

# ANÁLISE ESTATÍSTICA DO REGIME DE ONDAS AO LONGO DA REGIÃO MARÍTIMA DO PORTO DO PECÉM

*Luiz Alberto de Almeida Vieira, Dr.<sup>1</sup>; Erasmo da Silva Pitombeira, Livre Docência<sup>2</sup> & Raimundo Oliveira de Souza, Dr<sup>3</sup>.*

**RESUMO---** Este trabalho faz uma análise estatística do regime de ondas ao longo da região marítima do Pecém e procura estabelecer seu regime. Nesta análise, medidas de espectros de ondas foram subdivididas em partes de baixa freqüência (swell) e uma parte de alta freqüência (sea). Para cada parte, dados sazonais e anuais foram analisados, a fim de derivar as condições near shore wave ao longo da linha de costa dos arredores do Pecém. O modelo de ondas descreve a propagação de ondas representando as deformações, tais como refração, difração, shoaling e rebentação. Os resultados são de grande importância para o estudo da dinâmica da linha de costa da região do porto de Pecém e na determinação de simulações numéricas.

**ABSTRACT---** This work makes a statistics analysis of the waves movement throughout the region of the Pecém and looks for to establish its regime. In this analysis, measured of specters of waves a high-frequency part had been subdivided in parts of low frequency (swell) and (sea). For each part, periodic and annual data had been analyzed, in order to derive the conditions to near shore wave throughout the shoreline of the outskirts of the Pecém. The model of waves describes the propagation of the waves representing the deformations, such as refraction, diffraction, shoaling and breakwater. The results are of great importance for the study of the dynamics of the shoreline of the region of the port of Pecém and in the determination of numerical simulations.

**PALAVRAS CHAVES:** regime de ondas, zona costeira, estatística

---

<sup>1</sup> Universidade de Fortaleza – UNIFOR. Rua Monsenhor Bruno, 1902, sala 6/7, Aldeota, CEP 60120-000, Fortaleza, Ce, Tel. (85) 3287.1882, fax (85) 3272.1884, e-mail: lvieira\_lvieira@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC, Bloco 713, C.P. 6018, CEP 60.451-970, Fortaleza, Ce, Tel. (85) 3366.9622, e-mail: erasmo@ufc.br

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC, Bloco 713, C.P. 6018, CEP 60.451-970, Fortaleza, Ce, Tel. (85) 3366.9771, e-mail: rsouza@ufc.br

## INTRODUÇÃO

As medições e observações dos agentes (vento, ondas, corrente, marés e outros fenômenos) que atuam na zona costeira e de todas as grandezas que influenciam no conhecimento da hidrodinâmica costeira são a base fundamental para qualquer estudo dos processos dinâmicos, permitindo, assim, prever o comportamento da costa tanto sob condições naturais, quanto sob a influência de obras realizadas pelo homem na referida zona. No planejamento adequado de qualquer obra em zona costeira se faz necessário conhecer as séries aleatórias registradas na região em estudo.

Devido aos enormes custos envolvidos em projetos dessa natureza, os dados deverão ser representativos do regime de ondas da região estudada para evitar um mau planejamento, seja em projetos de dispersão de efluentes em zona marinha, seja na execução de qualquer projeto costeiro (diques, quebra-mares e estruturas offshore); deve-se conhecer a magnitude e condições das ondas que ocorrem (altura, período e rumo de propagação da onda) que também influenciam nos processos naturais como transporte de sedimentos e mudanças na conformação do fundo batimétrico. Essas avaliações das condições das ondas em áreas costeiras são essenciais para estimar as forças envolvidas nas linhas de costa, qual seja o limite entre o continente e a porção adjacente ao mar onde não há efetiva ação marinha, no alcance máximo das ondas, concretizando-se pela presença de falésias, no limite entre a vegetação e a praia, ou nos costões rochosos, ou qualquer outra feição que marque o início da área continental (Suguió, 1992; Ângulo, 1994). Portanto, o conhecimento do regime de ondas de uma região e a capacidade de previsão do estado de agitação marítima são de fundamental importância para todas as atividades ligadas ao oceano. Entre os vários tipos de ondas que ocorrem no oceano, estão as ondas superficiais de gravidade gerada pelo vento, que representam a principal e mais constante forma de transporte de energia no mar, exercendo um papel preponderante na determinação das feições costeiras e constituindo-se na mais efetiva ameaça às obras costeiras, à segurança da navegação e às operações navais.

Ondas, em geral, nos lembra ondulações na superfície do mar, de um lago ou de um rio, freqüentemente com aparência de regularidade e progredindo da região de formação para a costa, onde, vias de regra, são dissipadas como rebentação ou refletidas parcialmente. As ondas próxima à costa ou em mar aberto podem ser classificadas em vaga (wind-sea ou sea) – as que estão na zona de geração, sendo capazes de receber energia do vento; e marulho ou ondulações (swell) – ondas que se propagam para fora da zona de geração original e/ou que não são capazes de receber energia do vento. Uma vez geradas, as ondulações, como que, adquirem vida própria, sendo capazes de propagar-se por grandes distâncias, com pouca atenuação (Melo Filho et al., 1993), que podem ser comparadas à metade da circunferência da Terra (Barber & Ursell, 1948).

A característica das ondas em sua geração dependem de 3 propriedades do vento próximo à superfície, que são: 1) intensidade do vento; 2) duração do período de tempo em que o vento sopra; e 3) pista (fetch) ou extensão da área de atuação do vento. Na verdade, os processos costeiros são o resultado das interações dos agentes dinâmicos (vento, ondas, corrente, marés e outros fenômenos), com a zona litoral, definindo um processo natural de transporte de sedimento litorâneo capaz de estabelecer a evolução e formação das linhas costeiras. Portanto, a ação dos ventos, combinado com a dinâmica dos oceanos – associada ao movimento de partículas sólidas, são fatores determinantes da transformação das linhas de costa ao longo do tempo.

É inescondível que a implantação de uma obra de engenharia em zona costeira traz riscos de impactos ambientais, obrigando aos seus responsáveis, seja a que nível for, públicos, privados ou em parceria, a promover os estudos necessários com o objetivo de prevenir e definir as medidas corretivas de modo a minimizar os prejuízos à população e ao meio ambiente, ou mesmo aos resultados pretendidos com a sua conclusão. Ao se implantar um terminal portuário em costas de areia, como no caso em tela, ter-se-á criado uma área de amortecimento energético ondulatório, gerando, assim, um possível local de acumulação de areia. Como o equilíbrio de uma costa se faz pela passagem de sedimentos ao longo da praia, quando ocorre aprisionamento destes em um ponto especial, tem-se, consequentemente, assoreamento a barlamar do molhe construído e erosões à sotamar. Exemplificando, citemos o caso da praia de Sukhumi Bay em que a linha de costa, num curso de sete anos, avançou cerca de 80 metros na zona de sombra do quebra mar e recuou, sob efeito de uma erosão localizada, à praia, a sotamar do tómbolo (Zenkovich, 1967).

