



V SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, 07 a 09 de Novembro de 2012

COMPARAÇÃO ENTRE ESTRATÉGIAS PARA CÁLCULO DO TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS NA PRAIA DE MATINHOS, PR – BRASIL.

Cleverson A. Thoaldo¹, Maurício F. Gobbi²

^{1,2} Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, UFPR
Caixa Postal 19011, Curitiba PR, 81531-980, Brasil
E-mail: ¹cleversonthoaldo@hotmail.com, ²gobbi@ufpr.br,

RESUMO

Neste trabalho são aplicados modelos de propagação de ondas e de transporte longitudinal de sedimentos na Praia de Matinhos no litoral do Paraná através de modelagem numérica/computacional. É suposto que o transporte de sedimentos ocorre principalmente devido às correntes causadas pela quebra das ondas. Para quantificar o fluxo de sedimentos é necessário conhecer o comportamento da onda na zona de arrebentação no trecho de costa em questão. A modelagem é baseada no modelo de ondas em declive suave - Mild-slope Equation - que inclui efeitos de refração e difração simultaneamente. A esta equação podem ser feitas várias simplificações e adições. A implementação computacional usada neste trabalho foi o programa REF-DIF1, versão 2.5 (Kirby ET AL, 2002). Como não há uma série longa de medições de ondas no litoral do Paraná, foi usada uma série de ondas de um ano do programa PIC - Programa de Informação Costeira da Universidade Federal de Santa Catarina que mediu séries detalhadas (a cada meia hora) de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina durante alguns anos. Após algumas considerações para se transportar os dados de ondas para o largo do Paraná, o modelo de ondas propagou um ano de dados de ondas variando a cada 2 horas. Foi também calculada a propagação pelo REF-DIF de diferentes agrupamentos (clusters) dos dados de ondas do programa PIC. Conhecido o comportamento das ondas na zona de arrebentação ao longo da costa, foi aplicada a equação de Kamphuis que calcula a taxa de transporte de sedimentos, para cada onda, com e sem os agrupamentos. O transporte de sedimento calculado para as ondas agrupadas foi comparado ao transporte da série completa de ondas.

Palavras-chave: Erosão Costeira, Transporte de Sedimentos, Propagação de Ondas, Modelagem Numérica.

1. INTRODUÇÃO

A praia de Matinhos, região de estudo desse trabalho, vem sofrendo problemas de erosão desde a década de 70, período que coincide com o intenso processo de urbanização e crescimento industrial da região. As interferências antropogênicas tornaram essa porção do litoral bastante suscetível às elevações no nível do mar causadas por marés meteorológicas e também a influência de ondas de tempestade. Na tentativa de proteger propriedades próximas à beira mar foram feitas obras de contenção como espigões e muros.

As modificações da linha da costa da praia de Matinhos foram obtidas a partir de interpretações de fotografias aéreas de diversos anos (1954, 1969, 1980 e 1997) e constatou-se que a costa avançou aproximadamente 25 m em direção ao mar até 1969 e em 1980, uma retração máxima de 24 m foi observada e a costa foi então considerada estável até 1997. Muitas alternativas de contenção da erosão são utilizadas pelos moradores locais numa tentativa de proteger suas propriedades. Frequentemente são usadas rochas, solo,

gramados e até muros privativos podem ser vistos em frente às casas. Estudos de ondas e de transporte de sedimentos são essenciais para a gestão apropriada da costa de Matinhos.

O objetivo desse trabalho é quantificar o transporte longitudinal de sedimentos na costa do Paraná através de modelagem numérica das ondas e da aplicação de um método de cálculo de transporte de sedimentos. Neste trabalho, foram usados dados de onda ao largo adaptados do programa PIC (Programa de Informação Costeira) da Universidade Federal de Santa Catarina (Melo F^o, 2004).

2. EQUAÇÃO GOVERNANTE PARA AS ONDAS

2.1 Equação do Declive Suave

A Equação do Declive Suave (EDS), deduzida por Berkhoff (1972), é uma equação capaz de descrever a propagação de ondas com efeitos de refração e difração simultaneamente, que despreza modos não-propagantes e supõe que a topografia do fundo tem variações suaves em distâncias da ordem de um comprimento de onda. Booij (1983) mostrou que ela é eficiente em topografia com inclinações de até 1:3.

