

Avaliação da hidrodinâmica costeira e das taxas de transporte longitudinal de areia nas praias de Cassino e Mar Grosso, RS, Brasil.

José A. S. Fontoura¹, Luiz E. Almeida³ e Lauro J. Calliari²

¹ Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Departamento de Materiais e Construção, Av. Itália s/n, Km 8, Campus Carreiros, CEP 9620-900, Rio Grande, RS, Brazil. Fone (53) 3233-6917. fontoura@dmc.furg.br

² Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Departamento de Geociências, Laboratório de Oceanografia Geológica, Av. Itália, Campus Carreiros, CEP 96201-900, Rio Grande, RS, Brazil. Fone (53) 3233-6518.

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. (IPH). Porto Alegre, RS, Brazil. Av. Bento Gonçalves s/n, Campus do Vale, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil.

RESUMO

Usando metodologia de coleta de sedimentos com armadilhas portáteis (fundo e suspensão) dentro da zona de surfe e metodologias de aquisição de imagens, topografia e sedimentologia conduzidas com o auxílio de filmadora, estação total e trabalhos em laboratório, respectivamente, determinou-se os parâmetros hidrodinâmicos, morfométricos e a deriva litorânea da região. Dados de ondas em águas profundas foram obtidos a partir de modelo do CPTEC/INPE. Os trabalhos de campo foram realizados em 50 campanhas distribuídas pelo período de 1 ano. Do total, 42 foram dedicadas exclusivamente a dados hidrodinâmicos e morfométricos enquanto que as 8 restantes foram utilizadas também para coleta de sedimentos. Ao mesmo tempo foram obtidos dados sobre a direção e velocidade dos ventos e das correntes longitudinais. Todos os dados foram obtidos em condições atmosféricas normais. Os trabalhos de campo foram conduzidos em 6 perfis transversais distribuídos entre as praias do Cassino e Mar Grosso (3 de cada lado da embocadura).

PALAVRAS-CHAVE: Transporte longitudinal, Deriva litorânea, Transporte de sedimentos costeiros.

ABSTRACT

The growing coastal occupation by urbanization and the presence of engineering investments to attend these demands has showed the need of detailed studies of littoral drift with the objective to determine the total and liquid longshore sand transport rate since this phenomenon play an important role in several aspects related to coastline evolution and coastal engineering.

Using stream-traps for collect sediments (bedload and suspended load) into the surf zone according the methodology described by Kraus [11], topographic and hydrodynamic data respectively obtained by a total station and video images, allowed the morphodynamic characterization of the study area. Deep water wave data were obtained by the WAVEWATCH-III model from the Brazilian National Space Research Institute (INPE) and compared with data acquired by a non directional wave rider at the same location (PNBoia Project). Wave characteristics at 15 m water depth and in the breaker zone were respectively obtained from Coli [5] and by visual observations. The field work was done in 50 field trips distributed along one year. Among the 50 field data collection, 42 were dedicated

exclusively to hydrodynamic and morphodynamic data, while 8 were also used for collect sediments. All acquired data were obtained in normal atmospheric conditions.

The field work was done in 3 cross-shore profiles distributed along a stretch of 10 Km of coast south of the Patos Lagoon inlet encompassing Cassino and Querência beaches and 3 cross-shore profiles distributed along a stretch of 10 Km of coast north of Patos Lagoon inlet called Mar Grosso beach. It was also studied the participation of bedload and suspended load transport and there are strong evidences that bedload represents approximately 18% of total transport.

The measurements indicate a bi-directional flow of sediments, with a low net transport towards the northeast, like following: Profile-1(07/01/03) 1.92 m³/h NE-SW; Profile-2 (07/19/02) 2.60 m³/h NE-SW, (01/16/03) 0.23 m³/h NE-SW e (02/20/03) 25.1 m³/h SW-NE; Profile-3 (05/02/03) 4.24 m³/h SW-NE; Profile-4 (09/05/03) 43.33 m³/h SW-NE; Profile-5 (01/17/03) 2.54 m³/h NE-SW e Profile-6 (02/21/03) 31.74 m³/h SW-NE . The low values of total and net transport rate found in this area are consistent with the rate of sediment accumulation south of the inlet in the last 90 years.

The results suggest that the low longitudinal transport rates can be associated to both the small angle of wave approach (70% below 3°, with the remaining 30% inferior to 8°) and low wave height values at the breaker line (85% below 0.70 m and only 5% above 1 m). The low local hydrodynamics can be associated with the presence of jetties, as well as with the presence of fluid mud banks at the nearshore area. These muddy areas can be responsible by the partial dumping of the incident wave energy and for the reduction of available sand to be transported towards the surf zone. Observations also suggest that the direction of the longshore current and the littoral drift is strongly dependent of the longitudinal wind component along the coast.

ADDITIONAL INDEX WORDS: Alongshore transport, Littoral drift, Coastal sediment transport.

INTRODUÇÃO

O estudo do transporte sedimentar dentro da zona de surfe não é uma preocupação nova para engenheiros costeiros e oceanógrafos. A sua importância se ombreia em dificuldades com as limitações impostas pelas condições inóspitas da zona de arrebentação. As restrições não se prendem somente aos recursos limitados dos equipamentos desenvolvidos com este objetivo, mas também as dificuldades em se representar adequadamente, por aproximações matemáticas, os fenômenos que ali ocorrem. Estimativas das quantidades de sedimentos transportados são importantes subsídios para o processo de gerenciamento costeiro e para o desenvolvimento de obras de engenharia. Entretanto, na opinião de muitos autores (Castanho, [2]; Lanfredi & Framiñan, [14]; Kraus, [11]; Van Rijn, [24]; Kamphuis, [12]; Miller, [18] e Elfrink & Baldock, [7]) pouco tem sido feito na condução de experimentos bem instrumentados, seja em ambiente natural seja em laboratório, principalmente quando comparado com a grande quantidade de estudos realizados sobre o transporte na região fora da arrebentação. Parece, portanto evidente a necessidade de maiores investimentos que permitam um aumento significativo da massa crítica de conhecimentos centrados nesta área.

O equilíbrio costeiro é em geral dinâmico, o fato de praias e linhas de costa que conhecemos apresentarem durante longos períodos a mesma disposição morfológica, não significa que os sedimentos encontrem-se em repouso todo este tempo. Pelo contrário, esta morfologia é mantida pela entrada e saída constante do sistema, em intervalo de tempo conhecido, de quantidades médias iguais de sedimentos. Esta é a noção correta do equilíbrio dinâmico de uma linha de costa.

Para que esse equilíbrio seja rompido é necessário que se componha uma nova disposição para as forças envolvidas no processo, destruindo o status anterior. Este rompimento geralmente ocorre por conta ou de fenômenos naturais, fruto de modificações intrínsecas da própria natureza, ou por ação do homem que através de obras de engenharia costeira altera o livre caminho dos sedimentos. A erosão e a acreção de sedimentos ao longo das linhas de praia são fenômenos oriundos deste desequilíbrio de

forças. Portanto, é fundamental que o engenheiro costeiro saiba reconhecer estas causas de desequilíbrio e saber como administrá-las.

As primeiras tentativas de medição científica do clima de ondas e da quantificação do transporte litorâneo na costa do RS são creditadas a Vitor Freire Motta [16] e Erasmo Pitombeira [19], respectivamente. Entretanto algumas limitações de ordem tecnológica não permitiram que fossem encontrados por este último valores líquidos de transporte condizentes com as indicações geomorfológicas. Quanto ao clima de ondas, embora algumas dificuldades em determinar os ângulos de incidência, em geral ficaram muito próximos dos valores atuais estabelecidos com o auxílio de ondógrafo direcional. Registros recentes obtidos com ondógrafo direcional (Strauch, [21]; Coli, [5]) permitiram uma revisão e atualização dos dados de ondas, principalmente na região de Rio Grande.

Este trabalho pretende cooperar no estudo do comportamento da hidráulica costeira entre a linha de quebra e o ponto de máximo 'run-up' buscando estabelecer a verdadeira grandeza da deriva litorânea na praia do Cassino, na praia do Mar Grosso e no entorno dos Molhes Leste e Oeste da Barra do Rio Grande, os resultados medidos estão consubstanciados por dados atuais de ondas, correntes e ventos.

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de interesse desta pesquisa compreende a embocadura do sistema lagunar Patos-Mirim e as praias oceânicas adjacentes. O ponto central da área localiza-se na embocadura da Barra do Rio Grande, nas coordenadas $32^{\circ} 9' 30''$ S e $52^{\circ} 5' 30''$ W. Ao sul, a área é limitada por um ponto na Praia do Cassino de coordenadas $32^{\circ} 14' 56''$ S e $52^{\circ} 9' 36''$ W e distante aproximadamente 10 Km da raiz do molhe oeste da Barra, enquanto que ao norte é limitada por um ponto na Praia do Mar Grosso, distante aproximadamente 10 Km da raiz do molhe leste da mesma Barra e localizado nas coordenadas $32^{\circ} 3' 28''$ S e $51^{\circ} 55' 48''$ W (Fig 1).

