

VERIFICAÇÃO E COMPROVAÇÃO DAS MODELAGENS HIDRODINÂMICA 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, Dr.³.

RESUMO--- A fim de compreender e prever evoluções geomorfológicas em mares e em estuários litorais necessita-se de um modelo que descreva a dinâmica do movimento da água, o movimento do sedimento e a evolução de limites erodíveis (como o fundo). Os últimos dois módulos requerem a informação quantitativa sobre a erosão, a deposição e o transporte do sedimento. As estruturas são construídas ao longo da costa para várias finalidades e causam modificações no ambiente natural com mudança circunstanciais da linha de costa. A concepção do porto de Pecém requereu do governo estudar e impedir as possíveis alterações da linha de costa próxima 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. Os resultados para a dinâmica da linha de costa da região do porto de Pecém foram obtidos 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, em comparação com os resultados determinados pelas simulações numéricas mencionadas.

ABSTRACT--- In order to understand and predict geomorphologic evolutions in coastal seas and estuaries a model is needed which describes the motion water dynamics, sediment movement and the boundaries erodible evolution (like the bottom). The latter two modules require quantitative information about erosion, deposition and sediment transport. The structures are built long the coast for some purposes and cause modifications in the natural environment with change of the circumstantial shoreline. 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. The results of the shoreline dynamics in the port of Pecém region had been gotten 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, in comparison with the results determined by the numerical simulations.

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_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 (diques, quebra-mares e estruturas offshore, projetos de dispersão de efluentes em zona marinha), 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.

Justificativa

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 (1997), sobre o título: Avaliação dos Impactos na Morfologia Costeira, Através de Modelagens Numéricas, Provenientes da Implantação do Porto do Pecém – Ce. 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.

Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo acompanhar a evolução da linha de costa da região adjacente ao Terminal Portuário do porto do Pecém, Figura 1, no alto, bem como, avaliar os processos de transporte de sedimentos litorâneo utilizando as simulações obtidas com os programas: MIKE21; LITIPACK.



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.

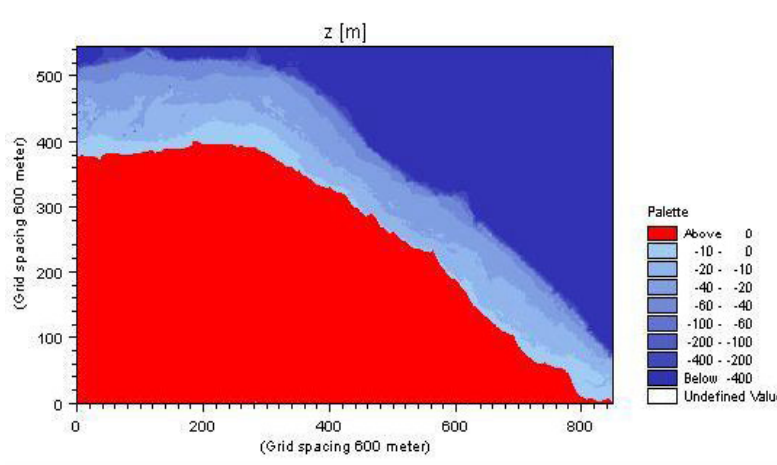


Figura 2 – Batimetria do Pécem Elaborada com o software MIKE 21.

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. 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 resultam 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.

Dinâmica das Ondas

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). As teorias matemáticas ondulatórias dividem-se em: teorias irrotacionais e teorias rotacionais, estas 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.

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; 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.

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

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. Mostra-se na Figura 3 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 3 – Transporte de sedimento decorrente da interação refração/difração

O transporte de sedimento pode dar-se por arrastamento, por suspensão e na água, *wash load*, este tipo de transporte é, em geral, desconsiderado no cálculo. O transporte por arrasto resulta das forças de fricção no leito do mar que variam exponencialmente com as velocidades do escoamento e que se define como a parcela que está em maior ou menor contato com o leito durante o transporte (Fredse & Deigaard, 1994, p. 195). 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.

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



Figura 5 – Ponta do Pecém parcialmente inundada na preamar.

METODOLOGIA

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). Dividiu-se, então, o presente trabalho em duas etapas pois, 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 6**, 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.

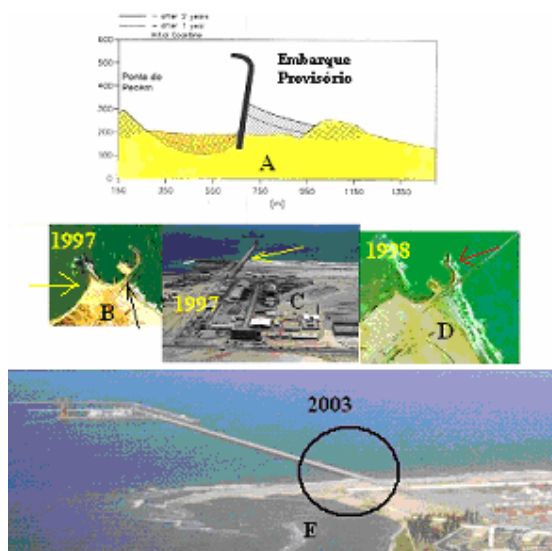


Figura 6 – A) Embarcadouro Provisório - Previsão; B) Embarcadouro Provisório. Ano 1997; C) Embarcadouro Provisório, pouco antes do acréscimo; D) Embarcadouro Provisório, com o acréscimo. Ano 1998; E) Situação após a retirada do embarcadouro provisório. Ano 2003.