Este modelo tornou-se muito popular, apesar de ser deduzido no contexto da teoria linear. Outras deduções foram feitas por muitos autores, como Mei (1973), Massel (1989), Porter & Chamberlain (1997).

A EDS em questão é:

$$\nabla_H \cdot (CC_g \nabla_H \phi) + k^2 CC_g \phi = 0 \quad (1)$$

onde

∇_H - operador gradiente horizontal
 ϕ - potencial horizontal de velocidade
 k^2 - número de onda
 C - velocidade de fase da onda
 C_g - velocidade de grupo

Esta equação rege a propagação de ondas de pequena amplitude com fundos em declive suave. A Eq. (1) não leva em consideração alguns efeitos que modificam o campo de onda como dissipação de energia e não-linearidade.

2.2 Aproximação Parabólica da EDS

A equação do declive suave é uma equação elíptica, necessitando de condições de contorno em toda a fronteira do domínio do problema para ser resolvida. Nem sempre, esta é uma tarefa fácil ou possível. O objetivo da aproximação parabólica é o de transformar a EDS, que é uma equação elíptica, em uma ou mais equações parabólicas, que necessitam de condições iniciais para serem resolvidas.

A aproximação parabólica, já usada em problemas semelhantes em outros campos da física, no caso de ondas superficiais de gravidade, foi utilizada pela primeira vez por Radder (1979). A aplicação da equação parabólica requer que o campo de ondas tenha uma direção preferencial de propagação e que não haja reflexão no sentido oposto ao da propagação.

As seguintes hipóteses são utilizadas para a obtenção da aproximação parabólica:

- Existe uma direção de propagação preferencial do campo de ondas (direção x) de modo que os desvios em relação a esta direção sejam pequenos.
- O campo de ondas pode ser dividido em duas componentes: uma de ondas transmitidas e outra de ondas refletidas.
- Após encontrar um par de equações parabólicas acopladas, uma para o campo de ondas transmitido e outra para o campo de ondas refletido, admite-se que o campo de ondas transmitidas predomina sobre o campo de ondas refletidas.
- As variações de k_c (número de onda complexo) são pequenas.

A equação parabólica em coordenadas cartesianas pode ser escrita em função da amplitude complexa Ψ , então a equação parabólica torna-se

$$2ik_c \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \left[2k_c(k_c - k_0) + i \frac{\partial k_c}{\partial x} \right] \Psi + \frac{i}{2k_c} \frac{\partial^3 \Psi}{\partial x \partial y^2} + \left(\frac{3}{2} + \frac{k_0}{2k_c} \right) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

onde x e y são coordenadas cartesianas espaciais, k_0 é o número de onda representativo de referência, k_c é o número de onda complexo.

A implementação numérica da aproximação parabólica da EDS usada neste trabalho é a do REF/DIF versão 2.5. A equação usada pelo REF/DIF é um pouco diferente da equação (2) já que trabalha com uma variável ligeiramente diferente e inclui outros efeitos como não linearidade e interações com correntes, não usados aqui.

3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O transporte de sedimentos junto a costa é a causa da alteração no perfil de praias existentes. Essa mudança no ambiente é causada principalmente pela quebra de onda na praia. Este mecanismo é capaz de desalojar e arremessar sedimentos que serão carregados pelas correntes induzidas pelas ondas: correntes longitudinais (*longshore currents*) e correntes de retorno (*rip currents*). Bowen (1969) e Longuet-Higgins (1970) criaram a primeira teoria capaz de prever a velocidade da corrente longitudinal, onde investigaram o papel da componente longitudinal da tensão de radiação. Longuet-Higgins balanceou a variação longitudinal dessa tensão de radiação com a tensão de cisalhamento do fundo gerada pela corrente longitudinal, obtendo uma fórmula para seu cálculo.