A linha de costa nesta região é orientada segundo o eixo nordeste-sudoeste (NE-SW), enquanto que o eixo central da embocadura da Barra do Rio Grande segue a orientação geral noroeste-sudeste (NW-SE), fazendo um ângulo de aproximadamente 73° com o alinhamento geral da costa. Os limites físicos dos processos estudados ficam circunscritos à zona de surfe e espraiamento, até a profundidade de aproximadamente 2 m.

Considerando estudos realizados pelo DHI (Danish Hydraulic Institute), com o modelo Mike-21 para o EIA-RIMA de ampliação dos molhes (FURG, [8]), a linha de costa foi subdividida em duas zonas conceituais: uma de influência dos molhes e outra fora desta. A influência direta da obra foi considerada importante até a distância de 3 Km da mesma.

Para realização desta pesquisa foram planejados 6 perfis, três na Praia do Cassino e três na Praia do Mar Grosso. Dois foram dentro da zona de influência, dois no limite desta e dois completamente fora da influência. Na praia do Cassino estes perfis ficaram assim distribuídos: Perfil-1 (P1) em frente a estação de maricultura da FURG (EMA), 10 Km ao sul do Molhe Oeste, nas coordenadas $32^{\circ} 12' 36''$ S e $52^{\circ} 10' 48''$ W; Perfil-2 (P2), em frente ao TERMINAL, 3 Km ao sul do Molhe Oeste, nas coordenadas $32^{\circ} 10' 14''$ S e $52^{\circ} 7' 44''$ W; Perfil-3 (P3) ao lado da raiz do Molhe Oeste, 300 m ao sul deste, nas coordenadas $32^{\circ} 9' 40''$ S e $52^{\circ} 6'$ W. Na Praia do Mar Grosso os perfis ficaram assim distribuídos: Perfil-4 (P4) ao lado da raiz do Molhe Leste, 300 m ao norte deste, nas coordenadas $32^{\circ} 8' 27''$ S e $52^{\circ} 4' 30''$ W; Perfil-5 (P5) distante 3 Km ao norte do Molhe Leste no ponto de coordenadas $32^{\circ} 7' 13''$ S e $52^{\circ} 3' 18''$ W; Perfil-6 (P6) em frente ao restaurante Caramujo, 10 Km ao norte do Molhe Leste, nas coordenadas $32^{\circ} 2' 20''$ S e $51^{\circ} 59' 40''$ W. Tudo conforme figura 2.

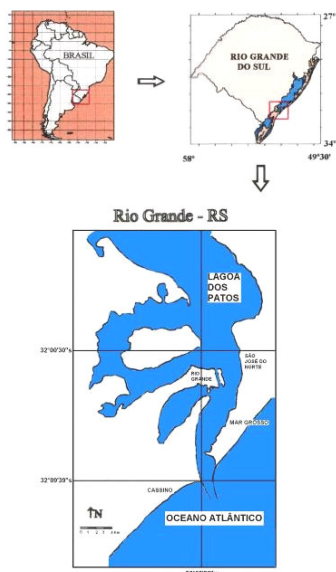


Figura 1 – Localização da área de estudos.

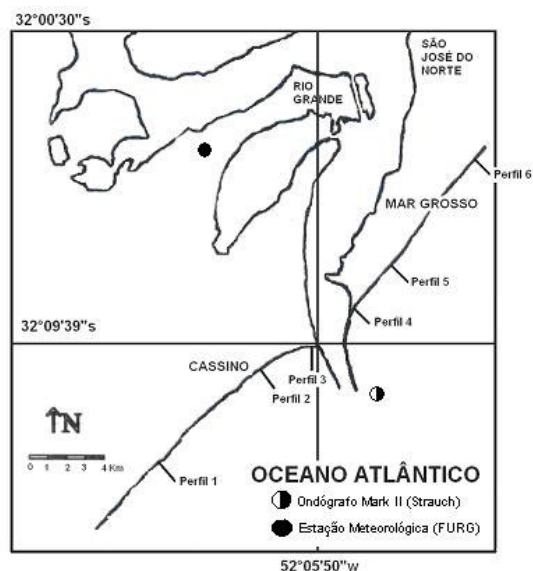


Figura 2 – Localização dos perfis na área de estudo.

MATERIAIS E MÉTODOS

A análise das opções disponíveis indicou o uso de armadilhas portáteis como sendo a melhor solução para a medição do transporte sólido. Este método foi utilizado durante muito tempo por geólogos para coleta de sedimentos fluviais. A partir de Kraus [11] este equipamento passou a ser utilizado também na coleta de sedimentos costeiros, principalmente dentro da zona de surfe.

O conjunto de medição é composto por um suporte metálico e um grupo de redes de captura (Fig 3 e 4). O suporte é construído em aço carbono e as soldas esmerilhadas para evitar acidentes com os operadores e com o tecido das redes. As redes são fixadas individualmente a quadros metálicos que funcionam como bocas de captura e estes, por sua vez, afixados ao suporte metálico por atilhos plásticos descartáveis. O suporte metálico possibilita a instalação simultânea de 10 redes. As mesmas são numeradas em seqüência vertical ascendente de 1-10. As redes de 1-6 têm comprimento de 60 cm. As redes 7 e 8 têm comprimento de 70 cm e as redes 9 e 10 tem comprimento de 110 cm. Estes são comprimentos mínimos a serem usados na arrebenção, valores menores podem acarretar perda de sedimento por retorno do fluxo. As redes são construídas com tela de poliamida, 100% nylon, M-250 (0,063 x 0,063 mm) e diâmetro do fio de 0,62 mm, sendo comercializadas em peças de 1 m de largura e comprimento desejado. A abertura da malha, neste caso, coincide com o limite inferior do tamanho dos sedimentos não coesivos (areia muito fina). Maiores detalhes sobre os equipamentos e sobre a aplicação do método podem ser obtidos em Fontoura [10].

As coletas devem seguir um procedimento padrão comum a todos os experimentos. Inicialmente obtém-se o perfil batimétrico da praia com o auxílio de uma estação total. O perfil é plotado e sobre ele são selecionados os pontos onde serão efetuadas as coletas de sedimento. Os pontos escolhidos são sinalizados com balizas coloridas. A seguir, as armadilhas portáteis são instaladas em cada um dos pontos balizados. Cada conjunto é posicionado tendo as bocas das armadilhas voltadas contra a corrente longitudinal e os pés do suporte completamente enterrados no fundo até que a boca da primeira armadilha toque o solo. O pesquisador deve posicionar-se atrás do suporte metálico e entre este e a praia, evitando alterar o carreamento natural do fluxo e minimizando o risco de ser jogado contra o suporte pela ação das ondas. Com correntes fracas as armadilhas ficarão abanando e

enredando nas pernas do suporte. Entretanto, para velocidades acima de 0,30 m/s permanecerão cheias e na horizontal, facilitando a coleta. As coletas ficam limitadas pela profundidade da água e altura das ondas, dificilmente ultrapassando o segundo banco. Quanto mais altas as ondas menor a possibilidade de trabalho em zonas mais profundas.



Fig 3 – Vista frontal da montagem.

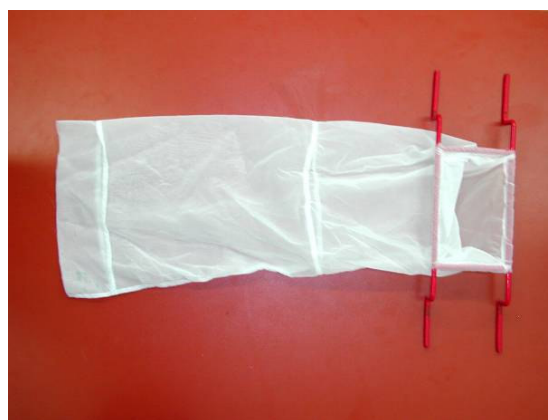


Fig 4 – Boca metálica e rede.

A primeira armadilha é a responsável pela coleta do sedimento de fundo (bedload), as demais são responsáveis pela coleta dos sedimentos em suspensão (suspended load). Após 5 minutos de coleta tem início junto ao fundo um processo erosivo intenso que compromete a fidelidade das medições. Para evitar o comprometimento dos dados amostrados, o tempo de coleta deve ficar entre 3 e 5 minutos. Após a coleta as armadilhas são marcadas com etiquetas plásticas, removidas, enroladas e guardadas em saco plástico próprio onde são registrados o nome do perfil praiial e o número e posição da estação de coleta. Um novo conjunto de armadilhas é instalado no suporte liberando-o para nova coleta. Detalhes da operação de coleta são apresentados nas figuras 5 e 6. Este método permite medir a taxa média de transporte dentro da zona de surfe, o comportamento vertical do transporte, a distribuição vertical dos sedimentos transportados, bem como estabelecer suas características sedimentológicas.

