os pontos cardeais definem a localização da origem do vento). Tais sistemas de vento são os principais responsáveis pelo equilíbrio de calor no planeta

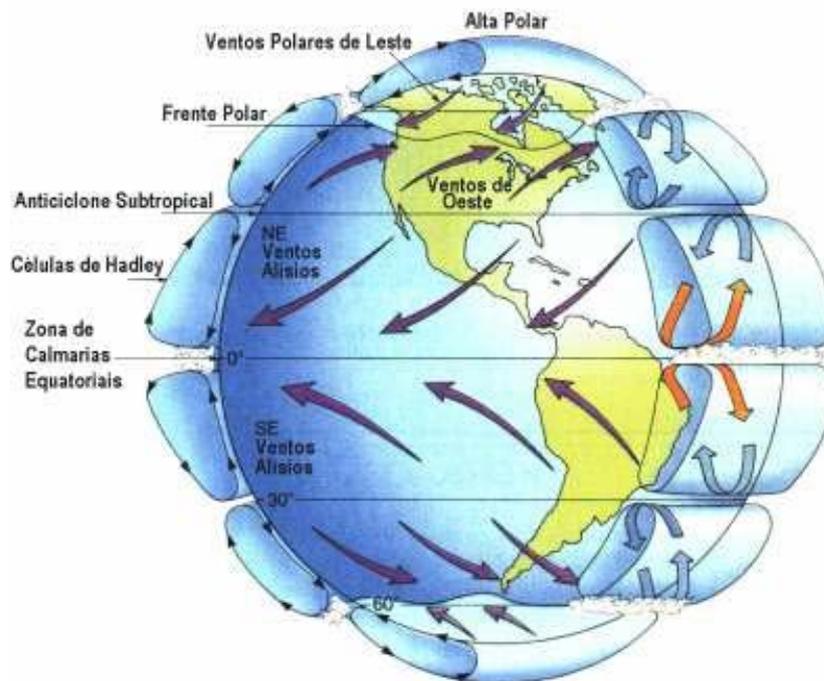


FIGURA 2.19 - Sistema de ventos para uma Terra hipoteticamente recoberta inteiramente por oceanos, mostrando os maiores cinturões de ventos e regiões de elevação e descida de ar (Fonte: <http://www.aeroclubeparana.com.br/meteorologia/circgervento.htm>)

Ao longo da costa, o vento principalmente através de um processo de arrasto, atua nas partículas soltas de forma atuante, transportando este material para outras regiões, mantendo assim, o equilíbrio.

O trabalho de movimentação eólica carrega a areia até depositá-la nas praias, onde pode formar grandes acumulações móveis conhecidas como dunas. São enormes montes de areia acumulada pelo vento e que mudam freqüentemente de lugar. Esses movimentos presentes nas dunas são os grandes responsáveis por todo o equilíbrio dinâmico das costas. Essa ação dos ventos em zonas costeiras, só é fundamental quando há grandes quantidades de material disponível para transporte.

Assim, reconhece-se a importância das ações eólicas para o equilíbrio sedimentar ao longo das praias, tendo em vista a grande interação deste parâmetro físico com os demais agentes marítimos, responsáveis pelo mecanismo da dinâmica costeira.

Os ventos que atingem a costa brasileira são basicamente desenvolvidos pelo sistema de circulação atmosférica, definido pela célula de alta pressão do Atlântico Sul de características semi-estacionárias, que constitui o principal centro de circulação atmosférica do Brasil, bem como pelo avanço da Frente Polar Atlântica, gerando vigorosos ventos de sul – sudeste. Dentro do aspecto da geração de ventos, incluem-se ainda os alísios de NE, controlados essencialmente pela movimentação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e que afeta principalmente a porção norte do Brasil.

### 3.0 – ÁREA DE TRABALHO

#### 3.1 – Histórico

O litoral do Ceará, na sua porção adjacente à cidade de Fortaleza, vem sendo submetido a obras de engenharia costeira e portuária há quase 200 anos. A primeira intervenção foi feita em 1807 com a construção do porto da então Vila de Fortaleza. Desde então muitas tentativas se sucederam no sentido de prover a região de um porto capaz de atender às suas necessidades econômicas e comerciais. Na década de 1940 o porto foi transferido para Mucuripe e desde então vem impondo constantes modificações e intervenções no litoral adjacente (Figura 3.1). Todos os capítulos dessa história podem ser encontrados nos arquivos do INPH e um resumo da mesma é apresentado por Moraes (1981) em dois trabalhos: “Aspectos de Geologia Ambiental Costeiro”, capítulo IX – “Sedimentação e Controle Ambiental”, e “Evolução Sedimentológica da Enseada de Mucuripe”. Informações qualitativas, e algumas quantitativas, podem ser extraídas desses trabalhos e assim, colaborar para a compreensão dos processos costeiros que se verificam na região.

Desde as primeiras obras realizadas no então porto de Fortaleza, são verificados assoreamentos nos recintos portuários. No final do século passado, John Hawkshaw apresentou um projeto para o porto de Fortaleza que, entre outros detalhes, previa a construção de um quebra-mar de 670m, aproximadamente paralelo à linha de costa, ligado a este por meio de um viaduto sobre pilastras. À medida que a construção avançava, seguia junto o assoreamento na área de sombra da obra. O assoreamento foi tal que antes da virada do século a linha de costa junto à “Muralha Hawkshaw” já havia avançado 400m mar adentro. Não se tinha à época o atual conhecimento sobre processos litorâneos e portanto, não foi feita a devida correlação entre tal assoreamento com as obras do porto. Nas primeiras décadas deste século muitos estudos foram conduzidos e diversos projetos foram apresentados na tentativa de resolver o problema do assoreamento no porto de Fortaleza. O antigo porto de Fortaleza foi abandonado e transferido para a ponta do Mucuripe na década de 1940. A construção se estendeu por mais de 5

anos, e no final das obras já eram verificados sinais de erosão na praia de Iracema e de assoreamento junto ao quebra-mar principal inviabilizando o uso do cais de petroleiros. Morais (1981) estimou a partir de dois levantamentos batimétricos um anterior à obra e outro de 1946, que aproximadamente 128.000 m<sup>2</sup> de terrenos foram erodidos na praia de Iracema.

Torna-se evidente que os dois processos estão associados. O efeito do quebra-mar do Mucuripe é o de barrar os sedimentos que são transportados de Leste para Oeste pelas correntes geradas por ondas junto à costa. O fenômeno físico é o mesmo que se verificava na Muralha Hawkshaw, só que no caso do Mucuripe com ordem de grandeza muito maior.

Na década de 1950 foram conduzidos estudos no Brasil e na França no sentido de esclarecer o problema e determinar uma solução para o mesmo. A solução encontrada recomendava a construção de um espigão na praia do Futuro para impedir que os sedimentos vindos de Leste penetrassem no recinto portuário. Simultaneamente deveria ser feito um transpasse de areia desse ponto para a costa a sotamar da região de sombra do quebra-mar. Com essa medida o que se pretendia era impedir que houvesse assoreamento no porto como também erosão no litoral de sotamar.

Esse transporte de areia foi executado e o que se verificou foi um crescimento do processo erosivo a Oeste do porto e de assoreamento a Leste do mesmo. Nos anos de 1970 foram construídos espigões no trecho de litoral a sotamar de Mucuripe até a Barra do Ceará e prolongamento do espigão da praia do Futuro, conforme projeto feito pelo INPH. Em 1980 foram dragados 2,5 milhões de m<sup>3</sup> de sedimentos do recinto portuário, material esse que deveria ser aproveitado na recuperação da praia de Iracema.

A rapidez dos processos de erosão e assoreamento no litoral do Ceará sugere que o transporte litorâneo seja intenso. Morais (1981) quantificou, a partir de levantamentos batimétricos realizados nos anos de 1977 e 1978, os volumes erodidos e assoreados na praia do Futuro que chegaram a valores da ordem de 600.000 m<sup>3</sup> de areia em um ano. Isso significa que ao se barrar o sedimento num ponto, o escoamento a sotamar provocara uma erosão da mesma ordem de

grandeza, pois o escoamento continua com a mesma capacidade de transporte, mas sem a mesma disponibilidade de sedimento.

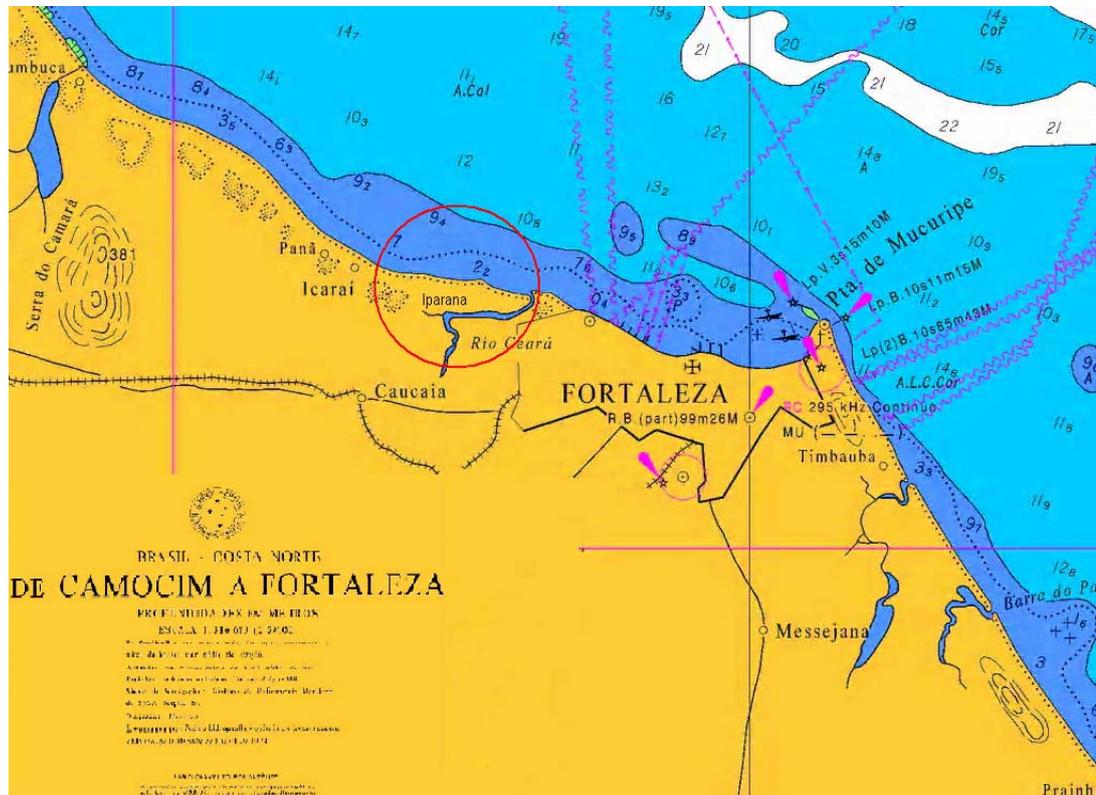


FIGURA 3.1 - Localização da Praia de Iparana (Fonte: DHN, 1975)

Dessa forma, qualquer obra de correção deve ser acompanhada de transpasse de areia; caso contrário, o problema essencial permanece.

Isso é o que vem acontecendo no litoral de Fortaleza. O espigão da praia do Futuro retém os sedimentos que assoreariam o porto, mas também aqueles que alimentariam o trecho de litoral a sotamar do porto. O mesmo acontece com o espigão da Barra do Ceará, impedindo que as praias a Oeste da embocadura sejam alimentadas.

Morais (1981) analisou o comportamento do litoral Oeste à embocadura do rio Ceará comparando as linhas de costa entre 1972, antes da construção do espigão da Barra do Ceará com a situação atual. Detectou que a linha de costa recuou 150m tornando exposto o arenito de embasamento do Grupo Barreiras. Segundo ele, algumas falésias do Grupo Barreiras que aparecem a partir de 500m a Oeste da foz, estão funcionando como uma barreira propriamente dita, retendo os sedimentos erodidos no local.

Ate agora foi falado apenas das implicações relacionadas ao transporte litorâneo; entretanto, nessa região o transporte eólico assume um papel significativo. A importância de tal mecanismo está no fato das areias das dunas constituírem uma fonte de sedimentos para o escoamento litorâneo. Evidências dessa integração são dadas pelas reações observadas sempre que campos de dunas são fixados, impermeabilizadas ou removidos acarretando conseqüente erosão nos terrenos de sotamar. O transporte eólico constitui fenômeno ainda mais complexo e menos investigado que o litorâneo. Estimativas grosseiras são feitas através de cubagens de volumes transportados ao longo de um intervalo de tempo; entretanto, esse procedimento carece de diversos levantamentos de campo, em diferentes épocas, o que na maioria dos casos não é disponível.

No caso de Iparana (Figura 3.2) conta-se com algumas informações a respeito da taxa de movimentação de dunas e não de vazão sólida, levantada pela Estação de Agrometeorologia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará. Tais resultados, referentes à levantamentos conduzidos entre os anos 1986 e 1988, indicam um avanço mínimo e máximo mensal da ordem de 0,01m e 5,58 m respectivamente, fornecendo uma média anual de aproximadamente 20m. Essa migração das dunas acontece, obviamente, na direção do vento que é insistentemente de leste. Levando-se em consideração a orientação da costa, constata-se que parte do transporte eólico é carreado para a praia participando como uma fonte de material para o transporte litorâneo.



FIGURA 3.2 - Vista aérea de Iparana (Modificado de: <http://www.semace.ce.gov.br>)

É isso o que, aparentemente, vem ocorrendo em Iparana. Como há pouco suprimento de material a barlar, o escoamento dissipa sua energia no transporte de sedimento local e daquele fornecido pelas dunas. Isso justifica o fato do desaparecimento das dunas locais e a falta de sinais de erosão até agora, no litoral de sotamar a Oeste de Iparana.

Esse mesmo processo já ocorreu em localidades próximas a Mucuripe onde a fixação de dunas teve seu papel a desempenhar nos processos de erosão que lá foram verificados. Infelizmente, não existem registros disponíveis sobre tais processos o que poderia contribuir para a compreensão de outros semelhantes.

Em suma, a erosão que se verifica na praia de Iparana não é nada mais que uma extensão do mesmo problema das praias de Fortaleza, que é o equilíbrio dinâmico entre a capacidade de transporte do escoamento e a disponibilidade de material (sedimento) para ser transportado. Em outras palavras, a continuidade do transporte de sedimentos não foi respeitada. Qualquer medida corretiva que se adote para sanar este problema deverá respeitar tal condição natural sob pena de se enfrentar o mesmo problema em outro trecho da costa mais a sotamar.

A direção do SESC - Serviço Social do Comercio, tem desenvolvido atividades no sentido proteger a área costeira de sua Colônia de Férias, localizada na Praia de Iparana, município de Caucaia, estado do Ceará.

Esta região costeira vem ao longo dos anos sofrendo problemas de erosão e recuo da linha de costa. A diretoria do SESC tem executado um trabalho de proteção sob a forma de um muro longitudinal. Referida obra protetora foi executada conforme programa de trabalho proposto pelo grupo de trabalho do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, através da COPPETEC, no caso em Projeto assinado pelo Coordenador, Professor Paulo César Colonna Rosman e pela Professora Enise Valentine.

O projeto em referência, previa a construção de um muro longitudinal ("sea wall"), com comprimento da ordem de 900 metros, o qual se assentava na região costeira adjacente à Colônia de Férias do SESC, tendo suas condições físicas definidas pelos regimes de ondas e de marés locais.

Esta construção tem como objetivo a fixação da linha de costa, pois atua impedindo que os terrenos participem do processo de erosão. Essa solução previne futuras erosões nos abrigados pela estrutura, mas não faz cessar as causas da erosão como também não propicia a recuperação da praia defronte ou adjacente à estrutura.

O projeto de referida obra é datado de 22 de abril de 1991 e a sua consecução se deu na metade do ano de 1992, sendo a mesma construída conforme os padrões definidos em projeto e atendendo às recomendações construtivas alinhadas.

Em 21 de dezembro de 1993, realizou-se uma vistoria à obra implementada, por uma equipe na qual se achavam inseridos um engenheiro do SESC e o Professor Paulo César Colonna Rosman, quando então ficou evidenciado que a obra de proteção, construída hum ano e meio atrás, se achava em perfeita ordem de conformação estrutural.

Em 17 de dezembro de 2001, foi realizada na área costeira de Iparana, no segmento de praia protegido pela obra rochosa supra citada, nova visita técnica, com a missão de avaliar as suas condições atuais de acomodação, conformação e

segurança. A necessidade de tal inspeção se fazia sentir, pelo tempo que já havia passado da construção da obra, quase dez anos, e pela observação de que em alguns pontos se notava o desarranjo das peças rochosas ali colocadas.

A inspeção de campo, levada a efeito por técnicos do SESC e da professora Enise Valentine, da COPPE – UFRJ constatou a situação em 2001 da proteção rochosa longitudinal e através do PARECER TÉCNICO SOBRE A OBRA DE PROTEÇÃO COSTEIRA DE IPARANA, foram enumeradas algumas atividades que deveriam ser implementadas para a reconformação e restauração da mesma.

A execução da restauração preconizada no relatório do grupo de trabalho da COPPE exigiu que o SESC tomasse algumas providências administrativas e técnicas, e para este fim contatou a Universidade Federal do Ceará, através do Centro de Tecnologia e do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. O grupo de trabalho em Engenharia Costeira, o qual desenvolve atividades através da ASTEF – Associação Técnico-Científica Engenheiro Paulo de Frontin, examinou a recomendação proposta no relatório de campo apresentado pela Professora Enise Valentine e organizou um plano executivo que contemplasse tais exigências, sendo este documento, a apresentação de uma proposta de trabalho para a consecução da mesma.

O muro de enrocamento (Figura 3.3) está posicionado no alinhamento do sopé das dunas na extensão defronte à propriedade do SESC. Quanto à geometria, o comprimento é dado pela extensão do trecho de praia que se protege em torno de 900m. A altura é de aproximadamente 3,8m acima do leito rochoso, suficiente para impedir a penetração de água no lado protegido; isto é, impedir o “overtopping”, que para o talude de 1:1,5 de enrocamento, e para o “run-up” máximo (Figura 3.4 a 3.9).

