

Modelagem Numérica do Potencial Hidrodinâmico e do Transporte de Sedimentos na Praia do Cassino e no Entorno dos Molhes da Barra de Rio Grande (RS), Utilizando o Modelo SMC

Felipe Caetano Sprovieri, José Antonio Scotti Fontoura

Universidade Federal do Rio Grande
f.sprovieri@furg.br; josefontoura@furg.br

Recebido: 26/08/11 - revisado: 30/09/11 - aceito: 28/05/12

RESUMO

Com os recentes avanços no estudo da dinâmica sedimentar em regiões costeiras, torna-se possível investigar os mecanismos que governam o processo de transporte sedimentar, bem como, as taxas que regem este transporte. Contudo, uma análise quantitativa deste tipo de estudo envolve incertezas consideráveis, isto porque, os fenômenos envolvidos no transporte de sedimentos em ambientes costeiros apresentam padrões complexos, tanto no aspecto hidrodinâmico, como na parte da dinâmica de sedimentos. Desta forma, a utilização de modelos numéricos que descreva/simule a evolução morfológica do ambiente costeiro, com base no estudo do transporte de sedimentos do local, é uma alternativa que apresenta grande potencial para avaliar a dinâmica sedimentar em ambientes complexos. Este estudo visa avaliar a dinâmica do transporte de sedimentos na Praia do Cassino no estado do Rio Grande do Sul. Para isso, foi utilizado o Sistema de Modelagem Costeira (SMC), que é uma ferramenta numérica desenvolvida pelo Grupo de Engenharia Oceanográfica de Costas (GIOCO), da Universidad de Cantabria, Espanha. Os resultados obtidos no estudo demonstram que o modelo numérico aplicado responde corretamente para a área de estudo, desta forma possibilitando compreender o padrão de transporte de areia mediante cenários de onda correspondentes ao período de verão/primavera e outono/inverno.

Palavras Chave: Transporte de Sedimentos, Sistema de Modelagem Costeira, Erosão/Sedimentação.

INTRODUÇÃO

A morfodinâmica de ambientes costeiros é um estudo complexo. Isto devido ao alto grau de variabilidade do sistema, o qual acopla níveis energéticos que atuam em escalas espaciais e temporais distintas. O sistema costeiro é controlado através do contínuo ajuste hidrodinâmico e morfológico, sendo este fornecido pelo processo de transporte de sedimento. Este tipo de ajuste é retroalimentado, pois no momento em que a morfologia evolui, as condições encontradas pela hidrodinâmica estão alteradas, fazendo com que ocorra um reajuste do sistema (Cowell e Thom, 1994). Todos os processos de ajuste realizados dentro do sistema costeiro são reflexos do transporte de sedimento, o qual é resultado da interação entre o movimento do fluido sobre uma superfície não consolidada, induzida pela tensão de cisalhamento, gerando movimento e subsequente transporte. As implicações que o processo de transporte de sedimentos apresenta, abrangem os mais variados níveis, sendo reflexo da complexidade

ambiental de cada local. No entanto, quantitativamente este tipo de estudo apresenta incertezas consideráveis, apesar do esforço dedicado a esta problemática, com erros superiores a uma ordem de magnitude (Taborda, 1999). Este tipo de variação encontrado nos resultados pode ser explicado pela complexidade dos fenômenos envolvidos, tanto na parte da hidrodinâmica como também na parte da dinâmica de sedimentos, as quais apresentam padrões complexos (Taborda, 1999, Fontoura, 2004). Os mecanismos que governam o processo de transporte sedimentar, bem como, as taxas que regem este transporte, afetam diretamente a qualidade, durabilidade, segurança e custos (gerenciamento) envolvidos em obras costeiras, as quais visam controlar este fenômeno (Fontoura, 2004). Quantitativamente, as taxas de transporte sedimentar que ocorrem na zona de surfe, são muito superiores que em outras zonas. Isto, devido ao processo de quebra das ondas, que ocorre neste local. O processo de quebra dissipa grande quantidade de energia contida nas ondas, mobilizando uma grande massa de sedimentos e os colocando em suspensão. Junto a este processo, a incidência oblíqua das ondas sobre a linha

de costa, gera uma corrente, conhecida como corrente longitudinal, a qual tem alta capacidade de transportar sedimentos na zona de surfe. Porém, a zona de surfe apresenta caráter hostil para o levantamento de dados de campo, desta forma, a complexidade de estudos morfológicos que abordem uma escala temporal em nível de engenharia torna-se comprometida. Portanto, a utilização de modelos que descreva/simule a evolução morfológica do ambiente costeiro é uma alternativa que apresenta grande potencial. Desde que, os dados ambientais inseridos no modelo sejam de qualidade e que os processos/resultados obtidos pela modelagem possam ser confrontados/comparados com dados medidos *in situ*.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar o transporte de sedimentos na Praia do Cassino no Rio Grande do Sul, através de modelagem numérica. As simulações realizadas para tal objetivo são baseadas em cenários, os quais representam estados de mar predominantes na região. O primeiro cenário utilizado na modelagem representa período de primavera e verão e, o segundo cenário representa período de outono e inverno.