Assim, tomaram-se os perfis de praia levantados em campo na região em estudo e, a partir deles foram gerados os perfis da linha de costa na cota zero, comparando-se as diversas situações em várias épocas desde a construção do porto Pecém.

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

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 (Vieira, 2007).

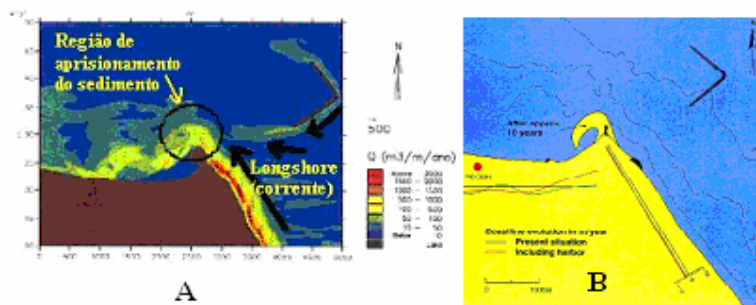


Figura 7 – (A) Taxas potenciais de transporte de sedimentos ao longo do litoral de Pecém após a construção do quebra-mar do Porto do Pecém.-CE. (B) - Dinâmica da linha de costa para situação prevista para o ano de 2006

Parte dos sedimentos acumulados é transportada pela ação das ondas swell num total estimado no pontal da ordem de $85.000 \text{ m}^3/\text{ano}$. Taxa de transporte dirigida para a costa: $30.000 \text{ m}^3/\text{ano}$; Taxa total de sedimentos acumulada em frente e imediatamente a Oeste do promontório: $115.000 \text{ m}^3/\text{ano}$. 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**.

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

Impacto costeiro antes e depois do TEP.

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.

Segundo Vieira (2007), na 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 à 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.

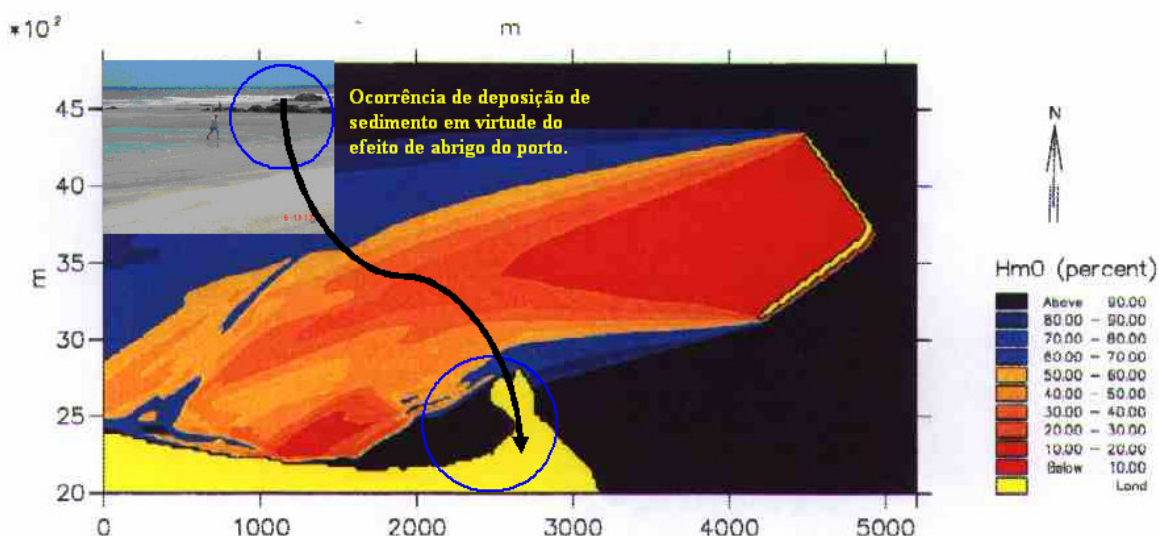


Figura 8 - O efeito de abrigo do porto sobre o campo litorâneo de ondas

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. O que muito claramente confirma as previsões. Contemple-se também os resultados, ainda sob a influência do TEP, de 05/09/1999, comparado ao obtido após a retirada do TEP de 05/04/2001, Figura 9, com a ocorrência de assoreamento nas seções S1W a S10W, a oeste do eixo da ponte.

As Figura 9 até a Figura 14 apresentam os perfis de linha de costa de três levantamentos ocorridos em dezembro de 1996 (que praticamente, representa o litoral virgem, sem obra portuária, com algumas áreas do Pecém sujeitas a erosão, consequência do corte parcial da realimentação eólica originária das dunas existentes entre a vila e a Ponta do Pecém); maio de 1999 (executado com o TEP implantado); e abril de 2001, já sem o TEP. Já em abril de 2001 realizou-se um levantamento, que se comparado ao de dezembro de 1996, traz, como resultado, a demonstração de um assoreamento nas seções S1E e S10E (Figura 10); forte erosão ao largo (**Figura 11**), aproximadamente, a partir da seção S16W para oeste, provocando o ataque à costa, apresentando-se crítico no trecho entre as seções S17W e S22W, que se reduz gradativamente até a seção S28W, para em seguida assorear até S30 W.