No planejamento adequado de qualquer obra em zona costeira se faz necessário conhecer as séries aleatórias registradas na região em estudo. Devido aos enormes custos envolvidos em projetos dessa natureza, os dados deverão ser representativos do regime de ondas da região estudada para evitar um mau planejamento, seja em projetos de dispersão de efluentes em zona marinha, seja na execução de qualquer projeto costeiro (diques, quebra-mares e estruturas offshore); deve-se conhecer a magnitude e condições das ondas que ocorrem (altura, período e rumo de propagação da onda) que também influenciam nos processos naturais como transporte de sedimentos e mudanças na conformação do fundo batimétrico. A característica das ondas em sua geração dependem de 3 propriedades do vento próximo à superfície, que são: 1) intensidade do vento; 2) duração do período de tempo em que o vento sopra; e 3) pista (fetch) ou extensão da área de atuação do vento. Uma vez geradas, as ondulações, como que, adquirem vida própria, sendo capazes de propagar-se por grandes distâncias, com pouca atenuação (Melo Filho et al., 1993), que podem ser comparadas à metade da circunferência da Terra (Barber & Ursell, 1948). Outros fatos relacionados podem ser obtidos na tese de doutorado do primeiro autor (Vieira, 2007).

Devido ao empreendimento do governo do Estado do Ceará na construção do Terminal Portuário do Pecém, desde novembro de 1995, o Instituto de Pesquisa Hidroviárias – INPH, vem realizando medições de velocidade e de direção dos ventos em Pecém, tendo concluído em outubro de 1997 um estudo naquela área costeira (área esta em que seria construído o referido terminal portuário), através de uma parceria firmada entre o INPH e o Danish Hydraulic Institute – DHI, com a apresentação do Relatório Final, sobre o título: Avaliação dos Impactos na Morfologia Costeira, Através de Modelagens Numéricas, Provenientes da Implantação do Porto do Pecém – Ce.

## Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise estatística do regime de ondas ao longo da região marítima do Pecém e procura estabelecer seu regime, a fim de derivar as condições near shore wave ao longo da linha de costa dos arredores do Pecém.

## LOCALIZAÇÃO

O Porto do Pecém localiza-se na praia do Pecém, nas proximidades do Município Cearense de São Gonçalo do Amarante, a cerca de 50 km de Fortaleza, Figura 1.

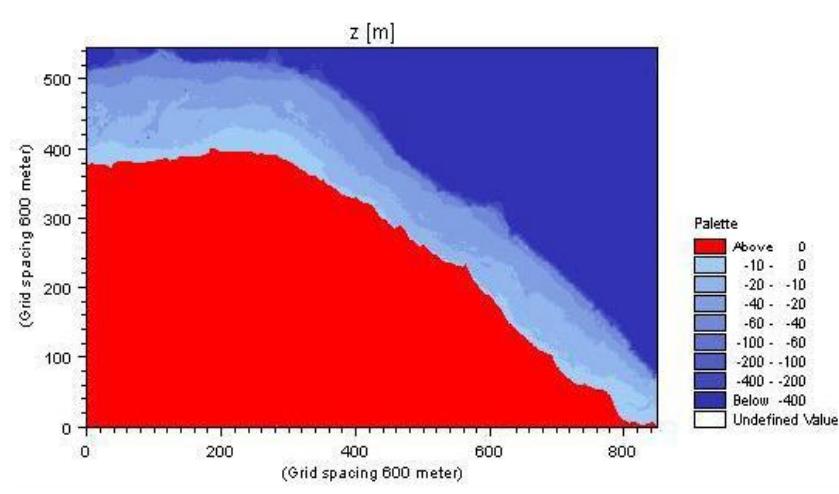


Figura 1 – Localização (Fonte: DERT – CE). Região costeira e marítima do porto do Pecém.

## CARACTERIZAÇÃO

Seu litoral é marcado pela presença de uma vasta área de dunas e de afloramentos rochosos emersos e submersos do embasamento cristalino. Aproximadamente a 4,00 m abaixo do nível médio

do mar o fundo está quase que inteiramente coberto por rochas. Somente em alguns locais essa rocha fica exposta na praia. A oeste da Ponta de Pecém o fundo do mar também é constituído por rocha. Ocorre afloramento de rochas cristalinas de praia constituindo promontórios, os quais influenciam diretamente na dinâmica costeira, podendo ocasionar erosão, e/ou assoreamento na praia (Ponta do Pecém). A batimetria do Pecém, elaborada com o MIKE 21, Figura 2, é fortemente dominada pela ocorrência de rocha na zona litorânea. A ponta do Pecém se destaca como sendo a região em que as curvas batimétricas de – 15 a – 18 metros mais se aproximam da linha de costa, com distâncias da ordem de 2 km, não havendo, portanto, necessidade de dragagem para atingir profundidades adequadas para os navios de pretendida aportagem.



**Figura 2 – Batimetria do Pécem Elaborada com o software MIKE 21.**

Quanto aos parâmetros físicos, sua combinação: correntes marítimas, ondas incidentes, movimento das marés, bem como, a incidência dos ventos, provoca ações oceânicas capazes de definir um processo contínuo de transporte de sedimento ao longo da linha de costa estabelecendo a evolução e transformação desta região costeira. A turbulência e a corrente gerada pela ação das ondas resulta na mistura e suspensão de sedimento que serão transportados ao longo da linha de costa pelas correntes de marés e pelas marés altas e baixas.

## FUNDAMENTOS FÍSICOS

A dinâmica dos oceanos, associada aos movimentos de material sólidos por ação dos ventos, tem determinado significativa transformação das linhas de costa, nos continentes, em uma escala de tempo bem definida. Conhecer e dominar este processo costeiro implica em estabelecer um domínio completo dos impactos causados pela presença física das mais variadas obras marítimas, como também de construção costeira, o que representa um dos grandes desafios encontrados pelos engenheiros e cientistas que tratam de resolver problemas relacionados com a dinâmica costeira.

## Dinâmica das Ondas

Imagine-se, por alguns instantes, que uma superfície líquida estivesse em estado de repouso e que a gravidade fosse a única força externa a exercer sua ação sobre o fluido em repouso. Desse modo, ter-se-ia uma superfície líquida nivelada com a horizontal. Submetida esta superfície a ação de outras forças externas, tais como, atração gravitacional da lua e do sol, variando segundo suas posições relativas e, a fatores meteorológicos (ventos, precipitação, entre outros), biológicos, humanos, etc., este estado de repouso ideal não poderia ser alcançado e, assim também, no caso dos mares e oceanos. As ondas são então formadas pela fricção e arraste na superfície da água ocasionada pelo vento e, seu crescimento, é efeito do tempo de contato com sua crista. A agitação das ondas, a fricção com o fundo do mar, a mudança de declividade de seu leito, são, também, fatores que influenciam no crescimento da altura da onda e de sua declividade até a rebentação.