As equações utilizadas para cálculos de transporte de sedimento foram desenvolvidos com base principalmente em estudos de campo, no entanto, a obtenção de dados de alta qualidade no campo é difícil. O modelo mais amplamente utilizado para estimar taxa de transporte de sedimentos é a Fórmula do “CERC”, que é baseado em medições de campo. Porém a precisão é questionável em algumas circunstâncias. Vários parâmetros que podem influenciar o cálculo do transporte de sedimentos, como período da onda e tamanho dos grãos de sedimentos, não são levados em consideração na fórmula do CERC. Comparações adicionais foram feitas com a fórmula proposta por Kamphuis (1991), que inclui período de onda, um fator que influencia a arrebentação das ondas, fornecendo boas estimativas.

3.1 Taxa de Transporte Longitudinal

A região, em que o material é transportado ao longo da costa, está situada na zona de arrebentação. A taxa de transporte longitudinal de sedimentos pode ser calculada através de uma expressão de transporte de massa ou volume de sedimentos. Esta expressão de massa ou volume relaciona a taxa total de transporte longitudinal de sedimentos para algumas ondas de fácil mensuração e parâmetros da praia.

A equação utilizada neste trabalho será a desenvolvida em Kamphuis (1991) que provém de uma expressão que inclui os efeitos do período de onda, inclinação da praia e o tamanho dos grãos, dada por

$$Q_k = 6.4 \cdot 10^4 H_{sb}^2 T_{op}^{1.5} m_b^{0.75} D^{-0.25} \text{sen}^{0.6} 2\alpha_b \quad (3)$$

onde

Q_k : taxa de transporte (m^3/ano);

H_{sb} : altura significativa de onda no início da arrebentação;

T_{op} : período de pico da onda;

m_b : relação das forças perturbadoras das ondas no momento da quebra;

D : diâmetro dos grãos;

α_b : ângulo da onda no início da arrebentação.

4. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA COSTA DO PARANÁ

Para o cálculo do transporte de sedimentos usando a fórmula de Kamphuis Eq.(3) é necessário conhecer o campo de ondas que chega à costa. Observando a propagação de ondas a uma escala mais global, o clima de ondas incidente ao largo da costa de Santa Catarina, local onde foi feita a coleta dos dados, será considerado similar ao clima de ondas que incide ao longo da costa do Estado do Paraná, tornando possível que as ondas sejam transportadas do local de coleta dos dados e propagadas para a zona de arrebentação.

A região em que foi feita a análise do transporte de sedimentos está compreendida entre a praia de Matinhos e Pontal do Paraná, e que será referida neste trabalho como sendo Matinhos para facilitar a citação quando necessária. Os dados de onda utilizados para o cálculo do transporte de sedimentos foram cedidos pelo PIC - Programa de Informação Costeira da Universidade Federal de Santa Catarina.

4.1 Caracterizações da Área de Estudo

A costa do Estado do Paraná, ($25^{\circ}12'44''S - 48^{\circ}01'15''W$ e $25^{\circ}58'38''S - 48^{\circ}35'26''W$) Fig. 3, estende-se por aproximadamente 100 km na direção NE-SW. Ao sul, localiza-se a baía de Guaratuba ($25^{\circ}52'S, 48^{\circ}38'W$) e ao norte o Complexo Estuarino de Paranaguá - CEP ($25^{\circ}00'S$ e $25^{\circ}35'S, 48^{\circ}15'W$ e $48^{\circ}50'W$). Constitui um dos menores litorais entre os estados litorâneos do Brasil. Apesar disso, se forem consideradas as reentrâncias, estuários e ilhas esta linha de costa ultrapassa os 1.675 km, a qual pode ser classificada entre costa estuarina, costa oceânica e de desembocadura (Angulo & Araújo, 1996).

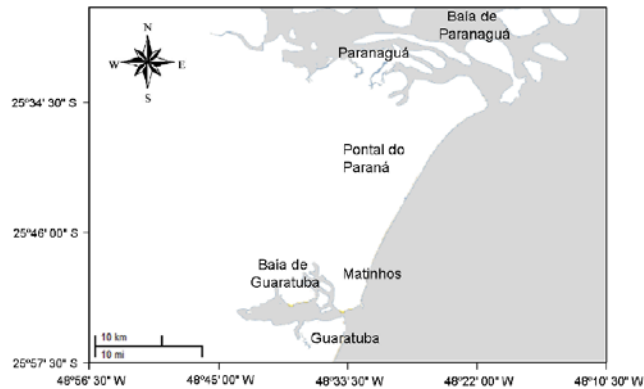


Figura 3: Região da praia de Matinhos

Suas praias são predominantemente arenosas, interrompida apenas por alguns pontais rochosos e pelas desembocaduras das baías de Guaratuba e de Paranaguá, composta principalmente por sedimentos marinhos de areias finas a muito finas, constituindo feixes de cordões litorâneos (linha definida pelo limite entre o mar e a terra e que varia com as marés) orientados paralelamente à linha de costa atual no sentido sudoeste-nordeste (Angulo, 1992).