Todavia, a comparação entre os levantamentos de dezembro de 1996 e abril de 2001 verifica-se, Figura 10, que a sueste, entre as seções S-2E e S-10E, restou assoreado um volume de 42.900

m³/ano, ou cerca de 185.890,34 m³ em 52 meses (período entre dezembro de 1996 e abril de 2001), Quadro 2. Entretanto, do levantamento de maio de 1999, Figura 12, vale lembrar, em que havia a interferência do TEP, pode ser observado em planta que a sueste do TEP e eixo da Ponte ocorreu um assoreamento numa extensão de aproximadamente 600 m, entre as seções S2E e S10E.

Neste ponto, observe-se que os volumes assoreado ou erodido podem ser aproximados pela área entre as curvas, pois a estas são diretamente proporcionais. Este mesmo levantamento (de 1999) comparado com o de abril de 2001 já apresenta no trecho sueste do litoral um início de erosão, como já se poderia esperar pela retirada do TEP, apesar de apresentar ainda um volume considerável de assoreamento com cerca de 45.996 m³/ano, conforme volumes estimados apresentados no Quadro 1, ou 88.160,34 m³ em 23 meses (entre maio de 1999 e abril de 2001) que, todavia, encontra-se dentro da previsão volumétrica esperada à vista de que o volume de sedimento previsto acumulando no pontal conectado à terra (em frente a Ponta do Pecém) foi de 85.000 m³/ano, de acordo com resultados anteriores. Apenas no intuito de confirmar as observações estabelecidas nesta pesquisa, se tomarmos os dados obtidos no levantamento de 1999 e de 1996 (**Figura 13**), é possível observar que entre os trechos entre S1W / S3W e S4W até S10W, a oeste do TEP e eixo da ponte, ocorreu uma grande erosão numa extensão aproximada de 700 metros. Fato decorrente da zona de sombra proveniente do TEP e do próprio porto. A partir da estaca S10W para oeste, no rumo da localidade do Pecém, as linhas de costa se aproximam tendo como início de erosão a região compreendida entre as seções S17W e S22W, numa extensão aproximada de 500 metros, se estendendo até a estaca S30W, em cerca de 1.200 metros, no processo erosivo. Todavia, a partir da estaca S22W para oeste, apesar da erosão ainda apresentada, pode-se dizer, dada a proximidade das duas linhas de costa, que o litoral se mantém como em 1996, aproximadamente.

Portanto, pode-se inferir que no entorno da Ponta do Pecém, entre as seções S1W e S10W, há um avanço da isobatimétrica para o largo, e a partir desta seção para oeste, as isobatimétricas aproximam-se do litoral denotando uma forte erosão ao largo, o que provoca o ataque na costal, com trecho crítico situando-se entre as seções S17W E S22W.

Os dois quadros, Quadro 1 - Volumes de assoreamento / erosão (oitavo levantamento - Resultados de Campo) e Quadro 2 - Volumes de assoreamento / erosão (nono levantamento - Resultados de Campo), esclarecem a movimentação dos sedimentos ao longo dos períodos: 1º período: de 05/05/1999 a 05/05/2001; 2º período: de 09/12/1996 a 05/04/2001.

A retirada do TEP, por sua vez, restabelecerá as condições de projeto, estando comprovado pelos resultados mostrados que sua presença, barrando o caminhamento original dos sedimentos marinhos na região, foi o responsável pelo assoreamento da região SE do terminal de embarque provisório e, bem assim, a erosão a NW.

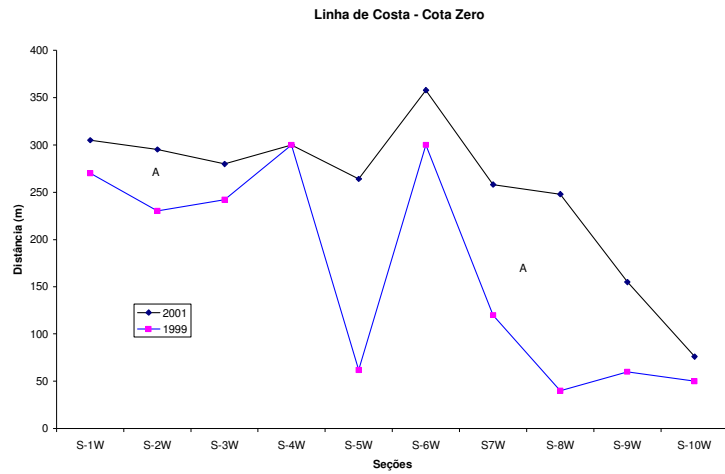


Figura 9 - Resultados dos levantamentos de 1999 (antes da retirada do TEP) e de 2001 (após).

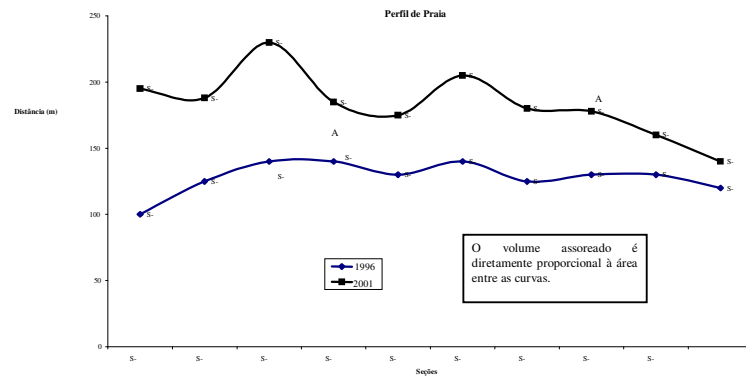


Figura 10 - Modificação da Linha de Costa. Trecho Suleste - Período 1996/2001.

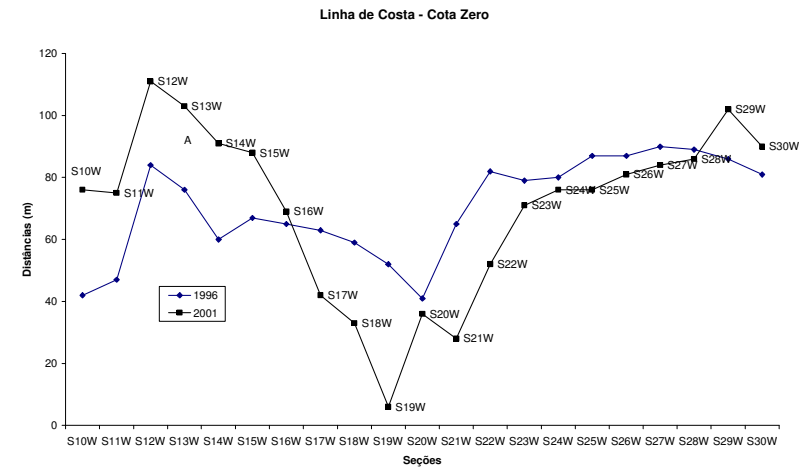


Figura 11 - Modificação da Linha de Costa. Trecho Oeste - Período 1996/2001.

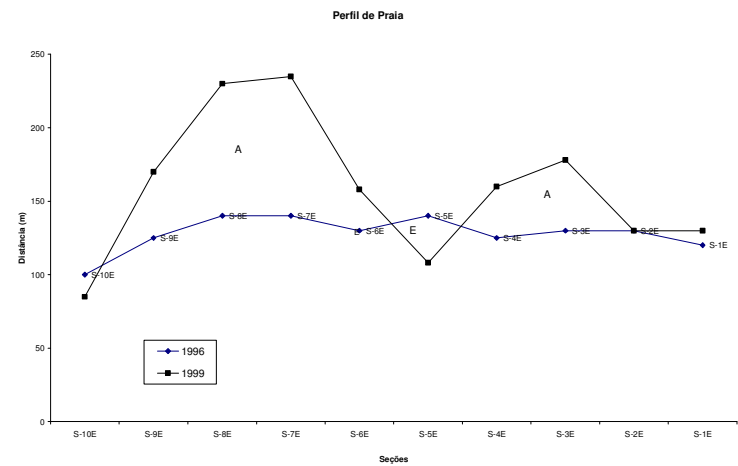


Figura 12 - Modificação da Linha de Costa. Trecho Suleste - Período 1996/1999.

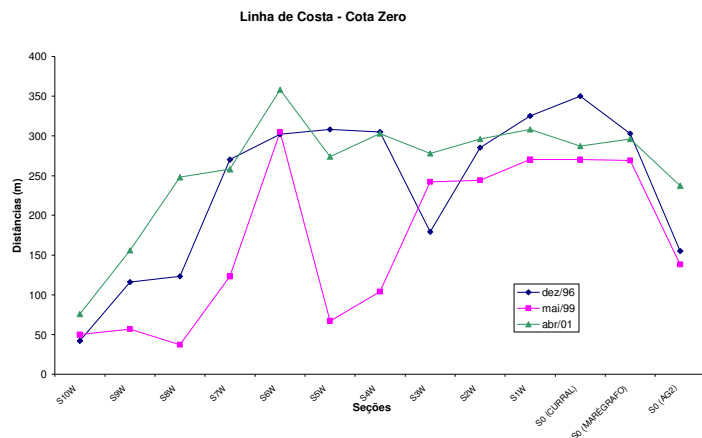


Figura 13 - Modificação da Linha de Costa. Trecho Oeste - Período 1996/1999.

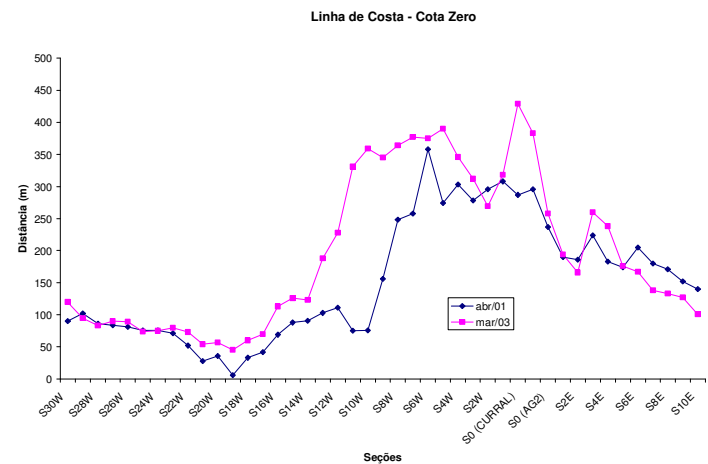


Figura 15 - Modificação da Linha de Costa. Trecho Oeste a Leste - Período 2001/2003.