Os perfis praiiais foram obtidos com uma estação total marca Nikon, modelo DTM-330 e uma baliza regulável equipada com um prisma refletor. A profundidade da água (h_b) no ponto de quebra foi obtida diretamente do perfil transversal, representado pela distância entre o fundo e a linha d'água. A posição média da linha d'água foi definida em função da posição média entre o ponto de máximo e mínimo 'swash' registrados na face da praia durante os trabalhos de campo.

A largura média da zona de arrebenção (L_b) foi estimada a partir de informações visuais obtidas de fontes aerofotográficas com o auxílio do sistema ADAR-1000 (Fontoura & Hartmann, [9]). Em algumas oportunidades, quando a largura da arrebenção era pequena, foi possível medi-la com auxílio da estação total. Na prática, a largura da zona de arrebenção foi definida como sendo a distância horizontal entre a linha úmida na face praiial e a posição da linha de quebra mais distante na direção do oceano.



Fig 5 – Operação de coleta.



Fig 6 – Preparação e etiquetação.

A inclinação da praia na zona de arrebentação foi obtida diretamente do perfil transversal. A tangente do ângulo de inclinação ($\text{tg}\beta$) foi determinada pela relação entre a profundidade da água no ponto de quebra (h_b) e a distância entre este e a linha úmida da face praial (L_b).

As correntes longitudinais foram determinadas com bóia de deriva, cronômetro e trena. Efetuou-se três medições em cada perfil e posteriormente determinou-se as suas médias.

A intensidade e direção instantânea dos ventos locais foram obtidas com o auxílio de um anemômetro portátil e de uma bússola. Valores médios diários foram extraídos do banco de dados da FURG.

As características das ondas em águas profundas foram obtidas a partir de simulações com o modelo WAVEWATCH III (Tolman, [23]) realizadas pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para o local e período da pesquisa. A altura e o período das ondas no ponto de quebra foram extraídos da filmagem contínua dos campos de ondas (aprox. 10 min) e posterior análise em laboratório. Os ângulos de incidência das ondas no ponto de quebra foram obtidos com bússola e determinados originalmente em relação ao norte.

Conjuntos mínimos de 30 ondas observadas foram utilizados para determinar o valor médio das alturas das ondas no ponto de quebra. Os valores médios (rms) foram obtidos com o auxílio da equação (1):

$$H_{rmsb} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{b(i)}^2} \quad (1)$$

onde $H_{b(i)}$ é a altura de quebra da onda 'i' e N o número de medições realizadas.

O fluxo de sedimentos que passam por cada um dos perfis estudados é calculado com o auxílio das equações abaixo apresentadas (2), (3) e (4) conforme Wang et ali [25]. Os sedimentos que passam pelo espaço entre cada duas armadilhas consecutivas são estimados pela equação abaixo (2):

$$\Delta F_i = \left(\frac{\frac{F_{i+1}}{z_{i+1}} + \frac{F_{i-1}}{z_{i-1}}}{2} \right) \Delta z_i \quad (2)$$

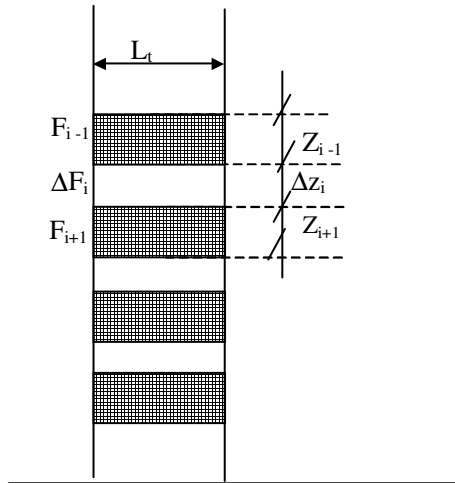


Fig 7 – Esquema mostrando fluxo nas armadilhas e espaçamento entre elas.

O fluxo total I_j que passa através do conjunto ‘j’ é calculado pela equação (3) abaixo:

$$I_j = \sum_{i=1}^n F_i + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta F_i \quad (3)$$

Vários conjuntos são instalados ao longo de um perfil, conforme mostra a Figura 8.

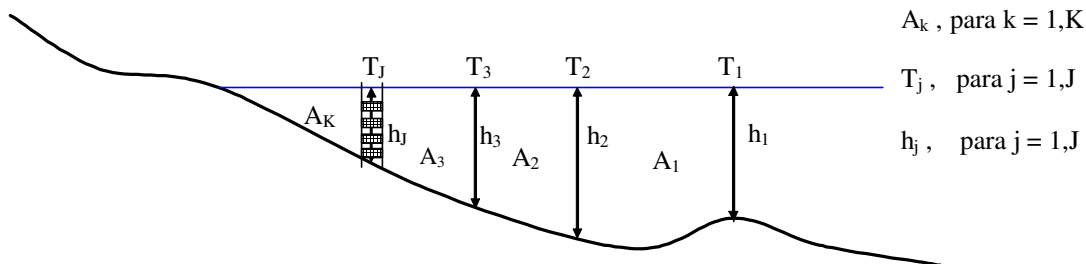


Fig 8 – Localização dos conjuntos (T_j), profundidade local (h_j) e área entre dois conjuntos consecutivos (A_k).

A taxa total de transporte longitudinal no perfil é dada pela equação (4) abaixo:

$$Q_{\text{Total}} = \sum_{k=1}^K \left(\frac{I_j + I_{j+1}}{2} \right) A_k \quad (4)$$

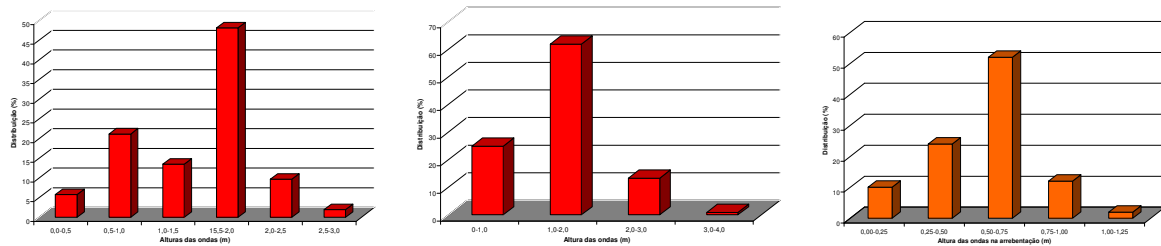
RESULTADOS

Foram realizadas 50 campanhas de medições distribuídas pelos 6 perfis durante as quatro estações do ano. Deste total, 42 dedicadas exclusivamente a medições hidrodinâmicas e meteorológicas enquanto que nas 8 restantes foram feitas estas mesmas medições acrescidas do transporte de areia.

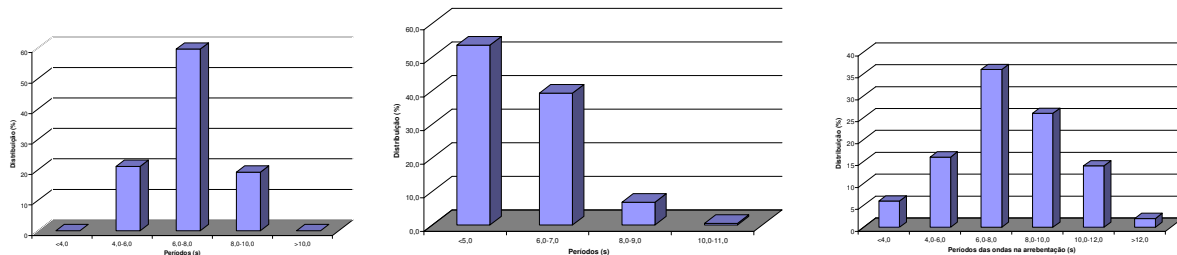
A seguir são apresentados e comparados os resultados das características das ondas observadas em três profundidades distintas e que bem exemplificam quanto o comportamento destas em relação a hidrodinâmica costeira é influenciado pela batimetria local. A extensa plataforma continental e a distribuição quase paralela das isobatimétricas em relação à linha de costa promovem a permanente refração das ondas que se aproximam da praia fazendo com que aquelas posicionadas nas extremidades do espectro (nordeste e sudoeste) girem até posições mais centrais próximas de sudeste. A figura 9 apresenta a altura, período e direção das ondas modeladas para águas profundas e medidas na cota de 15 m e no ponto de quebra respectivamente. A figura 10 mostra os efeitos da ação do fundo (refração) sobre a direção de propagação destas mesmas ondas desde águas profundas até a zona de quebra.

As ondas em águas profundas tiveram as suas alturas e períodos modelados comparados com dados obtidos por ondógrafo não direcional instalado em ponto muito próximo da região para a qual o modelo foi rodado. O resultado desta comparação sugeriu uma correlação muito forte entre valores preditos e medidos. A figura 11 mostra a correlação entre as alturas.