ÁREA DE ESTUDO

A Praia do Cassino (Figura 1) está localizada na porção centro-sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Esta planície possui 700 km de comprimento e até 120 km de largura no sistema lagunar formado pela Lagoa dos Patos e Lagoa Mirim (Fontoura, 2004). A praia do Cassino, pertence ao município de Rio Grande e, está localizada ao sul da desembocadura da Lagoa dos Patos (Figura 1).

A linha de costa do estado do Rio Grande do Sul se estende por 630 km, apresentando características homogêneas ao longo de sua extensão. A ausência de promontórios rochosos e/ou baías no decorrer de sua trajetória a torna uma linha de costa singular, sendo uma costa arenosa totalmente exposta à energia incidente do ambiente oceânico adjacente.

A praia do Cassino está altamente influenciada pela desembocadura da Lagoa dos Patos, onde a presença dos molhes da Barra de Rio Grande exerce

papel fundamental no comportamento das características morfodinâmicas da praia. A linha de costa da Praia do Cassino possui orientação segundo o eixo nordeste-sudoeste (NE-SW), enquanto o eixo central da desembocadura da Lagoa dos Patos, nos molhes da Barra de Rio Grande, segue orientação noroeste-sudeste (NW-SE), formando um ângulo de aproximadamente 73° com o prolongamento da linha de praia ao sul (Fontoura, 2004).

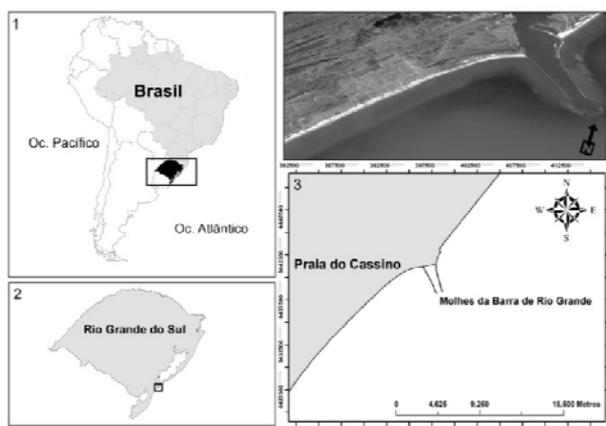


Figura 1 - Área de estudo mostrando a Praia do Cassino e os Molhes da Barra de Rio Grande.

MODELAGEM

A modelagem numérica dos processos envolvidos no transporte de sedimentos na Praia do Cassino foi realizada através do Sistema de Modelagem Costeira – SMC. O SMC é uma ferramenta numérica desenvolvida pelo Grupo de Engenharia Oceanográfica e de Costas (GIOC), da Universidade de Cantabria, Espanha, no âmbito da Direção Geral de Costas do Ministério do Meio Ambiente (GIOC, 2003a). O uso do SMC é destinado especificamente a engenheiros técnicos, os quais desenvolvem atividades no âmbito costeiro.

O SMC integra uma série de modelos numéricos, os quais se encontram estruturados de acordo com as escalas temporais e espaciais dos processos a serem modelados. Na Figura 2 é apresentada a estrutura de organização do SMC (GIOC, 2003a).

O Sistema de Modelagem Costeira – SMC é estruturado em cinco módulos fundamentais. “Pré-Processo” é o módulo que permite caracterizar e processar informações de entrada para os diferentes modelos numéricos. O módulo de análise de curto

prazo de praias “Acordes” recorre às ferramentas numéricas que permitem analisar a morfodinâmica de um sistema costeiro, em uma escala espaço-temporal de curto prazo. O “Arpa” é o módulo que permite analisar a morfodinâmica de praias em uma escala espaço-temporal de médio e longo prazo. O módulo de “Modelagem de Terreno” permite modificar os contornos do fundo (batimetria) e laterais (estruturas), o qual é fundamental para avaliar diferentes cenários de um projeto de engenharia. Finalmente, o módulo “Tic” é o tutor de engenharia de costas que se encontra dentro do SMC como apoio teórico, conceitual e de informação básica para os diferentes modelos numéricos do sistema (GIOC, 2003a).

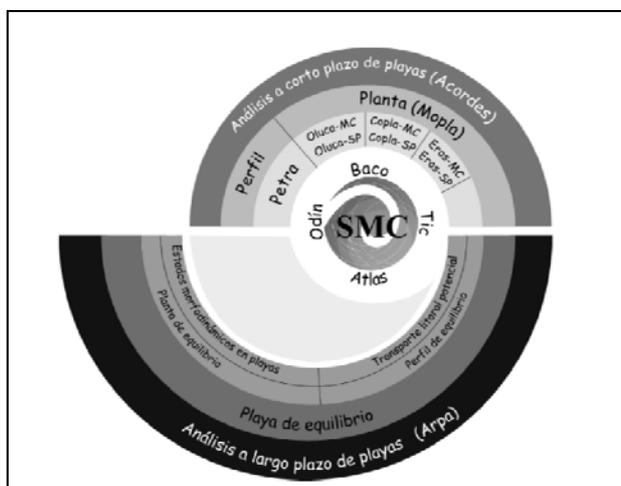


Figura 2 - Estrutura de organização do Sistema de Modelagem Costeira - SMC.