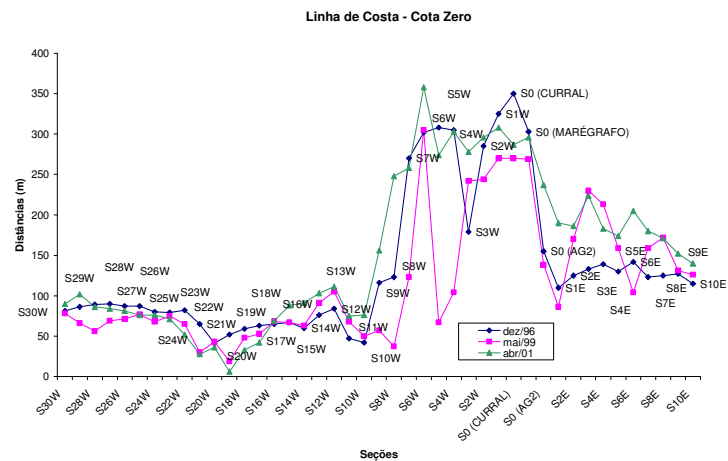


Figura 14 - Modificação da Linha de Costa. Seções de Oeste a Leste - Período 1996/2001.

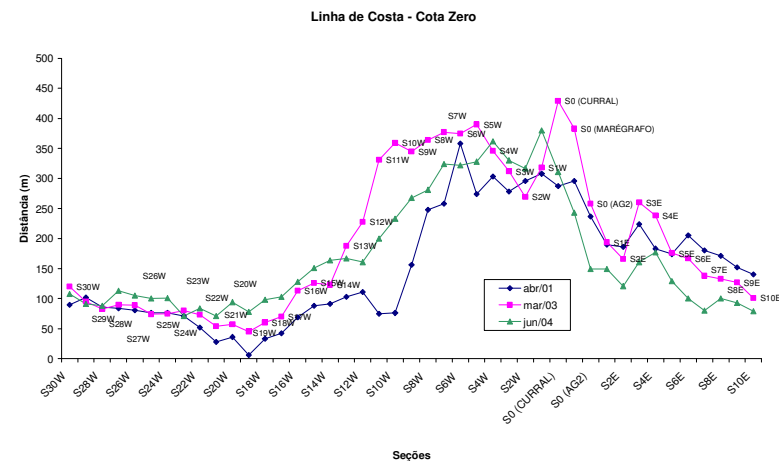


Figura 16 - Modificação da Linha de Costa. Trecho Oeste a Leste - Períodos 2001/2003/2004

Quadro 1 - Volumes de assoreamento / erosão (oitavo levantamento - Resultados de Campo)

Quadro Representativo dos volumes de assoreamento/erosão ⁴ (Comparação entre o oitavo e nono levantamento realizado)				
Período:		Início	5/5/1999	
Total de meses	23	Fim	5/4/2001	
Trecho	Volume (m ³ /período)	Reflexo	Volume (m ³ /mês)	Volume (m ³ /ano)
S1E - S30W	357227,54	A	15532	186384
S2E e S10E	88160,34	A	3833	45996
Volume total	445387,88	A	19365	232380
Volume total esperado				115.000
S17W e S22W	-12052,58	E	-524	-6288
S3W e S10W	202337,75	A	8797	105564
S2E e S10E	88160,34	A	3833	45996
S2E e S2W	139034,37	A	6045	72540
S2W e S16W	223190,25	A	9704	116448
S16W e S				
26W	-24774,58	E	-1077	-12924
S26W a S30W	19777,5	A	860	10320

Quadro 2 - Volumes de assoreamento / erosão (nono levantamento - Resultados de Campo)

Quadro Representativo dos volumes de assoreamento/erosão (Comparação entre o oitavo e nono levantamento realizado)				
Período:		Início	9/12/1996	
Total de meses	52	Fim	5/4/2001	
Trecho	Volume (m ³ /período)	Reflexo	Volume (m ³ /mês)	Volume (m ³ /ano)
S1E - S30W	22492,93	A	433	5196
S2E - S10E	185890,34	A	3575	42900
Volume total	208383,27	A	4008	48096
Volume total esperado				115.000
S0Marég. - S10E	223001,06	A	4288	51456
S0Marég. - S4W	-39168,5	E	-753	-9036
S4W - S16W	86415,35	A	1662	19944
S16W - S28W	-66489,64	E	-1279	-15348
S28W - S30 W	4625	A	89	1068

Assim, a partir deste ponto, serão analisados apenas os resultados posteriores à retirada do TEP tendo em vista que, evidentemente, durante sua permanência, os resultados se apresentaram deturpados pela sua influência conforme já explicitado, cuja presença provocou uma interrupção temporária da movimentação do sedimento ao longo do litoral na costa do Pecém. Ressalte-se que é possível continuar a análise dos resultados apenas considerando as áreas das regiões entre os

traçados das linhas de costa, a vista de que este resultado, apesar de representar uma projeção da área verdadeira, é diretamente proporcional ao volume nas respectivas seções e regiões. Deste modo, é possível identificar que o décimo levantamento, em 21/03/2003, comparado com o nono, de 05/04/2001, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, determinam a constatação da conclusão supra, relacionada ao que resultou a retirada do TEP, verificando-se que com a sua retirada deu-se o retorno da movimentação originária dos sedimentos, ficando também constatada a tendência gradual de recuperação do equilíbrio da linha de costa nas adjacências do Porto do Pecém.

Atente-se ainda para o trecho entre S-18W e S-30W em que a linha de costa busca uma maior estabilidade sofrendo já apenas uma pequena alteração no seu traçado. Deste modo, constatou-se que a erosão a leste do eixo da ponte de acesso ao terminal do Porto do Pecém, localizado entre as seções S-2E e S-10E, foi da ordem de 113.000,00 m³. Enquanto que do lado Oeste do eixo da ponte de acesso ao terminal do Porto, deu-se assoreamento em praticamente toda sua extensão de praia, num volume da ordem de 883.000,00 m³, a menos do trecho compreendido entre as seções S-26W e S-30W, que foi erodido em cerca de 9.500,00 m³.

Os resultados do levantamento realizado em junho de 2004 denotam a tendência a estabilidade da linha de costa e da normalidade de transporte de sedimentos sem o efeito comprometedor do TEP. Como calculado no levantamento supra mencionado, ocorreu uma erosão a leste do eixo da ponte de acesso do Terminal do Porto do Pecém da ordem de 117.360 m³, entre as seções S-2E e S-10E. Efetivamente, a retirada do TEP devolveu as condições normais de transporte de sedimentos da região em análise, tendente a sua estabilização, que será constatada com a análise dos resultados dos próximos levantamentos em 2005 e 2006, quando se completam 10 anos do início da construção do Terminal do Porto do Pecém. Portanto, é possível concluir que enquanto sob a influência da existência do TEP teve-se um assoreamento, entre as seções S-2E e S-10E, de cerca de 223.001,06 m³; tem-se, após a sua retirada, uma erosão continuada de, aproximadamente, 230.360,00 m³ (113.036,40 m³ segundo o levantamento de março de 2003 comparado com o de abril de 2001 e, 117.360,00 m³ segundo o levantamento de junho de 2004, comparado com o de março de 2003).

Observa-se na comparação das linhas de costa dos anos 2001/2003/2004 a tendência à sua estabilização. Esta tendência tem se confirmado nos anos subseqüentes definindo a linha de costa já estabelecida tal qual se observa, inicialmente, pelos resultados obtidos dos levantamentos de 2003, 2004 e 2005, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ao Figura 18. Os traçados da linha de costa dos períodos de 2004 a 2006, Figura 18, já não deixam dúvida da definição que se tem do estado definitivo após a construção do porto do Pecém nestes dez anos a partir de 1996, o que se

⁴ E: áreas de erosão (-); A: áreas de assoreamento (+)

observa nas áreas entre as curvas representativas da linha de costa, diretamente proporcionais às projeções dos volumes assoreamento / erosão, apresentando, a linha de costa, um movimento tendente a sua regularização e a uma posição de estabilidade.

A comparação dos resultados do levantamento de abril de 2006 com os resultados de 1996, Figura 19, mostram como se estabeleceu a linha de costa nos dez (10) anos que se seguiram à construção do porto do Pecém. Considerando que a ponte tem seu eixo coincidindo com a seção S-2E vê-se que a linha de costa no trecho S-2E a S-10E foi pouco modificada erodindo no trecho entre S-7E e S-10E. Entretanto, já na região entre S-5W e S-30W houve engordamento, principalmente entre S-5W e S-22W, em que se observa um recuo da linha de costa crescente e variando de 50 metros em S-6W até atingir cerca de 200 metros em S-11W, reduzindo-se a partir daí até atingir cerca de 5 metros em S-24W, votando a crescer lentamente até alcançar 30 metros em S-30W.

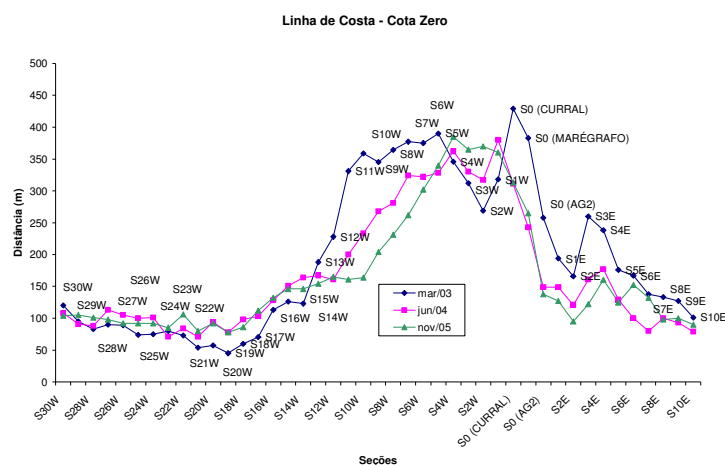


Figura 17 - Modificação da Linha de Costa. Trecho Oeste a Leste - Períodos 2003/2004/2005