Evidentemente, a descrição das ondas oceânicas de maneira completa não se constitui simples tarefa, dado a sua complexidade. Entretanto, como é sabido, dos estudos de física ondulatória, uma onda simples é caracterizada pelo seu comprimento de onda,  $L$ , pela sua altura,  $H$ , e pelo seu período,  $T$ , Figura 3.

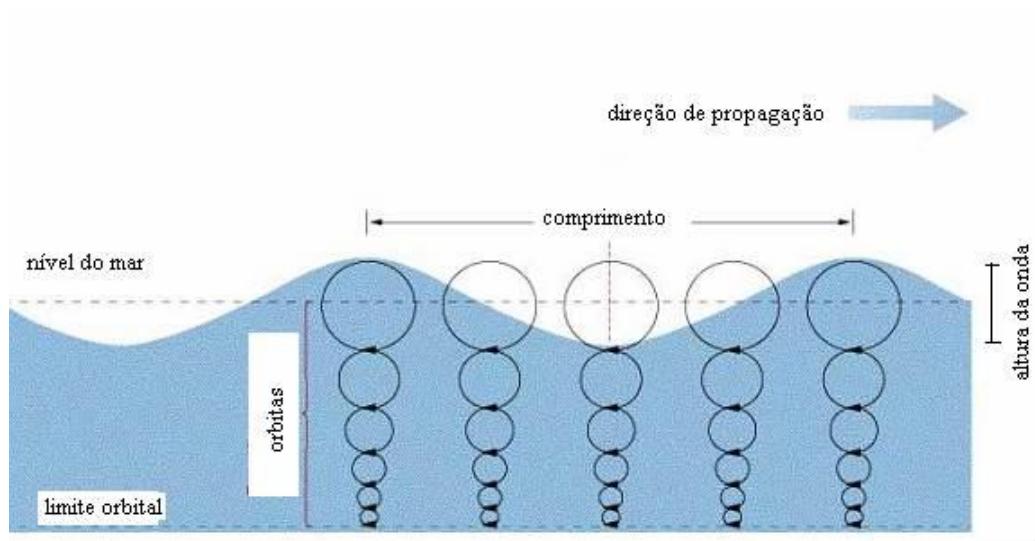


Figura 3 - Uma onda simples e suas partes – Desenvolvimento orbital na formação de uma onda.

A sua velocidade de propagação,  $C$ , também conhecida por celeridade ou velocidade de fase, é definida pela expressão:  $\frac{L}{T}$ . Interessa, ainda, considerar o quociente designado por declividade da onda, dado por:  $\delta = \frac{H}{L}$ . As teorias matemáticas ondulatórias dividem-se em: teorias irrotacionais, que resultaram dos trabalhos de Stokes e das extensões feitas posteriormente por Levi-Civita e

Struik; e as teorias rotacionais, que não são totalmente confirmadas pelos ensaios experimentais e pelos valores observados na natureza (ABECASIS & OUTROS. - ABECASIS, F. M.; CASTANHO, Pires; CARVALHO, 1957). Laplace (1776) apresentou um estudo satisfatório para ondas de pequena amplitude em águas de profundidade infinita. Airy (1845), por sua vez, desenvolveu a teoria para as ondas irrotacionais em fundo horizontal em toda a profundidade da água. Esta teoria, conhecida como teoria linear da onda, usa somente o primeiro termo da série de Fourier na sua dedução.

Komar (1966), a este respeito, anuncia ter sido desenvolvida por Gerstner (1802) a primeira solução de ondas com altura finita, limitada a ondas em águas de profundidade infinita, tendo, nesta oportunidade, concluído que o perfil das ondas em águas profundas é uma trocóide. Esta teoria é de larga aplicação na engenharia civil e arquitetura naval, pois suas soluções são exatas e as equações simples de usar, satisfazendo as condições de pressão do perfil de ondas e a continuidade. O desenvolvimento da teoria das ondas se baseia na aplicação das equações de Navier-Stokes e no fluxo de fluídos viscosos em regime permanente. Para seu estudo as ondas se classificam em ondas de pequena amplitude, que representam pequenas alterações na superfície da água e não causam maiores problemas às estruturas localizadas em alto mar ou na costa, e ondas de amplitude finita, que são as que interessam nos projetos de portos, estruturas marítimas e obras de proteção de praias.

Diversos estudos foram feitos por pesquisadores no mundo com o fito de estabelecer fórmulas teóricas possíveis de determinar a capacidade de transporte litorâneo (volume de sedimentos transportado na unidade de tempo) e, assim, obter o valor anual do transporte de sedimento, fator importante quando se projeta ou executa uma obra costeira. Segundo Komar (1966), as cinco teorias mais comumente aplicadas para descrever o movimento de onda no mar são: a uma, a teoria de Airy – sinusoidal, desenvolvida por G. B. Airy (1845), (com aplicações em ondas de pequena amplitude em águas profundas); a duas, a teoria de Stokes (1847) (com aplicações em ondas de grande amplitude, porém finita, em profundidade intermediária e de águas rasas “shallow water”); a três, a teoria de Gerstner (1802) – trocoidal (embora demonstrada com as equações da hidrodinâmica, findou abandonada por falta de confirmação experimental); a quatro, a teoria da onda solitária, descrita, primeiramente, por J. Scott Russel (1844), aplica-se satisfatoriamente a ondas solitária ou crista isolada de amplitude finita, próxima do zero, sem comprimento de onda nem período a elas associadas, movendo-se em águas rasas, é uma onda progressiva consistindo de uma simples crista, sem movimento oscilatório; a cinco, a teoria da onda senoidal, primeiramente desenvolvida por Korteweg e de Vries (1895), é uma onda periódica de cristas longamente espaçadas, separadas por longos cavados, e que poderiam ser usadas para descrever o movimento de ondas antes da zona de rebentação.