No escopo do presente trabalho, foi utilizado para modelagem dos processos costeiros o “MOPLA”, ferramenta numérica inserida no módulo “Acordes”.

MOPLA

O MOPLA é composto por três modelos numéricos distintos que simulam a evolução morfodinâmica de uma praia, modelando a propagação e transformação das ondas sobre o domínio (OLUCA), determinado o sistema de correntes (COPLA) através dos tensores de radiação devido à propagação das ondas, e calculando o transporte de sedi-

mento e evolução batimétrica (EROS), com base no campo de ondas e correntes (GIOC, 2003d).

Os modelos OLUCA, COPLA e EROS trabalham sequencialmente, pois os dados de saída de um modelo são utilizados como entrada para o próximo. Inicialmente, calculam-se os campos de ondas para os casos executados no modelo OLUCA. Os resultados obtidos são executados no COPLA para o cálculo do campo de correntes em função dos tensores de radiação gerados pelas componentes de energia das ondas. E por fim, os dados de velocidade e direção do campo de correntes são utilizados para determinação do transporte de sedimentos (GIOC, 2003d).

CENÁRIOS SIMULADOS

A modelagem do transporte de sedimentos na Praia do Cassino será realizada a partir de cenários, os quais representam estados de mares característicos do local investigado. O clima de ondas corresponde ao padrão estatístico dos seus parâmetros descritivos, tais como altura significativa (H_s), período (T), direção (Dir) de propagação e energia. As ondas geradas pelo vento aqui são designadas por vagas ou *sea*, e aquelas geradas por tempestades longe do local de geração, por ondulações ou *swell*. Em geral, no litoral do Rio Grande do Sul, os dois regimes estão presentes, tanto as vagas quanto as ondulações, o que caracteriza um espectro direcional bi-modal, interferindo um sobre o outro e com predominância ora das vagas, ora das ondulações (Strauch *et al.*, 2009).

A idéia geral na escolha do cenário a ser simulado, parte da abordagem em como as taxas de transporte de sedimentos varia no local estudado. Fontoura (2004), através de dados medidos na Praia do Cassino, verifica que as taxas de transporte de sedimentos oscilam significativamente, mediante as condições ambientais governantes no momento analisado. A magnitude das taxas envolvidas no processo de transporte de sedimentos na Praia do Cassino oscila entre 0,23 e 25,1 m³/h, segundo as condições ambientais regentes durante o período de medição Fontoura (2004).

Partindo desta análise, e focando a importância do estudo de modelagem de transporte de sedimentos no local seja aplicada a práticas de projetos de engenharia, segurança de navegação e gerenciamento costeiro, assume-se que simular condições de mar que ocorram constantemente ao longo do ano na Praia do Cassino, seja uma forma eficaz

para estimar valores de transporte de sedimentos no local. Desta forma, torna-se possível analisar as taxas envolvidas no processo, eliminando valores subestimados ou superestimados. Assim, o valor encontrado conduzirá a uma abordagem padrão, ou seja, será estimada a taxa de transporte de sedimentos que ocorre em condições energéticas normais, segundo as características de mares mais frequentes verificadas no local.

Os cenários escolhidos se basearam nos resultados obtidos por Strauch (1997, 2001) e Strauch *et al.*, (2009). Onde foi realizado o monitoramento do clima ondulatório em Rio Grande, a partir de dados medidos por um ondógrafo direcional, tipo Waverider, durante o período de 28 meses (início da medição outubro de 1996). O ponto de fundeio do ondógrafo foi 32° 10' S e 51° 58' W, na profundidade de 17 m.

O cenário 01, foi determinado como sendo característico de primavera e verão, com ondas de altura significativa média de 1 m, propagando-se com uma direção média de 110° (ESE), tendo como período significativo médio 8 s.

O cenário 02, foi determinado como sendo característico de outono e inverno, com ondas de altura significativa média de 1,5 m, propagando-se com uma direção média de 160° (SSE), tendo como período significativo médio 12 s.

VALIDAÇÃO DO MODELO

Para validar a modelagem para área de estudo em questão e, desta forma poder avaliar o transporte de sedimentos no local, foram realizadas simulações baseadas em casos medidos no local. Fontoura (2004) através do uso de armadilhas de sedimentos instaladas na zona de surfe da praia do Cassino mediu a taxa de transporte em três perfis transversais à linha de costa. Concomitantemente à medição da taxa de transporte de sedimentos realizada, foram adquiridos dados de altura de onda com o uso de vídeo e, dados de corrente longitudinal através de bóia derivadora e bússola. Os dados medidos neste trabalho, bem como as condições governantes no momento da medição foram simulados no SMC, para que os valores encontrados na modelagem fossem comparados aos medidos, e a partir da comparação fosse estabelecido um critério de avaliação do modelo para o local investigado. Os dados medidos por Fontoura (2004) utilizados para validação do modelo para área de estudo, juntamente

com os valores obtidos na validação do modelo através da modelagem com o modelo numérico SMC, podem ser visualizados na Tabela 1. Os resultados são referentes a cada perfil modelado, no mesmo local aonde foram medidos os dados por Fontoura (2004).