A região em que será aplicado e analisado o transporte de sedimento será a praia de Matinhos, que se situa próximo à Baía de Guaratuba, sendo uma região classificada como de mar aberto, costas voltadas para mar aberto e que não apresenta influência significativa das desembocaduras estuarinas. Essa região vem apresentando problemas de erosão fazendo com que a praia diminua gradativamente, devido a ação natural do mar que avança sobre as ruas e calçadas, causando uma série de problemas sociais e ambientais.

No balneário de Praia Brava, que se localiza no município de Matinhos, aparecem problemas de erosão desde a ocupação e empreendimentos na orla na década de 70. Na parte central da praia foi feito um aterramento para que uma estrada beira-mar fosse construída, a qual tem uma configuração reta ao longo da praia, sem considerar a natural curvatura geomorfológica existente (Angulo, 1984). Em 1983, duas obras de contenção foram colocadas obliquamente à linha de costa com objetivo de acumular sedimentos e conter a erosão, protegendo as propriedades próximas à beira mar Fig. 4, (Lisniowski, 2009).



Figura 4: Balneário de praia Brava e os espigões colocados na praia em 1983. Fonte: Lisniowski, 2009

Os esforços para conter a erosão estabeleceram uma linha de costa distinta, impedindo à praia de assumir sua configuração natural, então essa costa não pode ser considerada estável. Nas praias que não houve nenhum tipo de intervenção, não há evidências de processos erosivos, sendo que essas praias apresentam um balanço natural de sedimentos (Angulo, 1996).

4.2 Clima de Ondas

Os parâmetros de onda (período, altura significativa e direção) usados neste trabalho para o cálculo do transporte de sedimentos foram coletados por meio de um ondógrafo de precisão com transmissão telemétrica (Melo F^o, 2004). Estes equipamentos foram instalados a 35 km de Santa Catarina e fica num local com 80 m de profundidade. Os dados usados foram oriundos de campanha de 5 anos (2002 – 2006), medindo a direção de incidência, o período e a altura das ondas em intervalos de 30 minutos.

Por haver muitas falhas nos dados, dos cinco anos foi feita a construção de uma série completa de um ano com intervalo de 2 horas. Os dados de onda do ano “fictício” apresentam as seguintes características: a altura significativa está compreendida entre o valor máximo de 4,29 m e mínimo de 0,56 m e o período entre o valor máximo de 16,667 s e mínimo de 3,125 s. Estes dados de ondas foram usados diretamente no modelo de propagação e transporte de sedimentos. Além disso, os dados foram separados em grupos ou *clusters* (Minucci,

2010), usando métodos de agrupamentos (que são métodos estatísticos destinados a dividir em subconjuntos representativos um conjunto de dados observados). A partir de todos os dados existentes de uma amostra, um por um, a análise de agrupamento é capaz de resumi-los de modo que, nem a expressividade, nem a significância do conjunto de dados sejam perdidas. Minucci (2010) concluiu que o um algoritmo matemático de agrupamento satisfatório foi o da distância Euclidiana Padronizada seguido do método da Ligação Ponderada, resumindo todos os dados de um ano (aproximadamente 4 mil) em dados de 2 à 10 ondas dependendo dos parâmetros utilizados no agrupamento.

A direção do transporte foi chamada de NORTE quando para a esquerda de quem olha da praia para o mar, e SUL quando para a direita.