No desenvolvimento da teoria linear admite-se: Fluido homogêneo e incompressível; portanto a densidade  $\rho$  é constante; A tensão superficial pode ser ignorada; Os efeitos da aceleração de Coriolis, devido a rotação da terra, não é considerado; A pressão na superfície livre é uniforme e constante; O fluido é ideal ou não viscoso; A onda particular que está sendo considerada não interage com nenhum outro movimento da água. O fluxo é irrotacional de modo que as partículas da água não girem (somente as forças normais são importantes e as forças cortando são insignificantes); O leito (bed) é horizontal, fixo, de limites impermeável, que implica que a velocidade vertical no leito é zero; A amplitude da onda é pequena e a forma da onda não varia com o tempo e espaço; As ondas são plana ou long-crested (bidimensional). O modelo clássico no estudo de ondas para dinâmica dos fluidos considera a onda ideal do tipo senoidal. Essa aproximação simplifica a progressão da onda sobre a superfície, mesmo quando são irregulares. Desta forma, denomina-se água profunda com relação a uma dada onda de superfície aquela em que sua profundidade é pelo menos a metade do comprimento de onda. Na prática, a relação de profundidade ( $h$ ) com o comprimento de onda ( $L$ ) é:

Para águas profundas:  $\frac{h}{L_\infty} > \frac{1}{2}$ ; Para águas em profundidade intermediária:  $\frac{1}{25} < \frac{h}{L_\infty} < \frac{1}{2}$ ; Para

águas rasas:  $\frac{h}{L_\infty} < \frac{1}{25}$ . A seguir, o quadro 5 mostra as equações para a onda linear de Airy,

considerando as regiões de aplicação de aproximações com:

Quadro 1 - Equações para a Onda Linear de Airy

PROFOUNDIDADE RELATIVA	ÁGUAS RASAS $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$	ÁGUAS INTERMEDIÁRIAS $\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	ÁGUAS PROFUNDAS $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$
1. Perfil	Mesma	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[ \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos \theta$	Mesma
2. Celeridade	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi d}{L} \right)$	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
3. Comprimento de Onda	$L = T \sqrt{gd} = CT$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi d}{L} \right)$	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0 T$
4. Velocidade de Grupo	$C_g = C = \sqrt{gd}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right] C$	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$
5. Velocidade da Partícula			
(a) Horizontal	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \theta$	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
(b) Vertical	$w = \frac{H\pi}{T} \left( 1 + \frac{z}{d} \right) \sin \theta$	$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
6. Aceleração da Partícula			
(a) Horizontal	$a_x = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$a_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$a_x = 2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
(b) Vertical	$a_z = -2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 \left( 1 + \frac{z}{d} \right) \cos \theta$	$a_z = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$a_z = -2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
7. Dispersão da Partícula			
(a) Horizontal	$\xi = \frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$\xi = -\frac{H}{2} e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
(b) Vertical	$\zeta = \frac{H}{2} \left( 1 + \frac{z}{d} \right) \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
8. Pressão de Superfície	$p = \rho g (\eta - z)$	$p = \rho g \eta \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$	$p = \rho g \eta e^{\frac{2\pi z}{L}} - \rho g z$

## Transporte de sedimento

É evidente a necessidade de conhecimento do que faz um grão de sedimento mover-se e aonde ele vai! Os engenheiros dedicados ao estudo da hidráulica reconhecem que, uma das mais importantes e difíceis classes de problemas, está relacionada com o transporte de sedimentos em zona costeira incorrendo em erosão, e / ou deposição. A energia refletida de uma parede vertical pode ser significativa na dinâmica costeira. A interação entre a refração e difração através da praia e reflexão ocorrida a partir de uma estrutura costeira cria uma zona em que o sedimento transportado ao longo da costa (longshore) se acumula.

O transporte de sedimento pode dar-se por arrastamento (a parcela da descarga total que está em maior ou menor contato com o leito durante o transporte), por suspensão (a parcela da descarga total que se move sem contato contínuo com o leito, devido à agitação do fluido em turbulência) e na água, *wash load*, este tipo de transporte é, em geral, desconsiderado no cálculo. Segundo o professor Erasmo Pitombeira “*O conhecimento prévio de como se comporta o transporte litorâneo, é de valor inestimável no projeto de qualquer obra marítima. Todo projetista de obras marítimas desejaria ter uma definição do transporte litorâneo, para que pudesse, senão tirar partido do mesmo, pelo menos orientar seus projetos de modo a não contrariá-los e assim evitar uma série de transtornos indesejáveis*” (Pitombeira, 1973). Assim, a capacidade de previsão da dinâmica sedimentar e de variações morfológicas é elemento fundamental para gestão adequada das zonas costeiras, também sujeita às intempéries capazes de causar o avanço do mar sobre o litoral, resultando em ressaca do mar, causada pelos fortes ventos e fortes marés, a exemplo do que já ocorreu por diversas vezes em Fortaleza, Ceará, na praia de Iracema.



Figura 4 - Praia de Iracema. (Foto publicada no jornal O POVO, 04/07/2006, de Chico Gadelha).

No Pecém o efeito principal das marés é a mudança dos padrões de transporte de sedimentos na direção perpendicular à praia. Durante a baixa-mar a rebentação das ondas ocorre nos baixios em

frente à cidade de Pecém, uma distância de várias centenas de metros da costa enquanto que durante a preamar a Ponta do Pecém fica parcialmente inundada. Durante a preamar a Ponta do Pecém fica parcialmente inundada, como se pode observar na Figura 5.



**Figura 5 – Ponta do Pecém parcialmente inundada na preamar.**

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

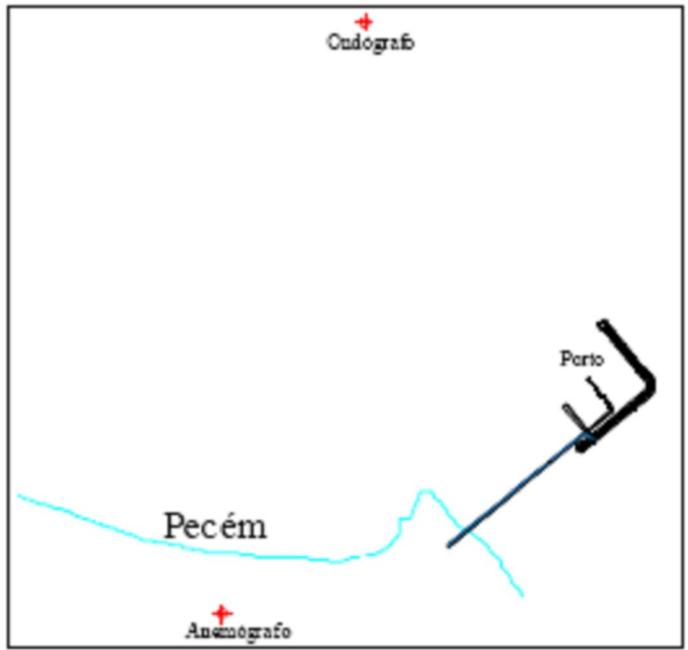
### Modelagem a Partir de Ondas Registradas

*Análise estatística do regime de ondas ao longo da região marítima do Pecém.*

Nesta análise, medidas de espectros de ondas foram subdivididas em partes de baixa freqüência (swell) e uma parte de alta freqüência (sea). Para cada parte, dados sazonais e anuais foram analisados, a fim de derivar as condições near shore wave ao longo da linha de costa dos arredores do Pecém. O modelo de ondas descreve a propagação de ondas representando as deformações, tais como refração, difração, shoaling e rebentação.

### Resultados Estatísticos dos dados de ondas

O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH utilizando o ondógrafo localizado a uma profundidade de 18 metros em um ponto ao largo da ponta do Pecém, figura 46, nas coordenadas: latitude  $03^{\circ} 29' 31''S$ ; longitude  $38^{\circ} 49' 03''W$ ; vem realizando medições de ondas na região portuária do Pecém desde 1997, permitindo, assim, uma obtenção da caracterização do regime de ondas. Esses dados foram considerados constantes e válidos para a inteira área de estudo, porque atualmente não existem medidas de longo prazo e pontuais ao longo de todo o litoral do Ceará.



Fonte Rabelo, 2004

**Figura 6 - Localização do ondógrafo e anemógrafo do Instituto Nacional de Pesquisa Hidroviária (INPH).**

Todavia, tendo em vista que só foi possível dispor dos dados de ondas entre os meses de março de 1997 a outubro de 2001 e os relativos aos meses de janeiro a março de 2005, nos referiremos aos resultados obtidos a partir desses dados. As direções de propagação das ondas obtidas (em relação ao Norte Verdadeiro) foram agrupadas em classes definidas a intervalos de 30 graus, quadro 11, com maior incidência de D na classe de 75° a 105°, correspondendo a um percentual de 73,86%, do período analisado, no qual tem-se os valores extremos, máximo (105°) e mínimo (48°) de D, observados em todo o período de medições analisadas, ocorridos em 05/04/96 e 23/03/96, respectivamente.

**Quadro 2 - Classes de Direção de ondas (D).**

Classes — O (graus)	N de Obs.	Freqüência Relativa (%)
45 a 75	23	26,14%
75 a 105	65	73,86%
Total	88	100,00%

As conclusões da análise estatística das ondas obtidas conforme o período já especificado, supra, em que foram registrados 16.013 trens de ondas, normalmente com 8 registros diários, perfazendo um total de 240 a 248 registros mensais. O quadro 12 apresenta as maiores alturas registradas nesse período.

**Quadro 3 - Alturas máximas registradas**

Data	Hora	Hmáx	Hs	D	Tp
02/09/99	04:19	4,69	2,22	107	7,7
23/06/98	04:02	4,68	2,29	102	7,1

Pode-se observar, quadro 13, que a classe de  $1,7 \text{ m} < \text{Hmáx} < 2,0 \text{ m}$  foi a mais freqüente, com 20,92%. A classe com  $4,4 \text{ m} < \text{Hmáx} < 4,7 \text{ m}$  ocorreu com 0,06%, portanto, ocorreram 10 ondas no período estudado, isto é, em 1705 dias. O grupamento de Hmáx compreendido entre 0,5m e 3,2 m ocorreu com 94,74% de freqüência. A incidência de ondas com mais de 3,8 metros atingem um percentual de 0,48% no período estudado, entretanto, ondas de mais de 4,1 metros e até 4,7 metros têm freqüência de 0,13%. Outrossim, ondas máximas acima de 3,2 m ocorreram com 5,26% e, ondas máximas acima de 2,00 ocorreram com 61,67%.

**Quadro 4 - Pecém – CE - Classes de Hmáx (m). Março 1997 a Outubro 2001.**

Hmax (m) – Classes		Frequência	F.Relativa (%)
0,5	0,8	1	0,01%
0,8	1,1	48	0,30%
1,1	1,4	541	3,38%
1,4	1,7	2198	13,73%
1,7	2,0	3350	20,92%
2	2,3	3025	18,89%
2,3	2,6	2582	16,12%
2,6	2,9	2172	13,56%
2,9	3,2	1253	7,82%
3,2	3,5	578	3,61%
3,5	3,8	188	1,17%
3,8	4,1	56	0,35%
4,1	4,4	11	0,07%
4,4	4,7	10	0,06%
Total		16013	100,00%

Tratando-se das ondas Significativas tem-se o seguinte, quadro 14:

**Quadro 5 - Pecém – Ceará. Maiores Ondas Significativas**

Data	Hora	Ks (Máx)	Hmáx	D	Tp
10/07	02:20	2,3997	3,52	107	7,1
10/07	03:20	2,398	4,44	101	7,7

Extraem-se do quadro representativo das classes de Hs (m), Março /1997 a Outubro /2001, quadro 15, os seguintes resultados: a classe de Hs de 1,3 m a 1,4 m, a mais freqüente, apresentou resultado com 12,43%; seguida da classe de 1,2 m a 1,3 m, com 11,95%. Por sua vez, a classe de 2,4 m a 2,5 m, maior altura significativa, ocorreu com 0,02%, ou seja, em todo o período ocorreram

apenas quatro ondas com a amplitude considerada. Finalmente, o grupamento de ondas 0,9 m s Hs 2,10 m ocorreu com a freqüência de 96,10%.

**Quadro 6 - Pecém-Ce. Classes de Hs (m). Março /1997 a Outubro /2001**

Hs (m)	Freqüência	F.Relativa (%)
0,3-0,4	1	0,01
0,4-0,5	0	0,00
0,5-0,6	0	0,00
0,6-0,7	10	0,06
0,7-0,8	48	0,30
0,8 - 0,9	206	1,29
0,9-1,0	534	3,33
1,0-1,1	1108	6,92
1,1-1,2	1502	9,38
1,2—1,3	1913	11,95
1,3-1,4	1991	12,43
1,4-1,5	1769	11,05
1,5-1,6	1408	8,79
1,6-1,7	1268	7,92
1,7-1,8	1461	9,12
1,8-1,9	1235	7,71
1,9-2,0	784	4,90
2,0-2,1	420	2,62
2,1-2,2	210	1,31
2,2-2,3	102	0,64
2,3-2,4	39	0,24
2,4-2,5	4	0,02
Total	16013	100,00

Tratando-se das direções de ondas, o exame dos 16013 registros de direções de ondas mostra claramente a existência de dois climas de ondas, quadro 16. Um, em torno da direção 40° - 50° com uma freqüência de 10,87%; e outro, em torno da classe 100°— 110°, com uma freqüência de 36,45%. As direções D (graus) crescem da classe “0° - 10°” até a classe “40° - 50°”, para depois cair até a classe “70° - 80°”. Desta classe a freqüência cresce até a classe de “100° — 110°” para depois cair até a de classe “120° - 130°”. Tem-se que a classe mais freqüente (100° - 110°) ocorreu com 36,45%; seguida com 13,56% pela classe seguinte (110° - 120°). Adicionando-se a estas duas classes a outra de 90° - 100°, atinge-se a freqüência de 62,04%. As classes extremas, primeira e última, ocorreram com freqüência de 0,07% e 0,01%, respectivamente, correspondendo a 1,19 e 0,17 dias com ocorrência de ondas com essas direções. Ondas com direção entre 0° a 30° ocorreram com freqüência de 4,73%. Isto indica que, em 1705 dias, houve 80,6 dias com ondas dessas direções. Ondas com direção entre 0° a 60° ocorreram com freqüência de 30,00%.