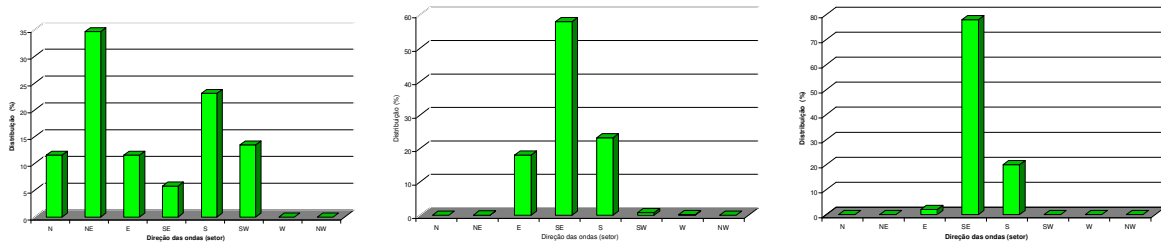
(i) Altura (m)



(ii) Período (s)



(iii) Direção (graus)



(a) Águas profundas

(b) Cota de 15 m

(c) Ponto de quebra

Fig 9 – Características das ondas em (a) águas profundas (INPE, 2004), (b) cota de 15 m (Coli, 2000) e (c) ponto de quebra.

As correntes longitudinais e a componente longitudinal dos ventos locais apresentaram uma forte correlação de convergência significativamente maior que a convergência esperada entre estas e a direção de incidência das ondas. O estudo apresentou uma taxa de convergência entre correntes e ventos em 86,5% dos casos observados enquanto que apenas em 64% dos casos observou-se

convergência entre as correntes longitudinais e a direção das ondas. É interessante observar que a convergência observada, entre o vento e as ondas, foi da ordem de 82%.

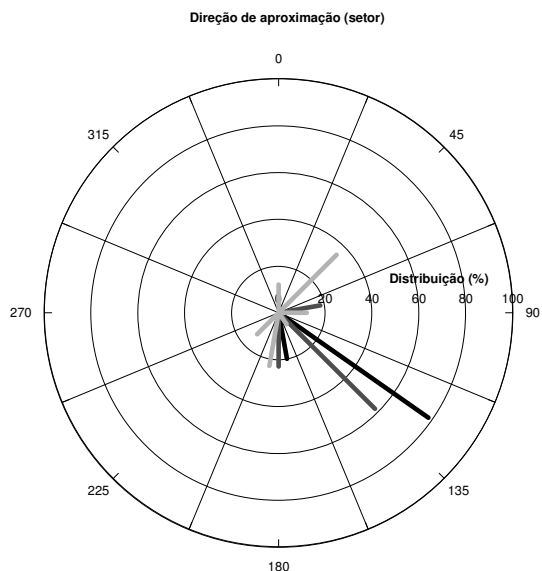


Fig 10 - Distribuição das ondas segundo a sua direção de aproximação em águas profundas (cinza claro), na profundidade de 15 metros (cinza escuro) e na linha de arrebentação (preto), respectivamente.

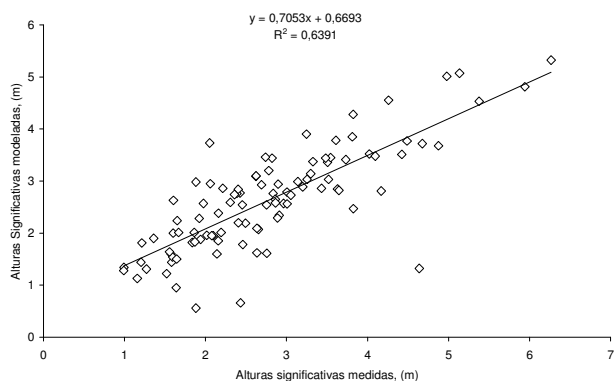


Fig 11 – Correlação entre alturas de ondas medidas e modeladas.

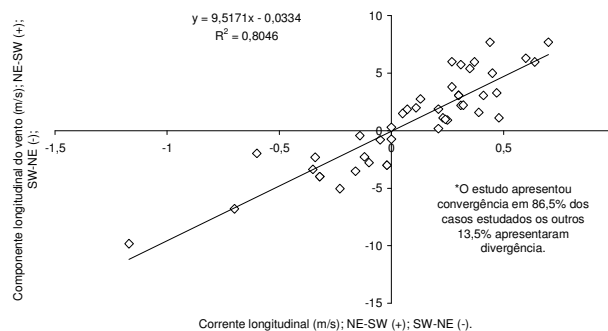


Fig 12 - Convergência entre correntes e ventos.

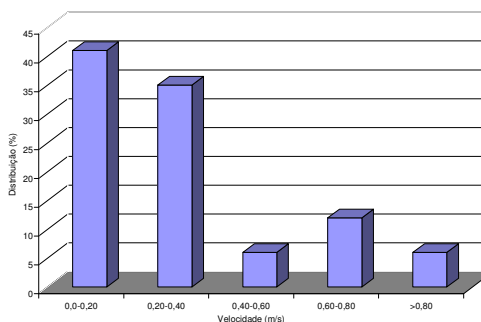
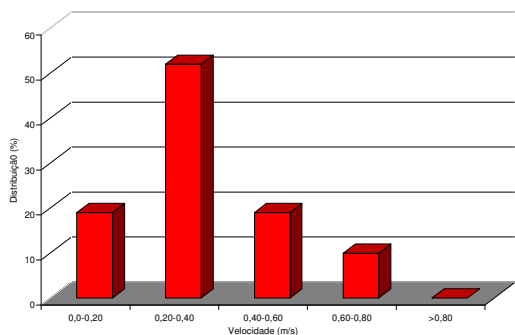


Fig 13 - Distribuição das intensidades da corrente longitudinal segundo a direção NE-SW e SW-NE, respectivamente.

A figura 12 mostra o diagrama de convergência entre o vento e corrente, enquanto que a figura 13 apresenta a distribuição das intensidades das correntes longitudinais segundo a orientação da costa.

Em 62% dos casos foram observadas correntes de NE-SW, em 34% das observações foram registradas correntes de SW-NE e somente em 4% dos casos não houve correntes a serem registradas.

A coleta dos sedimentos foi efetuada seguindo o mesmo esquema mostrado na figura 8, a única exceção foi o Perfil-5 onde as condições da batimetria permitiram apenas 3 estações de coleta. Dados da hidrodinâmica e da deriva litorânea no momento da coleta estão apresentados a seguir na tabela 1. As figuras 14-19 mostram os diagramas de distribuição do sedimento e as taxas de transporte longitudinal para cada perfil, plotados sobre a batimetria local no instante da coleta.

Tabela 1 – Ondas na arrebentação, corrente longitudinal e deriva litorânea registrada na data da coleta.

*Corrente longitudinal

LOCAL	DATA	Hb (m)	Tb (s)	CL (m/s)*	Q (m ³ /h)
Perfil-1	01/07/03	0,57	14	0,14 NE-SW	1,92
Perfil-2	19/07/02	0,59	11,2	0,41 NE-SW	2,60
	16/01/03	0,15	3	0,31 NE-SW	0,23
	20/02/03	0,78	9,4	0,1 SW-NE	25,1
Perfil-3	02/05/03	0,72	8,5	0,28 SW-NE	4,24
Perfil-4	05/09/03	0,97	11,6	0,36 SW-NE	43,33
Perfil-5	17/01/03	0,68	7	0,37 NE-SW	2,54
Perfil-6	21/02/03	1,26	8,6	0,70 SW-NE	31,74

PERFIL-1

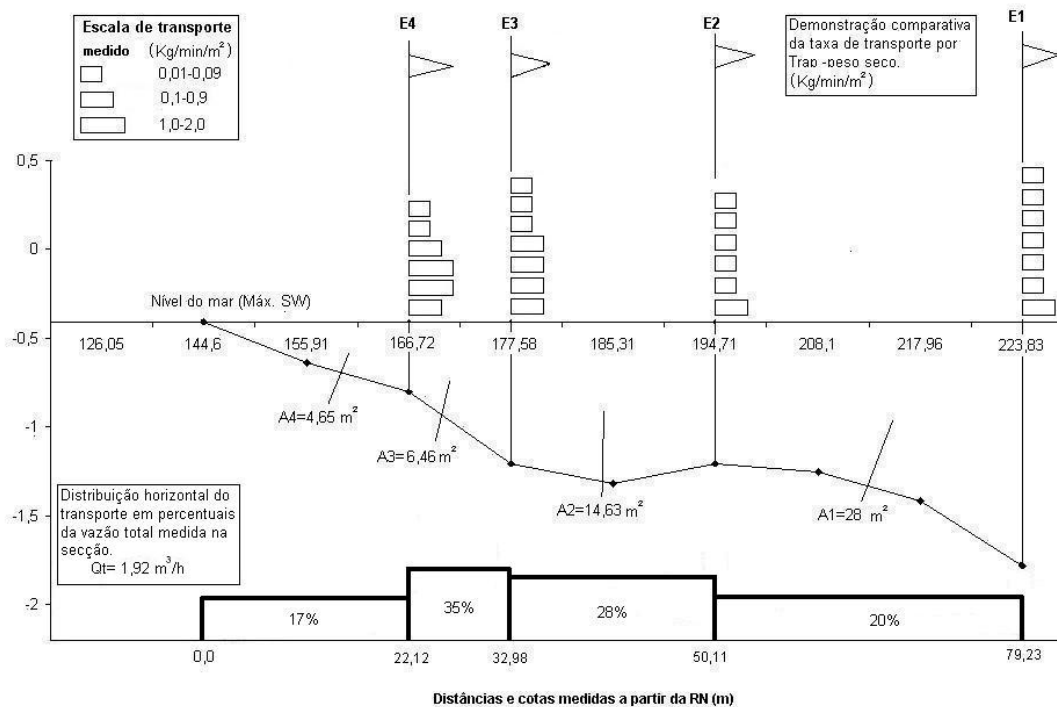


Fig 14 – Distribuição lateral e vertical da taxa de transporte longitudinal de areia medida no Perfil-1 durante a campanha de 01 Jul 2003.

PERFIL-2

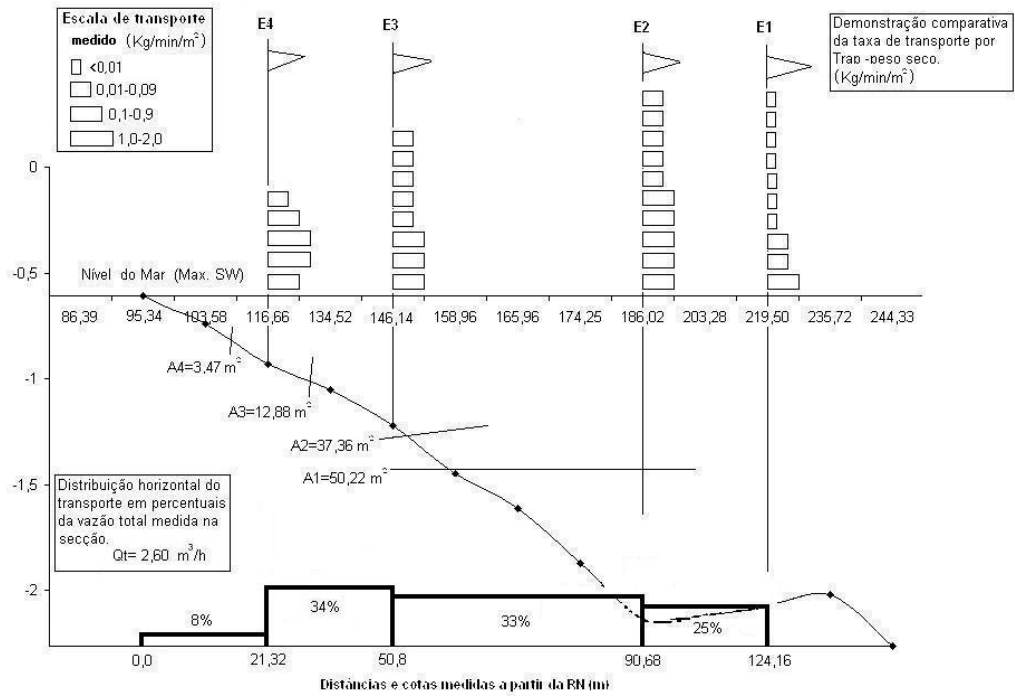


Fig 15 – Distribuição lateral e vertical da taxa de transporte longitudinal de areia medida no Perfil-2 durante a campanha de 19 Jul 2002.

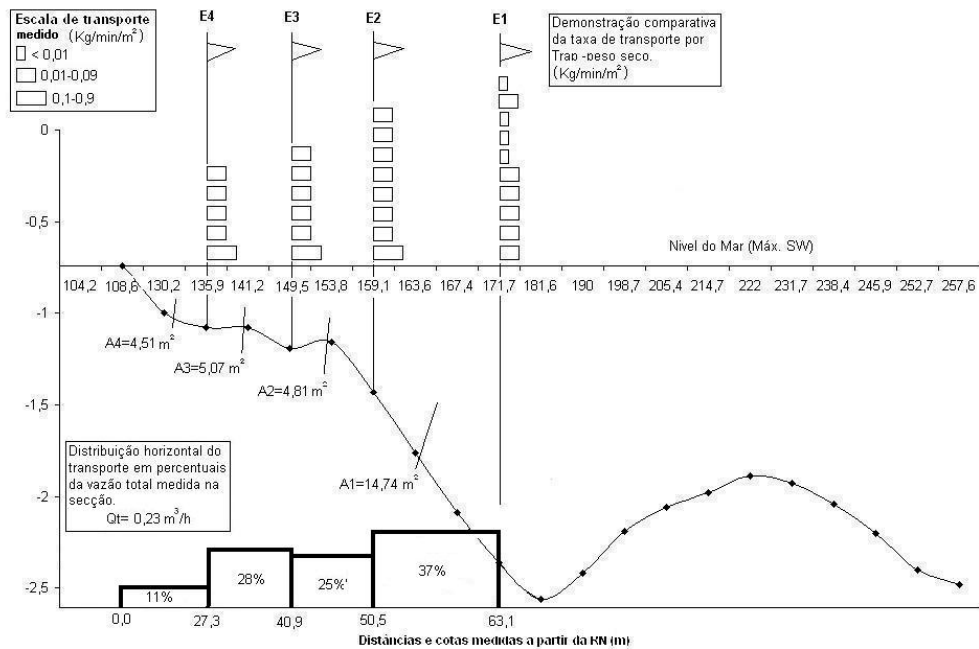


Fig 16 – Distribuição lateral e vertical da taxa de transporte longitudinal de areia medida no Perfil-2 durante a campanha de 16 Jan 2003.

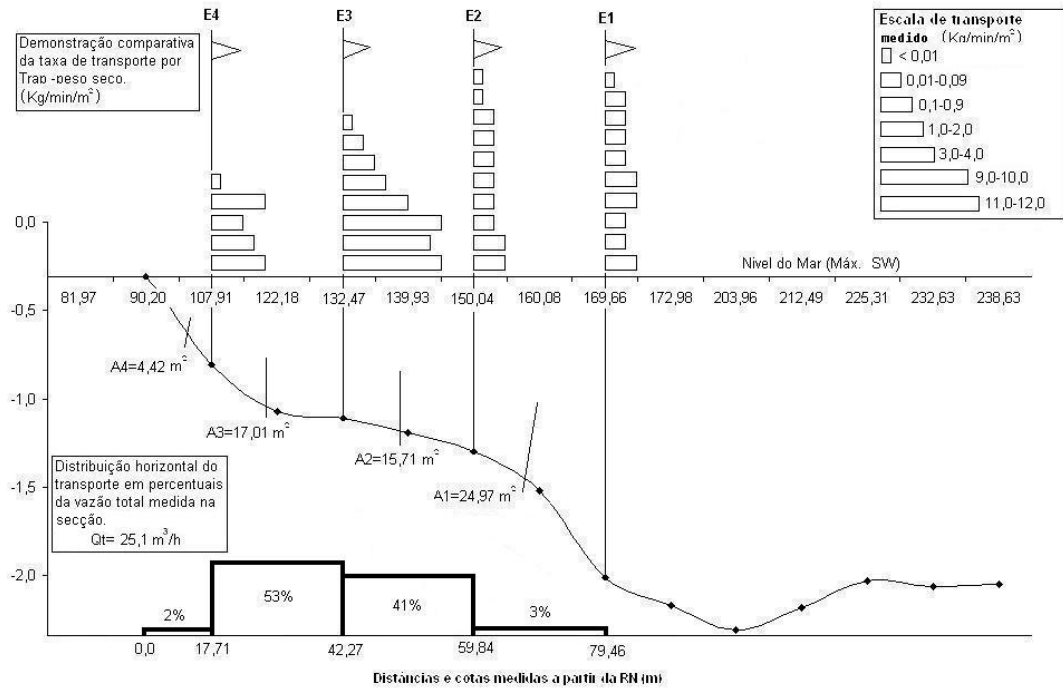


Fig 17 – Distribuição lateral e vertical da taxa de transporte longitudinal de areia medida no Perfil-2 durante a campanha de 20 Feb 2003

PERFIL-3

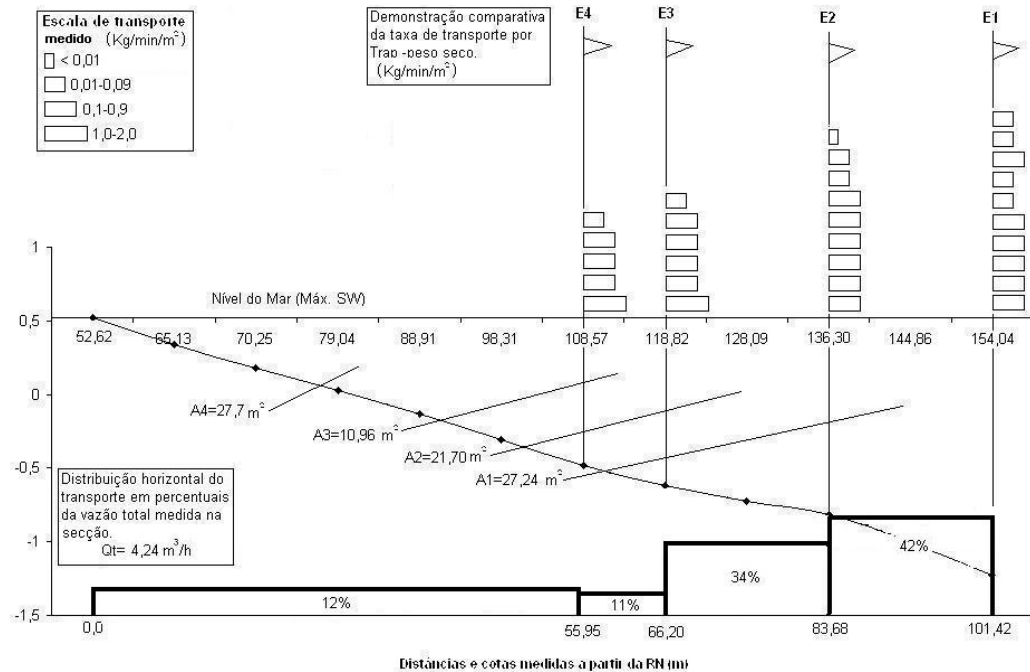


Fig 18 – Distribuição lateral e vertical da taxa de transporte longitudinal de areia medida no Perfil-3 durante a campanha de 02 Mai 2003.

PERFIL-4

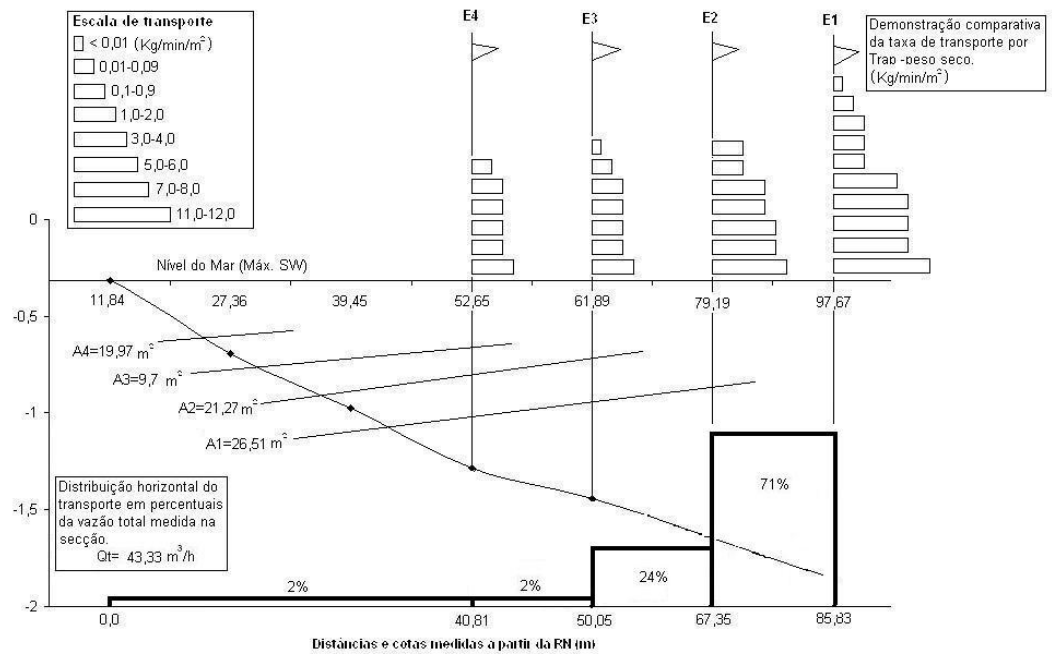


Fig 19 – Distribuição lateral e vertical da taxa de transporte longitudinal de areia medida no Perfil-4 durante a campanha de 05 Set 2003.

PERFIL-5

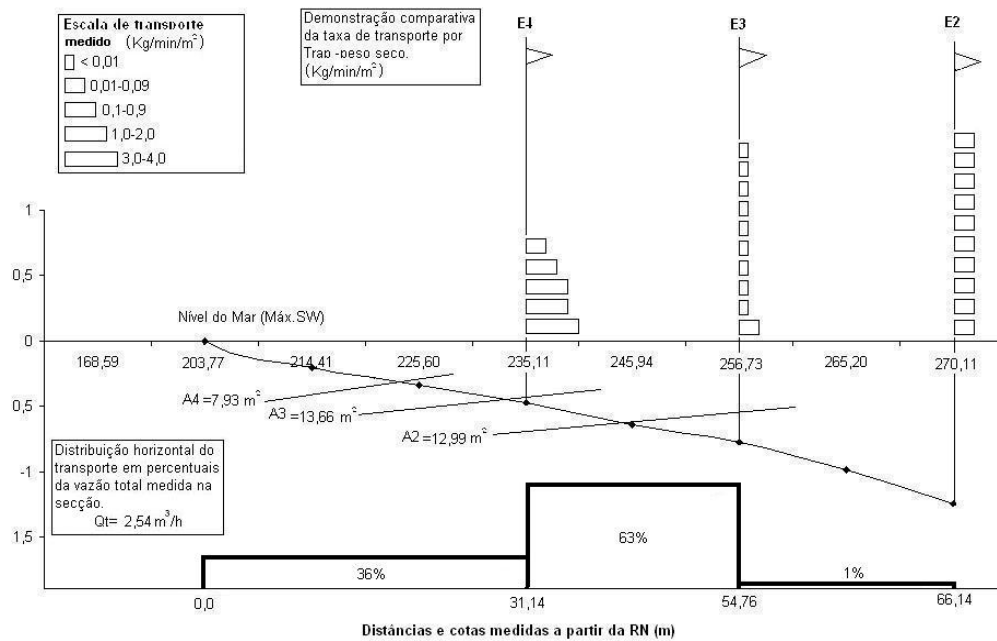


Fig 20 – Distribuição lateral e vertical da taxa de transporte longitudinal de areia medida no Perfil-5 durante a campanha de 17 Jan 2003.

PERFIL-6

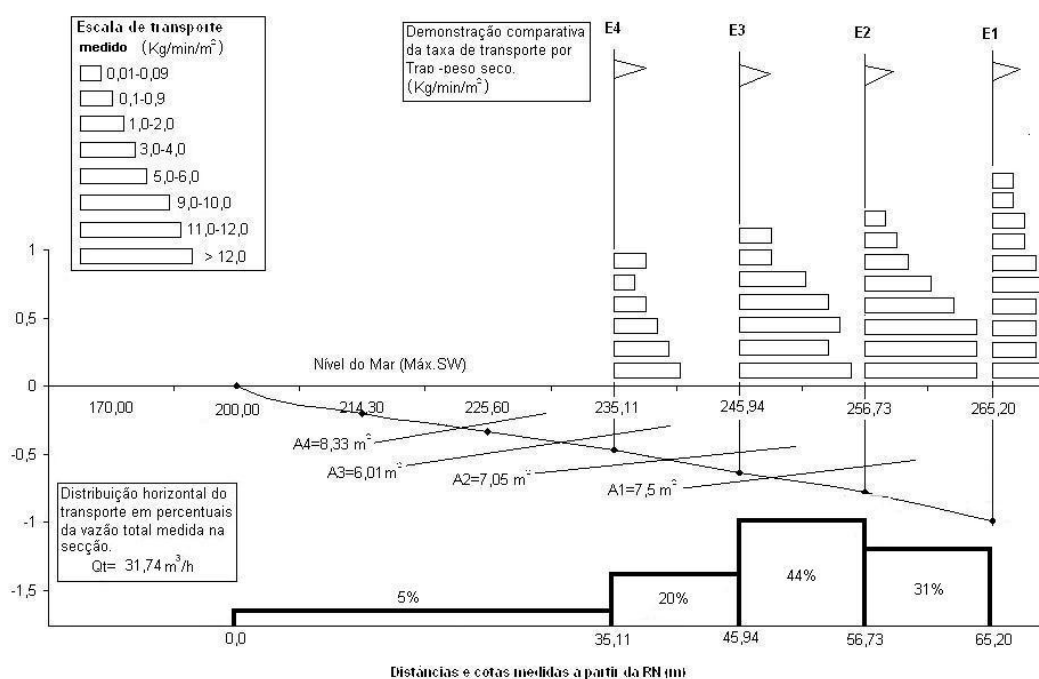


Fig 21 – Distribuição lateral e vertical da taxa de transporte longitudinal de areia medida no Perfil-6 durante a campanha de 21 Feb 2003.

DISCUSSÃO

Examinando a distribuição das ondas na arrebentação (Fig 9 e 10) observa-se que as direções se concentram em sudeste e sul, resultado de um intenso processo de refração promovido pela ocorrência de isobatimétricas paralelas à costa e a presença de uma plataforma extensa e rasa (Pimenta, [20]).

Comparando os resultados nota-se que em águas profundas ocorrem ondas de todos os quadrantes com exceção dos voltados para o continente (oeste e noroeste). Observa-se também que a maior ocorrência é de nordeste (35%) seguido de perto pelo quadrante sul (23%), enquanto que a menor ocorrência é de sudeste (5%). Examinando o comportamento destas ondas em 15-18 m (Motta, [17]; Strauch, [21] e Coli, [5]), observa-se que as direções ficam reduzidas à leste, sudeste, sul e sudoeste, sendo que sudeste passa a ser o setor mais representativo (60%) e sudoeste o menos importante (2%). Finalmente, na arrebentação com profundidade ao redor de 2 m, observa-se uma importante concentração das direções no setor sudeste (78%) com o restante distribuído entre sul (10%) e leste (2%).

Para profundidades entre 15-18 m é interessante comparar os registros feitos por Motta [17] para Tramandaí com os valores medidos por Strauch [21] para Rio Grande. Observa-se um comportamento muito parecido nas duas distribuições, apesar da distância temporal e tecnológica que separa os dois eventos. Motta [17] encontrou 68% das ondas como procedentes do norte da normal em Tramandaí e apenas 32% como egressas do sul, isto talvez explique em parte o transporte líquido para sudoeste encontrado por Pitombeira [19], contrario a todos os indicativos morfológicos existentes. Strauch [21] registrou 47% das ondas como sendo do norte da normal em Rio Grande e 52% do sul desta, o que está mais em acordo com o transporte para nordeste, ao mesmo tempo em que aponta para

um baixo valor do transporte líquido local, o que é bastante razoável. Outro aspecto interessante desta comparação é que o eixo central das medições de Motta encontra-se voltado mais para norte do que o eixo das medições de Strauch, isto talvez possa ser explicado pelas posições gerais das linhas de costa em Tramandaí (24°N) e Rio Grande (45°N), defasadas de aproximadamente 21°. Mas, de modo geral os registros feitos por Motta e Strauch são muito parecidos. Com estas observações fica evidente que a quase totalidade das ondas que chegam à praia, principalmente sob condições atmosféricas normais, apresentam um baixo ângulo de incidência com relação a normal à linha de costa.

Conforme a figura 13 as correntes longitudinais para sudoeste apresentam uma velocidade média entorno de 0,40 m/s (mais de 30% do total) e não foram registradas correntes acima de 0,80 m/s nesta direção, de forma que mais de 40% das correntes para sudoeste ficam abaixo de 0,40 m/s. Por outro lado, embora as correntes para nordeste também apresentem a maioria dos valores abaixo de 0,40 m/s (26% do total observado), nota-se que pelo menos 2% delas tem velocidade acima de 0,80 m/s indicando um pequeno predomínio das intensidades para nordeste.

Estas observações indicam que os valores mais elevados das intensidades para nordeste podem estar associados à presença de ventos do quadrante sul, principalmente no outono e no inverno. Estes ventos, principalmente de sudoeste, dão origem a correntes intensas que podem alcançar valores acima de 1,20 m/s. A principal característica dos ventos provenientes do quadrante sul é a intensidade, enquanto que a característica marcante dos ventos do quadrante norte é a duração. Este tipo de relação convergente entre a corrente e o vento é muito parecido com o comportamento observado por Lanfredi & Framiñan [14] para a praia de Union, no sul da Argentina, onde a concordância entre a direção geral da linha de costa e os ventos reinantes e dominantes, também favoreciam as convergências.

Com base nos dados contidos na tabela 1, que apresenta as condições hidrodinâmicas da região (desconsiderados eventos extremos) registradas ao longo de um ano, observa-se que em todos os perfis estudados foram registrados baixos valores de deriva litorânea. Quando comparamos estes com os elevados valores encontrados por Pitombeira [19] e Alfredini [1] para a costa do RS fica evidente a forte discrepância entre os mesmos. Entretanto cabe salientar que os autores acima estavam preocupados em estabelecer números gerais para a deriva litorânea na costa do RS desconsiderando as peculiaridades hidrodinâmicas ocorrentes no entorno da desembocadura da Lagoa dos Patos e a influencia que a grande obra de engenharia exerce no comportamento hidráulico deste ponto da costa. Portanto, é razoável aceitar que os valores preconizados por Pitombeira e Alfredini possam se confirmar em pontos específicos da costa, principalmente nos 'hot spot' onde elevadas taxas erosivas têm sido observadas (Calliari et ali., [4]; Pimenta, [20]). Entretanto, estes mesmos valores devem ser utilizados com cuidado para as demais regiões da costa aberta, pois mesmo longe da influencia dos molhes, dados preliminares medidos por Perotto et ali. (não publicados) indicam valores muito baixos do transporte longitudinal em diferentes segmentos praias entre Cassino e Chui. A seguir, é feita uma discussão detalhada do comportamento dos estoques sedimentares acumulados no costado dos molhes desde sua construção para esclarecer se os baixos valores encontrados são consistentes ao longo do tempo ou se representam apenas condições momentâneas.

Através da análise do comportamento da linha de costa ao sul do Molhe Oeste, buscou-se justificativa capaz de suportar historicamente a baixa deriva litorânea no entorno da obra. Este estudo teve como base as cartas da Barra do Rio Grande, geradas anual e sucessivamente entre 1883-1956 e publicadas pelo 18º Distrito do Departamento Nacional de Portos, Rios e Canais (DEPREC, [6]).

A primeira hipótese surge ao se examinar as cartas referidas e verificar a ocorrência de um processo acrescivo que depositou neste ponto aproximadamente 1.500 mil m³ de areia entre 1913 e 1915 a uma taxa média de 750 mil m³/ano. Estas mesmas cartas mostram que entre 1915 e 1947 este local não apresentou alterações significativas, apenas pequenas flutuações ora acrescivas, ora erosivas. Lelis [15] estudando aerofotografias métricas obtidas entre 1947 e 2000 observou que neste período também não ocorreram alterações significativas da linha de costa neste ponto específico, o que sugere que o processo acrescivo intenso foi um fato localizado no tempo e coincidente com os dois primeiros anos que se seguiram ao início da grande obra.

O mesmo comportamento pode ser observado na posição das cotas batimétricas (base e costado oceânico do molhe) registradas nas cartas. As posições das isolinhas são as mesmas em 1915 e nas cartas atuais, denotando que também no meio subaquoso o processo acrescivo intenso encerrou-se em 1915. A partir de então as alterações tem sido muito pequenas, apesar de passados 88 anos. No meio subaquoso estima-se que entre 1913 e 1915 foram acrescidos aproximadamente 700 mil m³ em dois anos, a uma taxa média de 350 mil m³/ano. Logo, é possível inferir que entre 1913 e 1915 foram agregados a este ponto da costa 2.200 mil m³, numa taxa média de 1.100 mil m³/ano. A partir de então, conforme mostrado por Lelis [15], este ponto da praia encontra-se em relativo equilíbrio.

É sabido que este não é um equilíbrio estático gerado pela ausência de aporte sedimentar, mas um equilíbrio dinâmico onde o balanço sedimentar tende para zero. Estima-se que este balanço seja o resultado da interação entre o transporte longitudinal líquido para nordeste e o transporte transversal líquido para o mar. Portanto, como nesta região não há evidências da presença de um forte transporte transversal para o mar, fica implícito que a manutenção de um balanço nulo ou com resultante muito pequena exige que o transporte longitudinal líquido para nordeste também seja pequeno.

Uma segunda hipótese com base nas mesmas cartas, sugere a existência de um transporte transversal acrescivo nos primeiros anos após a obra. Examinando as cartas anteriores a 1913 constatou-se que as barras arenosas que ocluíam a desembocadura estendiam-se paralelas à praia e muito além dos limites desta (Pontais sul e norte). Quando da sua construção os molhes cortaram estas barras de forma que o seu flanco oceânico apresentava na época um perfil muito mais raso do que é hoje. Por exemplo, a posição que hoje ocupa a cota de 5 m em 1913 era ocupada pela cota de 2 m, e assim sucessivamente. Logo é possível supor que parte significativa dos sedimentos acrescidos à base e costado inicial do Molhe Oeste o tenham sido feito por transporte transversal acrescivo, que aproximou da praia os sedimentos disponíveis nos rasos adjacentes, provocando o aprofundamento daqueles pontos por falta de reposição dos sedimentos removidos. Interessante observar que uma feição de fundo semelhante ocorre na base e costado inicial do Molhe Leste onde inclusive a extensão rasa apresenta um comprimento maior. Naquele costado também se nota, na carta de 1913 e nas cartas anteriores a presença de um terraço longo, possivelmente parte da barra pré-existente.