As estatísticas dos agrupamentos dos dados de ondas estão dispostas nas tabelas e figuras a seguir: a Tab. (1) e a figura (6) apresentam as características de cada grupo quando o agrupamento é feito exigindo-se 5 grupos de ondas sem nenhuma restrição. A Tab. (2) e a figura (7) apresentam as características de cada grupo quando o agrupamento é feito exigindo-se 3 grupos de ondas com a restrição de que estas ondas só provocam transporte para o norte (ondas de sul). A Tab. (3) e a figura (8) apresentam as características de cada grupo quando o agrupamento é feito exigindo-se 3 grupos de ondas com a restrição de que estas ondas só provocam transporte para o sul (ondas de leste e nordeste).

O domínio de aplicação do modelo de onda é mostrado na figura (9) e os valores de transporte de sedimento mostrados a seguir são a média ao longo do segmento, no meio da praia de matinhos (figura 9). Os resultados do transporte para cada grupo e para os dados brutos (soma do transporte causado por cada onda medida a cada 2 horas durante 1 ano) serão mostrados na próxima seção.

Tabela 1: Características de cinco grupos de ondas com dados do ano completo (sem restrição).

Grupo	transporte	proporção	H(m)	Direção (°)	T (s)
1	Norte	0,261	1,5	-24	9,8
2	Sul	0,293	1,2	33	7,1
3	Sul	0,351	1,9	25	8,8
4	Norte	0,074	1,8	-32	13,1
5	Norte	0,022	3,3	-34	14,1

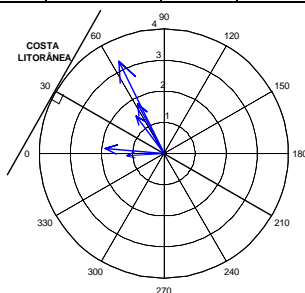


Figura 6: Características de cinco grupos de ondas com dados do ano completo (sem restrição).

Tabela 2: Características de três grupos de ondas com dados de ondas que transportam para norte.

Grupo	transporte	proporção	H(m)	Direção (°)	T (s)
1	Norte	0,107	1,5	-14	7,5
2	Norte	0,774	1,7	-30	10,5
3	Norte	0,119	2,9	-37	13,1

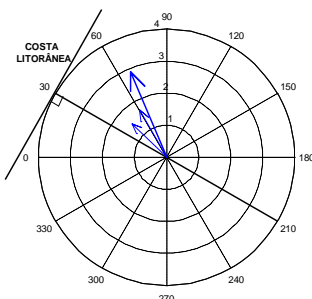


Figura 7: Características de três grupos de ondas com dados de ondas que transportam para norte.

Tabela 3: Características de três grupos de ondas com dados de ondas que transportam para sul para o sul

Grupo	transporte	proporção	H(m)	Direção (°)	T (s)
1	Sul	0,056	2,7	30	9,9
2	Sul	0,943	1,5	35	8,0
3	Sul	0,001	1,5	2	15,4

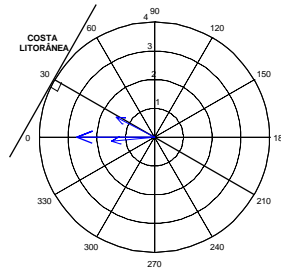


Figura 8: Características de três grupos de ondas com dados de ondas que transportam para sul.

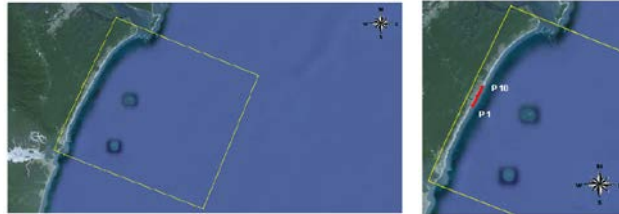


Figura 9: Domínio da malha e detalhe dos pontos de cálculo do transporte.