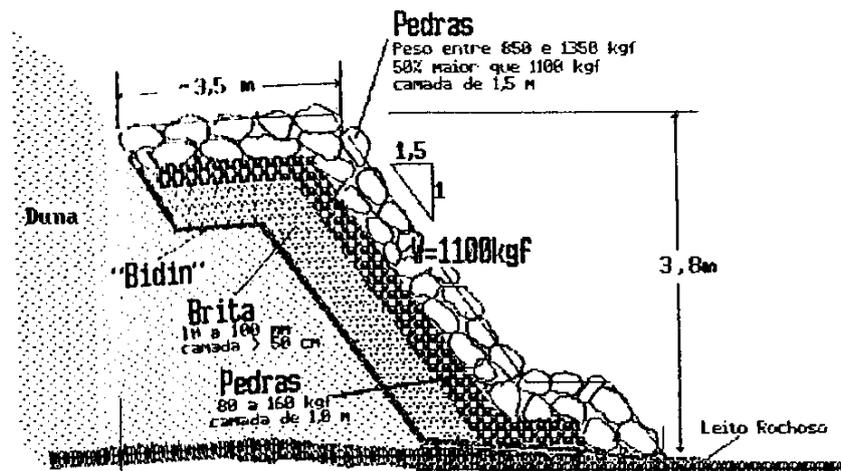


FIGURA 3.3 - Muro de Enrocamento (Esquema da Seção Transversal)  
(Fonte: ROSMAN,1989)



FIGURA 3.4 - Praia de Iparana antes da construção da "sea wall" (1992).



FIGURA 3.5 - Praia de Iparana antes da construção da “sea wall” com exposição de rochas (1992).



FIGURA 3.6 – Implantação da bidin na construção da “sea wall” em 1992.



FIGURA 3.7 – Vista oeste de Iparana, com exposição das rochas de praia, após a construção da “sea wall”(1992).



FIGURA 3.8 – Vista leste de Iparana, com exposição das rochas de praia, após a construção do “sea wall” (1992)



FIGURA 3.9 – Colocação da camada de 1,5 metros de pedra, na construção da “sea wall” (1992)

Em atendimento às recomendações do Relatório da COPPETEC, em que foram reconhecidas as deficiências no muro de pedra protetor da praia de Iparana foi elaborado um Plano de trabalho para a necessária reforma física pretendida.

Em alguns pontos foram detectados desarranjos no maciço rochoso ao longo do muro, como também, devido às mudanças ocorrentes na conformação do piso arenoso, o regime de ondas, em seu processo de arrebentação, passou a ter contato direto com o muro. Estas ocorrências, perfeitamente esperadas em obras marítimas com dez anos de construídas, passaram a exigir reparações que segundo o relatório pode ser conseguida através da iniciativa de *“re-arranjar as pedras ou simplesmente colocar outra camada por cima”*.

Para que se tivessem informações reais sobre a situação física do muro em sua totalidade, foi efetivado um levantamento topográfico de todo o muro, tendo-se o reconhecimento de suas condições em termos longitudinais e, através de perfis

transversais, se conseguiu aquilatar o que realmente aconteceu em suas diversas seções ao longo de todo o segmento construído.

No projeto básico, estavam definidas em seções as dimensões transversais da proteção rochosa a qual sendo comparada com a situação levantada pela topografia atual, fica registrado que ocorreu um arraste das pedras devido o efeito do regime ondulatório incidente. Neste caso ficou definido que, para que se tenha uma recuperação homogênea de todo o muro, se deveria colocar uma camada completa de pedras ao longo do mesmo. Foi recomendada uma camada praticamente com a mesma espessura. Referida camada, que receberá o impacto frontal do regime de ondas incidente, é formada de pedras com as especificações do projeto inicial. A distribuição destas pedras foi homogênea, de modo a que toda a estrutura seja contemplada com o reforço representado pelo maciço rochoso colocado.

## **3.2 – Condições atuais**

### 3.2.1 – Descrição

Devido a um arraste das pedras ocasionadas pelo efeito do regime ondulatório incidente, foi necessária uma recuperação do muro. Foi então colocada uma camada de pedras ao longo do mesmo para que se pudesse ter uma camada praticamente com a mesma espessura definida no projeto original (Figura 3.10). A distribuição destas pedras foi necessária para que toda a estrutura fosse contemplada com o reforço necessário. As pedras lançadas obedeceram às especificações previstas no projeto inicial, sendo então usadas na carapaça; são *“pedras com peso entre 850 e 1350 kgf, com pelo menos 50 % destas pedras pesando mais do que 1100 kgf”*.

Um levantamento efetuado das seções ao longo de todo muro, em janeiro de 2003, constatou que os volumes foram lançados entre as seções S6 e S11 para a

manutenção da seção padrão anteriormente ilustrada. Assim, a seção padrão hoje encontrada em Iparana é a mesma exposta anteriormente.



FIGURA 3.10 - Foto da “sea wall” dois anos após reparo (2003).

### 3.2.2 - Características físicas e ambientais

A praia de Iparana está localizada no município de Caucaia, região metropolitana de Fortaleza – Ceará, latitude  $3^{\circ} 40'S$  e longitude  $38^{\circ} 40'W$ . O litoral tem mostrado uma paisagem com exposição de arenitos. O campo de dunas se estende ao longo da costa, mas observa-se remoção da mesma com conseqüente recuo da linha de costa.

A região é caracterizada por praias arenosas, de granulometria média a grossa, apresentando frações mais finas apenas no limite oeste da região investigada. A praia está limitada, na sua retaguarda, por um campo de dunas e, em alguns trechos, falésias do Grupo Barreiras, formação que se estende pelo interior na forma de tabuleiros de arenitos e argilitos. Ao longo da costa, verificaram-se

trechos de dunas móveis, outros com cobertura vegetal de gramíneas e/ou arbustos, e outros, de dunas fixas já edificadas. Junto à praia, as dunas apresentaram alturas entre 15 e 20m, com declividade na face Norte entre 30% e 50%, e são constituídas basicamente por areia fina. A região apresenta um leito rochoso constituído por conglomeradas polimodais, com inclinação média em ordem de 5° mergulhando em direção ao mar, apresentando trechos de afloramento e outros, com um pequeno recobrimento de areia atingindo uma espessura média da ordem de 1,5m.

O comportamento dos parâmetros físicos intervenientes no ambiente é de fundamental importância para o conhecimento dos acontecimentos ocorrentes na área costeira de Iparana; por isso, foi desenvolvido um programa de estudo dos parâmetros físicos (Maia 2005), sendo medidos:

- Regime de ondas
- Regime de ventos
- Regime de marés

Como a praia de Iparana fica a uma pequena distância (16km) do porto de Mucuripe, toda informação sobre o ambiente costeiro levantado pode ser aproveitada para o estudo de Iparana.

#### 3.2.2.1 - Regime de ondas

As características do regime de ondas registrado no Porto do Mucuripe, foram obtidas com o ondógrafo Waverider, instalado pelo Instituto de Pesquisas Hidroviárias – INPH, a uma profundidade média de 16 m, à leste do espigão da praia do Futuro em Fortaleza no ponto de coordenadas: latitude 03° 42'14" S e longitude 38° 27'11" W. Este equipamento tem grande vantagem ao medir as direções de ataque das ondas, pois é através de meios eletrônicos, bem mais preciso que os de outros métodos, além da facilidade que se tem ao registrar os dados de direção com os dados de altura e período ao longo da temporada de atividade.

Foi estudada uma seqüência de 4 anos de medições de ondas realizadas no porto do Mucuripe (Fortaleza). De posse desses dados, determinou-se uma média de altura de onda de 1,15 m e moda de 1,14 m, apresentando período médio de onda mais freqüente de 5,70 segundos, associado à altura significativa, e média de 5,89 segundos. Com ondas incidentes na obra de 2,38m de altura. Há uma predominância de ondas do tipo *sea*, representando 94,2%, em relação às de *swell*, as quais correspondem a 0,28%, e o restante (5,52%), não pôde ser definido por estarem situados entre os dois limites.

Verificou-se também a existência de um forte controle das características das ondas pela velocidade e direção do vento, determinando um domínio das ondas de E, octantes ESE e ENE e, secundariamente de NE confirmando a predominância das ondas do quadrante E-SE e uma ocorrência secundária de ondas de NE.

A distribuição das ondas significativas ocorre de forma semelhante ao que se verifica para ondas máximas. O maior número de ocorrências (16,3 %) de ondas significativas foi distribuído no intervalo de 1,4 a 1,5m e 16,2 % no intervalo de 1,2 a 1,3 m. A maior concentração verificada (85 %) foi no intervalo de 1,0 a 1,7 m. As distribuídas entre o intervalo de 2,0 a 2,4 m, representando 1,2 % das ocorrências, foram distribuídas nos meses de julho a novembro.

Os períodos de ondas foram agrupados em 1 a 9 e 10 a 20 s, assumindo respectivamente, como intervalo de ondas do tipo *sea* e *swell*. Durante o intervalo de tempo avaliado (março de 1997 a março de 1998), 27% dos períodos de pico estão compreendidos entre os intervalos 10 a 16 s, enquanto 0,4 % corresponde ao intervalo entre 17 e 19 s. Este tipo de onda distribui-se entre os meses de dezembro a maio.

Quando as medições são realizadas na zona de praia estas ondas apresentam um incremento na altura pelo processo de “shoaling” e exibem períodos, em geral, variando entre 8 a 14 s. Gradualmente, as ondas do tipo *swell* são dissipadas, dando lugar ao predomínio de ondas do tipo *sea*, mas durante alguns momentos os dois tipos dividem espaço.

As direções N-NE e E-SE desenvolvidas, respectivamente, pelas ondas de *swell* e *sea* chegam a ser quase ortogonais umas às outras. Durante esta transição,

os ventos de E-SE são fracos, tornando-se gradativamente mais fortes à medida que se instalam as ondas do tipo sea.

Entre as direções mais freqüentes de ondas, as distribuídas no intervalo de 0° a 45° Az, correspondendo a 39,4 % das ocorrências, a mais comum foi 45° Az, seguida das ondas de 30° Az, que não foram observadas nos meses de julho e agosto, mas principalmente durante dezembro a maio, sendo que de março a maio predominaram as direções de 15° a 45° Az. Estas ondas são observadas em campo incidindo com direção de proveniência variando principalmente entre 30° Az e 40° Az com período medido na zona de praia em torno de 8 a 14s. Do total das ondas medidas, 60,6% corresponderam ao intervalo de direção entre 46° a 120° Az, sendo que no intervalo de 60° a 120° Az, a mais freqüente foi de 90° Az.

A análise do padrão anual do clima de ondas medidas na região do Porto do Mucuripe credencia o uso de dados destas localidades para a avaliação da dinâmica costeira na faixa em estudo. Neste contexto, verifica-se na região, a incidência predominante de ondas de NE e secundariamente de ENE durante o mês de janeiro, cujas maiores alturas significativas situam-se na faixa de 2,36 m (Figura 3.11).

Ao longo do mês de fevereiro distribuem-se entre NE, NNE, E, ESE, e ENE, com maior percentual de incidência decrescentemente segundo esta mesma ordem. As maiores alturas significativas verificadas neste mês (até 1,94 m) distribuem-se entre as ondas de E, ESE e NNE, com predomínio decrescente segundo esta ordem, enquanto as menores alturas significativas (até 1,68 m) são verificadas para as ondas de NE e ENE. No mês de março, estas direções anteriores persistem; entretanto, as ondas provindas de NE são mais comuns. O percentual de incidência de ondas de maiores alturas significativas foi alterado em relação ao mês anterior, passando a predominar para as direções NE, com alturas de até 2,15 m, seguida, em menor proporção, por NNE, E e ESE. As ondas do quadrante ENE apresentaram as menores alturas (até 1,77), embora mantendo elevado percentual de incidência.

A partir de abril, apesar de persistir um maior percentual de incidência das ondas de NE, ocorre um significativo incremento de ondas de ESE e E. Neste período as ondas de maiores alturas significativas (até 2,08 m), provieram do quadrante ESE, seguidos das de E e NE, enquanto as menores alturas significativas do período (até 1,73 m) ocorreram nos quadrantes ENE e NNE (Figura 3.11).

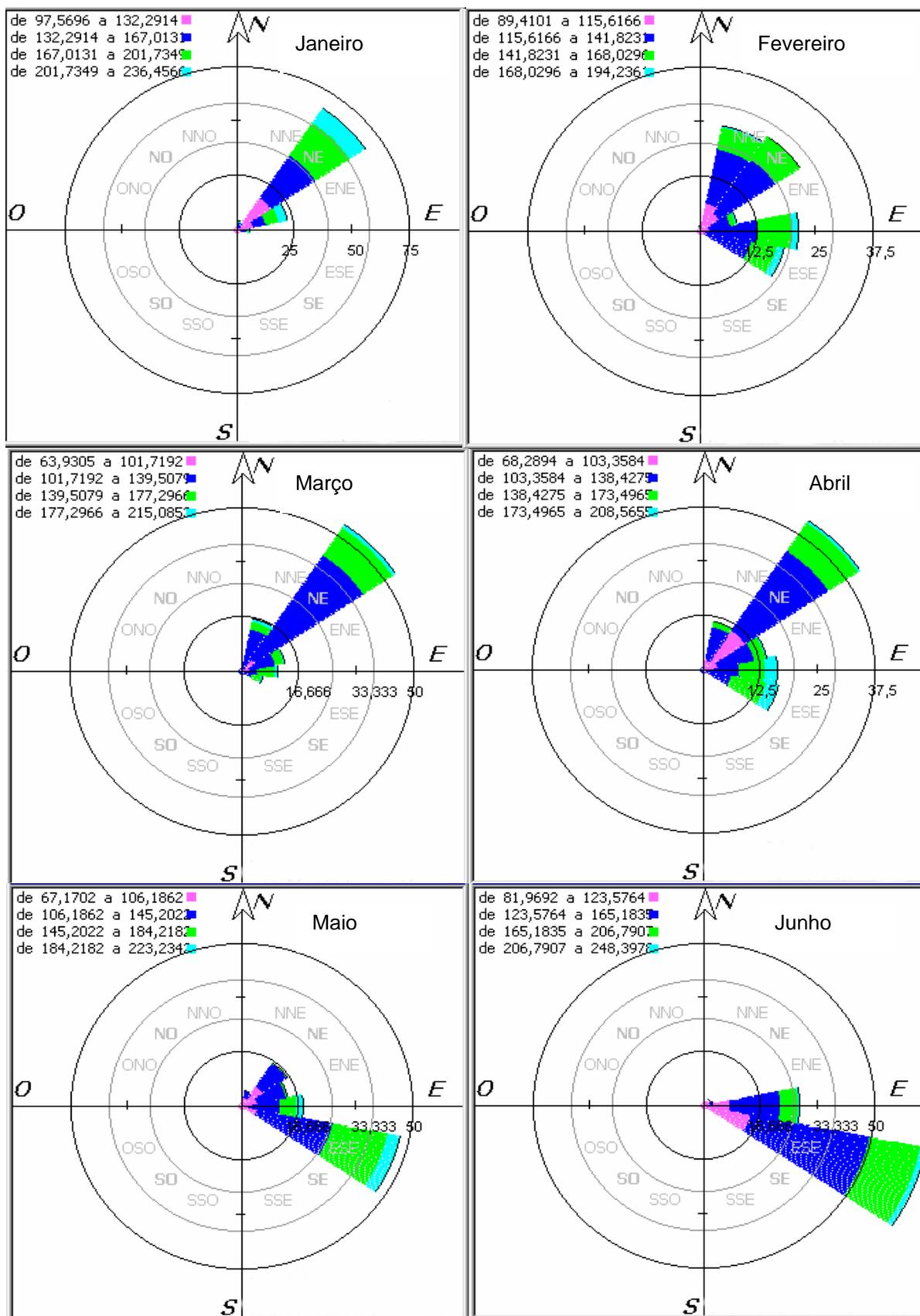


FIGURA 3.11 – Rosa das ondas para o primeiro semestre de 1991 a 1995 (Fonte: Maia 2005).

Durante o mês de maio as ondas distribuem-se entre ESE, E, NE; no entanto, as de NE tornam-se mais raras, ocorrendo um acentuado predomínio das de ESE. Neste período, as ondas de maiores alturas significativas (até 2,23 m) concentraram-se nas provenientes de ESE, seguidas de E, enquanto as alturas significativas de até 1,84 m, ocorreram em ondas de NE e ENE (Figura 4.2). Em junho as ondas do quadrante NE cedem lugar ao aumento da incidência de ondas de ESE e E. Semelhantemente, as maiores alturas significativas (até 2,48 m) ocorrem entre as ondas de ESE, enquanto as de até 2,06 m estão entre as E.

No mês de julho caracteriza-se um significativo declínio do percentual de incidências de ondas de E, associado ao aumento das de ESE. Este aspecto também se reflete no percentual de incidências das ondas de maiores alturas significativas de até 2,39 m. Esta mesma tendência é mantida durante o mês de agosto. Neste mês, as alturas significativas são mantidas num patamar geral sempre alto, acima de 1,31 até 2,46, com percentual maior de ondas de 1,89 a 2,46 m naquelas de ESE. O mês de setembro apresenta características semelhantes às de agosto, diferenciando-se pelo aumento de ondas de alturas significativas de 1,21 a 1,60 m e diminuição no percentual de incidência daquelas de 2,00 a 2,39 m (Figura 3.12).

Durante o mês de outubro o padrão do clima de ondas apresenta características de predominância semelhante às das ondas de junho, divergindo principalmente pelos maiores valores de alturas significativas apresentadas neste mês, com alturas de 1,88 a 2,30 m distribuídas entre as de ESE e secundariamente E, enquanto as ondas de NE apresentam suas maiores alturas significativas entre 1,45 a 1,88 m.

Em novembro é mantido o predomínio das ondas de ESE seguidas das de E, iniciando-se, entretanto, o retorno da incidência de ondas de NE. Neste período as alturas significativas das ondas são mantidas semelhantemente àquelas do mês anterior, ocorrendo uma sensível elevação das alturas significativas para ondas de NE, bem como para ESE e E.