Tanto a primeira como a segunda hipótese aponta para um transporte longitudinal atual muito pequeno, sendo que a primeira sugere a existência de um transporte intenso pelo menos nos dois primeiros anos após o início da obra e uma posterior estabilização em níveis baixos, enquanto que a segunda descarta até mesmo esta possibilidade apontando para um transporte baixo o tempo todo. Logo, com base nesta discussão, é possível sugerir que os valores baixos do transporte longitudinal nesta região, encontrados atualmente não são circunstanciais, mas representam um comportamento costeiro que pode estar associado à edificação dos molhes. Resta, portanto a seguinte pergunta a ser respondida: porque o transporte é pequeno?

A resposta pode estar nos baixos valores da altura significativa das ondas no ponto de quebra (H_{sb}) em condições atmosféricas normais e principalmente no reduzido valor médio do ângulo de incidência destas na arrebentação. Também a refração e a difração produzidas pela presença da obra parecem ter papel importante neste processo, principalmente nos pontos mais próximos da raiz do molhe, no âmbito de observação dos perfis 3 e 4. A influência dos baixos ângulos de incidência sobre o transporte longitudinal na região será melhor entendida se considerarmos que o ângulo de aproximação médio na linha de quebra ficou ao redor de 6,5° e que em condições atmosféricas normais, mais de 70% dos ângulos medidos na arrebentação postaram-se abaixo de 3° em relação a normal enquanto que os restantes 30% não ultrapassaram 8°. Valores tão baixos sugerem reduções importantes no valor da tensão radiante (Longuet-Higgins, [13]) que ingressa na zona de surfe limitando significativamente a mobilização dos sedimentos e principalmente o seu transporte.

Outro aspecto importante que deve ser considerado é a presença de grande quantidade de lama fluida, oriunda da pluma continental da Lagoa dos Patos, que cobre o fundo arenoso da antepraia entre as cotas de -4 e -10 m desde as proximidades do Molhe Oeste até a Querência (Calliari & Fachin, [3]). Tudo sugere que este corpo lamítico pode ser responsável, tanto pelo arrefecimento parcial das ondas

(principalmente durante tempestades) retirando-lhe parte significativa da energia que poderia ser disponibilizada dentro da zona de surfe na mobilização e transporte dos sedimentos como também pela formação de um escudo protetor de parte importante dos sedimentos terrígenos de fundo impedindo a sua mobilização e conseqüente alimentação da zona de surfe.

CONCLUSÃO

Com base nos dados obtidos e analisados durante a realização deste trabalho pôde-se concluir que durante o período observado houve convergência entre a direção da componente longitudinal do vento na costa e a direção da corrente longitudinal em 86,5 % dos casos estudados e divergência em 13,5 % dos casos restantes. Estes índices sugerem que as direções da corrente longitudinal e da deriva litorânea foram fortemente influenciadas pela direção e intensidade da componente longitudinal do vento (Fig 12). Alterações na direção do vento provocaram pronta resposta na direção da corrente e na deriva litorânea que buscaram imediatamente acompanhar a direção do vento. Exceções ocorreram quando a componente do vento foi muito pequena ou nula, neste caso a corrente passou a ser função quase que única da direção das ondas na arrebentação. Os 13,5% correspondentes às divergências observadas só ocorreram como resultado do movimento inercial da corrente após a mudança repentina do vento, mas estas situações se caracterizaram por sua efemeridade.

As observações sugerem fortemente que o transporte longitudinal é bidirecional e que apresenta uma pequena resultante líquida para nordeste mesmo sob condições atmosféricas normais, donde se deduz uma possível ocorrência da magnificação do transporte líquido para nordeste quando da passagem de tempestades costeiras vindas do quadrante sul. Este aumento no transporte pode estar associado principalmente ao crescimento da hidrodinâmica na zona de surfe, bem como ao aumento do nível da água na costa fazendo com que os processos costeiros passem a ocorrer próximo às dunas frontais, estoques naturais de sedimentos disponíveis.

Concluiu-se também, que o transporte longitudinal nesta região é muito pequeno, principalmente se comparado com pontos da costa onde as condições batimétricas favorecem o surgimento de focos de ondas associados a processos erosivos intensos. Os dados sugerem que esta redução nas taxas de transporte local podem estar associadas aos baixos valores dos ângulos de incidência das ondas na arrebentação, a pequena altura média das ondas no ponto de quebra devido à ação atenuante da lama fluida na antepraia, bem como, o congelamento parcial dos estoques de sedimentos terrígenos da antepraia ocasionados pela presença do pacote lamítico.

Finalmente concluiu-se que 18% de todo o transporte observado ocorreu por arraste de fundo (bedload) dentro de uma camada de aproximadamente 10 cm acima do fundo, os restantes 82% ocorreram por suspensão na coluna d'água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALFREDINI, P. 1999. *The longshore transport evaluation used as a tool for the brazilian coastline littoral processes knowledge*. Anais do VII Congresso Brasileiro da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA), 13p.
2. CASTANHO, J. 1966. *Rebentação das ondas e transporte litoral*. Memória 275, Laboratório Nacional de Engenharia. 278p.
3. CALLIARI, L.J. & FACHIN, S. 1993. *Laguna dos Patos: influência nos depósitos lamíticos costeiros*. Pesquisas, Porto Alegre, 20:57-69.
4. CALLIARI, L.J.; TOZZI, H.A.M. & KLEIN, A.H.F. 1998. *Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in southern Brazil - Rio Grande to Chuí*. In: Land and Ocean

- Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) Meeting, Anais da Academia Brasileira de Ciências, 70(2):231-247.
5. **COLI, A.B. 2000.** *Estudo sobre o clima de ondas em Rio Grande, RS.* Dissertação de Mestrado, FURG, Rio Grande, 80p.
 6. **DEPREC, 1959.** *Plantas da Barra do Rio Grande. Anos 1883 à 1956.* Compiladas pelo engº Cícero Marques Vasão (18º Distrito). Porto Alegre.
 7. **ELFRINK, B. & BALDOCK, T. 2002.** *Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives.* Coastal Engineering, 45:142-167.
 8. **FURG. 1999.** *Ampliação dos Molhes do Porto do Rio Grande.* EIA/RIMA vol.1, 75p.
 9. **FONTOURA, J.A.S. & HARTMANN, C. 2001.** *Capture small format aerial digital images using the Airborne Data Acquisition System (ADAR 1000) from Positive System Company (USA).* Pesquisas, Porto Alegre, 28(2):373-381.
 10. **FONTOURA, J.A.S. 2004.** *Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da Barra do Rio Grande, RS, Brasil. Tese de Doutorado.* Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre. 275 p.
 11. **KRAUS, N.C. 1987.** *Application of portable traps for obtaining point measurements of sediment transport rates in the surf zone.* Journal Coastal Research, 3(2):139-152.
 12. **KAMPHUIS, W. 1991.** *Alongshore sediment transport rate.* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 117(6):624-640.
 13. **LONGUET-HIGGINS, M.S. 1972.** *Recent progress in the study of longshore currents.* Contribution to: 'Waves on beaches and resulting sediment transport', edited by R. E. Meyer, Academic Press, New York.
 14. **LANFREDI, N.W. & FRAMINÂN, M.B. 1986.** *Field study and prediction of longshore currents, argentine coast.* Journal Coastal Research, 2(4):409-417.
 15. **LÉLIS, R.J.F. 2003.** *Variabilidade da linha de costa oceânica adjacente às principais desembocaduras do Rio Grande do Sul.* Monografia de Graduação, FURG, Rio Grande, 81p.
 16. **MOTTA, V.F. 1963.** *Relatório-análise e previsão alturas de ondas em Tramandaí.* Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 30 p.
 17. **MOTTA, V.F. 1967.** *Estudo em modelo reduzido para a regularização da embocadura Lagunar de Tramandaí, RS.* Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande
 18. **MILLER, H.C. 1999.** *Field measurements of longshore sediment transport during storms.* Coastal Engineering, 36:301-321
 19. **PITOMBEIRA, E.S. 1975.** *Estimativa do volume anual de transporte litorâneo na costa do Rio Grande do Sul.* Dissertação de Mestrado, UFRGS/IPH/Centro de Hidrologia Aplicada. 98p.
 20. **PIMENTA, F.M. 1999.** *Caracterização dos regimes de refração de onda ao longo da zona costeira do Rio Grande do Sul.* Monografia de Graduação, FURG, Rio Grande, 66p.
 21. **STRAUCH, J.C.S. 1996.** *Estudo do clima ondulatório em Rio Grande.* Anais do XII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia, Curitiba, PR 51p
 22. **TOLMAN, H.L. 1999.** *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18 NOAA/NWS OMB.* Contribution nº 166, 110p.

23. **VAN RIJN, L.C. 1993.** *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.* Aqua Publication, The Netherlands, Amsterdam. 632p.
24. **WANG, P.; KRAUS, N.C.& DAVIS Jr., R.A. 1998.** *Total longshore sediment transport rate in the surf zone: field measurements and empirical predictions.* Journal Coastal Research, 14(1):269-282.