5. RESULTADOS e DISCUSSÕES

Para a avaliação do transporte de sedimentos utilizou-se o programa REF/DIF1 com os dados de entrada necessários que são a batimetria local e os dados de ondas (dados de ondas de um ano medidos de duas em duas hora e dados de ondas de um ano agrupados estatisticamente). Foi feita uma rotação de eixos para manter a costa ao longo de Y e a perpendicular incidente como eixo X. Após a execução do modelo, obtêm-se os arquivos de saída do programa REF/DIF1 com os resultados dos parâmetros de ondas na arrebentação (altura significativa e ângulo), para então serem utilizados na fórmula de Kamphuis. A figura 10 exemplifica as simulações feitas mostrando alturas de onda de 2 simulações para ondas diferentes. É possível perceber as regiões de sombra atrás das ilhas, além de efeitos de refração, franjas de difração, etc. Finalmente é feito o cálculo da taxa de transporte de sedimento, através da fórmula de Kamphuis (em m^3 por ano), sendo definido que o transporte positivo indica o transporte de sedimentos para Norte (na realidade N-NE, devido à ligeira inclinação da costa em Matinhos) e o transporte negativo indica o transporte de sedimentos para Sul (na realidade S-SW).

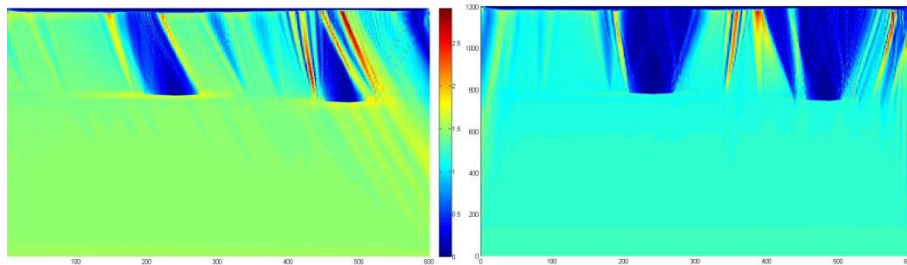


Figura 10: Duas saídas do REF/DIF para a praia de Matinhos. Altura/incidência/período: 1,5m/-45°/9,8s (esquerda) e 1,3m/0°/7,2 (direita).

Para cada onda foi executado o cálculo da quantidade de transporte de sedimentos que causaria em duas horas. Fazendo a soma de todos os resultados dos transportes de sedimentos calculados dos dados de ondas de um ano, obteve-se o transporte de sedimento durante o ano. O resultado obtido para o transporte de sedimentos para o ano fictício nestes dez pontos ao longo da costa apresenta-se na Tab. (4) em m^3/ano . Fazendo uma média entre os valores obtidos no transporte total, para os dez pontos de análise, encontram-se os valores do transporte de sedimentos ao longo do segmento mostrado na figura (10), mostrado na última linha da Tab. (4).

Tabela 4: Transporte de sedimentos para o ano fictício em m^3/ano

	Transporte para norte	Transporte para sul	Transporte Total (m^3/ano)
P ₁	1.747.679	-868.992	878.687
P ₂	1.756.959	-872.276	884.683
P ₃	1.756.144	-891.056	865.088
P ₄	1.760.179	-890.228	869.951
P ₅	1.758.471	-890.413	868.058
P ₆	1.763.425	-896.273	867.152
P ₇	1.763.379	-890.965	872.414
P ₈	1.771.771	-875.493	896.278
P ₉	1.761.640	-883.746	877.894
P ₁₀	1.750.251	-884.641	865.610
Média anual			874.582

Os resultados para o transporte de sedimentos, para os dados de onda que estão separados por grupos, foram obtidos utilizando o agrupamento formado com dados sem restrição com 5 grupos, mostrado na Tab. (5) e restringindo para ondas que contribuem para o norte e para o sul (três grupos cada). A média do transporte de sedimentos entre os dez pontos ao longo da costa apresentam-se nas Tab. (6) e (7) em m^3/ano .

Tabela 5: Transporte de sedimentos para cinco grupos de ondas sem restrição.

Grupo	ONDA	Transporte (m^3/ano)
1	Norte	536.200
2	Sul	-511.686
3	Sul	-811.224
4	Norte	640.502
5	Norte	675.342
	Σ	529.134

Tabela 6: Transporte de sedimentos para três grupos de ondas que transportam para norte.

Grupo	ONDA	Transporte (m^3/ano)
1	Norte	41.579
2	Norte	882.901
3	Norte	411.235
	Σ	1.335.715

Tabela 7: Transporte de sedimentos para três grupos de ondas que transportam para sul.