**Quadro 7 - Pecém – Ce. Classes de D (graus). Março /1997 a Outubro /200**

D(graus)	Freqüência	F.Relativa (%) }
0-10	11	0,07
10-20	160	1,00
20 -30	586	3,66
30-40	982	6,13
40-50	1740	10,87
50-60	1324	8,27
60 -70	516	3,22
70-80	259	1,62
80-90	429	2,68
90-100	1927	12,03
100-110	5836	36,45
110-120	2171	13,56
120-130	71	0,44
130-140	1	0,01
Total	16013	100,00

Há que se levar em conta que o fenômeno “ondas” é aleatório. A análise dos Períodos de Pico, utilizando-se os dados existentes no período mencionado, tem-se que a classe mais freqüente de Tpeak é o da classe de 6s a 7s, com 26,61% de ocorrência; seguida da classe de 5s a 6s, com 24,47%. Sobressai em 3º plano a classe de 7s a 8s, com 15,16%. O conjunto de períodos 4s a 10s representa cerca de 80,63% de freqüência, quadro 17. Os períodos considerados longos, de 10,1s a 20s, ocorreram com freqüência de 19,31%. Destes, cerca de 15,21% estão compreendidos entre os valores de Tpeak de 10s a 15s. Por sua vez, os períodos considerados curtos, de 3s a 9,9s, ocorreram com a freqüência de 80,69%; desta, tem-se que 66,24% correspondem ao conjunto de períodos de 5s a 8s.

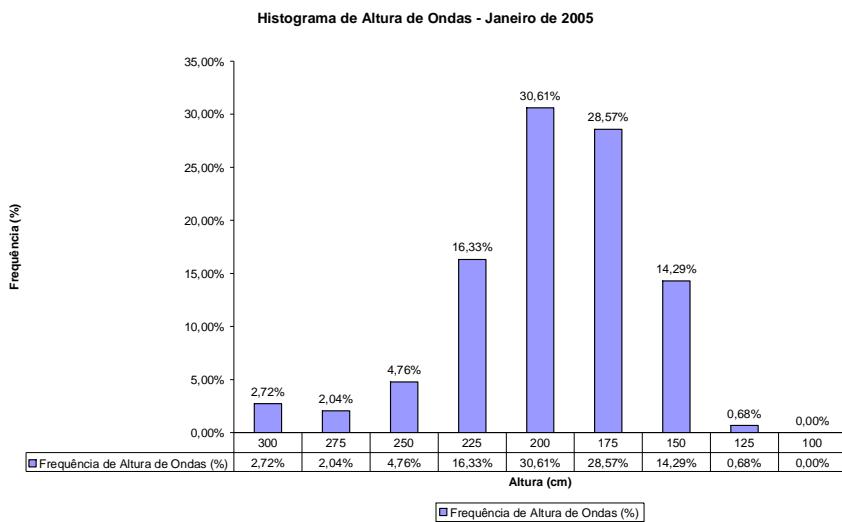
### **Regime de ondas do Pecém**

O regime de ondas do Pecém (apresenta-se com dois tipos de ondas): a uma, as ondas do tipo sea (vagas), ondas sob a influência do vento na área de geração (aparecem próximas à linha de costa do Pecém com direções de 75° a 120° N); a duas, as ondas do tipo swell (ondulações), ondas fora da área de geração e não mais sob a influência do vento (se originam no hemisfério Norte e chegam no local do porto do Pecém vindo de N a NE, com uma direção média das ondas - para períodos de aproximadamente 10 a 16 s, de cerca de 20° a 45° N).

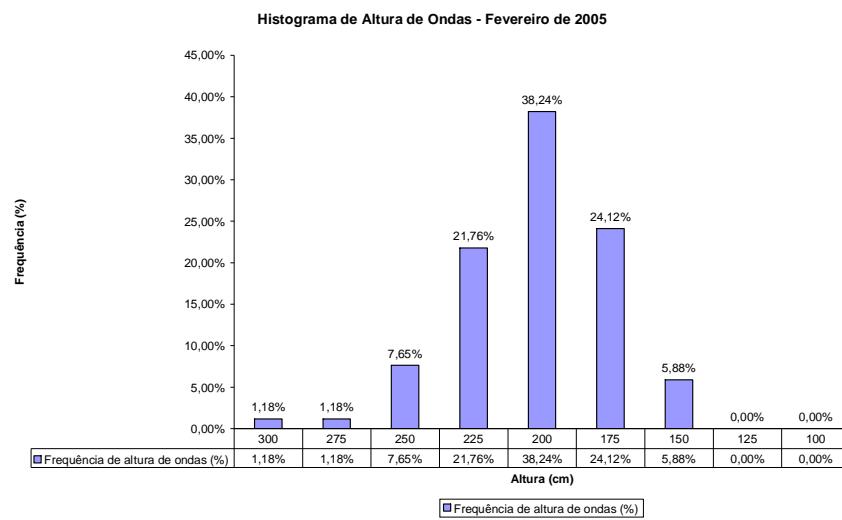
**Quadro 8 - Pecém – Ce. Classes de Tpeak (s). Março/1997 a Outubro/2001**

Tpeak(s)	Freqüência	F.Relativa (%)
3-4	10	0,06
4-5	702	4,38
5-6	3919	24,47
6-7	4261	26,61
7-8	2427	15,16
8-9	656	4,10
9-10	947	5,91
10-11	288	1,80
11-12	655	4,09
12-13	444	2,77
13-14	507	3,17
14-15	542	3,38
15-16	328	205
16-17	219	1,37
17-18	0	0,00
18-19	88	0,55
19-20	20	0,12
Total	16013	100,00

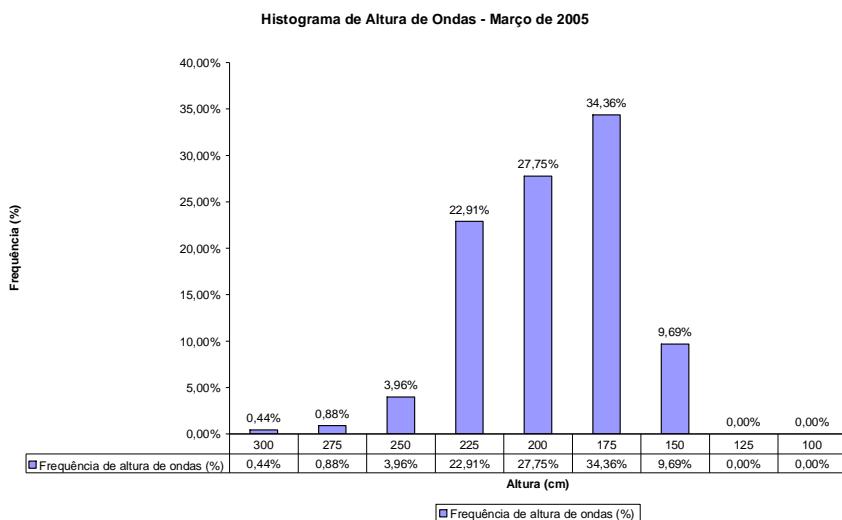
Deste modo, concluiu-se também que a incidência do clima de ondas gerada no Atlântico norte, ondas swell, tem maior intensidade que, porém, decaem nos meses subseqüentes. Observou-se, outrossim, que nos meses de agosto do referido período raramente ocorrem ondas swell com direção entre 10° e 70°, concentrando-se em ondas com direção entre 90° e 120°, o que se estabelece em clima sea durante este mês. A altura de onda raramente excede 2,0 metros. O modelo numérico é, portanto, calibrado com os eventos mais representativos para a elaboração das simulações, sendo inseridos no modulo PMS e NSW do MIKE21, os dados de onda com altura significativa, período e direções mais freqüentes. Nos gráficos 12, 13 e 14, são resumidos os dados de alturas de ondas medidos pelo ondógrafo do porto do Pecém, nos meses de janeiro /março de 2005. Outrossim, nos gráficos 15, 16 e 17, apresentam-se os dados de direção de ondas dos meses de janeiro a março de 2005.



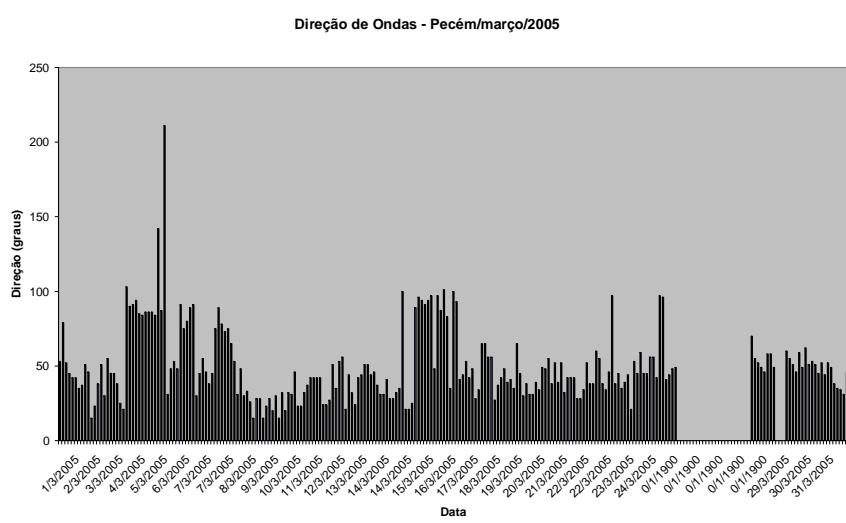
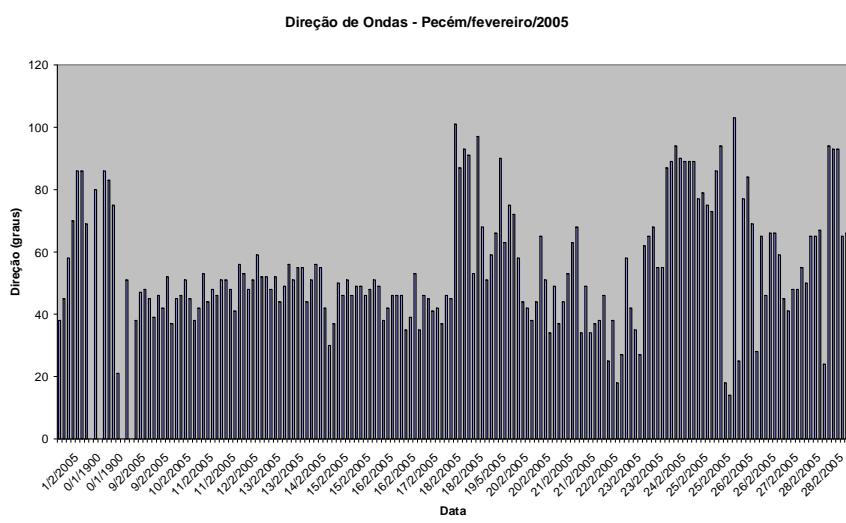
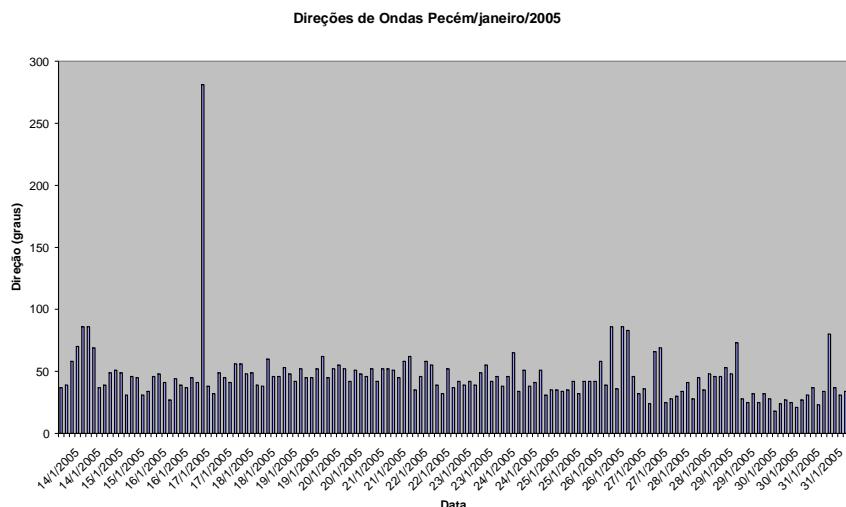
**Gráfico 1 - Dados de Ondas do Pecém. Janeiro de 2005.**



**Gráfico 2 - Dados de Ondas do Pecém. Fevereiro de 2005.**



**Gráfico 3 - Dados de Ondas do Pecém. Março de 2005.**



Os dados de marés são obtidos através do marégrafo do tipo linigrafo LNG-15M instalado no Pecém pertencente ao INPH. O marégrafo encontra-se localizado no lado esquerdo da estrutura de acesso ao quebra-mar (figura 23) com as seguintes coordenadas: Latitude: 3° 32' 8.24'' S; Longitude: 38° 47' 52.98'' W.

O marégrafo é do tipo digital e os dados são registrados de 2 em 2 minutos a 5 em 5, de forma que os dados em um mês atingem cerca de 16.981.

O regime de marés na região pode ser caracterizado como de meso-marés de periodicidade semi-diúrna; a amplitude média registrada pelo marégrafo tem oscilações aproximadas entre -20 e 320 cm em referimento ao M.S.L. (mean sea level) com valores médios da ordem de 155 cm.

Por outro lado, ondas de sea e de swell ocorrem simultaneamente na região do Pecém dominando, em ação combinada e de correntes geradas pelas ondas, o transporte litorâneo ao longo das praias ao redor, quase sempre em maiores proporções do transporte em suspensão, devido à turbulência provocada pela arrebentação da onda, e que se move devido às interações fluído – partícula, sem contato com o leito. Por sua vez, o transporte por arrasto, geralmente em menor proporção, contribui para totalizar o volume de sedimentos transportado ao longo da costa litorânea. O transporte por arrasto resulta das forças de fricção no leito do mar que variam exponencialmente com as velocidades do escoamento e que define-se como a parcela que está em maior ou menor contato com o leito durante o transporte (Fredsøe & Deigaard, 1994, p. 195).

## **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Os resultados obtidos com o objetivo de acompanhar a evolução da linha de costa da região adjacente ao Terminal Portuário do porto do Pecém, sujeita a influências provocadas pela ação das ondas e correntes, após a sua implantação deixaram evidenciado o equilíbrio da linha de costa original a Sudeste do eixo da ponte de acesso ao porto, e um engordamento da linha de costa a Noroeste, comprovando os resultados apresentados através dos Estudos Matemáticos.

Assim, com base no monitoramento realizado na região do porto do Pecém, no período de 1997 a 2005, é possível inferir que esta região é possuidora de dois climas de ondas principais, um formado por ondas de swell, com direção D entre 15° e 70°, formada pelas ondas geradas no Atlântico norte, com maior incidência deste tipo de ondas no período de novembro a abril, e outro formado por ondas sea, de maior incidência entre maio e outubro, geradas nas proximidades da costa e com direção D entre 70° e 120°.

A redução da energia das ondas geradas pelo efeito de sombra criada pelo quebra-mar provoca mudança no regime na linha de costa a Noroeste do terminal.

Enfim, a construção do Terminal Portuário do Pecém causou uma quebra da harmonia natural da região costeira aonde foi instalada, provocando um certo grau de desordem no movimento das ondas e dos sedimentos, alcançando ao final dos 10 anos de sua construção, tendência a estabilização no regime de ondas.

#### **Recomenda-se:**

Acompanhamento sistemático do regime de ondas nos próximos 5 anos para constatar o equilíbrio ora verificado. Estudo e elaboração de um novo lay-out da situação geral da costa na região do Porto do Pecém com o fito de manter estabelecidas as características aqui verificadas, evitando desequilíbrios que poderão prejudicar a manutenção do estado em que se encontra após 10 anos de seu início. Praticar um gerenciamento integrado e sustentável da zona costeira de abrangência do Terminal Portuário do Pecém, concentrando-se em questões bem definidas referentes ao gerenciamento costeiro. Desenvolver e manter bancos de dados para a avaliação e o gerenciamento da zona costeira de interesse.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Abecasis & Outros. A Previsão das Características das Ondas do Mar, p. 14/15. - Abecasis, F. M.; Castanho, Pires; Carvalho, Reis de «A previsão das características das ondas do mar» Lisboa, 1957. 218 p.
- Abecasis, F. Manzanares; Castanho, J. Pires; Carvalho, J. Reis. A Previsão das Características das Ondas do Mar. Lisboa, 1957. Memória No 114. Ministério das Obras Públicas. Lab. Nacional de Engenharia Civil, C. D. U. 532, 593.
- Airy, G. B. (1845). Tides and waves. Encyc. Metrop., Art., 192: 241 – 396.
- Barber, N. F. & URSELL, F., 1948, "The generation and propagation of
- CERC (1984) Shore Protection Manual U. S., Army Coastal Eng. Res. Center. Corps of Engineers.
- Department of the Army – Engineering and Design. Coastal Engineering Manual (CEM). U. S. Army Corps of Engineers Washington DC, 20314-1000. July, 2003.
- Department of the Army – Water Experiment Station, Corps of Engineers. 3900 Halls Ferry Road, Vicksburg, Mississipi, Novembro 2, 1995, p. 5-3 / 5-4.
- DHI - Danish Hydraulics Institute. Mike 21, A Modelling System for Estuaries, Coastal Water and Seas. Theory and Users Manual. 1999.

- Fredsøe, J e Deigaard, R. 1972 Mechanics of Coastal Sediment Transport. Advanced Séries on Ocean Engineering, vol. 3 World Scientific Singapore, 369 pp.
- Fredsøe, Jørgen and Rolf Deigaard, Mechanics of coastal sediment transport, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., USA.
- Gerstner, F. (1802). Theorie der Wellen. [Em inglês: Tech. Report, series 3, issue 339, Univ. of Calif. Inst. Eng. Res. Waves Research Laboratory, 1952.].
- Komar, P. D. Beach Process and Sedimentation. New Jersey: Prentice Hall, 1966.
- Laplace, P. S. (1776). Recherches sur quelques points du système du monde. Mem. De l'Acad. Roy des Sciences, Ouvrues Complètes, 9, no. 88, 187 pp.
- LITPACK - Sediment Transport and Littoral Processes LITPACK; Comprehensive Software Package for the Modelling of Noncohesive Sediment Transport in Waves and Currents. Developing by Danish Hydraulic Institute (DHI).
- Melo Filho, E., 1993, "The Sea Sentinels Project : Watching Waves in MIKE 21 - Modeling System for Estuaries, Coastal Waters and Seas, Professional Engineering Software Package for 2D. Developing by Danish Hydraulic Institute (DHI).
- Pitombeira, Erasmo da Silva. Cálculo do Transporte Litorâneo de Sedimentos na Costa do Rio Grande do Sul, Tramandaí. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Mestrado, 1973.
- Pitombeira, Erasmo da Silva. Processos Litorâneos em Regiões Costeiras do Estado do Ceará. Trabalho de Livre Docência. Universidade Federal do Ceará, 2005. Fortaleza, Ceará.
- Relatório final – outubro/97 – INPH/DHI/UFC. INPH: 91/97; Código: Pecém-1040/01.
- Stokes, G. G. (1847). On the theory of oscillatory waves. Trans. Cambridge Phil. Soc., 8:441. [também no Mathematical and physical papers, Cambridge Univ. press, London, 1880, 1: 197-229.].
- Suguio, K. Dicionário de Geologia Marinha. São Paulo, T. A. Queiroz, 1992.
- Vieira, Luiz Alberto de Almeida. Tese de Doutorado: Verificação e Comprovação das Modelagens Hidrodinâmica e de Transporte de Sedimentos na Área Costeira do Porto do Pecém. Universidade Federal do Ceará, janeiro de 2007.
- Zenkovich, V.P. Processes of Coastal Development. Oliver and Boyd, London, 1967, 739p.