Tabela 1 - Tabela apresentando as taxas e direções de transporte medidas por Fontoura (2004), juntamente com as taxas e direções obtidas pelo modelo para validação. Coluna marcada com * representa valores modelados.

Pontos	Q (m ³ /m/h)	Dir (°)	Q (m ³ /m/h)*	Dir (°)*
Perfil 1	1,92	NE-SW	6,88	NE-SW
Perfil 2	2,60	NE-SW	2,25	NE-SW
Perfil 3	4,24	SW-NE	1,06	SW-NE

Ressalta-se que já se espera uma discrepância nos resultados, pois os dados medidos *in situ* acoplam fenômenos naturais que não são introduzidos na modelagem. A principal diferença esperada é em relação ao vento, pois este agente energético possui grande influência no transporte de sedimentos no local (Fontoura, 2004, Tomazelli *et al.*, 2004, Siegle e Calliari, 2008). O SMC não possui acoplamento entre vento e ondas, diferentemente do modelo Delft 3D, que utiliza o SWAN como propagador de ondas, o qual possibilita acoplar o vento sobre a superfície, como agente energético externo (Delft3D, 2009). Existem outros fenômenos que contribuem para diferir os dados medidos dos modelados, isso devido à modelagem numérica estar limitada em fórmulas empíricas e semi-empíricas, as quais nem sempre se ajustam perfeitamente a área de estudo em questão.

A partir dos resultados da validação foi possível observar que existe diferença entre os dados medidos e os dados modelados (Figura 3). Esta diferença encontrada pode ser explicada pela influência de forçantes locais que atuam na área de estudo, como por exemplo, o vento. Este agente energético influencia fortemente o transporte de sedimentos na costa do Rio Grande do Sul, fazendo com que os dados modelados apresentassem discrepância com os dados medidos por Fontoura (2004). O vento influencia fortemente a corrente superficial na zona de surfe da Praia do Cassino, desta forma controlando significativamente o transporte de sedimentos no local (Jung *et al.*, 2005). Outro fator que deve ser considerado, é que os dados de transporte de sedimentos medidos por Fontoura (2004) abrangem várias classes granulométricas presentes no local de

cada medição, já os dados modelados utilizam apenas um diâmetro médio de grão. Neste trabalho foi utilizado apenas areia fina como tipo de sedimento de fundo do modelo, com diâmetro médio de grão de 0,125 mm.

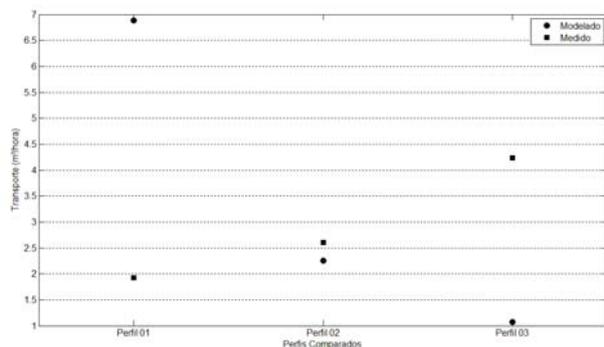


Figura 3 - Comparação entre os dados medidos em três perfis localizados na Praia do Cassino e, os dados modelados com o SMC.

Analisando os resultados da taxa de transporte na validação do modelo, é possível observar que no Perfil 01 o valor encontrado na modelagem foi superior ao medido. Nos Perfis 02 e 03 os dados modelados foram inferiores aos medidos. Como cada perfil foi simulado com características hidrodinâmicas específicas, não é possível comparar um perfil com outro, com intuito de determinar uma taxa de variação entre os dados medidos e modelados. Ressalta-se, que por mais que os valores encontrados apresentem-se distintos dos medidos, o modelo responde de forma eficaz para o local estudado. Visto que existem diversos fenômenos que ocorrem na natureza que não estão acoplados na modelagem, devido às limitações do modelo. Principalmente em relação aos tipos de sedimentos presentes no local, pois Fontoura (2004) determinou a taxa de transporte ao longo de toda coluna d'água, desta forma medindo tanto o sedimento transportado no fundo, como o sedimento em suspensão na coluna d'água. A modelagem foi realizada utilizando o sedimento de fundo apenas, sendo assim subestimando os resultados.

RESULTADOS

Os resultados obtidos na modelagem serão apresentados de acordo com os casos simulados. Foram simulados dois casos de ondas observados no local ao longo do ano Strauch (1997, 2001) e Strauch

et. al., (2009), um referente ao clima de ondas de verão e primavera e, o outro clima de ondas para o inverno e outono.

Foram inseridos pontos de controle ao longo da Praia do Cassino, espaçados a cada 1.000 m, para facilitar a discussão e comparação dos resultados entre os casos simulados. O ponto de controle inicial (P0) é localizado na base do Molhe Oeste da Barra de Rio Grande, e o ponto final (P10) localiza-se no final do setor urbanizado do município.

Caso 1: Primavera e Verão

Na Figura 4 é apresentada a distribuição da altura significativa de onda ao longo do domínio computacional modelado. A partir dos resultados obtidos no modelo, a onda de 1,00 m de altura propagada na fronteira SE do domínio computacional focaliza a energia entre os pontos de controle P3 e P5. O fenômeno da convergência dos raios (focalização) de onda neste caso proporciona um aumento na altura das ondas propagadas (1,00 m) de aproximadamente 0,50 m. A altura significativa observada após a convergência da onda é de aproximadamente 1,50 m. O processo de difração das ondas domina a ondulação incidente na linha de praia entre os pontos de controle P0 e P2. Neste setor da praia, as ondas propagadas ($110,00^\circ$) atingem o ponto de controle P0 com altura significativa de 0,3 m, aumentando gradativamente em direção ao ponto P2, onde os valores de altura atingem aproximadamente 0,7 m. Porém, entre o ponto P1 e P2 é observado uma área com ondas de 0,5 m aproximadamente. É evidente a presença da zona de sombra na parte sul do molhe oeste, que se estende do ponto P0 até o P2, devido à atenuação da energia de onda incidente na praia pela presença dos molhes. Entre os pontos de controle P5 e P6 a altura significativa de onda foi de 1,0 m aproximadamente, entre os pontos P6 e P7 a altura significativa foi de 0,8 m, e entre o ponto P7 e P10 a altura significativa foi de 1,0 m, isso próximo à linha de praia.

A distribuição dos campos de corrente ao longo da área de estudo é apresentada na Figura 5. Neste caso a velocidade máxima de corrente observada foi de 0,15 m/s, esta verificada entre os pontos P4 e P5. Local onde foram observados os maiores valores de alturas significativas de onda (1,50 m) para o caso simulado. As correntes verificadas para este caso apresentaram dois padrões distintos. Um padrão de correntes foi observado entre os pontos de controle P3 e P10, onde o sentido predominante é para sudoeste, com intensidades variando entre 0,01 e 0,15 m/s. O outro padrão observado foi entre

os pontos P0 e P3, onde o sentido predominante é para nordeste, com intensidades variando entre 0,01 e 0,08 m/s. As correntes observadas fora da zona de arrebatção das ondas apresentam baixa intensidade, em torno de 0,02 m/s. Estas correntes entram na praia com o mesmo ângulo de incidência das ondas ($110,00^\circ$), porém no momento que entram na zona de arrebatção, formam um sistema de vórtices, que divergem para sentidos opostos entre o ponto P4 e P3. O vórtice que se forma entre o P4 e P7, flui no sentido sudoeste, e o vórtice que se forma entre o P3 e P0, flui no sentido nordeste.

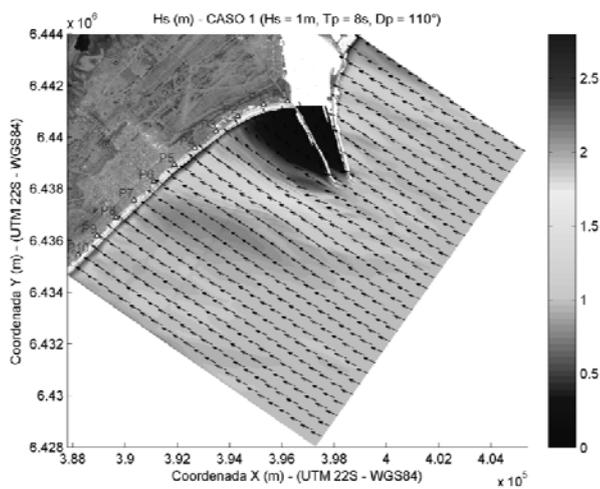


Figura 4 - Mapa da distribuição de altura significativa (m) de onda ao longo do domínio computacional, relacionado ao caso 1.

A modelagem do transporte de sedimentos na Praia do Cassino é apresentada na Figura 6. Neste caso o transporte máximo observado situa-se entre os pontos de controle P4 e P5. Local onde ocorreram as maiores alturas de onda e maiores intensidades de correntes relacionadas ao caso, respectivamente. As taxas de transporte calculadas para este setor variam em torno de $0,70 \text{ m}^3/\text{m}/\text{h}$. A direção predominante do transporte é para sudoeste. Porém, existe um transporte para nordeste entre o ponto P3 e P2, com taxas em torno de $0,30 \text{ m}^3/\text{m}/\text{hora}$.

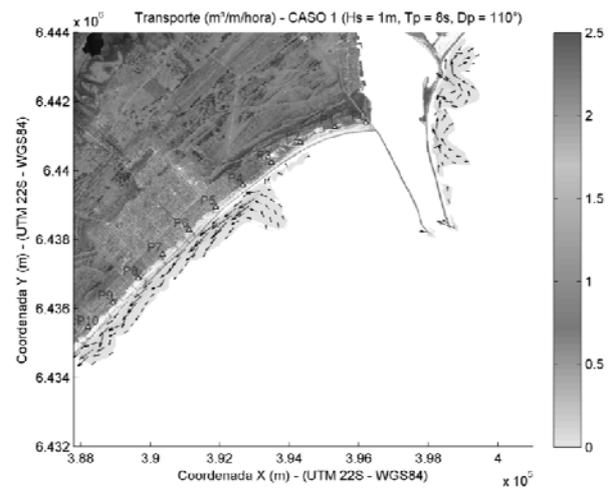


Figura 6 - Mapa de transporte de sedimentos ($\text{m}^3/\text{m}/\text{hora}$) ao longo do domínio computacional, relacionado ao caso 1.

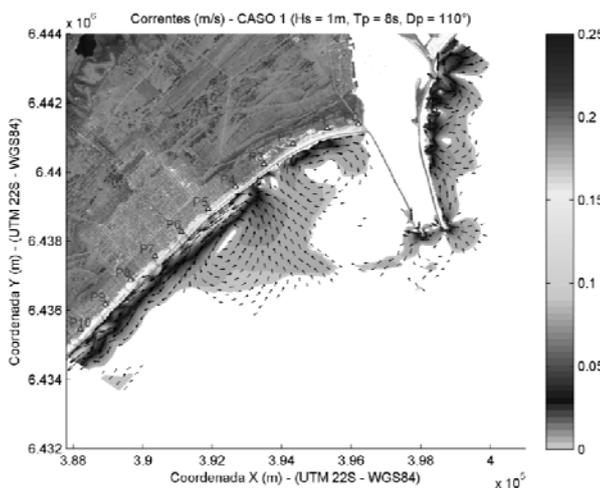


Figura 5 - Mapa da distribuição de velocidades de corrente (m/s) ao longo do domínio computacional, relacionado ao caso 1.

Caso 2: Inverno e Outono

Analisando a distribuição de altura de onda no caso 2, apresentado na Figura 7, observou-se um maior nível energético incidente comparado ao caso 1, mostrado na Figura 4. A partir dos resultados obtidos no modelo (Figura 7), a onda de 1,50 m de altura propagada na fronteira SE do domínio computacional focaliza a energia entre os pontos de controle P0 e P2. O fenômeno da convergência dos raios (focalização) de onda neste caso proporciona um aumento na altura das ondas propagadas (1,50 m) de aproximadamente 0,40 m. A altura significativa observada após a convergência da onda é de aproximadamente 1,90 m. Entre os pontos de controle P2 e P5 a altura significativa de onda foi de 1,65 m aproximadamente, entre os pontos P5 e P8 a altura significativa foi de 1,75 m, e entre os pontos P8 e P10 a altura significativa foi de 1,50 m, isso próximo à linha de praia.

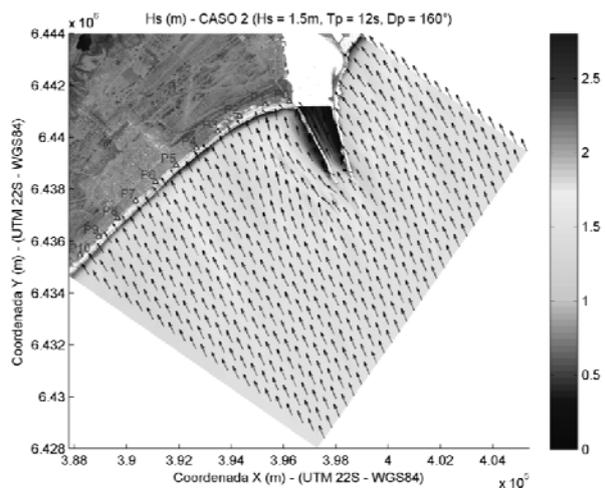


Figura 7 - Mapa da distribuição de altura significativa (m) de onda ao longo do domínio computacional, relacionado ao caso 2.

Na Figura 8 é apresentada a distribuição das velocidades de corrente ao longo do domínio computacional modelado. Neste caso a velocidade máxima de corrente observada foi de 0,23 m/s, esta verificada entre os pontos de controle P0 e P1, e entre os pontos P5 e P7. Locais onde foram observados valores de alturas significativas de onda em torno de 1,75 e 1,50 m, respectivamente, para o caso simulado. O padrão de correntes observado entre os pontos de controle P0 e P10 apresentam sentido predominante para nordeste, com intensidades variando entre 0,01 e 0,23 m/s. No setor compreendido entre os pontos de controle P3 e P8, e P0 e P2 foram observadas maiores intensidades na velocidade de corrente para o caso. As correntes observadas fora da zona de arrebentação das ondas apresentam baixa intensidade, em torno de 0,06 m/s. Estas correntes entram na praia com o mesmo ângulo de incidência das ondas (160,00°), porém no momento que entram na zona de arrebentação, geram um fluxo de retorno em direção a antepraia entre os pontos de controle P1 e P3, com velocidades em torno de 0,07 m/s. Um pequeno sistema de vórtice é observado entre os pontos de controle P0 e P1, com sentido para nordeste, intensificando as correntes neste setor.

O transporte de sedimentos modelado para o caso 2 é apresentado na Figura 9. Neste caso o transporte máximo observado situa-se entre os pontos de controle P3 e P5, e entre os pontos P7 e P8. Nestes setores a altura significativa de onda observada foi de 1,65 e 1,75 m respectivamente e, as velocidades de correntes máximas observadas foram de

0,23 m/s aproximadamente para ambos os setores. As taxas de transporte calculadas para estes setores variam em torno de 2,5 m³/m/h, com direção predominante do transporte para nordeste.

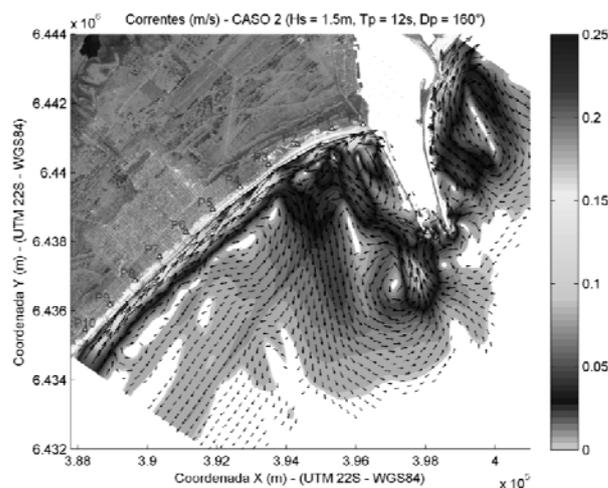


Figura 8 - Mapa da distribuição de velocidades de corrente (m/s) ao longo do domínio computacional, relacionado ao caso 2.

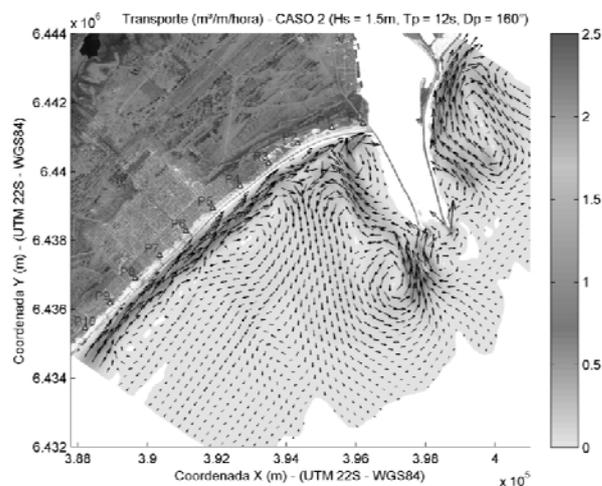


Figura 9 - Mapa de transporte de sedimentos (m³/m/hora) ao longo do domínio computacional, relacionado ao caso 2.

CONCLUSÕES

A modelagem do transporte de sedimentos para a Praia do Cassino, através da utilização do Sistema de Modelagem Costeira, se mostrou uma

ótima ferramenta para determinar a padrão do transporte no local. Os casos simulados neste trabalho foram baseados em condições que ocorrem frequentemente no local, desta forma os resultados encontrados servem como base para entender como funciona o processo de transporte de sedimentos ao longo do ano na Praia do Cassino.

De acordo com os resultados obtidos o transporte de sedimentos induzido pelas condições de agitação de verão e primavera (Caso 1) tem direção resultante para sudoeste. Para condições de agitação de inverno e outono (Caso 2) a direção resultante do transporte é para nordeste.

O transporte de sedimentos induzido pelas condições de agitação de verão e primavera (Caso 1) é limitado entre os pontos de controle P2 e P10, sendo que a presença dos Molhes da Barra de Rio Grande gera uma zona de sombra para as ondulações provenientes da direção leste-sudeste. A direção resultante do transporte de sedimentos no costado do Molhe Leste para condições de verão e primavera é para nordeste.

Em condições de inverno e outono (Caso 2) o transporte de sedimentos é distribuído ao longo de toda linha de praia (P0 ao P10), contudo a convergência da energia de onda gerada sobre o banco (Três Marias) localizado próximo ao Molhe Oeste induz um fluxo em direção a praia, fazendo com que as correntes litorâneas sejam redirecionadas para a antepraia. Este padrão de circulação e consequentemente de transporte de sedimentos formam uma célula de transporte, onde os sedimentos são transportados para o banco, através da corrente de retorno associado ao costado do Molhe Oeste, e o material depositado sobre o banco, retorna para a praia novamente através do fluxo gerado pela quebra das ondas sobre o banco.

Como o transporte de sedimentos resultante em condições de inverno e outono é para nordeste, e a presença dos Molhes da Barra bloqueia a passagem destes sedimentos, era de se esperar uma forte progradação da linha de costa na porção norte da praia, já que a presença dos Molhes da Barra atuam fisicamente no ambiente há mais de 100 anos, entretanto isto não tem ocorrido com a magnitude esperada. Um exame da Figura 9, sugere que a corrente gerada pelo processo de convergência das ondas sobre o banco das Três Marias (*wave set-up*), localizado a SO da desembocadura dos molhes, pode estar redirecionando o fluxo longitudinal de sedimentos, redistribuindo o material para a região da antepraia, e possivelmente contribuindo para a formação de um novo sistema de bancos longitudinais

que estariam se formando ao sul das Três Marias, conforme sugerido por Goulart e Calliari (2008).

O padrão de transporte de sedimentos associado ao Molhe Leste demonstra elevado potencial erosivo para o local, principalmente na raiz do molhe, conforme verificado no local.

As discrepâncias encontradas entre os dados modelados e medidos por Fontoura (2004) na validação do modelo podem ser explicadas pelas limitações do modelo utilizado. Como no local existe um intenso processo de transporte superficial de sedimentos, devido aos ventos locais serem intensos e constantes e, a declividade da praia ser extremamente suave ($0,5^\circ$), o valor encontrado já é subestimado em relação ao real.

REFERENCIAS

COWELL, P. J.; THOM, B. G. Morphodynamic of coastal evolution. In: CARTER, R. W. G. WOODROFFE, C. D. (Ed.). *Coastal Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. p. 33-86.

DELFT 3D. *Functional Specifications*. Netherlands: Deltares, 2009.

FONTOURA, J. A. S. *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*. 2004. 281 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

GIOC. *Coastal Modelling System (SMC): reference and user manual*. Cantabria: State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 2003a. 82 p. (in Spanish).

GIOC. *Spectral Wave Propagation Model (Oluca-SP)*. Cantabria: State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 2003b. 170 p. (in Spanish).

GIOC. *Wave Induce Currents Model in the Surf Zone (Coplá-SP)*. Cantabria: State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 2003c. 61 p. (in Spanish).

GIOC. *2DH-Morphodynamic Evolution Model for Near Shore Areas (MOPLA)*. Cantabria: State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 2003d. 262 p. (in Spanish).

GIOC. *Erosion and Sedimentation Evolution Model* (Eros). Cantabria: State Coastal Office Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 2003e. 55 p. (in Spanish).

GONZALES, M.; MEDINA, R.; GONZALES-ONDINAS, J.; OSÓRIO, A.; MÉNDEZ, F.; GRÁCIA, E. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. *Computers & Geosciences*, v. 33, n. 7, p. 916-931, 2007.

GOULART, E. S.; CALLIARI, L. J. Mapeamento batimétrico detalhado do banco das Três Marias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 3., 2008, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza, CE, 2008. 3 p.

JUNG, G. B.; PEREIRA, P. S.; CALLIARI, L. J. *Comportamento das correntes longitudinais na praia do Cassino, RS: análise durante o experimento cassino 2005*. Disponível em: <<http://www.praia.log.furg.br/Publicacoes/2008/2008f.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2011.

SIEGLE, E.; CALLIARI, L. J. High-Energy events and short-term changes in superficial beach sediments. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 56, n. 2, p. 149-152, 2008.

STRAUCH, J. C. Caracterização do estado de mar em Rio Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracajú. *Anais...* Aracajú, SE, 2001.

STRAUCH, J. C. Monitoramento de ondas em Rio Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., 1997, Vitória. *Anais...* Vitória, ES, 1997. v. 4, p. 385-391.

STRAUCH, J. C.; CUCHIARA, D. C.; TOLDO JR, E. E.; ALMEIDA, L. E. O padrão das ondas de verão e outono no litoral sul e norte do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 4, p. 29-37, 2009.

TABORDA, R. P. M. *Modelação da dinâmica sedimentar na plataforma continental portuguesa*. 1999. 366 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal, 1999.

TOMAZELLI, L. J.; DILLENBURG, S. R.; VILLWOCK, J. A. Geological Evolution of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, Special issue 39, p. 275-278, 2006. ICS 2004.

Numerical Modeling of Hydrodynamic Potential and Sediment Transport at Cassino Beach and Around the Rio Grande Barra Breakwaters (RS) Using the CMS

ABSTRACT

Recent advances in the study of sediment hydrodynamics in coastal regions make it possible to investigate the mechanisms that determine the sediment transport, and also the rates that rule this transport. However, quantitative analysis in this kind of study involves considerable uncertainties, because the phenomena involved in sediment transport in coastal environments present complex patterns, both as regards hydrodynamics and in sediment dynamics. Thus, the use of numerical models that describe/simulate the morphological evolution of the coastal environment based on the study of sediment transport at the site is an alternative that presents a high potential to evaluate sediment dynamics in complex environments. The purpose of this study is to evaluate the dynamics of sediment transport at Cassino Beach in the state of Rio Grande do Sul. For this purpose, the Coastal Modeling System (CMS) was used. It is a numerical tool developed by the Grupo de Ingeniería Oceánica y de Costas (GIOC), at Universidad de Cantabria, Spain. The results obtained in the study show that the numerical model applied is appropriate for the study area and that thus it allows understanding the sand transport pattern using wave scenarios corresponding to the summer/spring and autumn/winter periods.

Key-words: *Sediment Transport, Coastal Modeling System, Erosion/Sedimentation.*