Grupo	ONDA	Transporte (m^3/ano)
1	Sul	-134.969
2	Sul	-659.414
3	Sul	-1.536
	Σ	-795.919

Neste trabalho, as ondas agrupadas tenderam a causar um transporte líquido para norte um pouco menor que as ondas sem agrupamento. É necessária uma investigação das razões para tal discrepância.

Para que se possa fazer uma comparação entre os resultados obtidos nesse trabalho e os resultados encontrados por outros autores, deve-se levar em conta que os pontos (regiões de análise para o transporte de sedimentos) usados para os cálculos ao longo da costa são diferentes, assim como o modelo utilizado para o cálculo, o que leva a resultados diferentes. Mas pode-se constatar que os resultados estão em conformidade: apresentam uma tendência de transporte de sedimentos da região sul para norte. É interessante notar que o cálculo de transporte usando agrupamentos forneceu bons resultados em comparação com o uso dos dados brutos de ondas. Isso mostra que, para efeito de transporte longitudinal de sedimento, é possível substituir as dezenas de milhares de componentes de onda que ocorrem ao longo do ano por um número muito menor, de apenas 5-6 ondas.

Wosiacki (2009) calculou o transporte de sedimentos em três seções ao longo da costa do Paraná, usando, a partir dos dados do programa PIC, apenas coeficientes de refração e empinamento (lei de Snell) para determinar parâmetros das ondas, e as equações de Kamphuis e do CERC para as estimativas de transporte de sedimentos. Para a equação de Kamphuis foi encontrado em média um total de $582.270 m^3/ano$ com sentido para o norte. Este resultado, apesar das simplificações envolvidas no desprezo da difração provocada pelas ilhas ao largo, é muito próximo dos resultados do presente trabalho com ondas agrupadas.

Martins (2004) calculou um transporte de sedimentos da ordem de 1,5 milhões de m^3/ano , próximo à desembocadura sul do complexo estuário de Paranaguá. Alfredini (1999) calculou valores da ordem de 2,2 milhões de m^3/ano para a praia de Brejatuba em Guaratuba. Estes dois últimos trabalhos mencionados não foram aplicados na praia de Matinhos, mas são praias sujeitas às mesmas condições de ondas, e mostram um transporte na mesma ordem de magnitude que do presente trabalho, embora um pouco mais elevado. Gobbi (1997) encontrou valores próximos de $400.000 m^3/ano$ em alguns pontos ao longo da costa do Paraná, que estão também próximos aos valores encontrados aqui.

Métodos de campo para medir a taxa de transporte de sedimentos longitudinal também podem ser realizados, porém são extremamente custosos e tais medições são inexistentes na costa do Paraná.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho tem como objetivo principal a quantificação do transporte longitudinal de sedimentos ao longo da costa do Paraná utilizando dados de onda ao largo da costa e modelagem da transformação das ondas. Para se alcançar o objetivo proposto o primeiro passo foi determinar um modelo matemático para o campo de ondas que chega ao longo da costa paranaense. Foi então utilizada a equação do declive suave (*mild slope equation*), que descreve o perfil de ondas para topografias suaves. Porém por ser uma equação que necessite de condições em todo o domínio do problema, foi feita uma aproximação parabólica que precisa apenas de condições iniciais.

Depois foi construído um modelo numérico para a equação parabólica utilizando-se o método de diferenças finitas. Modelo que permite a execução com baixo custo computacional. Para a execução do modelo foi utilizado

o programa REF/DIF1, versão 2.5, no qual é necessário o conhecimento dos dados de ondas no início da propagação: período, ângulo e amplitude.

Os dados de ondas utilizados nos arquivos de entrada indat.dat do programa REF/DIF1 foram cedidos pelo PIC (Programa de Informação Costeira da Universidade Federal de Santa Catarina) e estes dados de ondas foram separados de duas maneiras: em dados de ondas de dois anos coletadas de duas em duas hora. Após a execução deste modelo, utilizando estes dados de ondas, obtiveram-se os valores do período, do ângulo e da amplitude, no momento da arrebentação da onda, que são necessários para o cálculo do transporte de sedimentos.

Utilizando a equação de Kamphuis e com os dados de onda obtidos na arrebentação foi possível calcular o transporte longitudinal de sedimentos ao longo da costa do Paraná, atingindo assim o objetivo principal deste trabalho.