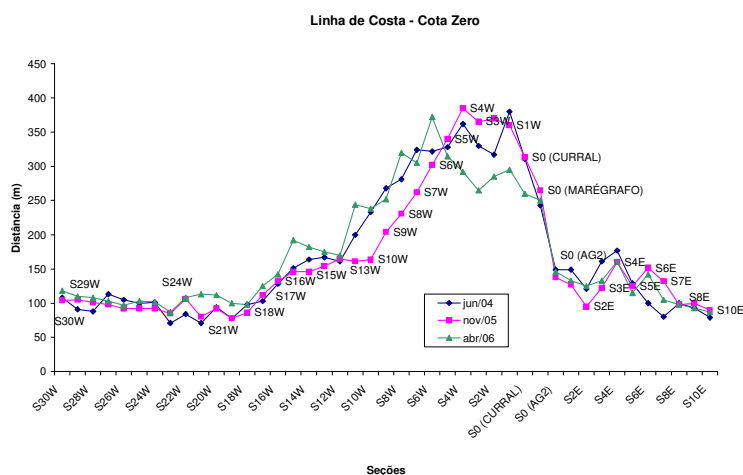


Figura 18 - Modificação da Linha de Costa. Trecho Oeste a Leste - Períodos 2004/2005/2006

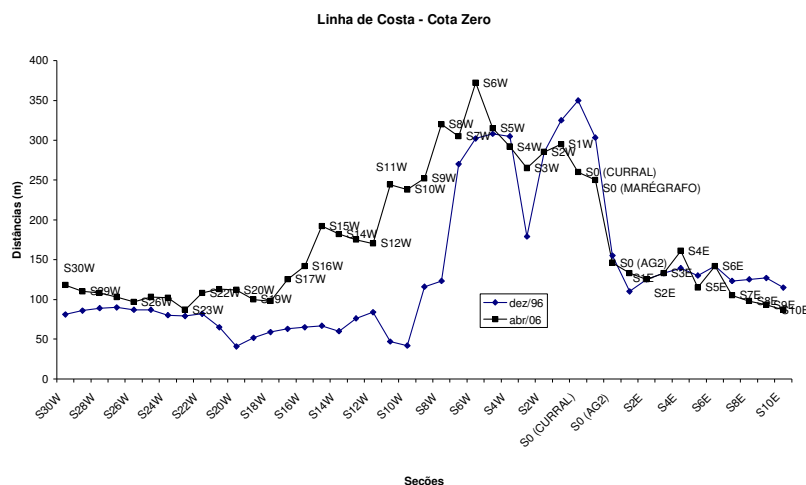


Figura 19 - Modificação da Linha de Costa. Trecho Oeste a Leste - Períodos 1996/2006

Os cálculos dos volumes confirmam os resultados acima apresentando um volume acumulado, de 1996 até abril de 2006 na região S-1E a S-30W, em cerca de 800.000 m³ (lembrando que a retirada do TEP ocorreu no ano 2000, tem-se que a movimentação de sedimentos, regularizando o transporte deu-se desde então). Os resultados do balanço entre dezembro de 1996 e abril de 2006 podem ser resumidos nos quadros **Erro! Auto-referência de indicador não válida.** e

Quadro 4 - Resumo dos Cálculos de Áreas e Volumes entre os Perfis de **Praia**.

Um novo traçado da linha de costa foi preparado com dados obtidos em campo em outubro de 2006, onde é feita a comparação das curvas de nível de +3,0 (três); 0,0 (zero) e a -1,0 (menos um), de dezembro de 1996 e de 2006 (Figura 20).

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.

Quadro 3 - Resumo dos volumes parciais e totais (Período: dez/1996 a abr/2006)

Período:	dez/1996 a abr/2006
Região	Volume (m ³)
S30W-S10E	781.817,77
S1E-S30W	758.163,25
S2E-S10E	23.654,52
S2E-S2W	11.550,62
S2W-S16W	586.744,48
S16W-S26W	146.357,00
S26W-S30W	46.588,50

Quadro 4 - Resumo dos Cálculos de Áreas e Volumes entre os Perfis de Praia

	Região		Erosão	Assoreament o	Resultant e	Volume (m ³)
S	30	W	2,585	132,15	129,57	
S	29	W	0,97	156,90	155,93	14.275,00
S	28	W	7,96	129,82	121,86	13.889,50
S	27	W	4,98	92,67	87,69	10.477,50
S	26	W	10,91	82,15	71,24	7.946,50
S	25	W	0,50	73,68	73,18	7.221,00
S	24	W	0,02	142,76	142,74	10.796,00
S	23	W	2,84	77,40	74,56	10.865,00
S	22	W	7,02	95,20	88,18	8.137,00
S	21	W	9,83	148,04	138,21	11.319,50
S	20	W	0,00	221,14	221,14	17.967,50
S	19	WA	0,00	204,45	204,45	21.279,50
S	19	W	0,00	110,80	110,80	5.516,88
S	18	W	0,00	119,79	119,79	8.647,13
S	17	W	0,00	204,09	204,09	16.194,00
S	16	W	1,55	206,80	205,25	20.467,00
S	15	W	7,52	340,34	332,82	26.903,50
S	14	W	3,18	405,32	402,14	36.748,00
S	13	W	4,48	348,77	344,29	37.321,50
S	12	W	11,65	244,46	232,81	28.855,00
S	11	W	4,26	685,66	681,40	45.710,50
S	10	W	0,40	661,39	660,99	67.119,50
S	9	W	44,91	407,19	362,28	51.163,50
S	8	W	1,04	781,81	780,77	57.152,50
S	7	W	0,64	535,62	534,98	65.787,50
S	6	W	0,00	685,68	685,68	61.033,00
S	5	W	0,00	420,15	420,15	55.291,50
S	4	W	15,92	224,91	208,99	31.457,00
S	3	W	191,36	17,74	173,62	1.733,13
S	2	W	13,24	186,89	173,65	1,35
S	1	W	82,23	123,82	41,59	10.223,90
S	0	Curral	136,76	91,84	44,92	109,36
S	0	Marégrafo	109,94	33,90	76,04	10.695,40
S	0	AG2	10,15	81,75	71,60	275,81
S	1	E	10,13	101,55	91,42	7.743,45
S	2	E	28,82	30,65	1,83	4.662,50
S	3	E	12,65	136,46	123,81	5.402,52
S	4	E	5,76	218,04	212,28	16.804,50
S	5	E	20,14	71,51	51,37	13.182,50
S	6	E	25,61	48,46	22,85	3.711,00
S	7	E	38,74	11,33	27,41	228,00
S	8	E	71,16	0,50	70,66	4.903,50
S	9	E	77,42	0,00	77,42	7.404,00
S	10	E	74,04	0,00	74,04	7.573,00

⁵ Os valores em vermelho são negativos.

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. 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.

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.

O assoreamento até abril de 2006 resultou num volume da ordem de 800.000 m³ na extensão de praia do lado Oeste ao eixo da ponte de acesso ao Terminal do Porto do Pecém, entre as seções S-1E e S-30W, com uma maior concentração no trecho entre as seções S-2W e S-16W, num volume da ordem de 586.743,13 m³. O assoreamento a leste do eixo da ponte de acesso ao terminal portuário do Pecém medido foi da ordem de 23.654,12 m³, na região compreendida entre as seções S-2E e S-10E. 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.

Recomenda-se:

Acompanhamento sistemático da linha de costa 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; 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.

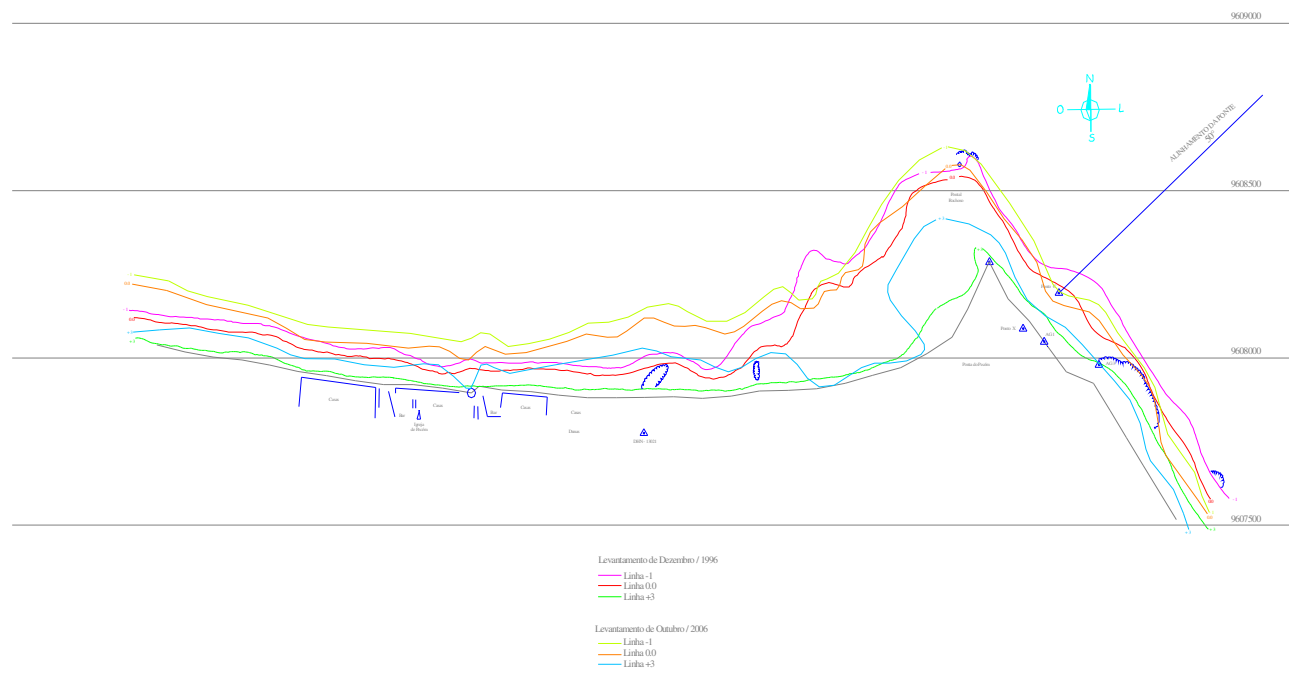


Figura 20 - Comparação da Linha de Costa. Ano 1996 X Ano 2006

BIBLIOGRAFIA

- 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 ocean waves and swell. I wave periods and velocities. Phil. Trans. Roy. Soc. London A, 240:527–560, 1948.
- 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.
- 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, Owuvres Completes, 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).
- Relatório final – outubro/97 – INPH/DHI/UFC. INPH: 91/97; Código: Pecém-1040/01.
- Stokes, G. G. (1847). On the theory of oscilatory waves. Trans. Cambridge Phill. Soc., 8:441. [também no Mathematical and physical papers, Cambridge Univ. press, London, 1880, 1: 197-229.].
- 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.