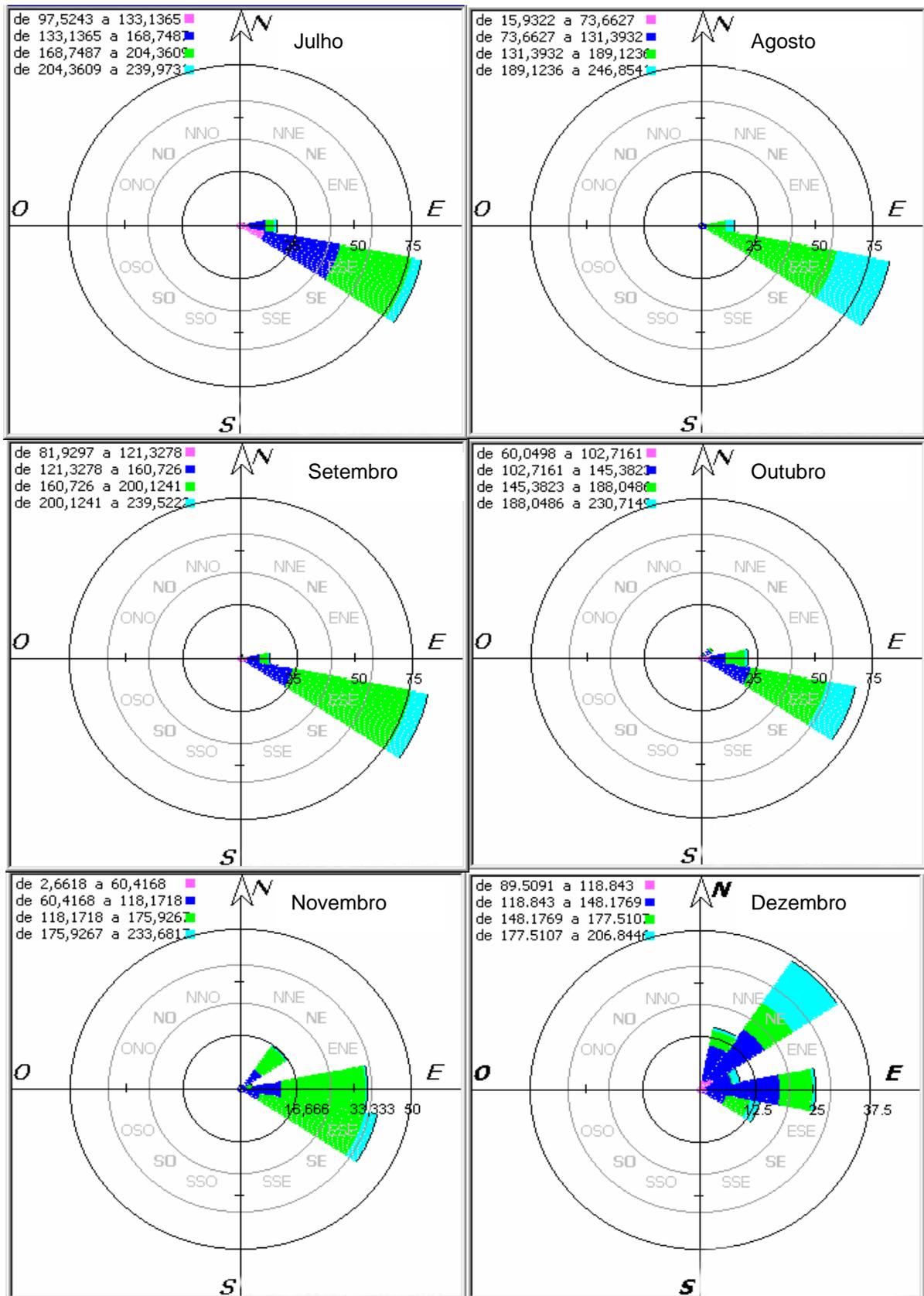


FIGURA 3.12 – Rosa das ondas para o segundo semestre de 1991 a 1995 (Fonte: Maia 2005).

Em dezembro confirma-se a tendência de retorno das ondas de NE, que predominam, seguidas das de E, e com percentual semelhante, ocorrem as de ESE e NNE. As maiores alturas significativas (1,77 a 2,06 m) ocorrem em maior percentual entre as de NE, seguida de ENE, ESE e secundariamente entre E e NNE (Figura 4.3).

### 3.2.2.2 - Ventos

Por sua localização na linha de costa, os ventos que incidem sobre a região em estudo devem ter os dados de ventos relativos às áreas costeiras do estado do Ceará. As velocidades médias dos ventos, medidas na estação da FUNCEME e da UFC em Fortaleza, variam de 2,62 a 4,56 m/s, com média geral de 3,64 m/s. Apresentam variação estacional (Figura 3.13), com valores mais baixos distribuídos ao longo dos meses de janeiro a junho, e índices mínimos em março e abril. Os maiores valores de velocidade ocorrem entre julho e dezembro, com picos entre agosto e outubro. Os ventos mais efetivos são reconhecidamente aqueles provenientes dos quadrantes E e E/SE, enquanto os de N e NE são mais atuantes nos meses de maiores taxas pluviométricas (janeiro a junho), mas ao longo do ano sua importância como agente da dinâmica costeira é bastante reduzida em relação aos ventos efetivos.

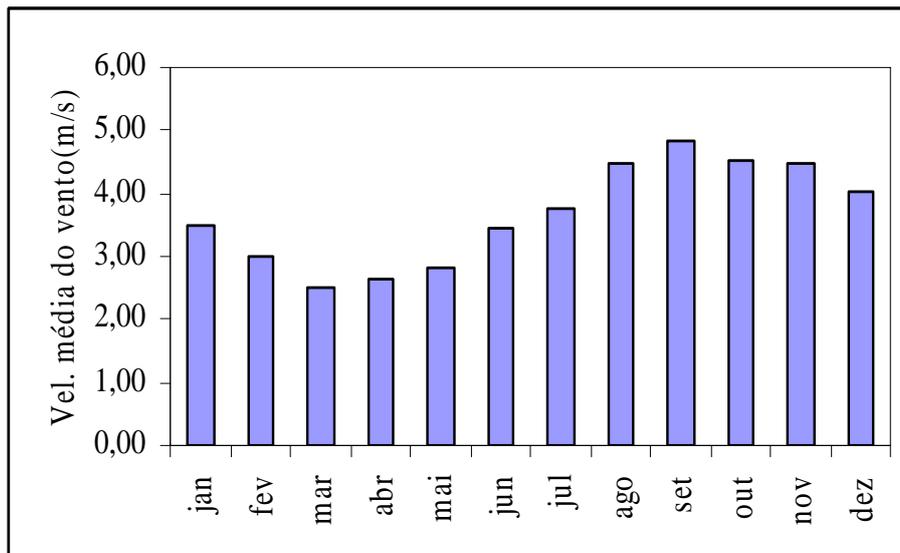


FIGURA 3.13 – Distribuição mensal das velocidades médias dos ventos entre os anos de 1974 a 2000 (Fonte: FUNCEME e UFC).

### 3.2.2.3 - Marés na área em estudo

Segundo Morais (1981), na costa cearense, as marés são representadas por ondas semidiurnas com desigualdade de amplitude e período médio das ondas de marés de 12,4 horas e defasagem média de 50 minutos de um dia para outro.

Os níveis de preamar atingem em média 2,82m durante sizígias e 2,20m durante quadratura. O nível médio do mar no Porto do Mucuripe é de 1,55m. Tais valores são relativos ao zero hidrológico da DHN, que corresponde ao nível médio dado pela media dos níveis de baixamar de sizígia. A altura de baixamar sobre o nível de redução, em sizígia, é de 0,28m e em quadratura, é de 0,90m.

Em estudo mais recente, Maia (1998), utilizando 14 registros analógicos mensais de marégrafo LNG-15 instalado no Porto do Mucuripe, verificou que durante o período de maio de 1995 a junho de 1996, a amplitude máxima da maré foi de 3,23 m tendo ocorrido na maré de sizígia do mês de dezembro de 1995, enquanto a amplitude mínima de maré com valor de 0,75 m, ocorreu na quadratura do mês de março de 1996.

Maia (1998) avaliou que as amplitudes de marés apresentam um período de oscilação de um semestre para os valores extremos, indicando uma influência temporal (de longo prazo) das forças astronômicas sobre a maré. Observou ainda que durante os meses de junho e dezembro a amplitude das marés aumenta tanto de quadratura quanto de sizígia, ocorrendo o inverso durante os meses de setembro e março, quando verificou diferenças temporais de amplitude de marés de sizígia de 0,30 a 0,40 m e de 0,40 a 0,50 m nas de quadratura.

Durante o período avaliado, a amplitude das marés apresentou máxima de 3,33 m e mínima de 1,9 m no Porto do Mucuripe. Maia (1998) analisou dados registrados por um marégrafo LNG-15 do INPH instalado no Porto do Mucuripe durante o período de 25 de abril de 1995 a 02 de julho de 1996. Com base nestes dados, determinou, aplicando a Referência de Nível (RN-3) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com o qual o zero dos maregramas e das cotas de leitura estão referidos, que a cota máxima do nível do mar (+341 cm) ocorreu durante a maré de sizígia de janeiro de 1996, enquanto a mínima (-15 cm) ocorreu nos meses de maio, julho e outubro de 1995. Considerou ainda, que a amplitude máxima possível de ser alcançada pelo nível do mar em função da ação conjunta da maré e das ondas meteorológicas, durante o período analisado, corresponde a 36 cm.

### 3.2.3 – Transporte litorâneo de sedimentos

Na costa do estado do Ceará, o regime ondulatório incide sobre a linha de costa com direções de propagação variando entre 0 e 120 graus, com relação ao norte verdadeiro. Dependendo da época do ano, têm-se mudanças sensíveis nesta direção de ataque bem como nos demais parâmetros da onda.

No período de outubro a março, o regime de ondas incidente se apresenta atacando as praias de uma maneira frontal, fazendo com que o transporte de sedimentos se faça perpendicularmente à linha de costa. Estas ondas, denominadas Swell, são caracterizadas por serem ondas longas provocando grandes ressacas

observadas nas praias do estado, com grande poder erosivo. Nesta época do ano, por termos mudanças apenas nos perfis de praia, não há transporte litorâneo de sedimentos, aparecendo na praia grandes bermas de areia, verdadeiros cortes transversais.

Já no período de março a outubro, tem-se a ocorrência de ondas do quadrante acima de 60 graus com o norte verdadeiro. Estas ondas, denominadas *Sea*, são geradas pelos ventos locais e têm como característica, pequenos períodos e grandes alturas, bem como incidem sobre a praia de forma oblíqua. Esta incidência oblíqua à linha de costa faz com que se tenha um grande transporte de areia ao longo da linha de costa denominado transporte litorâneo de sedimentos. Esse tipo de processo é impossível de ser quantificado precisamente, pois, não só a mecânica do transporte de sedimentos como também o escoamento na zona de arrebentação ainda não pode ser descritos matematicamente de forma exata. Porém, tem-se estimado tal transporte através de equações empíricas ou semi-empíricas na ordem de 800.000 m<sup>3</sup> por ano na costa de Fortaleza. Desta maneira, a costa de Fortaleza apresenta um verdadeiro lençol de areia que se desloca ao longo da praia, com as praias em equilíbrio dinâmico, o que possibilita dizer que em determinada praia, a areia que está ali hoje, não é a que estava ontem nem será a que vai estar amanhã; é um continuado renovar de sedimentos.

O transporte litorâneo de sedimentos é o responsável pelo equilíbrio das praias e o seu barramento normalmente cria problemas para a área costeira que lhe fica a barlar e a sotamar. Quando, por qualquer motivo, ocorre o barramento do transporte litorâneo de sedimentos, tem-se um engordamento das praias que ficam a barlar da obra causadora, com retenção dos sedimentos. Imediatamente nas praias a sotamar da referida obra, tem-se a falta de alimentação de areia, pois os sedimentos aprisionados deixarão de chegar a estas praias. Como a retirada de areia pelas ondas continua a se fazer sentir, nestas praias a sotamar será desencadeado um processo erosivo, o qual tem sido responsável por muitos casos de destruição de áreas costeiras.

#### 4.0 – A ÁREA COSTEIRA DE MUCURIBE

Para compreender melhor os processos costeiros ocorrentes na área de Iparana é de fundamental importância conhecer as ocorrências observadas na região marítima e costeira de Fortaleza. Como já mencionado anteriormente, o processo de assoreamento de Iparana já era sentido, em grande escala, desde 1870.

Com a construção do Porto do Mucuripe, foram realizadas obras de barramento das ondas e promoção de uma área protegida para ancoradouro. O porto consistia de um grande quebra-mar localizado na ponta do Mucuripe.

À medida que o quebra-mar ia sendo construído ocorria uma retenção de sedimentos a barlamar do mesmo, o que foi acompanhado através de levantamentos seqüenciados ao longo do tempo. Pode-se observar o avanço da costa ao longo dos anos nas figuras 4.1 e 4.8 que mostram os levantamentos feitos em 1931, 1943, 1944, 1947, 1949, 1950, 1951, 1961 e 1973. A partir de 1947 além do cais principal uma outra estrutura esta presente que é o cais de petroleiros.

A figura 4.9 mostra a construção de espigão de contenção, a figura 4.10 mostra a formação da Praia Mansa e a sua consolidação pode ser vista na figura 4.11.

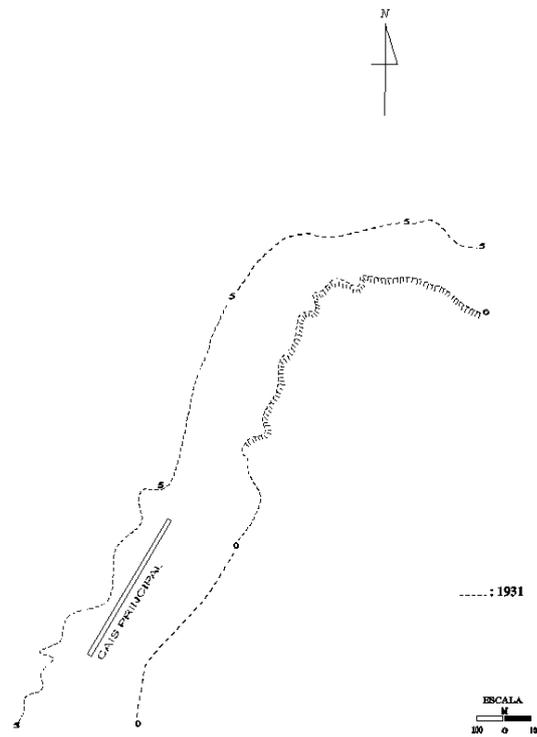


FIGURA 4.1 - Levantamento de 1931 da área costeira de Mucuripe (Fonte: Pitombeira, 2005)

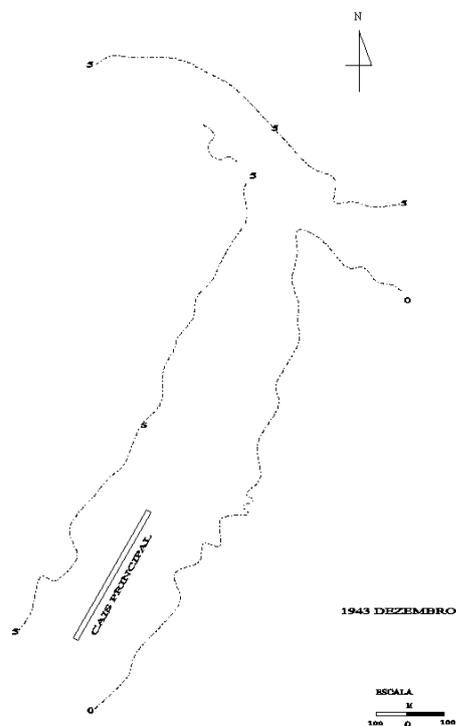


FIGURA 4.2 - Levantamento de 1943 da área costeira de Mucuripe (Fonte: Pitombeira, 2005)

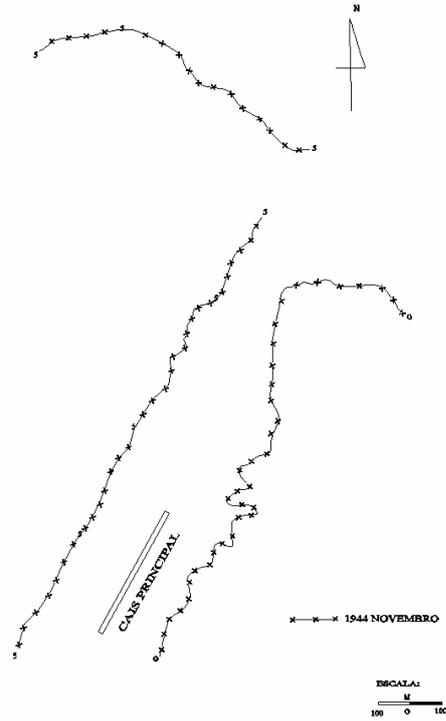


FIGURA 4.3 - Levantamento de 1944 da área costeira de Mucuripe (Fonte: Pitombeira, 2005)

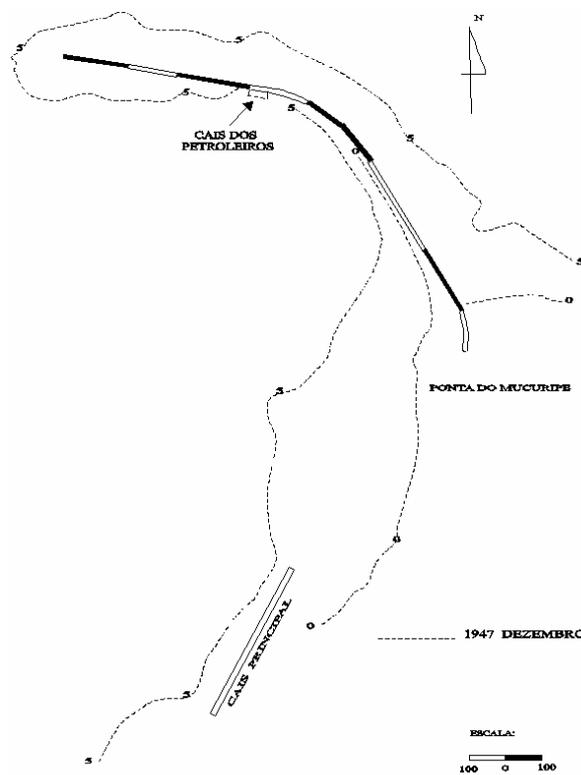


FIGURA 4.4 - Levantamento de 1947 da área costeira de Mucuripe (Fonte: Pitombeira, 2005)

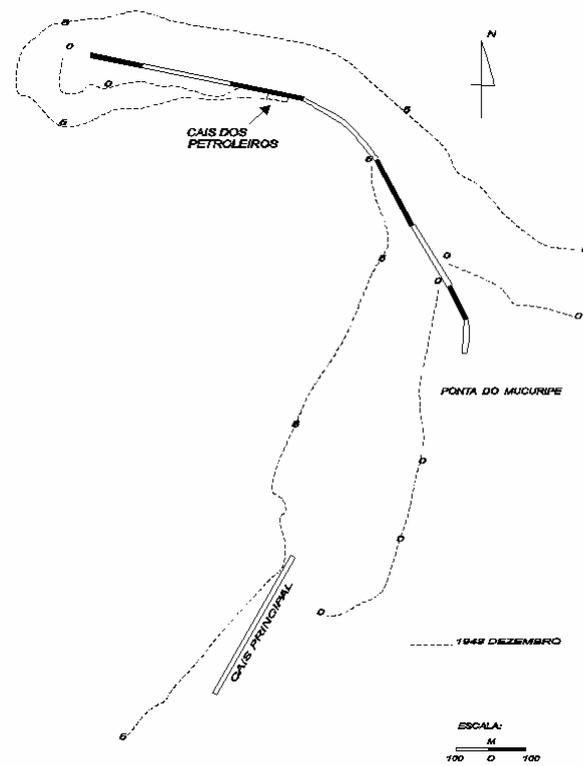


FIGURA 4.5 - Levantamento de 1949 da área costeira de Mucuripe (Fonte: Pitombeira, 2005)

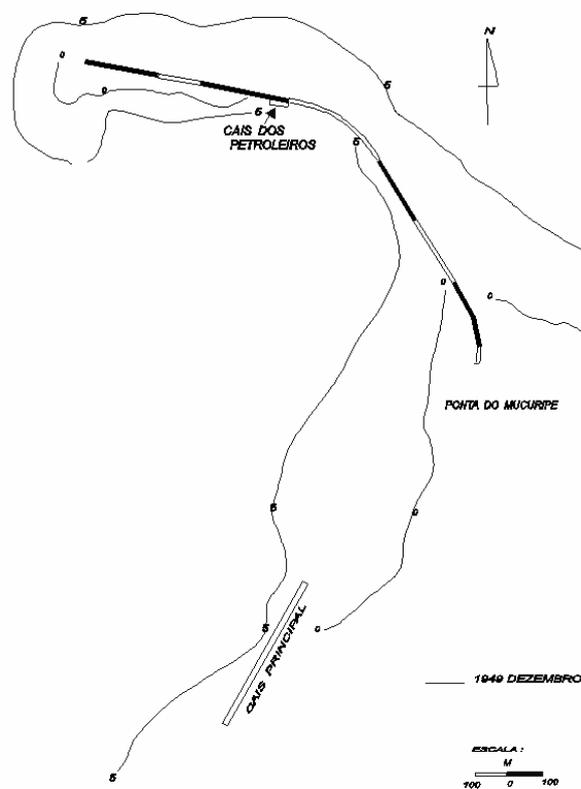


FIGURA 4.6 - Levantamento de 1950 da área costeira de Mucuripe (Fonte: Pitombeira, 2005)

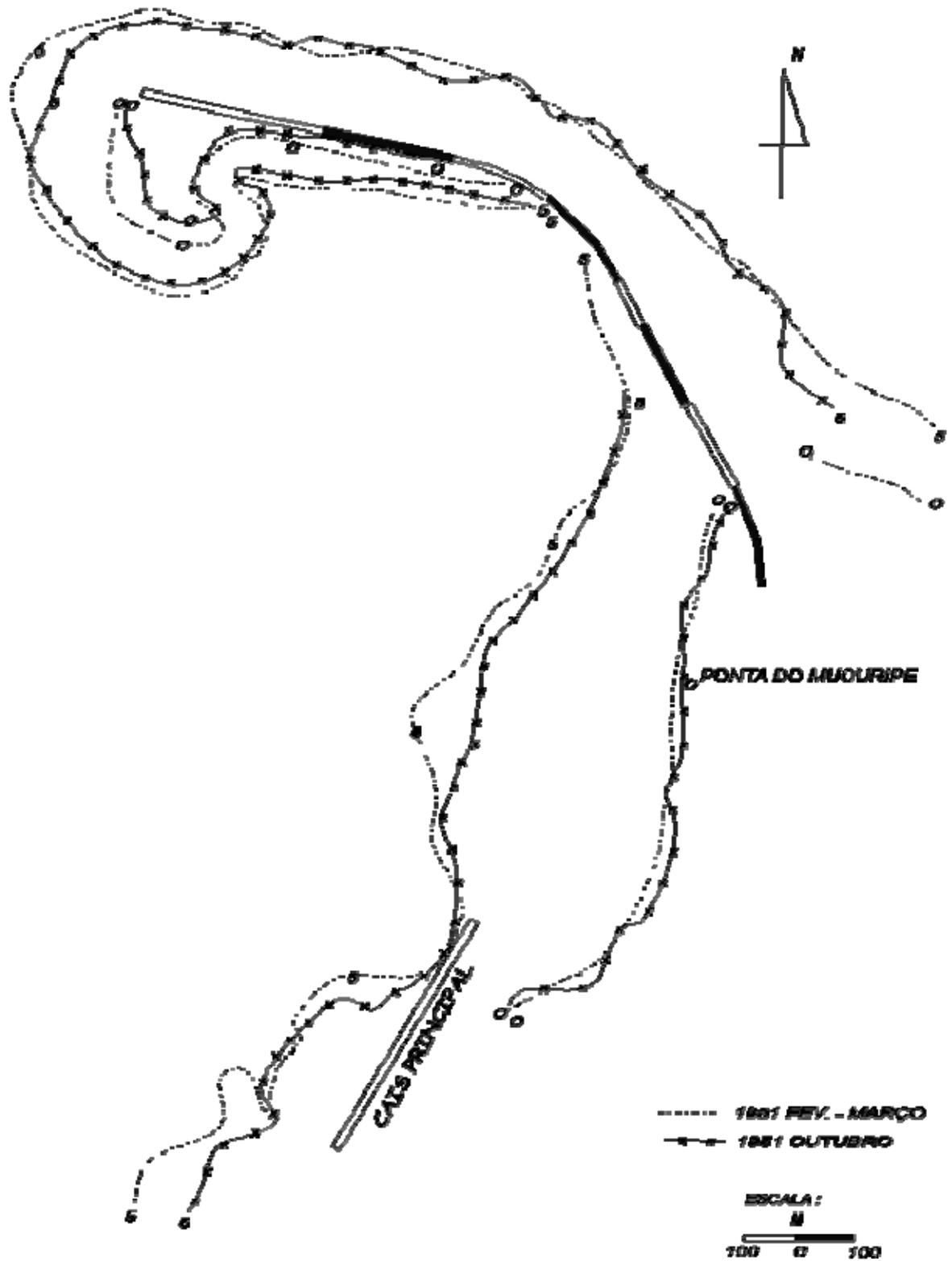


FIGURA 4.7 - Levantamentos de 1951 e 1961 da área costeira de Mucuripe (Fonte: Pitombeira, 2005)

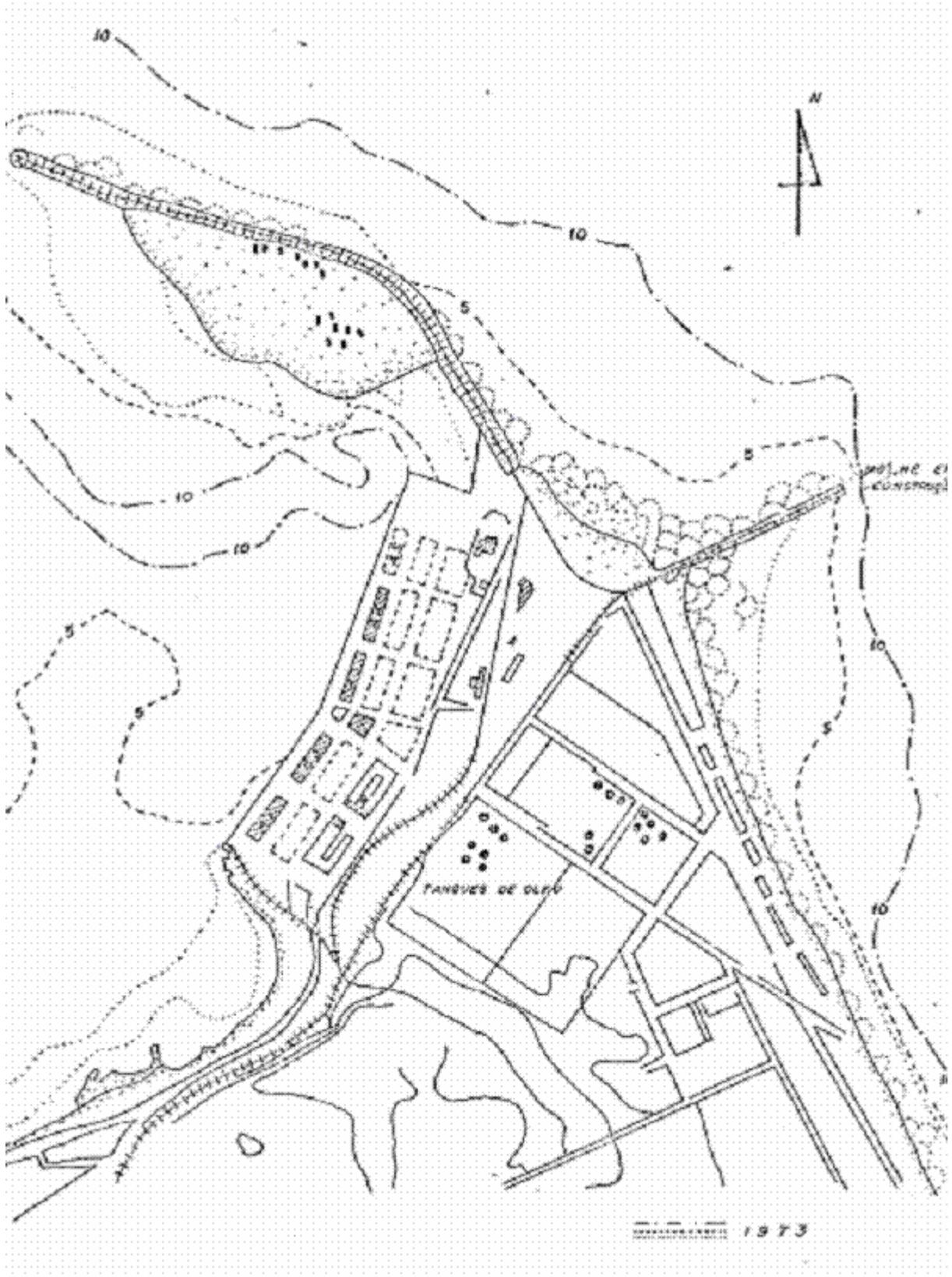


FIGURA 4.8 - Levantamento de 1973 da área costeira de Mucuripe (Fonte: Pitombeira, 2005)



FIGURA 4.9 - Foto da área quando da construção do espigão de contenção em 1964 (Fonte: Pitombeira, 2005).



FIGURA 4.10 - Início do processo de formação da Praia Mansa em 1970 (Fonte: Pitombeira, 2005).



FIGURA 4.11 - Vista superior da região marítima do Porto de Mucuripe com a Praia Mansa consolidada em 1975 (Fonte: Pitombeira, 2005).

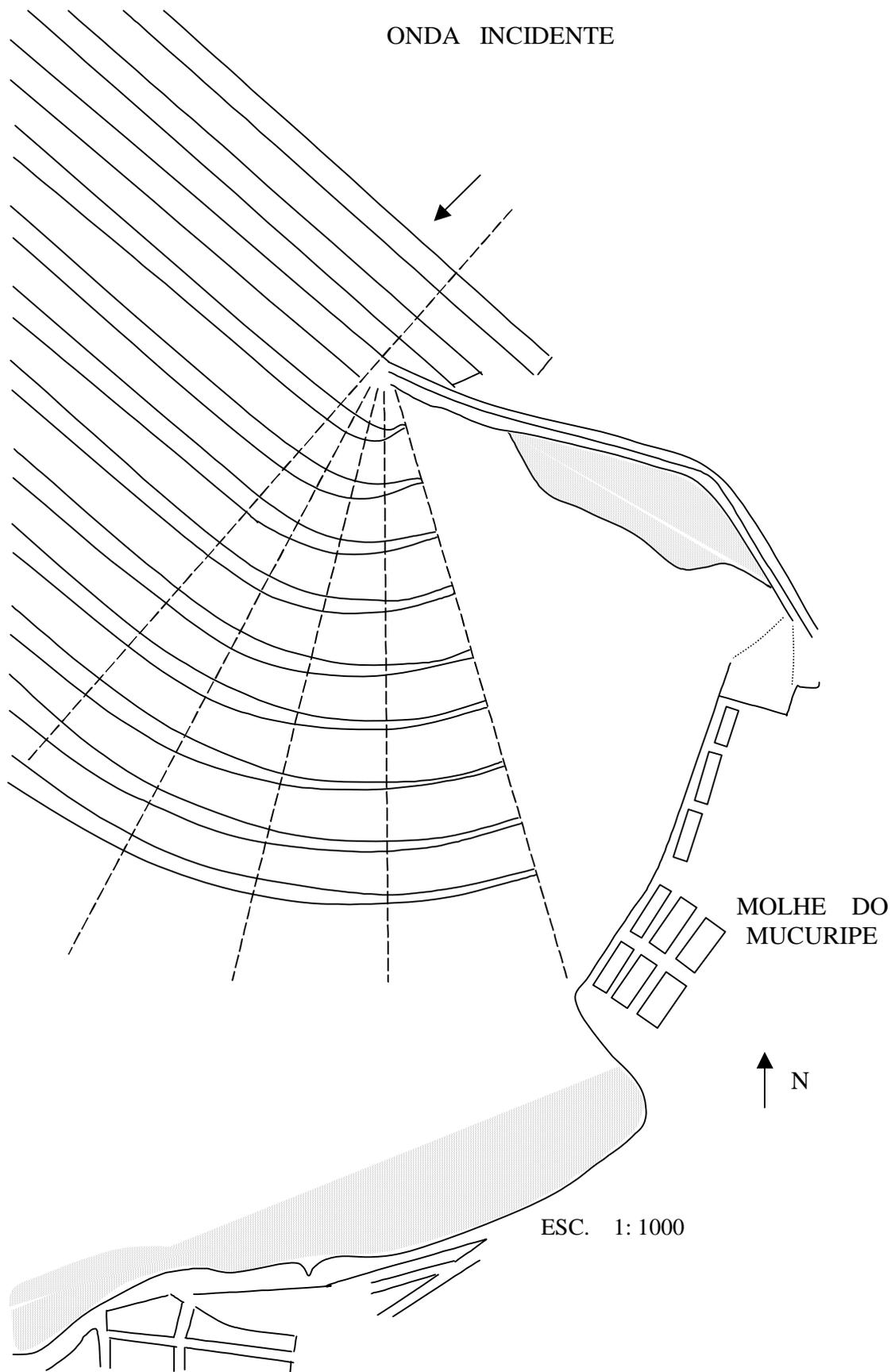


FIGURA 4.12 - Sistema de difração de ondas na região marítima do Porto do Mucuripe (Fonte: Pitombeira, 2005).

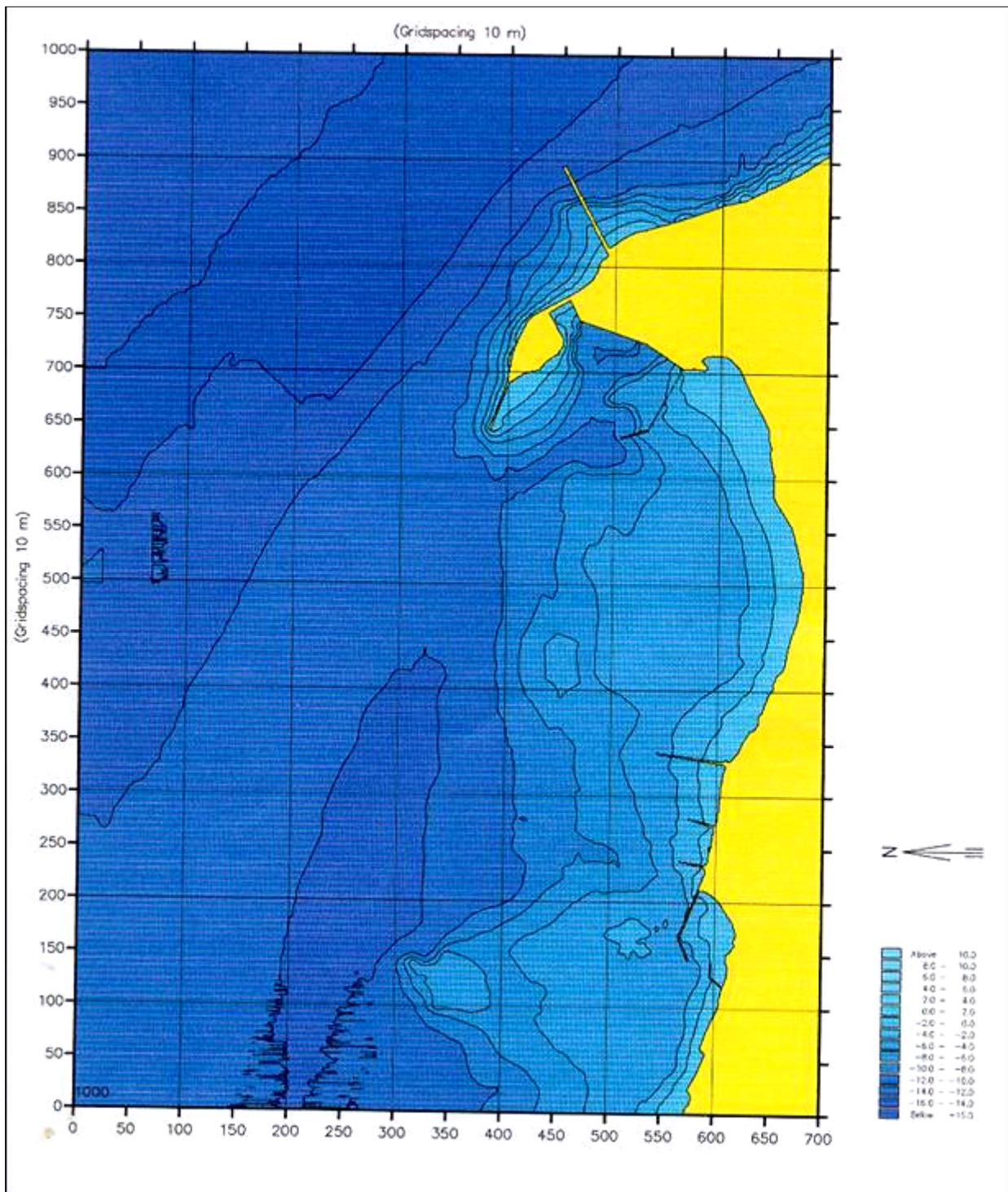


FIGURA 4.13 - Batimetria recente da área marítima de Fortaleza através de trabalho com o MIKE 21.

Após a construção do molhe da Ponta do Mucuripe, denominado TITAN, observaram-se mudanças no comportamento costeiro como o assoreamento da região a barlar do molhe, com a elevação dos fundos marinhos. Também se verificou erosão das praias a sotamar do molhe, com destruição da zona costeira a oeste.

No período de 1947 a 1951, se constatava a passagem de sedimentos pela extremidade do molhe. Com o passar do tempo, os processos de assoreamento a barlar do molhe do TITAN e a erosão das praias a sotamar do mesmo, continuaram, notando-se a erosão da praia de Iracema. O processo de assoreamento foi levado para dentro da bacia portuária e em 1956 na parte onde ocorre a inflexão no molhe, onde hoje se encontra a praia Mansa (Figura 4.18), já se distinguia um processo avançado de deposição. As ondas difratadas foram responsáveis por esta entrada dos sedimentos na bacia (Figura 4.12).

Com a construção do espigão de retenção na praia do Futuro e a dragagem do canal de acesso ao porto, até os dias atuais, há assoreamento na região a leste do espigão, causando seu continuado aumento, estando o mesmo atualmente com 990 metros de comprimento (Figura 4.13).

Com o processo erosivo atuante nas praias oeste de Fortaleza, obrigou-se a construção de obras de proteção inibidoras como paredes de pedras. No trecho de praias a oeste do Porto do Mucuripe, quase não tem movimentação de areias, o que obrigou à construção de alinhamentos de pedras para evitar o processo erosivo das praias.

Quando ondas tipo Swell, chegam com direções de ataque entre 0 e 60 graus com o norte verdadeiro, entram diretamente sobre a área marítima a oeste do quebra-mar do Mucuripe e incidem frontalmente na praia. Como estas ondas não colaboram para a ocorrência do transporte litorâneo de sedimentos, não há movimentação longitudinal de areia.

Nos meses de março a outubro, ondas tipo Sea, com direções de propagação entre 75 e 120 graus com o norte verdadeiro, são interceptadas pelo quebra-mar do Mucuripe, criando a zona de sombra da bacia portuária e atuando sobre as praias, ondas difratadas, remanescentes do regime de ondas que atinge o quebra-mar.

Foram feitas simulações do regime de ondas incidentes sobre a costa de Fortaleza, utilizando os modelos matemáticos desenvolvidos pelo DHI. A modelagem foi feita abrangendo uma área que vai da praia do futuro até a Barra do Ceará, portanto com condições de contorno bem dilatadas, de modo a referenciar qualquer mudança que pudesse ocorrer na costa de Fortaleza.

Analisando as simulações, vê-se que as ondas tipo Sea, que vem de direções acima de setenta graus com o norte verdadeiro, ao encontrarem o quebra-mar do Mucuripe, têm suas condições de propagação prejudicadas, portanto, sua influência sobre a área é praticamente nula (Figura 4.14).

A análise da modelagem feita com as ondas tipo Swell, mostra que há um choque frontal das ondas com a linha de costa, chegando com suas cristas quase paralelas à linha de costa (Figura 5.15). As figuras 4.16 a 4.18 mostram a atual Praia Mansa.

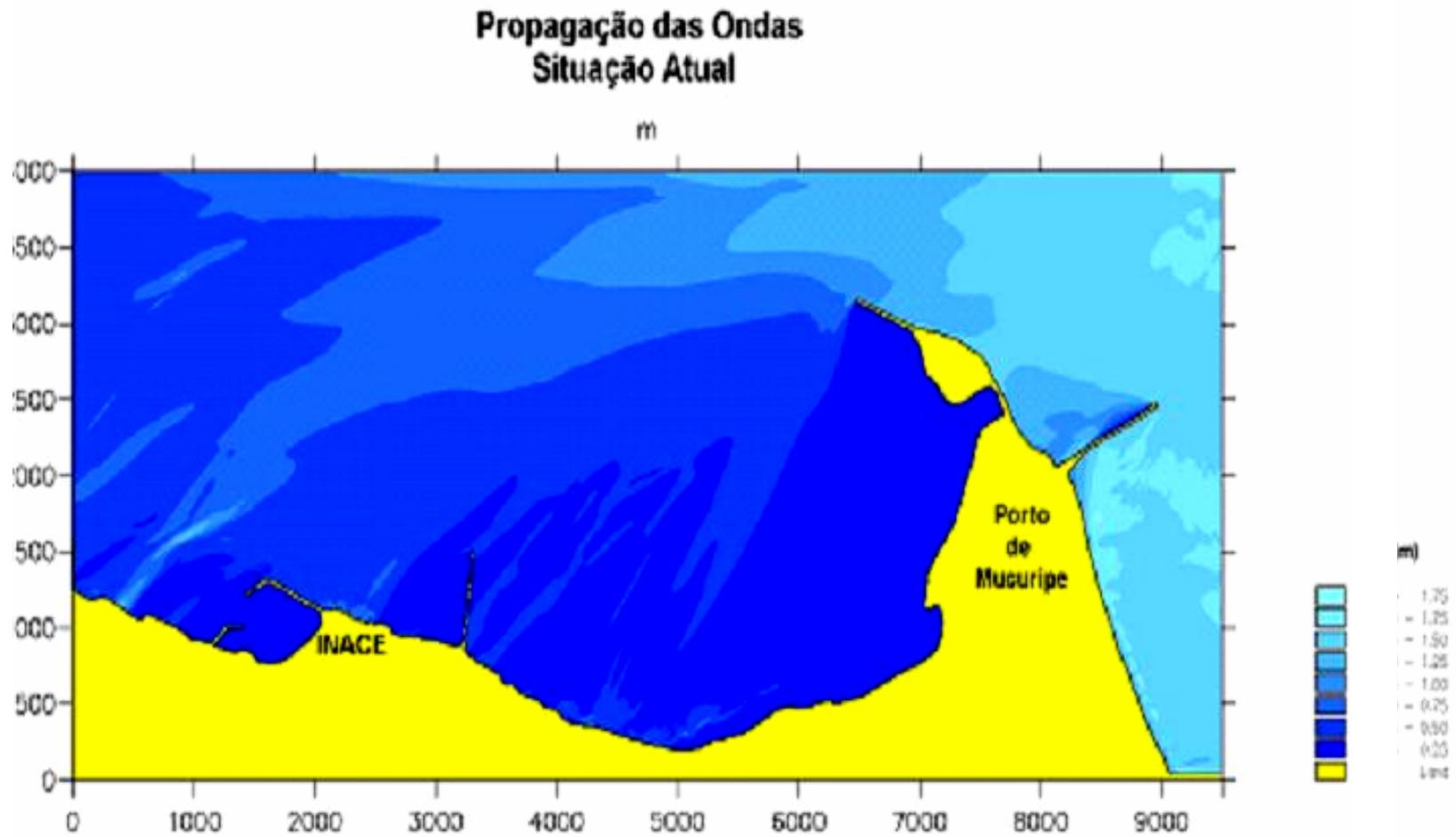


FIGURA 4.14 - Modelagem de distribuição de ondas tipo sea na área de Fortaleza com o MIKE 21 para  $H_s$  1,75 m e direção de  $90^\circ$ .

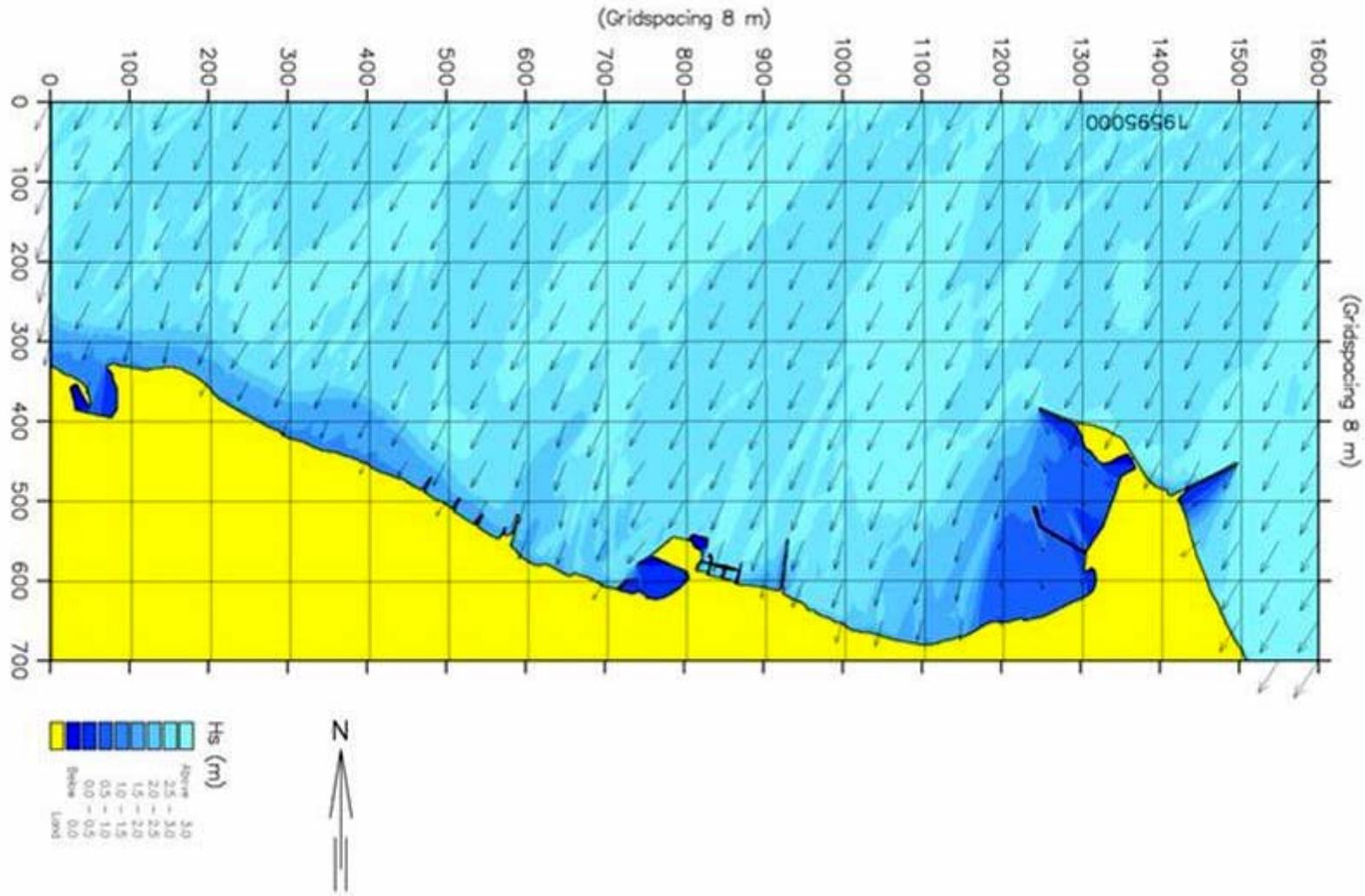


FIGURA 4.15 - Modelagem de distribuição de ondas tipo swell na área de Fortaleza com o MIKE 21 para Hs: 3,0 m e Dir. de 30°



FIGURA 4.16 – Navegação a baixa altitude com vista da Praia Mansa em 2004 (Fonte: <http://www.kitesurfmania.com.br>)



FIGURA 4.17 - Praia Mansa com vista dos geradores eólicos em 2004 (Fonte: <http://www.docasdoceara.com.br/>)



FIGURA 4.18 – Vista do quebra-mar da ponta do mucuripe e dos sedimentos retidos ao longo dos anos, em 2004. (Fonte: <http://www.kitesurfmania.com.br>)

## 5.0 – A PRAIA DE IPARANA

Durante um ano foram realizadas, mensalmente, observações e levantamentos topográficos das seções da “sea wall” em estudo, localizadas na praia de Iparana defronte à propriedade do SESC.

Como foi visto no item anterior, foram realizados levantamentos de perfis de praia para a avaliação da “sea wall”, sendo identificados alguns processos costeiros que ocorreriam e que estes processos mereciam controle. Durante o monitoramento, um dos itens, estudados foi o comportamento da praia. Os perfis foram locados tendo como ponto de partida os pontos S0 e S1.

Os perfis foram observados no período não chuvoso, a partir de agosto de 2003. Por motivos vários algumas datas previstas para execução do levantamento não foram atendidas, tendo-se então sido executados nas seguintes datas no período de treze meses:

Julho de 2003

Agosto de 2003

Setembro de 2003

Outubro de 2003

Julho de 2004

Em cada uma destas datas foram realizados 11 perfis e os resultados estão mostrados nas figuras 5.1 a 5.11. A geração, dos dados referentes aos perfis, foi realizada com auxílio de um equipamento conhecido como estação total (gentilmente cedida pela Universidade Federal do Ceará). No campo o equipamento é posicionado a frente de cada seção previamente marcada. O equipamento, de frente para o muro, capta pontos dessa face (cotas) em distâncias variadas entre si.

Os dados de cada perfil estão mostrados a seguir, com os dados dos cinco levantamentos em cada seção e de posse deles sobrepõem-se a cada seção. Com essa sobreposição podemos analisar claramente a evolução ao longo dos meses.

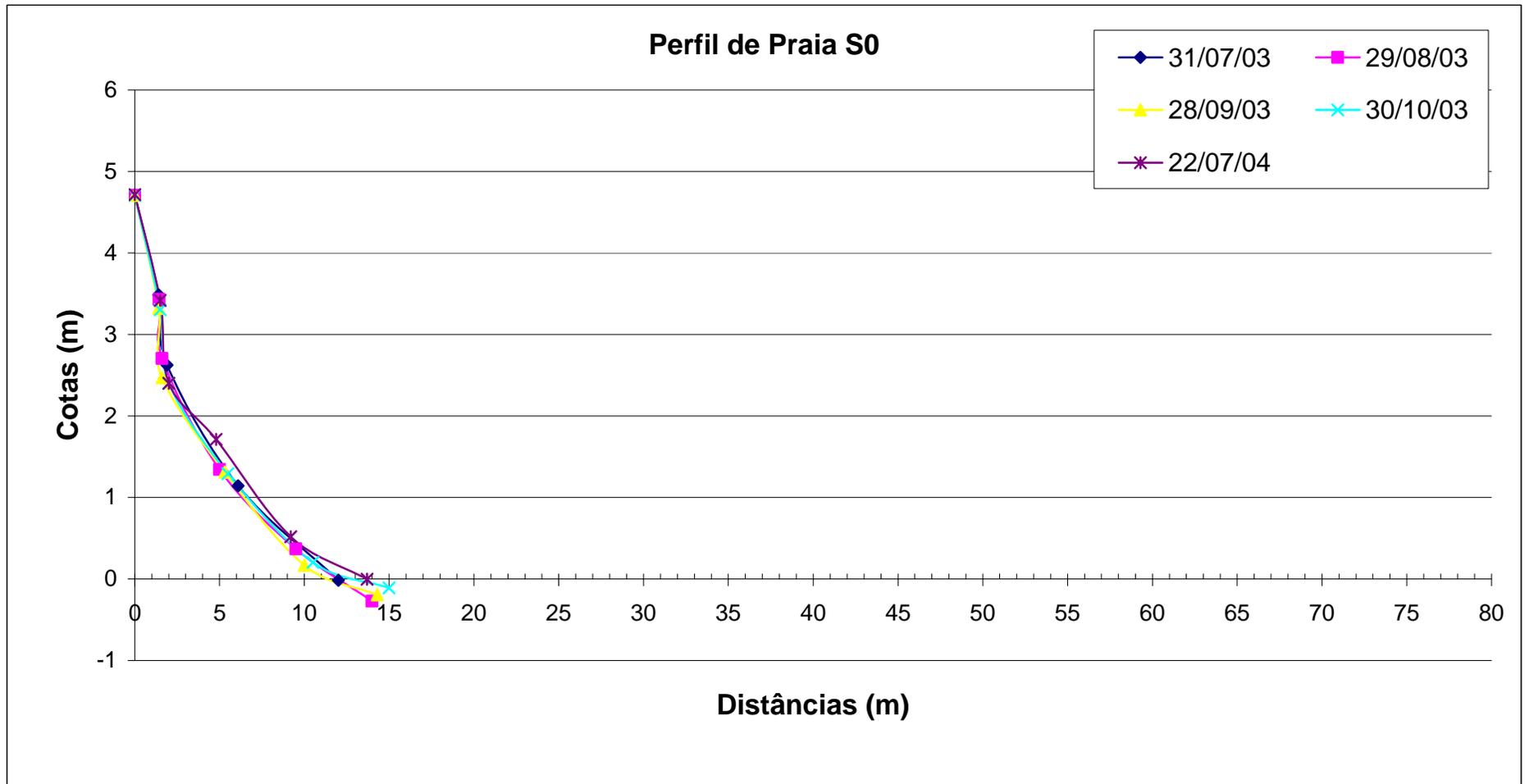


FIGURA 5.1 - Perfil de praia da seção S0

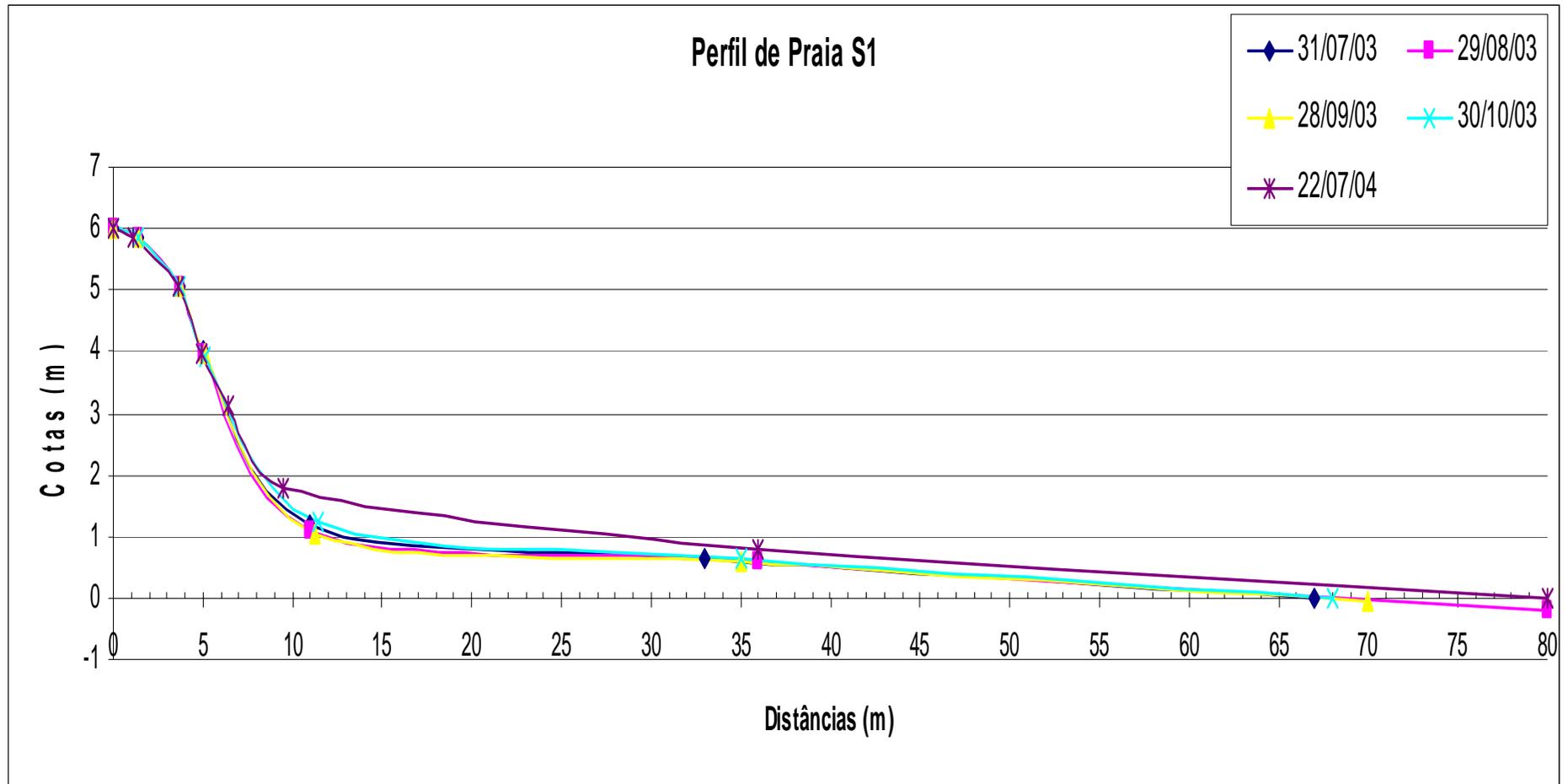


FIGURA 5.2 - Perfil de praia da seção S1

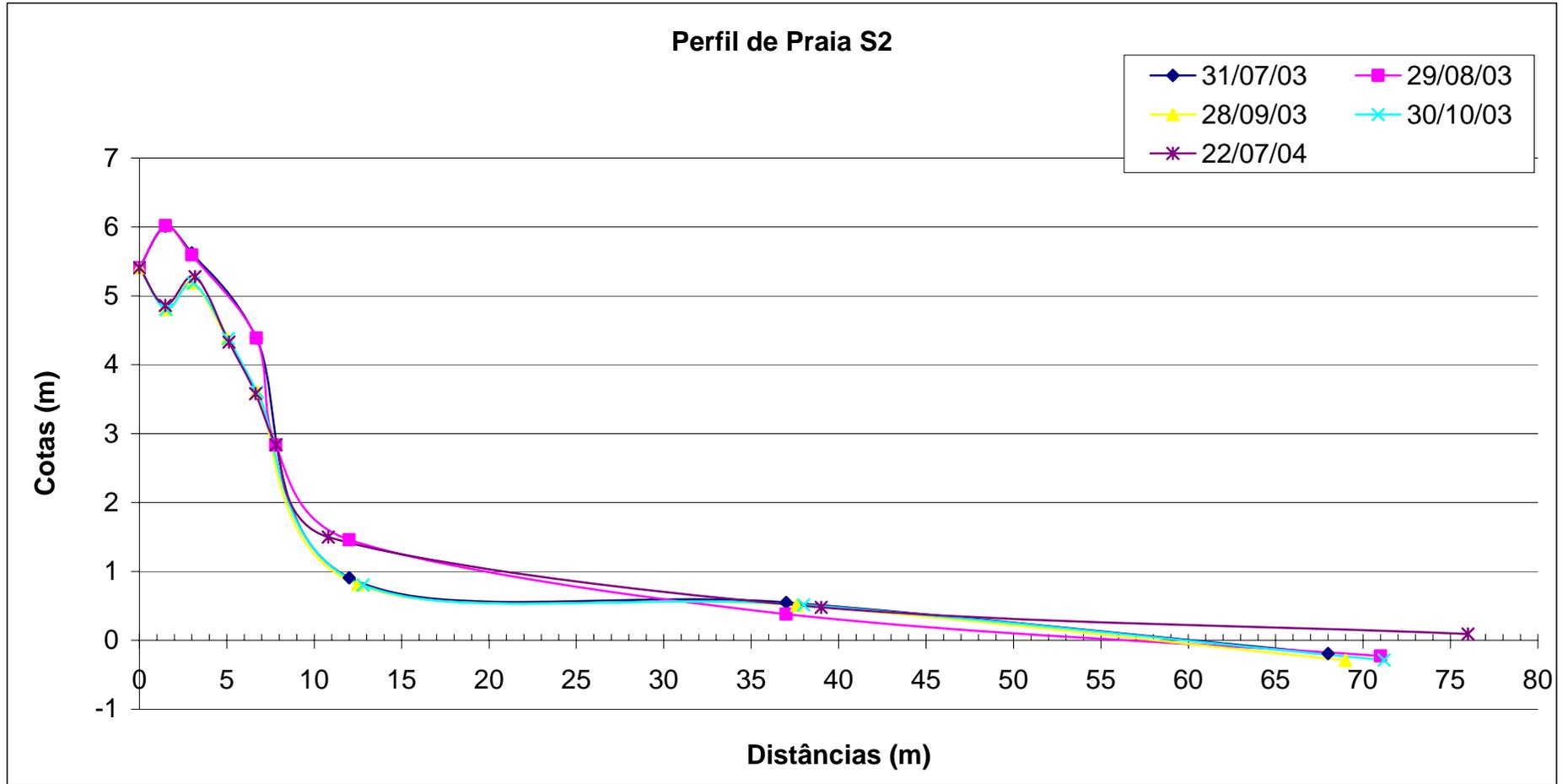


FIGURA 5.3 - Perfil de praia da seção S2

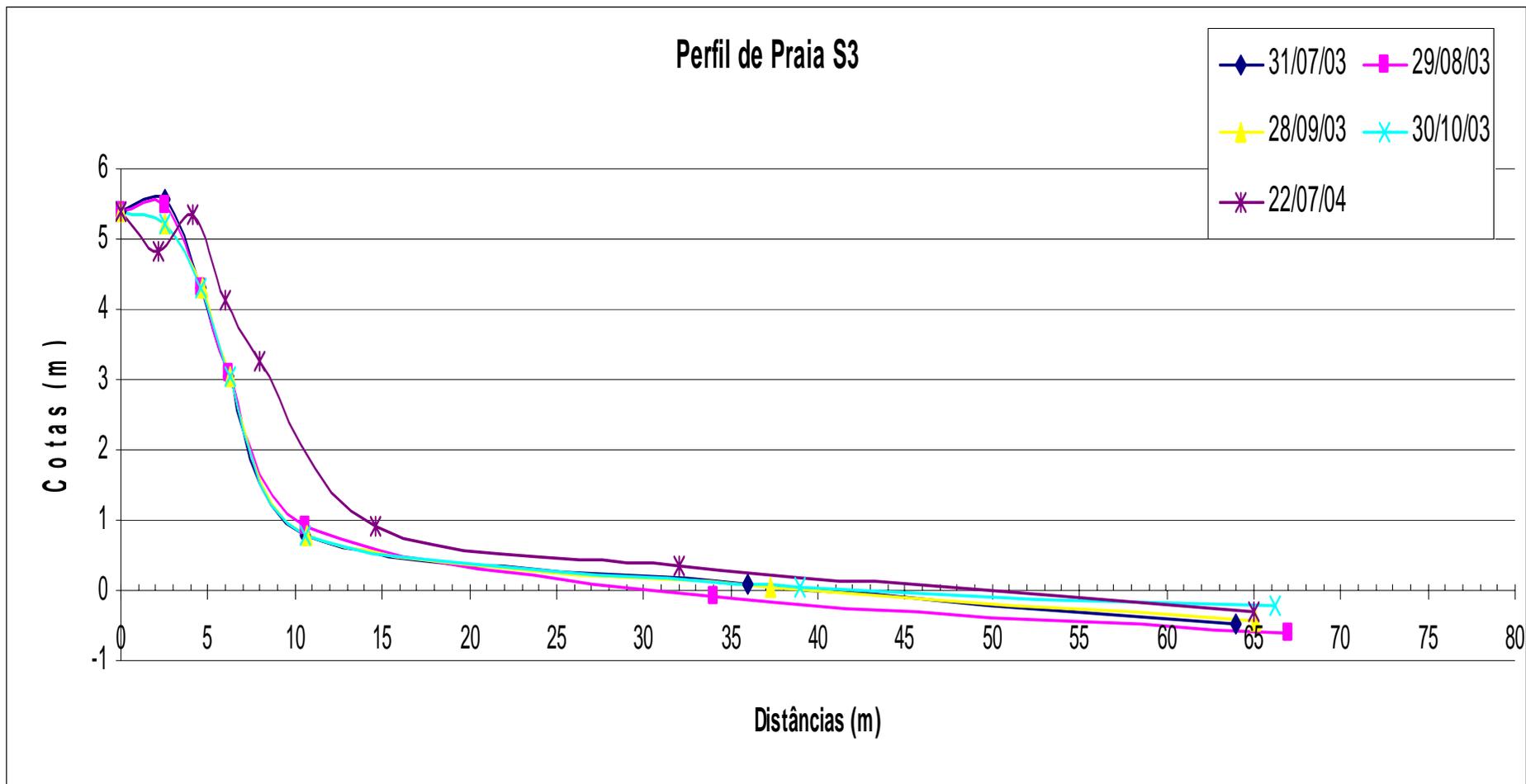


FIGURA 5.4 - Perfil de praia da seção S3

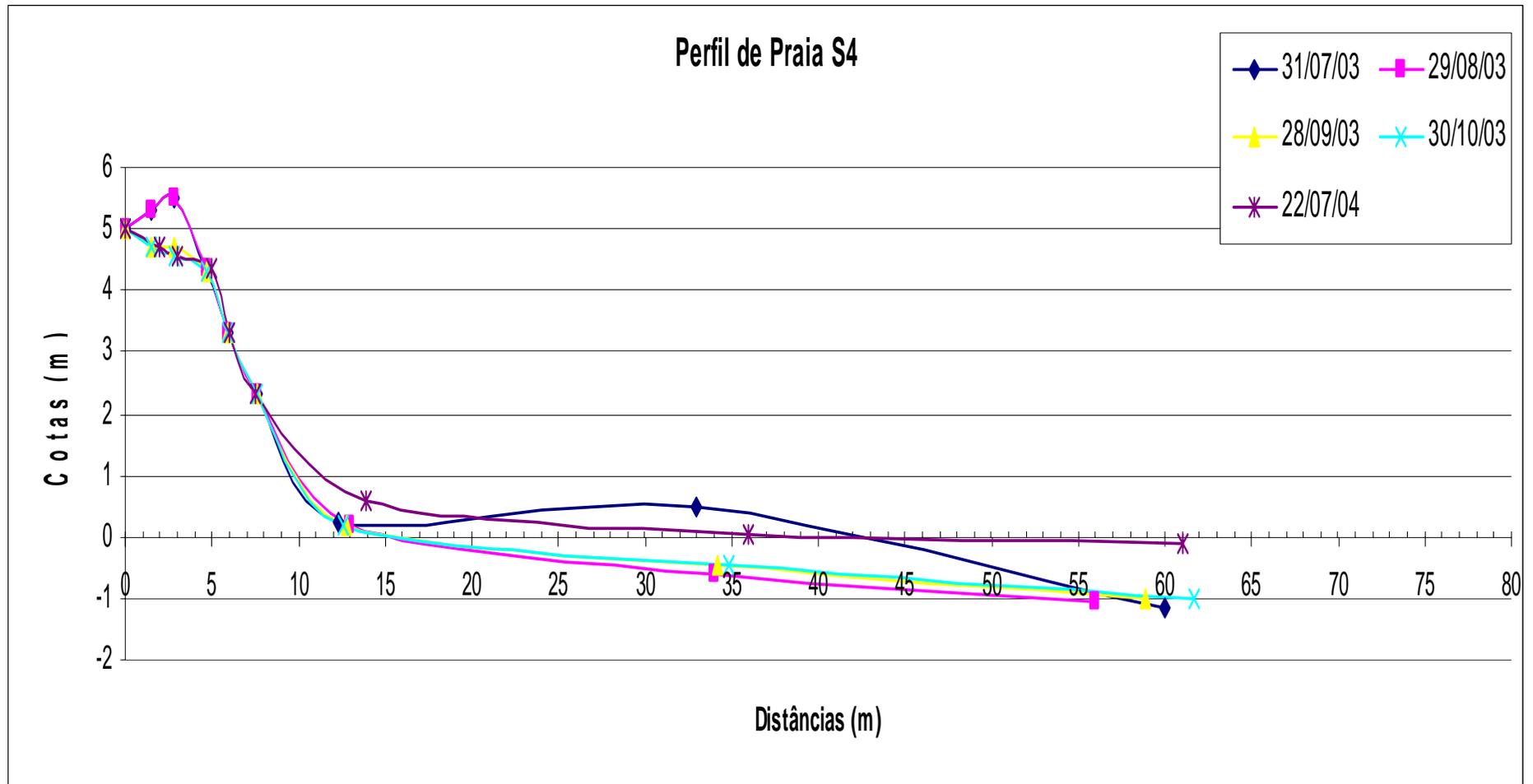


FIGURA 5.5 - Perfil de praia da seção S4

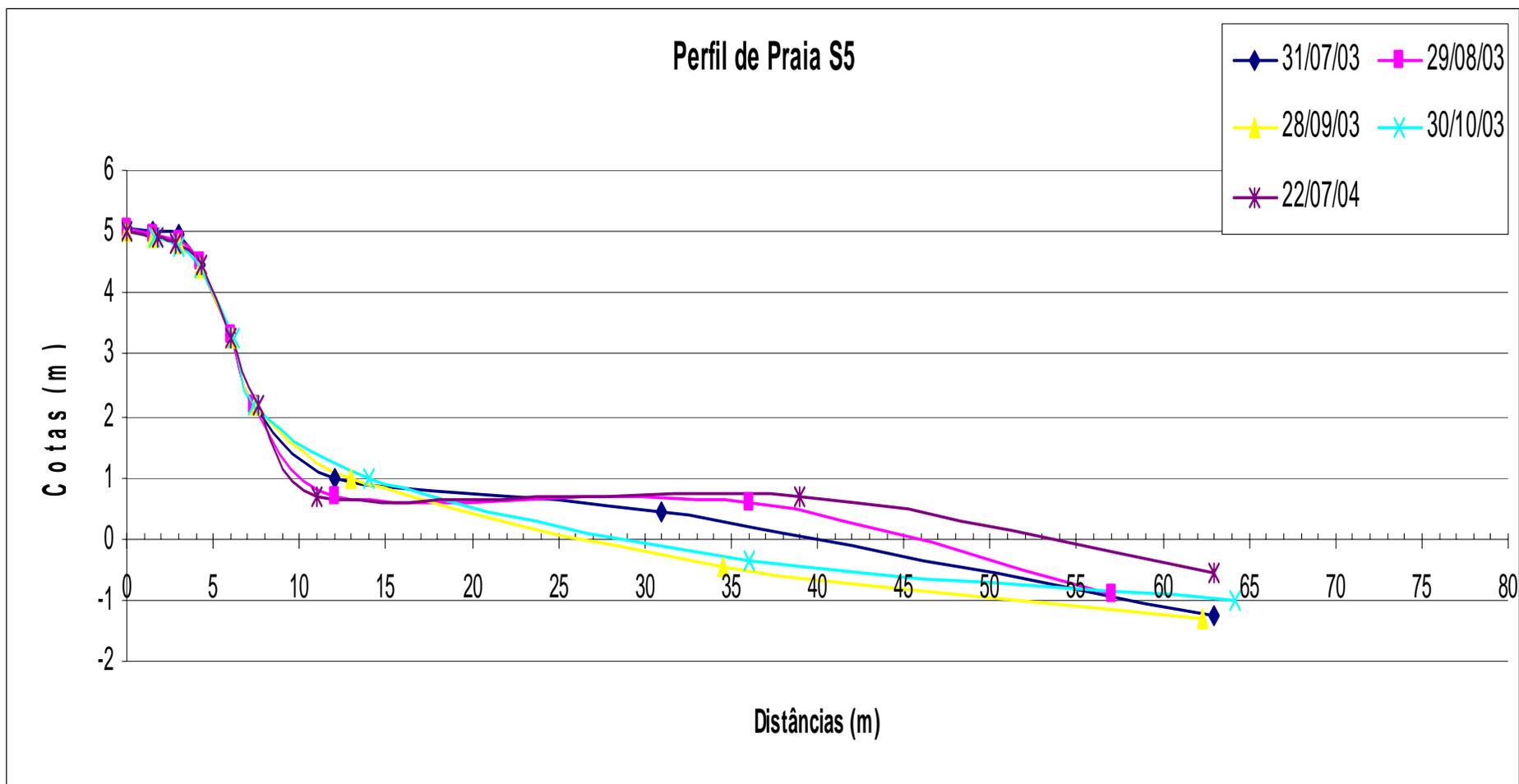


FIGURA 5.6 - Perfil de praia da seção S5

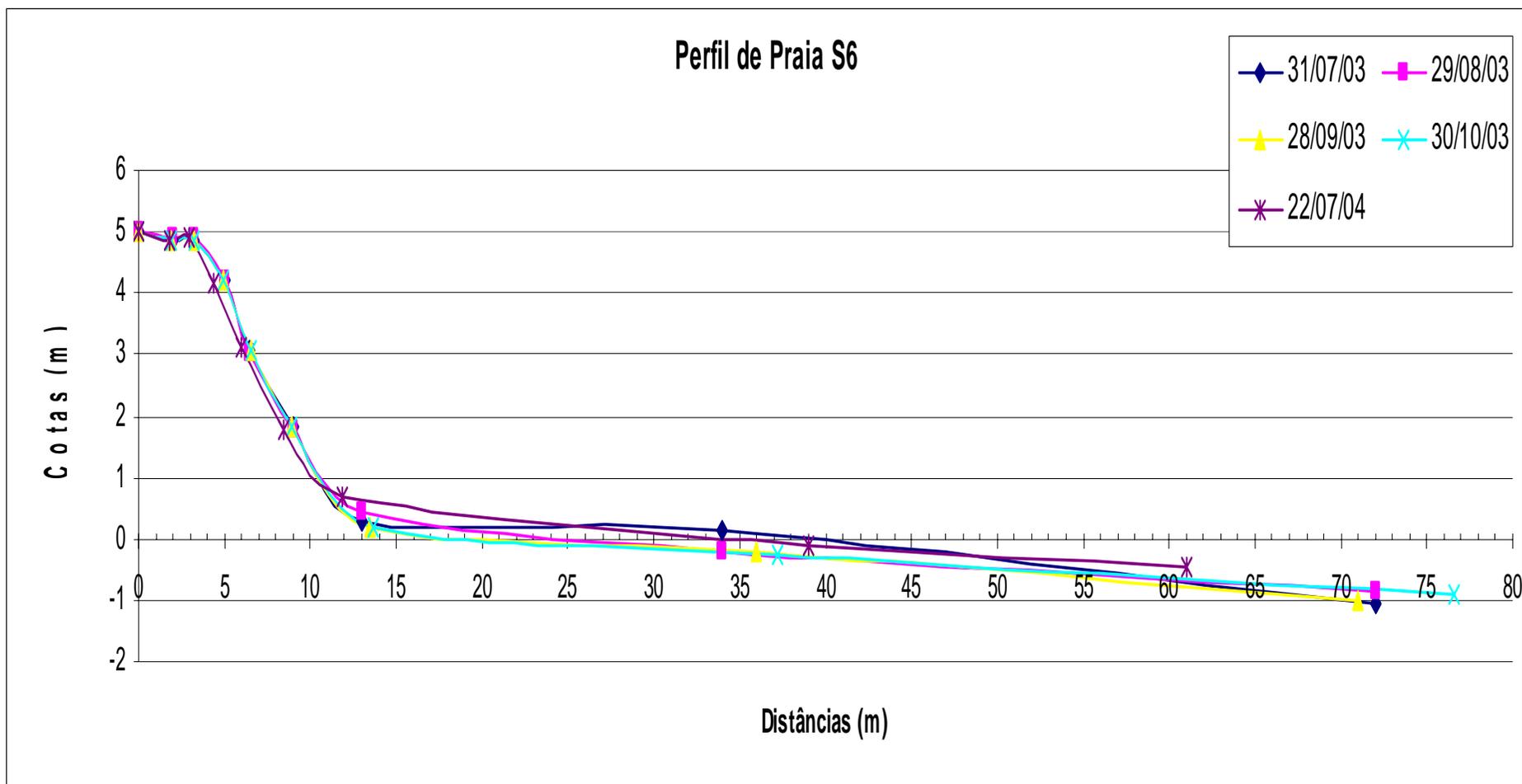


FIGURA 5.7 - Perfil de praia da seção S6

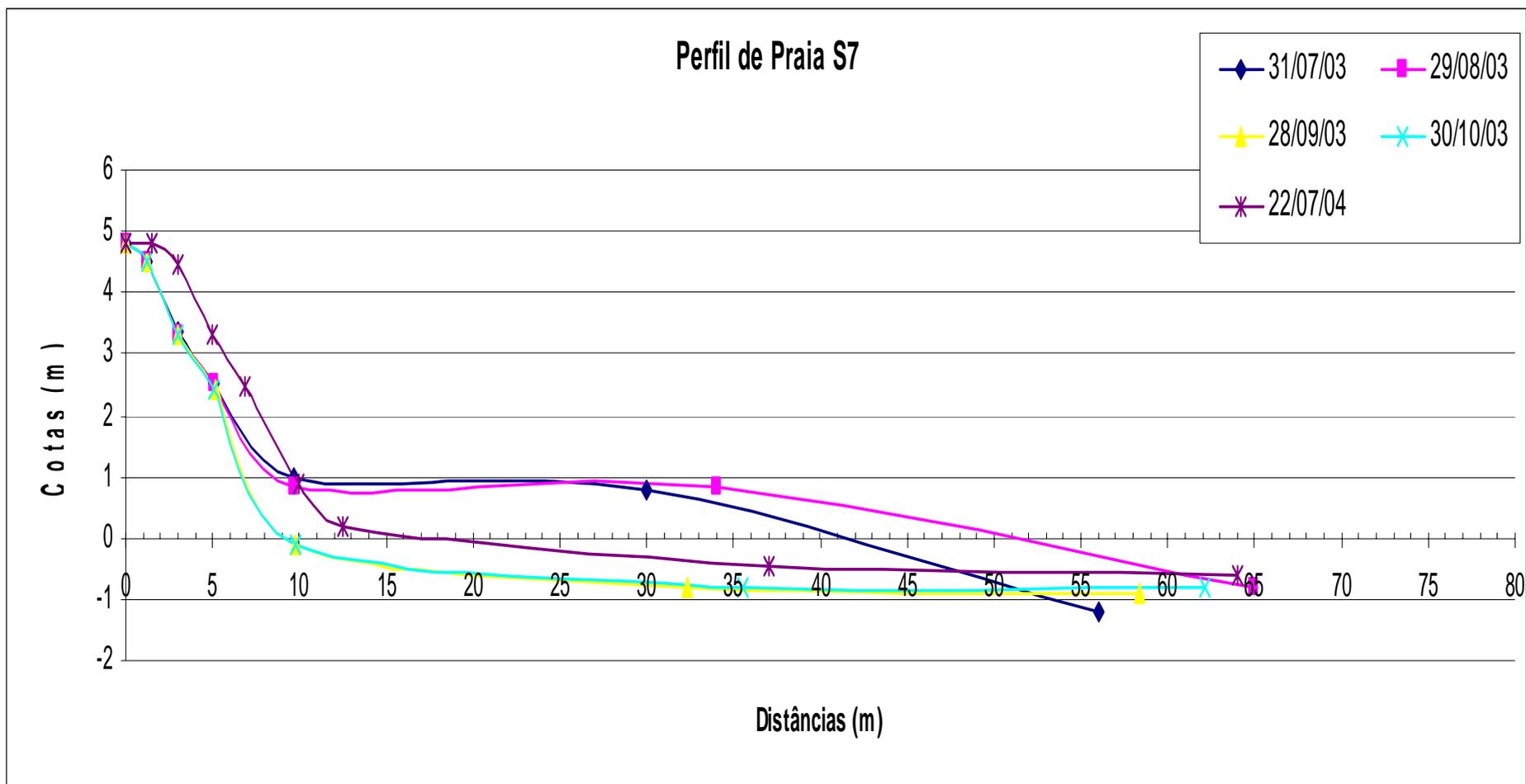


FIGURA 5.8 - Perfil de praia da seção S7

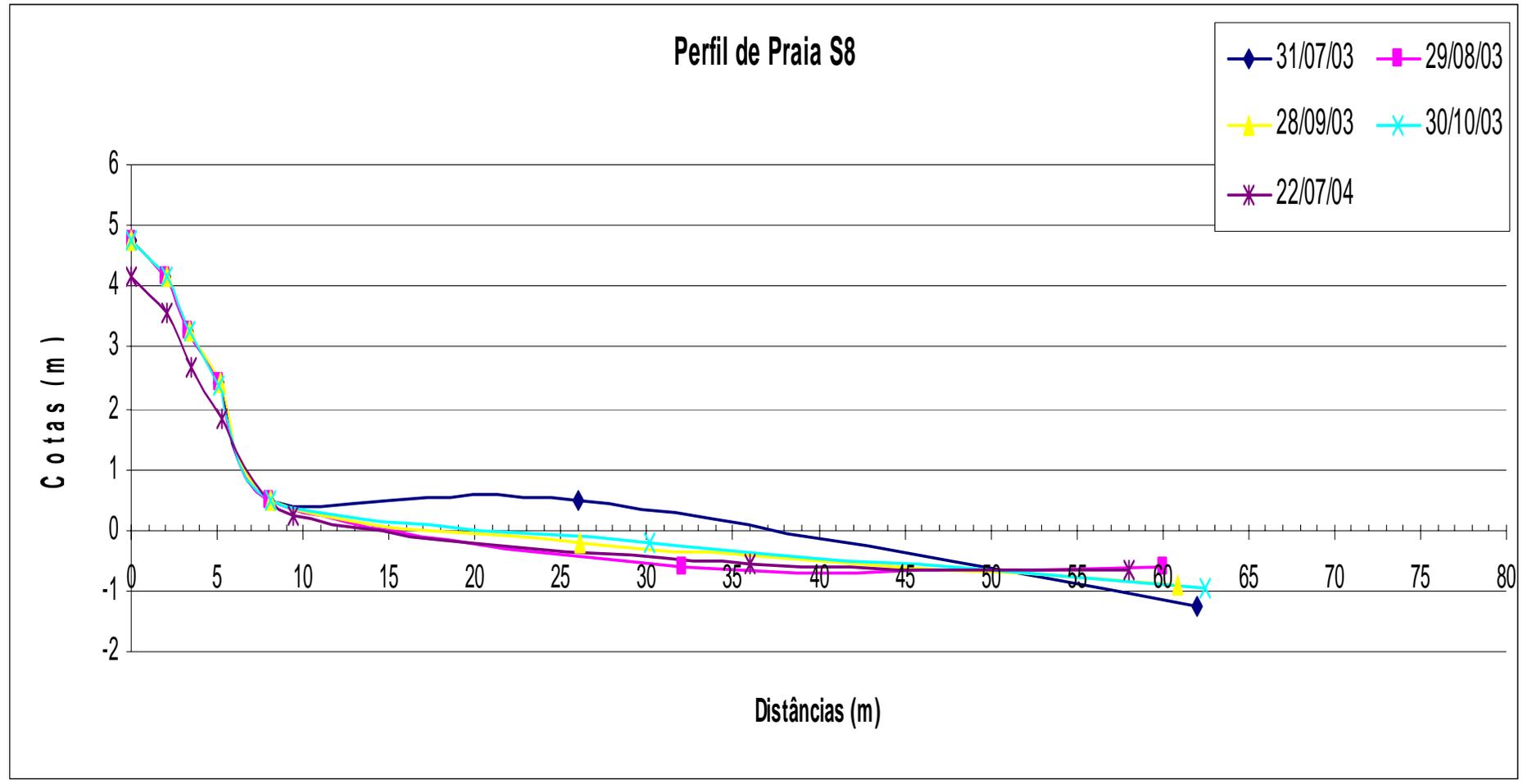


FIGURA 5.9 - Perfil de praia da seção S8

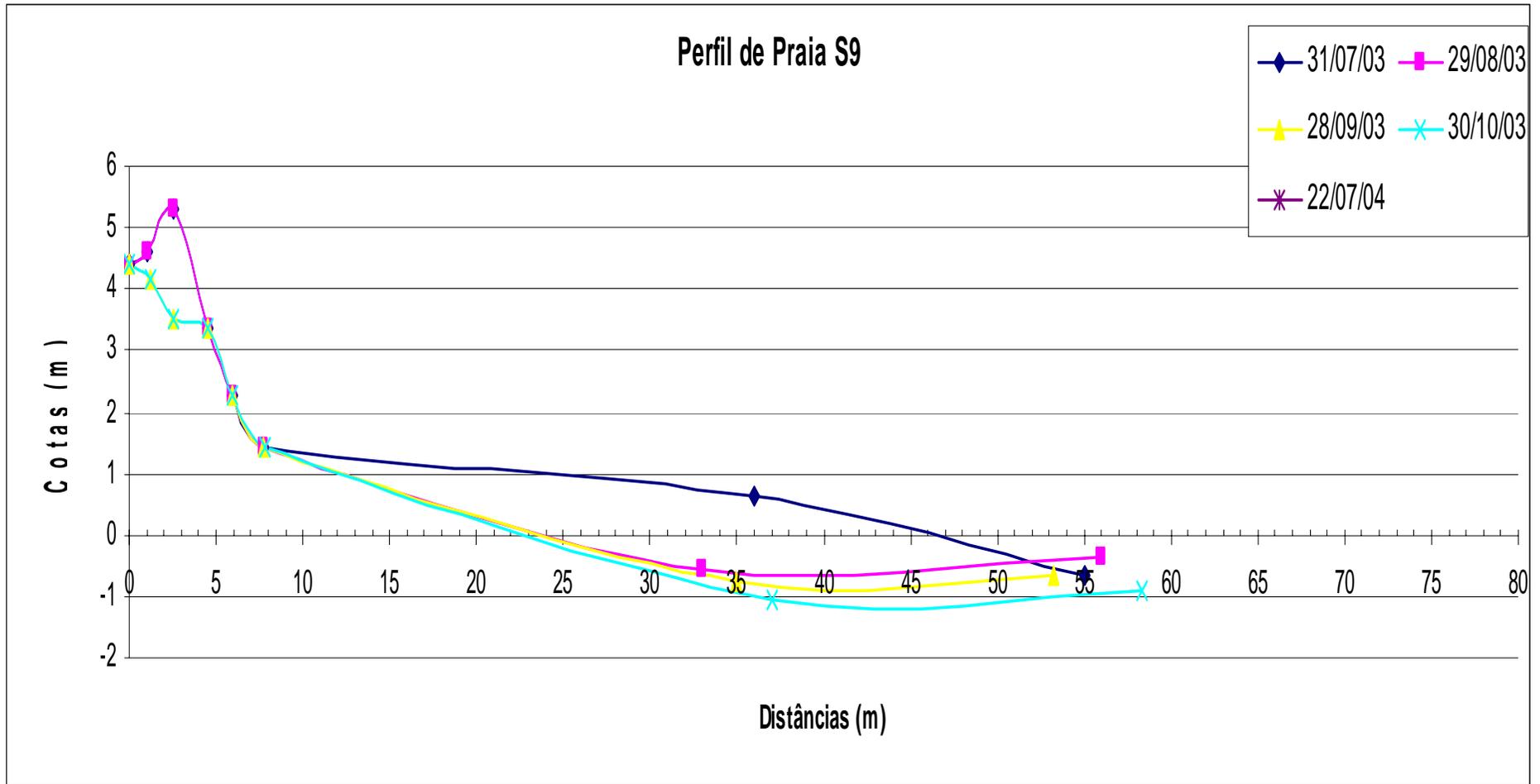


FIGURA 5.10 - Perfil de praia da seção S9

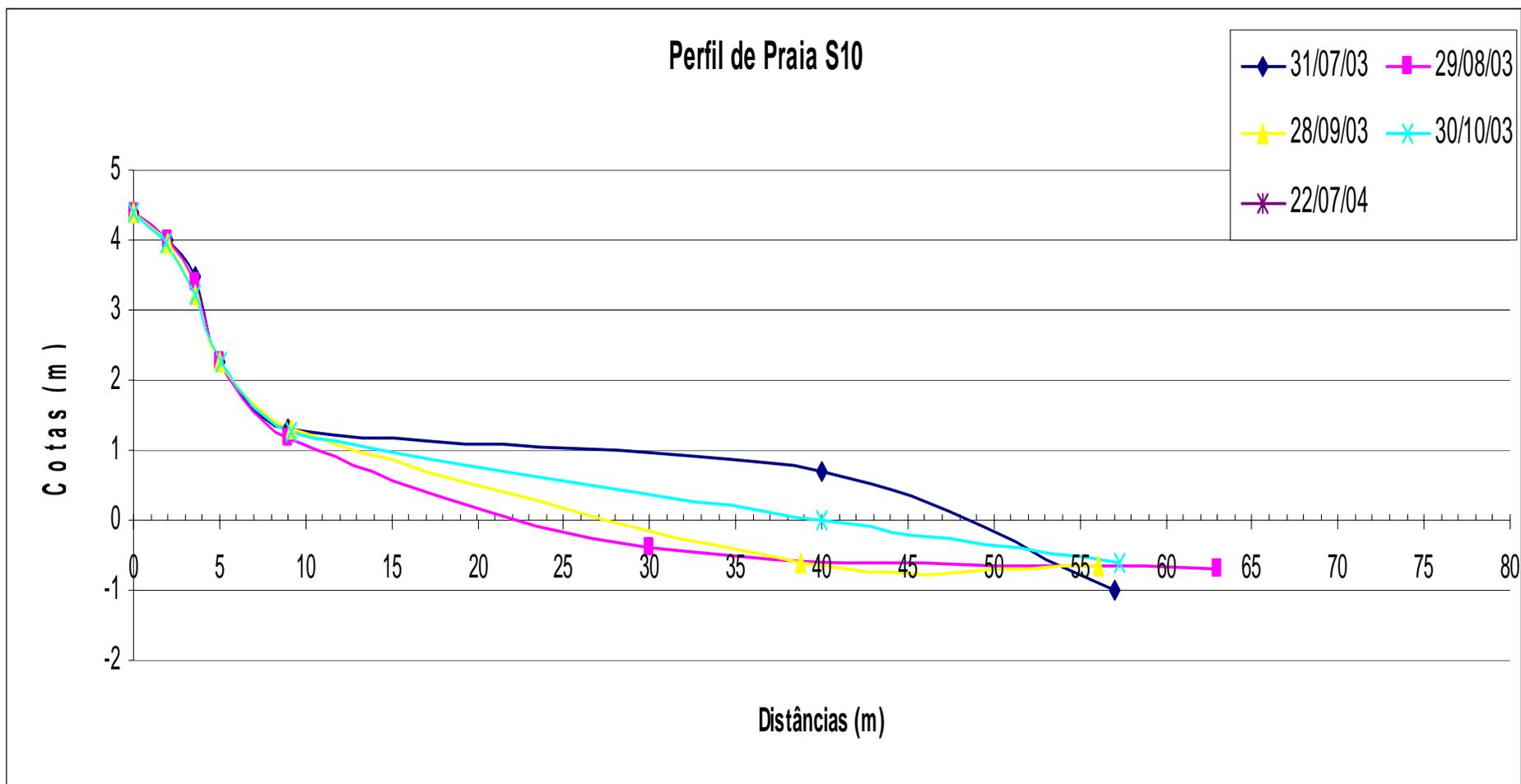


FIGURA 5.11 - Perfil de praia da seção S10

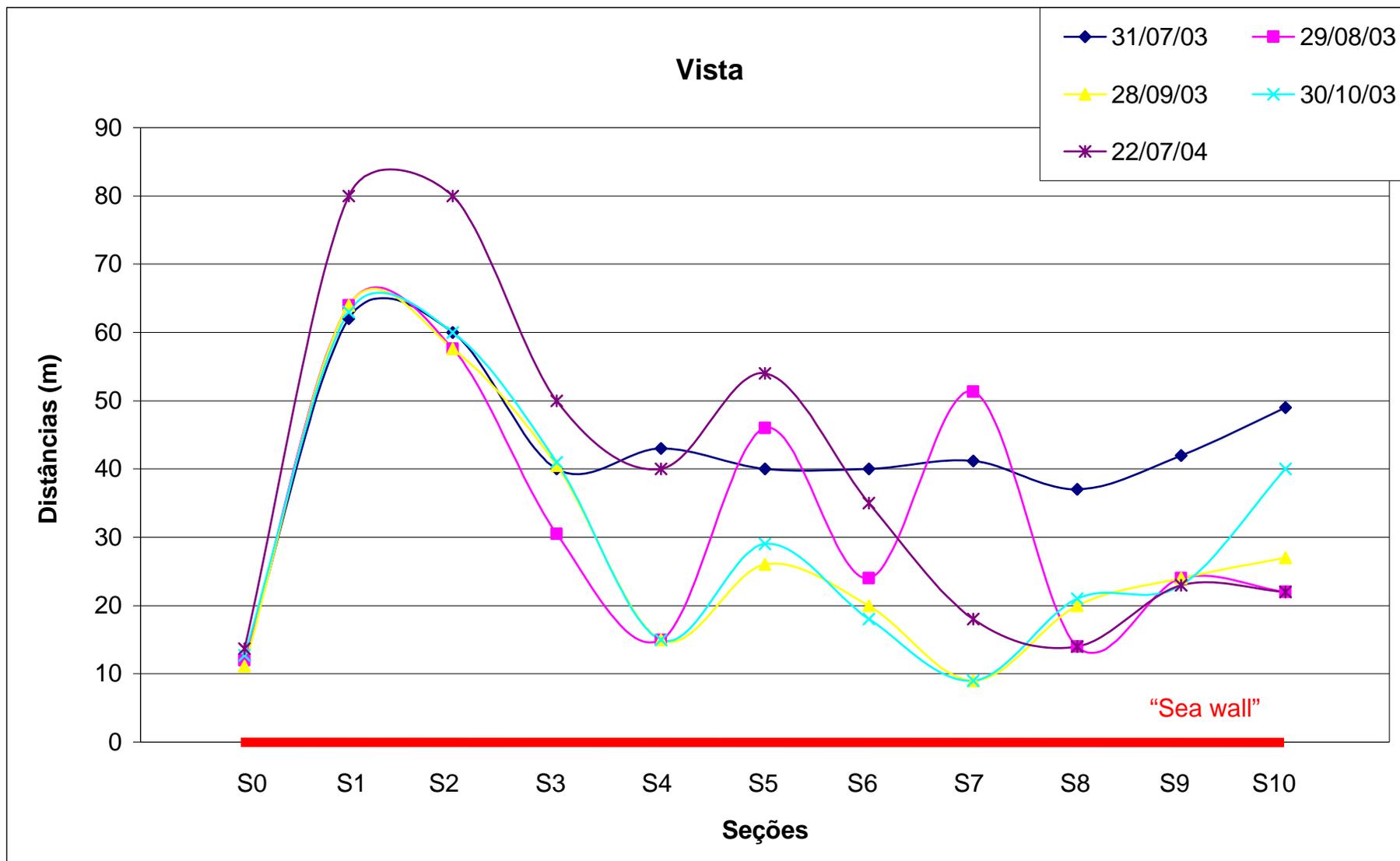


FIGURA 5.12 – Vista da evolução da praia na cota zero

O levantamento topográfico do muro de pedra e os perfis das seções ao longo da praia informam o comportamento e o estado atual do muro e das condições da praia. Considerando os dados levantados através da metodologia utilizada na elaboração deste trabalho, podemos observar uma questão importante referente aos processos litorâneos.

Os dados obtidos *in locu*, colocados em gráficos representam a evolução dos perfis das seções da “sea wall” (Figura 5.12). Tais perfis foram construídos a partir dos dados anteriormente citados nos anos de 2003 e 2004. Assim, é possível analisar o que vem acontecendo à parede de pedra e à costa. As seções mostram claramente o perfil do muro de enrocamento como pode ser observado nas figuras 5.1 a 5.11.

Na seção S0, como se pode ver na figura 5.1, os dados levantados mostram que não há sinal de movimentação ou acomodação da estrutura. Na seção S1 também se pode observar a estabilidade da estrutura. Nesta seção nota-se um pequeno acréscimo de sedimento no último levantamento. Esses acréscimos de sedimentos são devidos, predominantemente, a marés e ventos.

Observando as seções feitas ao longo de todo o muro, pode-se notar que houve uma acomodação normal ao longo do mesmo. Nas seções S2, S3, S4 e S9 iniciam-se um pequeno desarranjo devido ações antrópicas. As poucas mudanças observadas ocorreram por acomodações na parte superior do muro.

As seções S7, S8, S9 e S10 mostram a região do cabeço leste do muro de proteção. Pode-se notar que não há qualquer indicio de instabilidade estrutural do cabeço. Nota-se que o cabeço Leste está bem protegido pelas ruínas de barlar. Tal proteção está especialmente evidenciada pelo jato de água devido à arrebatção das ondas sobre as ruínas. Desta forma, o impacto das ondas que o cabeço recebe é residual.

Constatou-se que a “sea wall” apresenta boas condições de estabilidade, sem sinais de desmonte, ou de erosão de suas fundações. Ao observar os cabeços da estrutura notou-se que ambos encontram-se em boas condições.

Após a instalação do Porto do Mucuripe na década de 40 e construção das estruturas de controle da erosão litorânea (espigões e muros de contenção), não

ocorreu mais transporte de sedimentos na zona litorânea central de Fortaleza, assim a praia de Iparana não é mais alimentada por esses sedimentos que anteriormente ali chegavam. Uma consequência disso é a erosão da praia de Iparana, onde são observadas nas mudanças ocorridas à distâncias superiores a 15 m. Essas mudanças podem ser observadas nas fotos mostradas nas figuras 5.12 e 5.13, onde o arenito aflora na praia defronte ao muro, mas fica bem evidente que não há indícios de danos na base do muro.

Atualmente, na maior parte do tempo, com exceção da baixamar, a arrebentação de ondas se processa sobre o leito de arenito, recentemente aflorado, e, portanto ainda muito irregular, com muitas angularidades aparentes. Assim, as condições de banho de mar só são possíveis durante baixamar, e em uma região suficientemente afastada da costa de forma que o banhista possa acessar fundos de areia; portanto, fora da área de exposição do arenito.



FIGURA 5.13 - Seção 02 nas datas de 07/08/2003, 29/08/2003, 05/10/2003 e 02/11/2003.



FIGURA 5.14 - Seção 02 nas datas de 07/12/2003, 04/01/2004, 07/02/2004 e 09/03/2004.

## 6.0 – CONCLUSÕES

Ao longo das últimas décadas, vem ocorrendo contínua transformação do litoral cearense, em função de usos inconvenientes e de ocupações indevidas. Os resultados, já visíveis na paisagens são ilustradas pela erosão do litoral enquanto elemento natural. A situação traduz-se em verdadeira *deslitoralização* do Ceará, ou seja uma descaracterização da praia em si como objeto de lazer para banhistas. A realização de inspeções e pareceres técnicos representa um primeiro passo para o diagnóstico dos problemas.

Relativamente aos problemas ocorrentes na região costeira de Iparana e especificamente na área adjacente às construções do SESC, as análises anteriores são particularmente importantes, pois com a erosão do referido segmento de praia, desde a época da construção do muro protetor, o mar deixou de promover processos erosivos e entra em contato direto com o muro durante as preamares. Para o controle das condições de proteção exercitadas pelo muro assentado ao longo da praia, tem sido importante o monitoramento da sua estrutura, principalmente da carapaça externa que tem a finalidade de proteger o núcleo do muro do ataque do mar. Como este núcleo é composto por elementos rochosos menores, se este for exposto à ação de ondas pode ser facilmente danificado. É importante notar que havendo, em alguns trechos, um desarranjo nas peças que compõem a carapaça externa, esses segmentos representam pontos frágeis na estrutura podendo ser considerado como um risco para o ataque do mar ao núcleo do muro. A estrutura rochosa do muro protetor merece maiores observações na época do ano que tem início a temporada das ondas tipo swell, que estão geralmente associadas às tempestades ocorrentes no Atlântico Norte, as quais atingindo a praia de Iparana frontalmente podem criar problemas na estabilidade da estrutura.

Na avaliação feita sobre o comportamento da praia como receptora de sedimentos, pode-se notar que na área em estudo a movimentação deve ocorrer de uma maneira muito diminuta, visto que ao longo do tempo não se notou acréscimos no corpo sedimentar da praia. Pela conformação do piso marinho na área litorânea

descoberta quando a maré baixa, onde se destacam afloramentos rochosos do tipo arenitos consolidados, descobertos pelo processo erosivo ocorrido em tempos passados, pode-se notar o aparecimento de limos e outros tipos de substratos que comprovam a não movimentação de sedimentos por aquele local.

O processo erosivo ocorrido no passado que apontou a necessidade de construção do muro de proteção executado, realmente não se faz mais sentir com pleno vigor, em função da falta de sedimentos que se observa na área, com um piso rochoso aparente sem recobrimento sedimentar.

O muro de proteção previsto e construído evitou que o processo erosivo caminhasse no sentido do continente e impediu que as estruturas construídas pelo SESC na parte continental fossem destruídas.

O muro de proteção depois de dez anos de construção passou por um processo de recuperação, mostrando que o regime ondulatório atuante naquela faixa de praia, ao rebentar sobre o mesmo, exerce um trabalho de desmonte e desarrumação dos blocos rochosos.

Os resultados encontrados permitem acompanhar a evolução da proteção e da conformação da praia. Os estudos mostram a necessidade de um constante acompanhamento com objetivo de observar as condições de praia detectando-se processos de engordamento ou de emagrecimento, ou até mesmo a continuidade das condições sem mudanças, conforme o que acontecer na prática. Esse estudo é indispensável para que se possam evitar possíveis prejuízos no meio ambiente e, conseqüentemente, para a sociedade.

Por fim, os resultados deste trabalho demonstram a necessidade do contínuo processo de desenvolvimento de pesquisas e estudos, para se verificar os processos litorâneos e constantes avaliações para se observar o seqüenciado desenvolvimento da natureza.

## 7.0 – RECOMENDAÇÕES

Como embasamento nos dados obtidos, experiência profissional, os longos anos de estudos e observação de todas as questões levantadas, procurou-se refletir racionalmente para se argumentar um diagnóstico.

Diante de todas as informações obtidas através dos dados levantados, procurou-se fazer algumas recomendações.

Considerando que o muro de proteção se encontra em perfeitas condições na sua base de sustentação, pois foi assentado no manto de arenito existente no local. Embora desde sua construção a erosão tenha consumido todo sedimento disponível na praia à sua frente, tal processo não afetou a base do muro.

Em certos trechos do muro foram detectados desarranjos nas pedras que compõem a carapaça externa, mas em nenhum segmento o núcleo da estrutura foi afetado. Nesse caso recomenda-se um contínuo acompanhamento do mesmo. Se por ventura esse desarranjo apresentar maiores proporções, pode-se re-arranjar as pedras ou simplesmente colocar outra camada por cima, como já feito, desde que se obedeça a granulometria estabelecida no dimensionamento do muro.

Com a erosão da praia, que resultou inclusive no recuo da linha de duna, a escada de acesso a praia, ficou danificada, forçado à escalada das pedras do próprio muro ou contornar o cabeço Oeste do muro. Assim, é necessária a construção de uma escada que facilite o acesso à praia.

Atualmente a praia em si inexistente. Como observado nos levantamentos, a camada de areia outrora existente sobre o manto de arenito já foi consumida pela erosão. A recuperação da praia é uma das alternativas para conter a erosão nessa região. Uma possibilidade é o engordamento artificial da praia com a construção de espigões de retenção e aterro simultâneo. Outra alternativa é criação de duna artificial a barlavento da área erodida, proporcionando suprimento de material em consonância com as capacidades de transporte do vento e do mar na zona de arrebenção.

## 8.0 – BIBLIOGRAFIA

ABECASIS, F. Manzanares; CASTANHO, J Pires; CARVALHO, J.Reis de. **A Previsão das Características das Ondas do mar**. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1957. 215p. (Memória 114).

AEROCLUBE do Pará. **Meteorologia**. Disponível em: <<http://www.aeroclubeparana.com.br/meteorologia/circgervento.htm>>. Acesso em: 10 de mar. 2005.

AGENOR, C da S. **Estabilidade e Morfologia dos Contornos Litorâneos a Partir de Levantamento Sedimentológico na Região de Fortaleza-CE**. Disponível em: <<http://www.mares.io.usp.br/aagn/41o5html>>. Acesso em: 2 de fev. 2005.

ATLAS eletrônico de Climats e Correntes. 1 Atlas. Escalas variam. Disponível em: <<http://www.caiuaficha.com.br/atlas/climas.html>>. Acesso em: 15 de fev. 2005.

BIJKER, E.W. **The Increase of Bed Shear in a Current Due to Wave Motion**. Delft, Hydraulics Laboratory, 1967. 17 f. (Publication 46).

CALDWELL, Joseph M. **Wave Action and Sand Movement Near Anaheim Bay, Califórnia** – s- 1. Corps of Engineers, 1956. 21f. (Tecnical Memorandum 68).

CASTANHO, J. **Rebentação das Ondas e Transporte Litoral**. Lisboa, 1966. 270f. Dissertação (Concurso para investigador) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Ministério das Obras Públicas. (Memória, 275).

CASTRO, J.W. de A.; VALENTINI, E.; ROSMAN, P.C.C. **Estudo diagnóstico do comportamento atual da linha de costa entre os rios Pacoti e Tabuba, CE**. 37º Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo, dez. 1992. Boletim de resumos expandidos, v.1. Simpósios, 1992, p. 27.

CASTRO, J.W. de A. **Mapeamento Geológico Morfológico Costeiro da Praia de Iracema e Áreas de Influência**. Centro de Pesquisa em Geologia Ambiental, C.P.G.A., Relatório Técnico, Fortaleza, 1989.

CHAGAS, P.F. **Influência da Estrutura Portuária sobre os Processos Hidrodinâmicos na Região Costeira do Pecém – CE**. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª edição. Rio de Janeiro:Edgard blucher, 1980. 176p

CLICK SURF COLUNISTAS. **Big Waves**. Disponível em: <<http://www.clicksurf.com.br/>>. Acesso em: 25 de jul. 2005.

COPPETEC/ET – 170155. **Estudo sobre Erosão da Praia de Iparana – CE**. Relatório Técnico, COPPE/UFRJ, julho/1990.

\_\_\_\_\_ – 170168. **Projeto Básico para Contenção de Erosão da Praia de Iparana**. Relatório Técnico, COPPE/UFRJ, agosto/1991.

CARTA COSTEIRA nº 600. Brasil – Costa Norte de Camocim a Fortaleza. Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1975. 1 Carta. Escala variam.

EAGLESON, P. S., DEAN, R. G. Small Amplitude Wave Theory. In: IPPEN, Arthur T. **Estuary and Coastline Hydrodynamics**. New York: McGraw-Hill Book, 1966. 744p. 1-77. (Engineering Societies Monographs).

EDINFOR a LogicaCMG company. **Associação Nacional de Cruzeiros** Disponível em: <<http://www.edinfor.pt>>. Acesso em: 20 fev. 2005.

GETTY IMAGES. Provedor de imagens. Disponível em: <<http://creative.gettyimages.com/>>. Acesso em: 15 de jun. de 2005.

INPH. **Estudos do Transporte de Sedimentos em Torno do Porto de Fortaleza – Ce.** Rio de Janeiro, 1992. (INPH – 40/92).

IPPEN, A. **Estuary and Coastline Hydrodynamics.** McGraw-Hill. 1966.

KITESURF Mania em Missão. **Fotoreportagens.** Disponível em: <<http://www.kitesurfmania.com.br>>. Acesso em: 25 de mar. 2005.

MAIA, L. P. **Proceso Costeros y Balance Sedimentario a lo Largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicaciones para una Gestión Adecuada de la Zona Litoral.** Tese de Doutorado. Universidade de Barcelona. Barcelona-ES, 1998. 269p.

MAIA, L. P. **Monitoramento Ambiental das Praias do Município de Caucaia – CE.** Fortaleza, 2004. 48p.

MEDEIROS, A. J. de A.; SILVA, E. V. da; RAVENTOS J. S. **Geomorfologia e Dinâmica Ambiental da Planície Litorânea Entre as Desembocaduras dos Rios Pacotí e Ceará, Fortaleza – Ceará.** Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

MORAIS, J. O. **Evolução Sedimentológica da Enseada do Mucuripe. Fortaleza.** Arq. Ciência Mar, 19-46, Fortaleza 1981.

\_\_\_\_\_. **Processos de Assoreamento do Porto do Mucuripe.** Laboratório de Ciências do Mar. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1972.

MOTTA, Victor Freire. **Estudo em Modelo Reduzido para Regularização da Embocadura Lagunar de Tramandaí (Rio Grande do Sul).** Porto Alegre, Instituto de Pesquisa Hidráulica da UFGS, 1967. 58f.

PITOMBEIRA, E. S. **Modificações da Linha de Costa pela Construção de Quebra-Mar ao largo.** Revista Engenharia, Fortaleza, n.13, p. 73-84, dez. 1995.

\_\_\_\_\_. **Processos Litorâneos em Regiões Costeiras do Estado do Ceará.** Universidade Federal do Ceara. Fortaleza, 2005.

THURMAN, H. V., (1997) - **Introductory Oceanography**, Prentice Hall, New Jersey, 544 p.

ROSMAN, P. C. C. & VALENTINI, E. **Estudo de Erosão da Praia de Iparana – CE,** Projeto COPPETEC ET – 170155, Serviço Social do Comercio – SESC, 1989/90.

SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Marinha.** São Paulo. Ed. T.A. Queiroz, 1992. 171p.

SEMACE. GERCO - Gerenciamento Costeiro CE. 1 Carta Imagem. Disponível em: < <http://www.semace.ce.gov.br>>. Acesso em: 20 mar. 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Guia para normalização de trabalhos acadêmicos de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).** Fortaleza, 2003.

U.S. Army Corps of Engineers. **Shore Protection Manual.** 4 ed. Washington: Department of the Army. CERC, 1984.

VALENTINI, E & ROSMAN, P.C.C.. **Erosão Costeira em Fortaleza – CE.** Revista Brasileira de Engenharia, Caderno Recursos Hídricos, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, vol. 10, n. 1, julho de 1992.