Os valores do transporte de sedimento obtidos neste trabalho mostram-se coerentes quando comparados com resultados de outros autores presentes na literatura, mesmo considerando as aproximações na batimetria. Em geral o sentido do transporte de sedimentos provocado pelas ondas (predominam em maior quantidade as ondas vindas do sul) é para o norte.

Para uma extensão deste trabalho recomenda-se uma análise para o transporte de sedimentos utilizando-se mais dados de ondas e testando outros pontos ao longo da costa, podendo assim fazer comparações entre os resultados obtidos, observando se as diferenças entre os valores anuais são significativas ou não.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo, R.J., 1984, "As Praias do Paraná: problemas decorrentes de uma ocupação inadequada." Boletim Análise Conjuntural
- Angulo, R. J., 1992, "Geologia da Planície Costeira do Estado do Paraná." Tese de doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Brasil.
- Angulo, R.J. & Araújo, A.D., 1996, "Classificação da costa paranaense com base na sua dinâmica, como subsídio à ocupação da orla litorânea." Boletim Paranaense de Geociências.
- Alfredini, P., 1999, "The longshore transport evaluation used as a tool for the brazilian coastline litoral processes knowledge." Anais do VII Congresso Brasileiro da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA).
- Berkhoff, J. C. W., 1972, "Computations of Combined Refraction-Diffraction." Em Proc. 13th Conference on Coastal Engineering, Vancouver. ASCE.
- Bowen, A. , 1969, "Rip Currents: 1. Theoretical Investigations." Journal of Geophysical Research.
- Booij, N. , 1983, "A note on the accuracy of the mild slope equation." Coastal Engrg.,7,191- 203.
- CERC. Shore Protection Manual. Washington, DC: [s.n.].
- Gobbi, E. F. , 1997, "Gerenciamento costeiro: análise de caso do litoral do Paraná sob a perspectiva da engenharia costeira." Tese de Doutorado-COPPE/UFRJ,.
- Kamphuis, J. W., 1991, Alongshore sediment transport rate, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering ASCE.
- Kirby, J. T., Dalrymple, R. A. and Shi, F., 2002, "Combined Refraction/Diffraction Model, REF/DIF 1, Version 2.5, Documentation and User's Manual." Center for Applied Coastal Research Department of Civil and Environmental Engineering University of Delaware, Newark.
- Lisniewski, M. A., 2009, "Concentração de sedimentos transportados em suspensão e taxa de transporte longitudinal no litoral do Paraná, Brasil." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, (2009).
- Longuet-Higgins, M. S., 1970, "Longshore currents generated by obliquely incident sea waves 1 e 2." Journal of Geophysical research, v. 75, n. 33.
- Martins, G., 2004, "Dinâmica da zona rasa de shoaling e o transporte de sedimentos na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá-PR." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.
- Massel S.R. "Hydrodynamics of coastal zones." Elsevier Publ., Amsterdam.
- Mei, C.C. "Shoaling of Spiral Waves in a Circular Basin," J. Geophysical.
- Melo Filho, E., 2004. "Programa de Informação Costeira on-line: Um balanço dos primeiros dois anos de funcionamento". 1º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande. [disponível on-line em http://www.semengo.furg.br/2004/39_2004.pdf]
- Minucci, L. R., 2010, "Análise de agrupamentos de dados marinhos para quantificação do transporte de sedimentos da região costeira central do estado do Paraná." Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná.
- Noernberg, M.A.; Angelotti, R.; Caldeira, G.A. & Ribeiro de Sousa, A.F., 2008, "Determinação da sensibilidade do litoral paranaense à contaminação por óleo," Braz. J. Aquat. Sci. Technol..
- Porter, D. & Chamberlain, P. G., 1997, "Gravity Waves in Water of Finite Depth" (ed. J. N. Hunt), Computational Mechanics Publications.
- Radder, A. C. , 1979, "On the parabolic equation method for water wave propagation." J. Fluid Mech.
- Wosiacki, L. F. K., 2009, "Cálculo do transporte de sedimento ao longo da costa na região central do estado do Paraná." Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná.