

COMPROVAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DA LINHA DE COSTA E DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA ÁREA COSTEIRA DO PORTO DO PECÉM

Luiz Alberto de Almeida Vieira, Dr.¹; Erasmo da Silva Pitombeira, Livre Docência² & Raimundo Oliveira de Souza, Dr³.

RESUMO--- A concepção do porto de Pecém requereu do governo estudar e impedir as possíveis alterações da linha da costa próximo às estruturas construídas. Então, através de simulação numérica, utilizando-se moderno software, MIKE21 e LITPACK, estudou-se e previu-se o comportamento da linha de costa nos dez anos seguintes ao início da construção, 1996. Este trabalho verifica a realidade daquela previsão através de comparações da sua evolução desde o início da sua construção, mostrando-se as transformações causadas pelo transporte do sedimento em dois períodos de estudo, antes e depois da construção do embarcadouro provisório.

ABSTRACT--- The conception of the port of Pecém required the government to study and to hinder the possible alterations of the coast line next to the constructed structures. Then, through numerical simulation, using modern software, MIKE21 and LITPACK, it was studied and foreseen the behavior of the shoreline in the ten following years from the beginning of the construction, 1996. This work verifies the reality of that forecast through comparisons of its evolution since the beginning of its construction, revealing the transformations caused by the sediment transport in two periods of study, before and after the construction of the provisory docking.

PALAVRAS CHAVES: ondas, costa, zona costeira

¹ 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@deha.ufc.br ou lvieira_lvieira@yahoo.com.br

² 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

³ 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

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 vidas próprias, 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).

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.

Justificativa

Obtém-se resultados da linha de costa mais confiáveis quando se tem medições por um período de tempo razoavelmente longo. A falta de dados históricos de ondas apurados na região do Pecém, tornou necessária a utilização de registros de ondas de Mucuripe anteriores a campanha iniciada no Pecém, ou seja, de 1991 a 1995, juntamente com os dados posteriores já registrados no Pecém. Com o registro dos dados do Pecém que vem sendo realizados desde 1997 é possível realizar novas simulações, através de modelagens matemáticas, capazes definir as condições atuais da referenciada região Costeira do Pecém. Passado quase 10 anos do projeto inicial da obra do Porto do Pecém importa verificar até onde o projeto referido foi exato nas suas previsões.

Objetivos

O presente trabalho, com base na tese de doutorado do autor (Vieira, 2007) tem como objetivo acompanhar a evolução da linha de costa da região adjacente ao Terminal Portuário do porto do Pecém, Figura 1, no alto, sujeita a influências provocadas pela ação das ondas e correntes, após a sua implantação, bem como, avaliar os processos de transporte de sedimentos e com isso pesquisar as mudanças da linha da costa daquela região



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

CARACTERIZAÇÃO

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. 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.

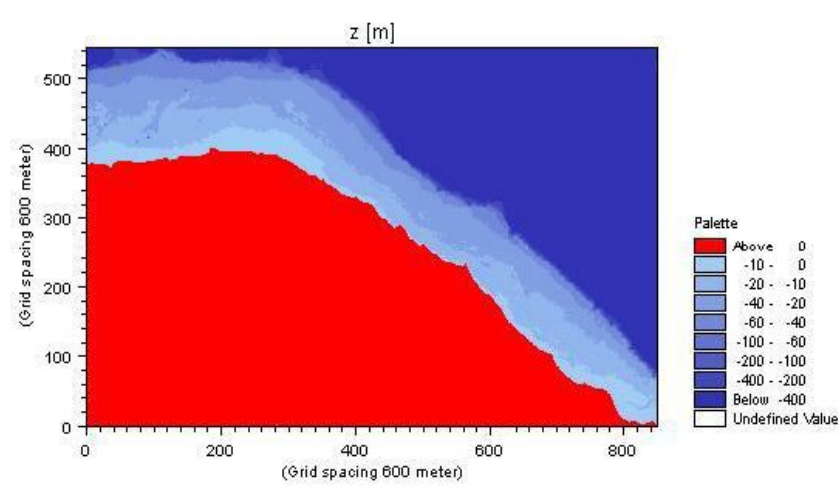


Figura 2 – Batimetria do Pécem Elaborada com o software MIKE 21.

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 relacionado 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.

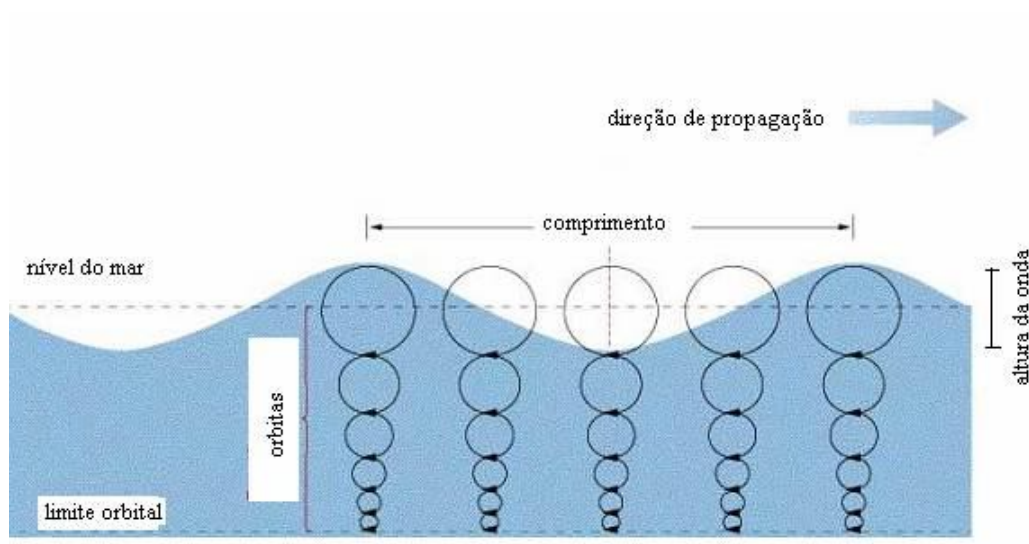


Figura 3 - Uma onda simples e suas partes – Desenvolvimento orbital na formação de uma onda.

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 serie de Fourier na sua dedução. A clássica teoria de Gerstner, desenvolvida mais tarde por Rankine, Airy e

Gaillard, mas abandonada posteriormente por falta de confirmação experimental, conclui que o perfil das ondas em águas profundas é uma curva gerada por um ponto do raio de um círculo que rola sem escorregar, apoiando-se superiormente numa reta horizontal (uma trocóide).

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. Por sua vez, Froude (1862) e Rankine (1863) desenvolveram as equações dessa curva. 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 profunda; 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 ρ 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

PROFUNDIDADE RELATIVA	ÁGUAS RASAS	ÁGUAS INTERMEDIÁRIAS	ÁGUAS PROFUNDAS
	$\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$	$\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	$\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$
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	$\zeta = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} \frac{\sinh [2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
8. Pressão de Superfície	$p = \rho g (\eta - z)$	$p = \rho g \eta \frac{\cosh [2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$	$p = \rho g \eta e^{\frac{2\pi z}{L}} - \rho g z$

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).

Transporte de sedimento

Qualquer um que esteve na praia e sentiu nos pés a areia movendo-se entre seus dedos sabe que as ondas e as correntes que alcançam a linha de litoral, shoreline, podem facilmente mover a areia. Estes movimentos causam erosão e engordamento das praias fazendo com que se corroam e reconstruam-se.

Todavia, falta, exatamente, a compreensão e o saber de como este acontecimento tem limitado a habilidade de cientistas e engenheiros em simular o ciclo natural da praia. Em consequência, as predições a respeito do impacto do próximo evento fortuito ou de força maior (provocado por obras costeiras ou naturais), ou do movimento em longo prazo da costa natural não são tão boas quanto se necessita que sejam, afetando decisões de gerenciamento costeiro.

Faz-se, portanto, 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.

O transporte por arrasto segue a formulação de Fredsøe e Deigaard (1992), a qual foi desenvolvida para incluir a ação combinada de ondas e correntes e as condições existentes na zona de arrebentação.

A energia refletida de uma parede vertical pode ser significativa na dinâmica costeira. Neste sentido, mostra-se na Figura 4 que a interação entre a refração e difração através da praia e reflexão ocorrida a partir da estrutura costeira cria uma zona em que o sedimento transportado ao longo da costa (longshore) se acumula. Comparativamente, no topo dessa figura, à esquerda, visualiza-se, de modo similar, o caso do porto do Pecém, em que se pode observar o transporte de sedimento, decorrente da interação refração / difração, dirigindo-se para a ponta do Pecém.



Figura 4 – Transporte de sedimento decorrente da interação refração/difração na costa de Porto Rico e a ocorrência no litoral do Porto do Pecém com o transporte dirigindo-se à ponta do Pecém.

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 5 - 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 6.



Figura 6 – Ponta do Pecém parcialmente inundada na preamar.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O perfil de praia no início das obras do porto do pecém.

Resultados apresentados no relatório final (1997) pelo grupo de trabalho INPH/DHI/UFC – (Instituto de Pesquisas Hidroviárias).

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, Figura 7.

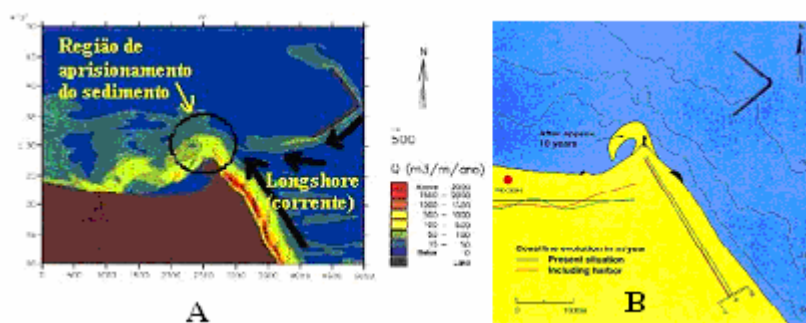


Figura 7 – (A) Taxas potenciais de transporte de sedimentos ao longo do litoral de Pecém após a construção do quebra-mar do Porto do Pecém.-CE. (B) - Dinâmica da linha de costa para situação prevista para o ano de 2006

A equipe de técnicos e cientistas pertencentes ao Instituto de Pesquisas Hidroviárias –INPH, ao Danish Hydraulic Institute –DHI, da Dinamarca, e a Universidade Federal do Ceará - UFC, concluiu que ocorre assoreamento a barlar do molhe construído e erosões à sotamar e um pontal conectado a terra que se desenvolveria após a construção do porto crescendo tanto em direção ao largo como para o ocidente, além da possibilidade de que a difração da onda em torno do pontal poderia causar uma divergência local da corrente litorânea e a conseqüente deriva de sedimentos conduzindo a erosão temporária da linha de costa imediatamente a Oeste da projeção do pontal na linha de costa. Assim, foi estimado o recuo / avanço da linha de costa para 10 anos após a construção do porto, cujo resultado mostra-se na Figura 7 (B). Conforme poderão ser observados visualmente, os resultados previstos pelo modelo, coincidem com a realidade do impacto causado pela construção do porto no período previsto de dez anos a partir de 1996.

Parte dos sedimentos acumulados é transportada pela ação das ondas swell num total estimado no pontal da ordem de $85.000 m^3/ano$. Taxa de transporte dirigida para a costa: $30.000m^3/ano$; Taxa total de sedimentos acumulada em frente e imediatamente a Oeste do promontório: $115.000m^3/ano$. A previsão da evolução da linha da costa do Pecém para 10 anos após a construção do porto, identificou a ocorrência de deposições de sedimentos em frente à ponta do Pecém, e a ocidente dela, por efeito de abrigo do porto, **Figura 7 e Figura 8**.

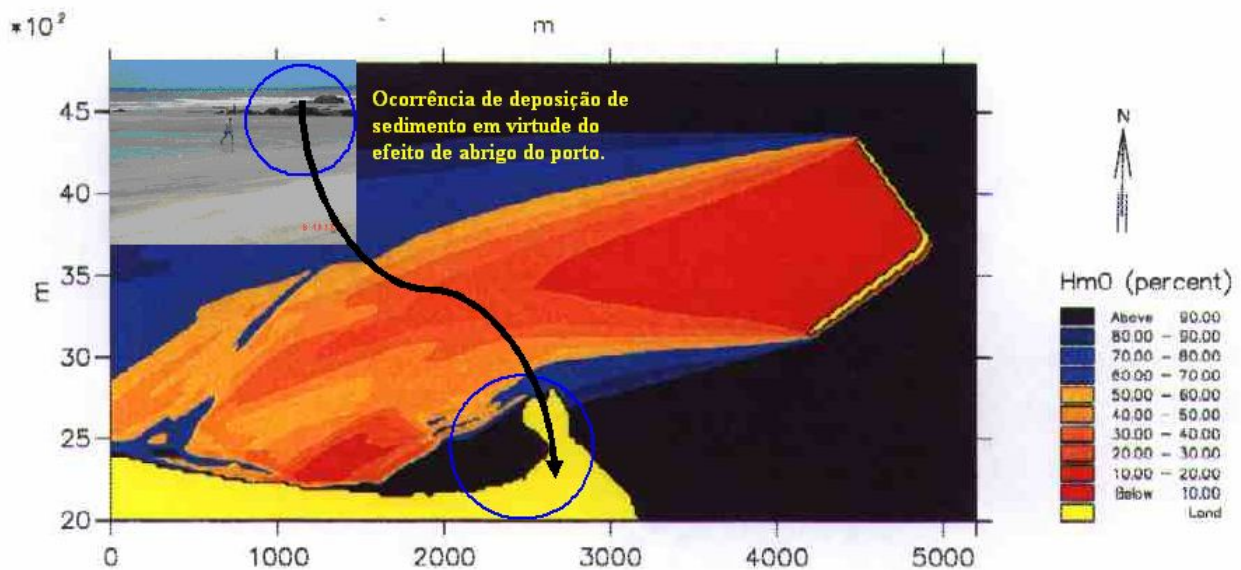


Figura 8 - O efeito de abrigo do porto sobre o campo litorâneo de ondas

Dinâmica da linha de costa - situação prevista para o ano de 2006.

Impacto costeiro antes e depois do TEP.

No início das obras do porto Pecém houve a necessidade da implantação de um embarcadouro provisório para o transporte do material de construção do seu quebra-mar, obra que bloqueou completamente o transporte de sedimento litorâneo e o resultado foi um rápido assoreamento do lado direito (barlamar) e erosão no outro lado (sotamar). A Figura 9 (A) representa a evolução da linha de costa nas vizinhanças do ancoradouro provisório, prevista para ocorrer dentro de um período de 2 anos após a construção do quebra-mar, todavia, embora que para este fim, foram utilizados dados estatísticos do Mucuripe, os efeitos na linha de costa decorrentes da construção do terminal de embarque provisório e previsto no Relatório Final tiveram seus resultados comprovados.

Devido a este terminal de embarque provisório - TEP construído para permitir o aportamento dos barcos transportando pedras para a construção do quebra-mar do porto, obteve-se dois momentos do processo de mudança da linha de costa neste local: **o primeiro**, até o ano 2000 ocorreu, em decorrência do TEP, erosão a sotamar – observe e compare na Figura 9, em (B), o lado esquerdo, sendo invadido como também se vê em (D), e assoreamento a barlamar – observe e compare que, em (B), a linha de costa toca o início do TEP e, em (D), a área assoreada do lado direito, barlamar. Após a retirada do TEP, **segundo momento**, a partir do ano 2000 em que o sedimento acumulado passou a ser transferido para Oeste, invertendo-se o processo, conforme será explicado adiante, e que se pode observar em (E) com o realinhamento da linha de costa (região circulada), voltando a situação anterior.

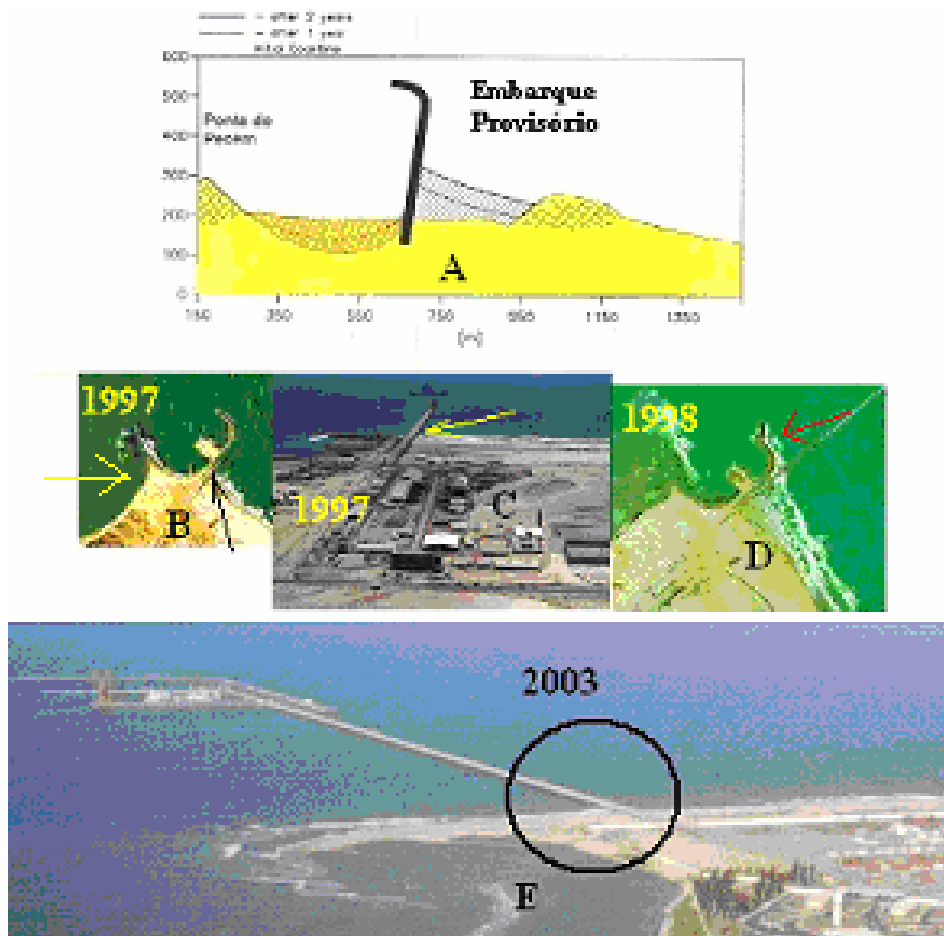


Figura 9 – A) Embarcadouro Provisório - Previsão; B) Embarcadouro Provisório. Ano 1997; C) Embarcadouro Provisório, pouco antes do acréscimo; D) Embarcadouro Provisório, com o acréscimo. Ano 1998; E) Situação após a retirada do embarcadouro provisório. Ano 2003.

Desse modo, uma onda que se propaga, com a interferência do TEP interpondo-se ao seu caminhamento, gera umas zonas abrigadas, imunes à chegada das ondas, portanto 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.

De acordo com o esquema da figura supra mencionada, vê-se que o quebra-mar de proteção foi desenvolvido paralelamente, à ponte de acesso, por um trecho de 900 m, abrigoando os piers das ondas provenientes dos quadrantes leste e sudeste, e por um trecho de 800 m paralelo aos piers, formando ângulo de 90° à esquerda com o primeiro trecho, proporcionando assim o abrigo das

ondas provenientes do quadrante norte, em que foram empregados cerca de 2,2 milhões de m³ de blocos de rocha, transportados por intermédio de barcaças auto-propulsoras, a partir do atracadouro provisório - TEP, a oeste da Ponta do Pecém, para embarque dos blocos. Na verdade, o sedimento assoreado a barlar foi tanto, conforme pode ser constatado comparando na figura supra (A, B, C, D) - observe o assoreamento a barlar e a erosão a sotamar; e as ondas coincidindo com o final do TEP, de modo que houve necessidade de acrescer o TEP, como indicado em (E), a fim de permitir seu uso como embarcadouro para os barcos que transportavam o material necessário a construção do quebra-mar do porto do Pecém, até seu final, o que se fez numa extensão de cerca de 50 metros e um desvio de 45° em relação ao eixo da ponte. A comparação de (B, C, D, E) permite distinguir perfeitamente a erosão e o assoreamento em decorrência da estrutura construída (TEP), com visível assoreamento a barlar, erosão a sotamar e com invasão do nível do TEP.

Este resultado permite concluir que nesta região praiana há um grande potencial de transporte de sedimento, de nascente para poente, capaz de causar grandes impactos quanto sujeito a um tipo de construção como esta que ocorreu nesta fase de construção do porto. Este efeito, causado na linha de costa devido a construção do quebra-mar, a que se costuma denominar de efeito sombra, decorrente do acúmulo de sedimento ao longo de uma obra costeira e que se dá imediatamente após sua construção, causando também erosão de um lado do quebra-mar, evidentemente, perdurou até o ano 2000, oportunidade em que, dada a conclusão do quebra-mar do porto, pode ser, finalmente retirado. Com isso, parte da dinâmica costeira daquela região pode ser recuperada e a situação se normalizada, como será observado através dos resultados obtidos.

Evolução da linha de costa após a retirada do TEP

Por volta do ano 2003/2004, após a retirada do TEP, já se podia ver a tendência de formação em frente a ponta do Pecém, a ocidente, de um pontal, decorrente da deposição de sedimentos. A figura 12 E mostra este efeito crescendo ao longo da linha de costa. Passados os dez (10) anos, no ano de 2006, este pontal se apresenta com a forma prevista na modelagem, conforme se pode visualizar observando a Figura 10, em que se vê o pontal já formado à ocidente conectado à terra.



Figura 10 - Vista aérea do porto do Pecém.

Para melhor comparar veja-se a Figura 11 em que se apresentam a Figura 7 (B), a Figura 9 (E) e a Figura 10 lado a lado com os três períodos comparados: A) Esquerda: previsão obtida a partir do software Mike 21 para o ano 2006; B) Intermediária: situação por volta do ano 2003/2004, cerca de três anos após a retirada do TEP; C) Direita: Foto aérea no ano 2006. O que muito claramente confirma as previsões.



Figura 11 - Vistas do Pontal. Comparação diversas épocas até 10 anos

CONCLUSÕES

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.

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

É importante ressaltar que a interrupção temporária da movimentação de sedimentos ao longo do litoral provocada pela presença do Terminal Provisório – TEP, barrando se caminhamento natural, causou grande assoreamento a Sudeste do terminal e erosão a Noroeste e, em consequência, redução da linha de costa a Noroeste, que restou restabelecida em aproximadamente 5 anos, após sua retirada, resultando no retorno das condições da movimentação dos sedimentos e na gradual recuperação do equilíbrio da linha de costa nas adjacências do porto.

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, conforme fora previsto nos cálculos simulados, através dos estudos com o Mike21 e Litpack, nova conformação natural, com forte tendência a estabilização da linha de costa atual.

RECOMENDAÇÕES

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;

Preparação de perfis costeiros que identifiquem as áreas críticas, inclusive as regiões erodidas, os processos físicos, os padrões de desenvolvimento, os conflitos entre os usuários e as prioridades específicas em matéria de gerenciamento;

Desenvolver e manter bancos de dados para a avaliação e o gerenciamento da zona costeira de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

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.

Avaliação dos impactos na Morfologia costeira através de modelagens numéricas, provenientes da implantação do Porto do Pecém – Ce.

Barber, N. F. & URSELL, F., 1948, "The generation and propagation of

DHI - Danish Hydraulics Institute. Mike 21, A Modelling System for Estuaries, Coastal Water and Seas. Theory and Users Manual. 1999.

Fredsøe, Jørgen and Rolf Deigaard, Mechanics of coastal sediment transport, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., USA, 1992.

Frost, H. 1963. Under the Mediterranean, Marine Antiquities. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. p. 278.

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.

Korteweg, D. J., and G. de Vries (1895). On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves. Phill. Mag., series 5, 39: 422-43.

Laplace, P. S. (1776). Recherches sur quelques points du système du monde. Mem. De l'Acad. Roy des Sciences, Oeuvres 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).
- Monitoramento Ambiental – Levantamento dos perfis de raia para controle da linha de costa nas adjacências do terminal portuário do Pecém – Ce., a partir de 9/12/96 - INPH.
- Monitoramento Ambiental da Região de Implantação das obras do Porto do Pecém a partir de Março de 1997 , INPH.
- Monitoramento Ambiental da Região de Implantação das obras do Porto do Pecém a partir de Março de 1997 , INPH.
- 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.
- Russel, J. S. (1844). Report on waves: 14th Meeting Brit. Assoc. advanc. Sci., pp. 311-90.
- Stokes, G. G. (1847). On the theory of oscillatory waves. Trans. Cambridge Phill. Soc., 8:441.
[também no Mathematical and physical papers, Cambridge Univ. press, London, 1880, 1: 197-229.].
- The American Heritage* ® *Dictionary of the English Language, Fourth Edition*
Copyright © 2000 by Houghton Mifflin Company. Published by the Houghton Mifflin Company.
All rights reserved. © 1996-2004 yourDictionary.com, Inc. All Rights Reserved.
- 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. Fortaleza. Ceará. 2007.