Carlos Koji Yokoyama

Mobilidade sedimentar da plataforma continental do estado de São
Paulo em função da propagação de ondas.

Dissertação apresentada ao
Instituto Oceanográfico da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Ciências, área de
Oceanografia Geológica

Orientador: Prof. Dr. Eduardo
Siegle

São Paulo

2012

Universidade de São Paulo
Instituto Oceanográfico

Mobilidade sedimentar da plataforma continental do estado de São Paulo em
função da propagação de ondas.

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Ciências, área de Oceanografia Geológica

Julgada em ____/____/____

Prof(a). Dr(a).

Conceito

Prof(a). Dr(a).

Conceito

Prof(a). Dr(a).

Conceito

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1 Ondas (Wright, 1999)	3
1.2 Plataforma continental.....	7
1.3 Transporte, erosão e deposição de sedimentos.....	9
2. Objetivos	11
3. Justificativa	12
4. Área de estudo.....	12
5. Material e Métodos.....	17
5.1. Dados de ondas	17
5.2. Modelo numérico de propagação de ondas	18
5.2.1. Batimetria	19
5.3. Potencial de mobilização de sedimentos devido às ondas (método de Porter-Smith et al., 2004)	22
6. Resultados.....	24
6.1. Dados de ondas	24
6.2. Modelo numérico de propagação de ondas, Mike 21	35
6.2.1 Simulações	35
6.3. Mobilidade sedimentar	41
6.3.1 Área de remobilização	41
7. Discussão	57
8. Conclusões.....	62
9. Referências bibliográficas.....	63

Índice de figuras

Figura 1: Principais parâmetros de um perfil de uma onda. Fonte: Wrigth, 1999.	4
Figura 2: Modelo de geração de ondas. Fonte: Wrigth, 1999.	5
Figura 3: Formação de ondas oceânicas. Fonte: Wrigth, 1999.	5
Figura 4: Orbitais de onda em águas profundas. Fonte: Wrigth, 1999.	6
Figura 5: Orbitais de onda em águas rasas. Fonte: Wrigth, 1999.	6
Figura 6: Diagrama de Hjulström – relaciona a velocidade do fluxo e o tamanho do grão para determinar erosão, transporte e deposição. Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Hjulstr%C3%B6m_curve	10
Figura 7: Curva de Shields – relaciona o número de Reynolds com a tensão necessária para mover um tamanho de grão. Fonte: http://tellus.csiro.au/TellusPhysics.html	10
Figura 8: Mapa do litoral do Estado de São Paulo.	13
Figura 9: Mapa de distribuição de porcentagem de areia. Fonte: Rodrigues et al., 2003.	15
Figura 10: Mapa de distribuição de porcentagem de silte. Fonte: Rodrigues et al., 2003.	15
Figura 11: Linha de costa e pontos batimétricos da plataforma do estado de São Paulo	19
Figura 12: Pontos batimétricos e linha de costa da plataforma continental de São Paulo.	20
Figura 13: Resolução da grade do modelo.	21
Figura 14: Batimetria interpolada da plataforma continental de São Paulo, utilizando o programa MIKE21.	21
Figura 15: Direção das alturas significativas (Hs) e dos períodos (T) de onda para o estado de São Paulo.	25
Figura 16: Direção de Hs e T para o estado de São Paulo no verão.	28
Figura 17: Direção de Hs e T para o estado de São Paulo no outono.	30
Figura 18: Direção de Hs e T para o estado de São Paulo no inverno.	32
Figura 19: Direção de Hs e T para o estado de São Paulo na primavera.	34
Figura 20: Distribuição das ondas, altura significativa por período médio.	35
Figura 21: Resultado de altura significativa e direção da simulação de uma onda de sul com 2,73 m e 10,15 s.	38
Figura 22: Resultado de altura significativa e direção da simulação de uma onda de sudeste com 2,22 m e 8,75 s.	38
Figura 23: Resultado de altura significativa e direção da simulação de uma onda de leste com 2,21 m e 7,53 s.	39
Figura 24: Resultado de altura significativa e direção da simulação de uma onda de leste com 2,21 m e 7,53 s.	40
Figura 25: Resultados da área de remobilização de sedimentos para as ondas de maior ocorrência para o clima de ondas geral na Plataforma Continental do Estado de São Paulo.	42
Figura 26: Área de remobilização de sedimentos com 0,062 mm para as ondas de verão.	44
Figura 27: Área de remobilização de sedimentos das ondas com maior ocorrência durante o outono.	46
Figura 28: Área de remobilização de sedimentos de 0,062 mm para ondas de inverno.	48
Figura 29: Área de remobilização de sedimentos de 0,062 mm das ondas de maior ocorrência na primavera.	50
Figura 30: Probabilidade que um sedimento de 0,125 mm (areia fina) sofre remobilização com altura significativa e período médio.	51

Figura 31: Probabilidade que um sedimento de 0,125 mm (areia fina) sofre remobilização com altura máxima e período de pico.	52
Figura 32: Probabilidade que um sedimento de 0,062 mm (areia muito fina) sofre remobilização com altura significativa e período médio.	53
Figura 33: Probabilidade que um sedimento de 0,062 mm (areia muito fina) sofre remobilização com altura máxima e período de pico.	53
Figura 34: Probabilidade que um sedimento de 0,025 mm (silte) sofre remobilização com altura significativa e período médio.	54
Figura 35: Probabilidade que um sedimento de 0,025 mm (silte) sofre remobilização com altura máxima e período de pico.	55
Figura 36: Porcentagem de tempo que a velocidade orbital junto ao fundo excede a velocidade crítica de arrasto para sedimento com diâmetro médio de 0,125 mm, 0,062 mm e 0,025 mm, para altura significativa e período médio.	56
Figura 37: Porcentagem de tempo que a velocidade orbital junto ao fundo excede a velocidade crítica de arrasto para sedimento com diâmetro médio de 0,125 mm, 0,062 mm e 0,025 mm, para altura máxima e período de pico.	56

Índice de tabelas

Tabela 1: Ocorrência de Hs pela direção de onda.	26
Tabela 2: Porcentagem de Hs pela direção de onda.	26
Tabela 3: Ocorrência de porcentagem de ondas para cada intervalo de altura de acordo com a direção para os meses de verão.	27
Tabela 4: Ocorrência de porcentagem de ondas para cada intervalo de altura de acordo com a direção para o meses de outono.	29
Tabela 5: Ocorrência de porcentagem de ondas para cada intervalo de altura de acordo com a direção para os meses de inverno.....	31
Tabela 6: Ocorrência de porcentagem de ondas para cada intervalo de altura de acordo com a direção para os meses de primavera.....	33
Tabela 7: Ondas com maior porcentagem de ocorrência, selecionadas para as simulações, com a média da altura e do período.	36
Tabela 8: Ondas com maior porcentagem de ocorrência, selecionadas para as simulações, com a média da altura e do período.	37

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais pelo apoio, incentivo e compreensão, sem os quais não poderia ter chegado até aqui.

Agradeço à Alline pela paciência, companheirismo e amor ao longo desses anos.

À minha família, em especial aos meus irmãos Leo, Deni e Marcos.

Ao Prof. Dr. Eduardo Siegle pela oportunidade de fazer o mestrado, orientação e ensinamentos.

Aos colegas de laboratório pelo companheirismo, aprendizagens e boas conversas. Em especial, neste trabalho, P.H., Ana Amélia, Gilberto e Talitha.

Aos diretores, professores, técnicos, alunos e funcionários do IOUSP pela estrutura, ensinamentos e vivência durante todos esses anos.

Aos amigos da turma II, uma turma muito iluminada. Em especial o Tom pela ajuda na análise dos dados.

Agradeço à CAPES pelo auxílio financeiro durante o período que estava no laboratório.

Resumo

O presente trabalho visa avaliar a mobilidade de sedimentos na plataforma continental do estado de São Paulo levando em conta a propagação de ondas e o tipo de sedimento. Com base no clima de ondas da região, resultante do modelo global de ondas WAVEWATCH-III, o modelo MIKE-21 (SW) foi aplicado para avaliar os processos de transformação de ondas a medida em que elas avançam sobre a plataforma continental. As ondas predominantes são as de sul com 36% e leste com 34%, variando de 1 a 2,5 metros de altura e 6 a 10 segundos de período. Esses dados formam a condição de contorno externa do modelo que fornece as informações necessárias para as estimativas de mobilidade sedimentar. Este processo foi avaliado através da aplicação de uma aproximação empírica onde a máxima velocidade orbital de fundo deve ser maior que a velocidade crítica de fundo. A altura significativa e período médio chegam a remobilizar areia fina até 40 m, areia muito fina até 45 m e silte até 60 m de profundidade. Altura máxima e período de pico, remobilizam areia fina até 60 m, areia muito fina até 80 m e silte até 90m de profundidade.

Palavras-chave: Mobilidade sedimentar, ondas, Plataforma Continental, São Paulo.

Abstract

This study aims to evaluate the mobility of sediments on continental shelf of São Paulo state considering wave propagation and sediment type. Based on wave climate of the region resulting from global wave model WAVEWATCH-III, numerical model MIKE-21 (SW) was applied to evaluate wave transformation processes as they propagate over the continental shelf. Waves from south and east are predominant with 36% and 34%, respectively, wave height ranged from 1 to 2.5 meters and wave period varied between 6 and 10 seconds. These data form boundary condition of the model and provides necessary information to estimate sediment mobility. In order to evaluate this process, an empirical approach was applied, where maximum bed orbital velocity must exceed a critical bottom velocity. The significant wave height and mean period mobilize fine sand up to 40 m, very fine sand up to 45 m and silt up to 60 meters deep. Maximum height and peak period, mobilize fine sand up to 60 m, very fine sand up to 80 m and silt up to 90 meters deep.

Key-words: Mobility of sediments, waves, continental shelf, São Paulo.

1. Introdução

Numa primeira tentativa de quantificar a influência do clima de ondas global no transporte de sedimentos, Harris e Coleman (1998) utilizaram dados de onda gerados por um modelo global de clima. Eles definiram que o clima de ondas era capaz de mobilizar areia de quartzo com diâmetro de 0,1 mm em 41,6% das plataformas continentais da Terra.

Existem muitos modelos de transporte e mobilização de sedimentos na plataforma continental. Nestes modelos, os efeitos da tensão de cisalhamento do vento, correntes de maré e/ou oceânicas podem ser incluídas ao lado das ondas como arrasto significativo aos mecanismos de transporte. Ao modelar a camada limite de fundo, o modelo de correntes de ondas de Grand e Madsen (1979), comparou as tensões de cisalhamento de fundo com relações empíricas, tais como a curva de Shields para quantificar a mobilidade dos sedimentos. Entretanto, devido ao detalhamento e gasto computacional, esses modelos geralmente podem ser aplicados apenas com uma resolução espacial e temporal pequena e, portanto, só são adequados para estudos locais em eventos de escala sazonal, onde estão disponíveis dados de entrada suficientemente detalhados.

Modelos simplificados têm sido usados para quantificar a mobilidade de sedimentos nas escalas globais (Harris e Coleman, 1998), continentais (Porter-Smith et al., 2004; Hemer, 2006) e regionais (Decker, 1988; Hemer et al., 2004). Este segundo grupo de modelos geralmente conta com simplificações de processos geofísicos na camada limite de fundo. Por exemplo, Decker (1988), calculou a distribuição cumulativa de frequências para altura e período de onda na plataforma interna do rio Orange, África do Sul, para estimar a

mobilidade de sedimentos. Entretanto, a altura e o período de onda foram tratados de forma independente e uma distribuição não foi calculada para as velocidades orbitais horizontais. Assim, enquanto este trabalho resultou em bons limites de altura e período de onda para que cada mobilização ocorresse, mas a probabilidade de a altura e o período de onda juntos excederem os limites de arrasto não foi quantificada. Harris e Coleman (1988) e Porter-Smith et al. (2004) utilizaram as relações empíricas simplificadas de Clifton e Dinger (1984) para calcular os limites de arrasto de sedimento devido às ondas, e ambos os estudos consideraram apenas o tamanho médio dos grãos na sua distribuição. Para sedimentos mal classificados, isto pode ter implicações importantes na interpretação dos resultados. Por exemplo, sedimentos com distribuição de tamanhos com duas modas, com sedimentos finos mal representados pelo tamanho médio dos grãos, podem ter uma parte dos sedimentos finos frequentemente mobilizados, ressuspensos, e posteriormente depositados sobre a biota bêntica bloqueando a luz. O modelo ainda prevê pequenos distúrbios no fundo marinho, como quando a tensão de cisalhamento necessária para mobilizar os sedimentos dados pelo tamanho médio dos grãos é maior que a real, onde existem componentes finas de sedimento. Portanto, é importante se considerar a total distribuição de tamanho de grãos no sedimento.

Para quantificar a mobilidade sedimentar numa escala regional, são necessárias algumas médias ou aproximações dos processos atuantes. Especialmente as ondas, que não são sempre as mesmas em qualquer parte do oceano em certo tempo, mas o oceano é formado por uma variedade de ondas de diferentes amplitudes e períodos (Dyer, 1986). As características

deste oceano complexo podem ser descritas com certa aproximação, de uma variedade de medições de altura e período de onda.

Os parâmetros de medição de onda usados neste estudo foram:

- Altura significativa de onda (H_{sig}) – a altura média de onda de um terço das ondas mais altas em um intervalo medido.
- Altura máxima de onda (H_{max}) – a altura de onda máxima registrada em um intervalo medido.
- Período de passagem zero (T_z) – período médio de todas as ondas.
- Período de pico máximo (TP1) – período do pico do espectro energia de onda.

Embora seja evidente que a escolha dos parâmetros de onda usados para prever a mobilidade dos sedimentos irá afetar os resultados, o grau de sensibilidade para a escolha dos parâmetros de onda utilizados e qual combinação leva ao resultado mais real, é uma incerteza (Griffin et al., 2008).

Os efeitos do atrito com o fundo e subsequente mobilização de sedimentos são cada vez mais reconhecidos como controles dos habitats bênticos, e, portanto, quantificá-los é importante para o gerenciamento marinho (Post et al., 2006).

1.1 Ondas (Wright, 1999)

As ondas constituem um dos processos marinhos mais efetivos na seleção e redistribuição dos sedimentos depositados nas regiões costeiras e plataforma continental interna.

Em física, uma onda é a perturbação oscilante de uma grandeza física no espaço e periódica no tempo. É um pulso energético que se propaga

através do espaço ou de um meio físico (líquido sólido ou gasoso). As ondas existem em um meio cuja deformação é capaz de produzir forças de restauração através das quais elas viajam e podem transferir energia de um lugar para outro sem qualquer das partículas do meio seja deslocada, isto é, uma onda não transporta matéria, há, no entanto, oscilações sempre associadas ao meio de propagação.

Podemos descrever uma onda através de seus principais parâmetros, (Fig. 1) que incluem: 1) o comprimento de onda (L), ou seja, distância entre duas cavas sucessivas; 2) a altura (H), representada pela distância entre a crista e a cava da onda; e 3) a amplitude (a), que corresponde à metade da altura da onda. Com estes parâmetros, podemos ainda determinar o período da onda (T), que corresponde ao tempo decorrido entre a passagem de duas cristas ou cavas por um determinado ponto em um intervalo de tempo fixo (normalmente um segundo). A frequência corresponde, portanto, ao inverso do período.

Figura 1: Principais parâmetros de um perfil de uma onda. Fonte: Wrigth, 1999.

A maioria das ondas oceânicas, conhecidas como ondas de gravidade, é formada pela ação do vento, que ao soprar sobre a superfície da água, forma pequenas ondas capilares (Fig. 2).

Figura 2: Modelo de geração de ondas. Fonte: Wrigth, 1999.

Mantendo-se a ação do vento, estas pequenas rugosidades da superfície da água se somam para produzir ondas maiores cujo tamanho é limitado pela velocidade e duração (tempo) de ação do vento e pela pista, ou seja, a extensão da superfície aquosa sobre a qual o vento está soprando (Fig. 3).

Figura 3: Formação de ondas oceânicas. Fonte: Wrigth, 1999.

Uma vez geradas, as ondas viajam mantendo sua trajetória mesmo depois de cessada a influência do vento. Fora da área de ação do vento, estas ondas são denominadas de marulho ou *swell*. Em seu percurso, sofrem modificações em seus parâmetros (altura e comprimento de onda) e velocidade de propagação, em função das modificações da batimetria do fundo submarino.

Se acompanharmos a movimentação de uma partícula d'água durante a passagem de uma onda em águas profundas, observamos que esta desenvolve movimentos orbitais circulares, cujos raios diminuem gradativamente em profundidade até desaparecerem completamente antes de

atingir o fundo submarino (Fig. 4), sendo incapazes de promover a movimentação dos sedimentos que recobrem o fundo marinho.

Figura 4: Orbitais de onda em águas profundas. Fonte: Wrigth, 1999.

Ao se aproximarem de regiões mais rasas, as ondas sofrem a influência do fundo marinho, o que se reflete em uma série de modificações em seu comportamento. Neste caso, observa-se que os movimentos orbitais das partículas d'água durante a passagem de uma onda são elípticos próximo à superfície, ficando cada vez mais achatados em profundidade, até atingir uma movimentação horizontal para frente e para trás junto ao fundo (Fig. 5), estas ondas de águas rasas têm a capacidade de movimentar sedimentos do fundo submarino.

Figura 5: Orbitais de onda em águas rasas. Fonte: Wrigth, 1999.

As modificações de comportamento da onda, quando se passa de águas profundas para rasas, são determinadas pela profundidade relativa, que exprime a relação entre o comprimento de onda e a profundidade da lâmina

d'água. Considera-se que as profundidades menores do que a metade do comprimento de onda ($L/2$), as ondas começam a agir como ondas de águas rasas, ou seja, começam a sofrer a influência e remobilizar o fundo submarino. Por exemplo, considerando-se em comprimento de onda de 100 m, a partir de 50 m de profundidade as ondas começam a influenciar o fundo submarino.

Uma vez sentindo a influência do fundo submarino, diminui a velocidade de propagação das ondas, o que resulta em decréscimo do comprimento de onda e aumento da altura de onda, até um momento em que estas não são mais estáveis e se quebram. A região entre a zona de quebra e a praia é conhecida como zona de arrebentação ou de surfe, onde continuam a se propagar, perdendo energia até a face de praia.

A sua velocidade de propagação, C , também conhecida por celeridade ou velocidade de fase, é definida pela expressão: $C = L/T$. Interessa, ainda, considerar o quociente designado por declividade da onda, dado por: $D = H/L$. Sobre a plataforma continental, denomina-se onda de água profunda aquela em que sua profundidade é pelo menos a metade do comprimento de onda. Na prática, a relação de profundidade (h) com o comprimento de onda (L) é: para águas profundas: $L/h > 1/2$; para águas em profundidade intermediária: $1/25 < L/h < 1/2$; e para águas rasas: $L/h < 1/25$.

1.2 Plataforma continental

As plataformas continentais são províncias compreendidas entre a linha de costa e o talude continental, e sua topografia atual é resultante do efeito cumulativo de erosão e sedimentação, relacionadas a numerosas oscilações de larga escala do nível do mar (TESSLER & MAHIQUES, 2001). A

cobertura sedimentar atual é resultado da natureza predominante de seus componentes, terrígena ou carbonática, a ação do transporte e retrabalhamento desses, atividade hidrodinâmica como ondas, marés e correntes, e pelos efeitos das oscilações do nível do mar (JOHNSON & BALDWIN, 1996).

A plataforma continental apresenta características próprias conforme a variação da sua profundidade, acarretando em processos diferenciados ao longo desta, tornando-se necessário, portanto, dividi-la em três regiões: interna, média e externa.

De acordo com Nittrouer & Wright (1994), a plataforma interna encontra-se intimamente relacionada com as zonas costeiras, principalmente com a zona de surf, visto que controla as forçantes hidrodinâmicas que regem esses sistemas. Afirma ainda que essa região une a zona marginal às plataformas média e externa, e o oceano profundo. O mesmo autor argumenta ainda que o transporte de sedimentos na plataforma interna é mais intenso perante as outras regiões, em parte, devido à profundidade do leito marinho, o qual é constantemente revolvido pela ação efetiva das ondas.

A plataforma média é conceituada por Nittrouer & Wright (1994) como uma região de transição entre os regimes de fluxo, sendo esta caracterizada pelo declínio da intensidade e frequência da agitação do fundo marinho devido ao aumento da profundidade.

Os mesmos autores destacam que a plataforma externa é caracterizada pela diminuição acentuada da ação das ondas sobre o leito marinho, tornando as forças friccionais de fundo pequenas, resultando em irrisória influência sobre sedimento.

1.3 Transporte, erosão e deposição de sedimentos

A velocidade da corrente necessária para colocar um determinado detrito em movimento, erosão, é maior do que aquela necessária para mantê-lo em movimento, transporte. A competência de um fluxo diz respeito à sua capacidade para transportar carga sólida. A competência é avaliada em termos da partícula sólida de diâmetro máximo que pode ser posta em movimento (Hjulström, 1935). No diagrama de Hjulström (Fig. 6) estão representadas curvas experimentais que tentam explicar a influência da velocidade da corrente e da dimensão dos materiais nos fenômenos de erosão, de transporte e de sedimentação.

As partículas mais fáceis de remover são as que apresentam dimensões próximas a 0,2 mm, na medida em que basta uma velocidade de cerca de 20 cm/s para deslocá-las da sua posição de repouso.

As partículas com dimensões inferiores a 0,01 mm apresentam uma grande força de coesão, pelo que oferecem uma considerável resistência à fricção e, portanto, somente são erodidas para velocidades superiores. Este fenômeno é conhecido pelo efeito Hjulström.

Figura 6: Diagrama de Hjulström – relaciona a velocidade do fluxo e o tamanho do grão para determinar erosão, transporte e deposição. Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Hjulstr%C3%B6m_curve.

Shields (1936) foi pioneiro a descrever como se inicia a suspensão de sedimentos com tamanho de grão uniforme a partir de um fluxo de água. Usando o critério que para mover um sedimento de certo diâmetro, o fluxo de água na interface com o sedimento deve exceder a certa tensão de fundo do grão. A curva de Shields (Fig. 7) relaciona o Número de Reynolds com a tensão necessária para mover um tamanho de grão.

Figura 7: Curva de Shields – relaciona o número de Reynolds com a tensão necessária para mover um tamanho de grão. Fonte: <http://tellus.csiro.au/TellusPhysics.html>.

A sedimentação nas plataformas continentais atuais é resultado da

interação de vários fatores que englobam a dinâmica deposicional, os quais, segundo Johnson & Baldwin (1996) e Tessler & Mahiques (2001), podem ser controlados pela natureza, tipos e volume de sedimentos introduzidos no ambiente, pelos efeitos oscilatórios do nível do mar, e pelos processos dinâmicos de transporte e retrabalhamento dos depósitos. Johnson & Baldwin (1996) citam ainda que alguns fatores secundários influenciam a sedimentação nessas áreas, como o clima, fatores biológicos, ou interações animal-sedimento, e fatores químicos, como composição do sedimento e química da água do mar.

Os processos dinâmicos que controlam essa sedimentação são considerados por Swift & Thorne (1991) como sendo determinados pela interação de cinco variáveis interdependentes: (i) taxa do aumento relativo do nível do mar; (ii) taxa de entrada de sedimento; (iii) tipo do sedimento; (iv) força do fluido; e (v) taxa de transporte de sedimento. Essas variáveis interagem ao longo do tempo geológico e resultam na produção de um perfil de equilíbrio e na determinação das fácies, tanto na organização interna como na distribuição das mesmas.

2. Objetivos

Geral

Avaliar a ação das ondas na mobilidade sedimentar na plataforma continental do estado São Paulo em função da propagação de ondas.

Específicos

- Caracterizar o clima de ondas da região;
- Avaliar os processos de transformação das ondas a medida em elas se

propagam sobre a plataforma continental através de aplicação de um modelo numérico;

- Caracterizar a plataforma continental de São Paulo, quanto à mobilidade de sedimentos.

3. Justificativa

Uma questão ainda sem resposta sobre os sedimentos da plataforma continental é: “Que porcentagem da plataforma continental do mundo está sujeita a processos hidrodinâmicos suficientemente fortes para mobilizar sedimentos do fundo?” (Swift e Thorne, 1991). Entretanto, isto é sugerido que cerca de 80 % das plataformas são dominadas por ondas de tempestade, 17 % por correntes de maré e 3 % por interações de correntes oceânicas (Walker, 1984; Swift et al., 1986).

Não existem muitos estudos sobre análises quantitativas nas plataformas continentais para determinar a distribuição espacial dos processos que dominam o transporte de sedimentos, a principal limitação tem sido as dificuldades práticas para coletar dados nas plataformas. A modelagem numérica é uma ferramenta alternativa para estudar os processos e estimar suas forçantes.

4. Área de estudo

A Margem Continental Sudeste Brasileira, na qual se insere a plataforma continental do Estado de São Paulo (Fig. 8), estende-se do Cabo de Santa Marta Grande (SC) (28°40' S) até o Cabo Frio (RJ) (23°00' S), corresponde ao Embaiamento de São Paulo, definido por Butler (1970).

Figura 8: Mapa do litoral do Estado de São Paulo.

Nessa unidade fisiográfica, a plataforma apresenta largura variável entre 73 e 231 km, declividade entre 1:656 e 1:1333 e uma profundidade de quebra de plataforma entre 120 e 180 m, sendo mais extensa na região adjacente à Baía de Santos. De uma forma geral, as isóbatas aproximam-se entre si em direção norte e, próximo ao Cabo Frio, apresenta sua menor largura. A presença de alguns canais foi observada, cortando a plataforma por toda a área (Zembruski, 1979).

Coimbra et al. (1980) analisaram, através de superfícies de tendência, a distribuição sedimentar na plataforma interna entre Santos (SP) e Ilha Grande (RJ), concluindo que o processo de distribuição sedimentar atual associa-se à ação de ondas que incidem ortogonalmente à costa, ou seja, vindas de sudeste, e correntes vindas de sudoeste. Esse foi o primeiro trabalho a tentar associar a distribuição granulométrica a processos de circulação na plataforma continental de São Paulo. Os trabalhos careciam, no entanto, de um número mais adequado de amostras e de uma associação com dados hidrodinâmicos

mais precisos.

Furtado et al. (1984) reuniram dados de cerca de 250 amostras, obtidos em 10 campanhas oceanográficas realizadas na plataforma continental de São Paulo, e elaboraram mapas de distribuição sedimentar, procurando associá-los a escassas afirmações sobre a hidrodinâmica. Observou diferenças na distribuição sedimentar entre o norte e sul da plataforma continental de São Paulo, com a Ilha de São Sebastião como divisor.

Alves & Ponzi (1984), estudando características morfológicas sedimentares da plataforma continental e talude superior da margem continental sudeste do Brasil, definem, quanto aos sedimentos superficiais, dois domínios para a área, o domínio de terrígenos na plataforma interna e média e o de carbonatos na plataforma externa.

Tessler (1988) analisou a distribuição sedimentar na plataforma interna sul de São Paulo, associou à ação de ondas sobre o fundo e verificou que o processo de transporte sedimentar é muito mais efetivo durante a passagem de frentes frias, concluindo que este é o principal processo responsável pelo transporte de fundo na área.

Furtado & Mahiques (1990) aplicando análise de superfície de tendência em dados sedimentológicos e associando-os a informações sobre a circulação da área, concluíram que o fundo é constituído predominantemente por areias finas e muito finas, com características de sedimentos palimpsestos.

De acordo com o Atlas Sedimentológico da Plataforma Continental do Estado de São Paulo (Rodrigues et al., 2003), a concentração de areia é maior que 90% em grande parte das porções interna e média da plataforma continental, apresentando uma tendência geral de diminuição dos teores em

direção às regiões mais profundas (Fig. 9).

Figura 9: Mapa de distribuição de porcentagem de areia. Fonte: Rodrigues et al., 2003.

A distribuição do diâmetro médio, segundo a classificação de Folk & Ward (1957), apresenta na plataforma interna e média o predomínio da fração areia muito fina (Fig. 10).

Figura 10: Mapa de distribuição de porcentagem de silte. Fonte: Rodrigues et al., 2003.

As massas d'água presentes na Plataforma Continental do Estado de

São Paulo correspondem à mistura entre a Água Tropical (AT), quente e salina ($T > 20^{\circ}\text{C}$ e $S > 36,40$; Miranda, 1982), transportada sobre o talude continental para sul-sudoeste, na camada superficial (0-200 m) da Corrente do Brasil (CB); a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) ($T < 20^{\circ}\text{C}$ e $S < 36,40$; Miranda, 1982) também transportada para sul-sudoeste ao longo do talude continental, porém na camada inferior da Corrente do Brasil (200-500 m); e a Água Costeira (AC), resultante da mistura da descarga continental de água doce com as águas da plataforma continental, tendo a menor salinidade das águas presentes na plataforma (Castro Filho, 1996). A AC é restrita a baixas profundidades (< 20 m) no verão, interagindo com a AT no inverno, quando cobrem toda a plataforma interna. A ACAS cobre o fundo da plataforma externa durante todo o ano, penetrando, na plataforma interna, durante o verão. Assim, a plataforma interna tem uma grande variabilidade intra-anual, apresentando uma termoclina sazonal a 20 m, durante o verão e, praticamente nenhuma estratificação no inverno.

Castro Filho (1996) identificou duas frentes na Plataforma Continental Sudeste: a Frente Térmica Profunda, que separa as porções interna e média, e a Frente Halina Superficial, que separa as regiões média e externa da Plataforma.

A Frente Térmica Profunda, associada a intrusões em direção à costa da ACAS, transportada pela Corrente do Brasil nas proximidades do talude entre os níveis de 200 e 500 m. Uma fração dessa coluna penetra em direção à costa sobre a plataforma continental (Miranda, 1982). É formada na região que separa a água fria, de origem oceânica, da mais quente característica das zonas mais internas da plataforma. A Frente Halina Superficial é a separação

da Água Costeira, mais interna, e a Água Tropical, mais externa e influenciada pela intrusão da Corrente do Brasil em direção à costa.

O clima tropical e subtropical úmido, aliado à ausência de grandes sistemas fluviais confere, ao regime pluvial, uma importância muito grande na contribuição de água doce para o oceano. O regime de chuvas apresenta-se com características episódicas, ainda que com prevalência de maiores precipitações pluviométricas nos meses de verão.

5. Material e Métodos

5.1. Dados de ondas

Para obter a climatologia da região, bem como as séries temporais de onda, dados do modelo WAVEWATCHIII-NWW3 (Tolman, 2002), entre 1997 e 2008, foram obtidos de <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/> e tratados no programa MATLAB 7.0. Estes dados foram utilizados como condições iniciais para o modelo MIKE21-FM – *Spectral Waves*.

O WAVEWATCH-III é um modelo desenvolvido pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dos Estados Unidos (Tolman, 1999). O modelo resolve a equação do balanço de densidade espectral para o espectro direcional de onda. O crescimento, refração e decaimento para cada frequência e direção específica são resolvidos, dando as características completas e realísticas do campo de onda transiente. Os processos físicos que estão incluídos neste modelo são: refração e as deformações no campo de ondas devido a variações temporais e espaciais da profundidade média da água e da corrente, crescimento de onda e decaimento devido à ação do vento, interações não

lineares, dissipação devido ao efeito de vento na quebra da onda e fricção com o fundo.

Este modelo possui um banco de dados desde 1997, contendo altura significativa, período e direção das ondas em diversos pontos ao redor do globo, com uma resolução espacial de $1^\circ \times 1,25^\circ$ na latitude e longitude respectivamente, com grade de 77°N a 77°S , com profundidade mínima de 25 m, e usa diferentes campos de ventos como entrada do modelo, disponíveis em intervalos de 3 horas, retirados do *Global Data Assimilation Scheme* (GDAS).

Foram realizadas análises do clima geral, considerando a totalidade dos dados, e para cada estação do ano: verão (dezembro, janeiro e fevereiro), outono (março, abril e maio), inverno (junho, julho e agosto) e primavera (setembro, outubro e novembro).

As ondas foram primeiramente separadas pelas direções norte ($337,5^\circ$ - $22,5^\circ$), nordeste ($22,5^\circ$ - $67,5^\circ$), leste ($67,5^\circ$ - $112,5^\circ$), sudeste ($112,5^\circ$ - $157,5^\circ$), sul ($157,5^\circ$ - $202,5^\circ$) e sudoeste ($202,5^\circ$ - $247,5^\circ$), relacionando com altura e período de onda. Usando o próprio programa Matlab foram feitas as figuras e as estatísticas de frequência.

5.2. Modelo numérico de propagação de ondas

O modelo numérico utilizado é o MIKE21-SW, desenvolvido pela DHI *Water & Environment* (Abbott et al., 1988; Abbott & Larsen, 1985). Este modelo é baseado nos princípios físicos (conservação de massa; momento; energia, etc.) e usa equações matemáticas para descrever ondas, correntes, transporte de sedimentos e mudanças no fundo. Este tipo de modelo é o acoplamento dos

modelos padrões das constituintes físicas (ondas, correntes, transporte de sedimentos) com o módulo de evolução do fundo baseado na conservação dos sedimentos (Vriend et al., 1993).

5.2.1. Batimetria

A batimetria foi realizada com base folhas de bordo de cruzeiros oceanográficos realizados pelo Instituto Oceanográfico da USP, com um total de 65123 pontos (Fig. 11).

Figura 11: Linha de costa e pontos batimétricos da plataforma do estado de São Paulo

Como apresentou áreas sem dados, foi retirado do ETOPO2 da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) uma grade de pontos batimétricos com resolução de 2 graus, aproximadamente 3,6 km. Assim a batimetria ficou com um total de 79855 pontos (Fig. 12), cobrindo uma grande área e deixando os limite da plataforma de São Paulo longe do limite da grade do modelo.

Figura 12: Pontos batimétricos e linha de costa da plataforma continental de São Paulo.

A linha de costa utilizada foi digitalizada no programa DIDGER a partir de imagens retiradas do programa GOOGLE EARTH georreferenciadas no programa GLOBAL MAPPER.

A grade do modelo foi criada no módulo MIKE ZERO – *Mesh Generator*. É necessário importar arquivos de linha de costa e batimetria, sendo possível delimitar o domínio e refinar a malha de acordo com interesse de resultado. O domínio foi separado em três compartimentos com refinamentos diferentes, apresentando apenas uma borda de entrada (Fig. 13). A malha flexível gerada sobre a plataforma continental do estado de São Paulo foi composta por células de aproximadamente 3 km².

Figura 13: Resolução da grade do modelo.

Os dados foram interpolados utilizando o método de vizinho natural e este módulo cria uma batimetria adequada (Fig.14) para a utilização no módulo de propagação de ondas, *Spectral Waves FM*.

Figura 14: Batimetria interpolada da plataforma continental de São Paulo, utilizando o programa MIKE21.

5.3. Potencial de mobilização de sedimentos devido às ondas (método de Porter-Smith et al., 2004)

Foi utilizado para o método proposto por Harris e Coleman (1998) e Porter-Smith et al. (2004), cálculos simples das velocidades máximas de fundo, devido ao movimento orbital das ondas, foram comparadas com a velocidade crítica de arrasto para sedimentos areia fina (0,125 mm), areia muito fina (0,062 mm) e silte (0,025 mm).

Baseado na teoria de ondas de Airy, foi utilizada a equação simplificada para águas profundas, onde a profundidade é maior que a metade do comprimento de onda ($d > L_o/2$), para calcular o comprimento de onda em cada ponto da malha.

$$L_o = gT^2/2\pi \quad \text{Equação 1}$$

Onde g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$) e T é o período de onda (Komar, 1976).

Em águas intermediárias, em que o a profundidade está entre a metade e um vigésimo do comprimento de onda ($L_o/20 < d < L_o/2$), a equação para cálculo do comprimento de onda (L) é dependente do comprimento de onda, tornando difícil o resultado (Nielsen et al., 1982).

$$L = L_o[\tanh(2\pi d/L)] \quad \text{Equação 2}$$

Onde L_o é o comprimento de onda em águas profundas, d é a profundidade local e L é o comprimento de onda em águas intermediárias. Assim foi utilizada uma aproximação derivada por Eckard (1952 apud Komar 1976).

$$L_i = L_o[\tanh(2\pi d/L_o)]^{1/2} \quad \text{Equação 3}$$

Onde o comprimento de onda em águas intermediárias (L_i), é obtida

através de Lo .

A velocidade orbital máxima junto ao fundo foi calculada seguindo a equação de Harris e Coleman (1998) e a velocidade crítica de fundo para iniciar a remobilização do sedimento foi determinada para um grão esférico, não-coesivo e de quartzo, de acordo com Clifton e Dingler (1984).

$$U_{max} = \pi H / T \sinh(2\pi h / L) \quad \text{Equação 4}$$

Onde U_{max} é a velocidade orbital máxima junto ao fundo, H é a altura de onda, T é o período de onda, h é a profundidade local e L o comprimento de onda.

$$U_{cr} = 33,3(TD_{50})^{0,33} \quad \text{Equação 5}$$

Onde U_{cr} é a velocidade crítica de arrasto, quando o $D_{50} < 0,05\text{cm}$, e D_{50} é o tamanho médio do grão. Para $D_{50} > 0,05\text{cm}$:

$$U_{cr} = 71,4(TD_{50}^3)^{0,143} \quad \text{Equação 6}$$

Foi calculada para cada onda, com uma frequência maior que 3 %, a velocidade crítica de arrasto para os grãos areia fina (0,125 mm), areia muito fina (0,062 mm) e silte médio (0,025 mm), utilizando o limite inferior de cada categoria do grão de acordo com Folk & Ward (1957).

A soma das frequências de ocorrência para cada onda, relacionada à área que esta conseguiu remobilizar, resultou na probabilidade de remobilização de cada tipo de sedimento com relação às alturas significativas e período médio, ou altura máxima e período de pico.

Os cálculos foram realizados no programa MATLAB e as figuras feitas no programa SURFER.

6. Resultados

6.1. Dados de ondas

Com os dados de ondas foram geradas figuras que representam a direção das ondas em relação à altura significativa (H_s) e período (T), para todo o período de 12 anos (Fig. 15). As tabelas 1 e 2 mostram o número de ocorrências e a porcentagem das alturas com relação à direção.

Durante o período de dados trabalhados, o clima de ondas apresentou predominância de direção das ondas de sul com 36,5% e leste com 34,1%, seguido pelas ondas de sudeste com 19,3% e nordeste com 7,5%, totalizando 97,3%. As alturas predominantes foram de 1,5 a 2 m com 30,3% e 1 a 1,5 m com 27,9%, seguido pelas ondas de 2 a 2,5 m com 19,4%, 2,5 a 3 m com 9,8 m, menores que 1 m com 6,2% e 3 a 3,5 m com 4%, totalizando 97,6%. As ondas de maior ocorrência foram a leste entre 1 e 2 m com 23,3% e de sul entre 1,5 e 2,5 m com 19,8%, seguido pelas de sudeste entre 1 e 2 m com 11,8%. As ondas de sul apresentam período de onda predominante entre 10 e 12 s, sudeste entre 8 e 10 s, leste e nordeste entre 6 e 8 s.

Figura 15: Direção das alturas significativas (Hs) e dos períodos (T) de onda para o estado de São Paulo.

A tabela 1 apresenta o número de ocorrência das alturas significativas pela direção de onda. Destacado em vermelho, aquelas com maior predominância.

Tabela 1: Ocorrência de Hs pela direção de onda.

		Direção								Total
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Hs	<1	33	302	1048	428	326	11	2	21	2171
	1-1,5	63	849	4587	1857	2207	80	27	42	9712
	1,5-2	27	844	3536	2243	3717	132	31	28	10558
	2-2,5	2	399	1703	1334	3170	119	14	3	6744
	2,5-3		174	700	539	1890	112	10		3425
	3-3,5		23	254	182	833	79	9		1380
	3,5-4		5	56	80	416	45			602
	<4		2	8	44	156	30			240
Total		125	2598	11892	6707	12715	608	93	94	34832

A tabela 2 mostra a porcentagem da ocorrência das alturas significativas pela direção de onda. Destacado em vermelho as ondas próximas a 5% ou mais.

Tabela 2: Porcentagem de Hs pela direção de onda.

		Direção %								Total
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Hs %	<1	0.0947	0.867	3.0087	1.2288	0.9359	0.0316	0.0057	0.0603	6.2328
	1-1,5	0.1809	2.4374	13.169	5.3313	6.3361	0.2297	0.0775	0.1206	27.882
	1,5-2	0.0775	2.4231	10.152	6.4395	10.671	0.379	0.089	0.0804	30.311
	2-2,5	0.0057	1.1455	4.8892	3.8298	9.1008	0.3416	0.0402	0.0086	19.362
	2,5-3	0	0.4995	2.0096	1.5474	5.426	0.3215	0.0287	0	9.8329
	3-3,5	0	0.066	0.7292	0.5225	2.3915	0.2268	0.0258	0	3.9619
	3,5-4	0	0.0144	0.1608	0.2297	1.1943	0.1292	0	0	1.7283
	<4	0	0.0057	0.023	0.1263	0.4479	0.0861	0	0	0.689
Total		0.3589	7.4587	34.141	19.255	36.504	1.7455	0.267	0.2699	100

Durante o verão: dezembro, janeiro e fevereiro (Fig. 16 e tabela 3), o

clima de ondas apresentou predominância de direção das ondas de leste com 51,3% e sul com 25,3%, seguido pelas ondas de sudeste com 12,2% e nordeste com 7,3%, totalizando 96,1% do montante. As alturas predominantes foram de 1 a 1,5 m com 48,9% e 1,5 a 2 m com 36,1%, seguido pelas ondas de 2 a 2,5 m com 7,9% e menores que 1 m com 6%, totalizando 98,9%. As ondas de maior ocorrência foram a leste entre 1 e 2 m com 44% e de sul entre 1 e 2 m com 21%, seguido pelas de sudeste entre 1 e 2 m com 10,4%. As ondas de leste e nordeste apresentam período de onda predominante entre 6 e 8 segundos, sudeste entre 6 e 10 s e sul entre 8 e 12 s.

Tabela 3: Ocorrência de porcentagem de ondas para cada intervalo de altura de acordo com a direção para os meses de verão.

[illegible]

Figura 16: Direção de Hs e T para o estado de São Paulo no verão.

Durante o outono: março, abril e maio (Fig. 17 e tabela 4), o clima de ondas apresentou predominância de direção das ondas de sul com 45,9% e leste com 32,4%, seguido pelas ondas de sudeste com 17,6%, totalizando 95,9% do montante. As alturas predominantes foram de 1,5 a 2 m com 37% e 2 a 2,5 m com 25,9%, seguido pelas ondas de 1 a 1,5 m com 21,8% e 2,5 a 3 m com 10,2%, totalizando 94,9%. As ondas de maior ocorrência foram a sul entre 1 e 3 m com 32,9% e de leste entre 1 e 2,5 m com 29,6%, seguido pelas de sudeste entre 1 e 2,5 m com 15,3%. As ondas de sul apresentam período de onda predominante entre 10 e 12 s, sudeste entre 8 e 10 s e leste entre 6 e 8 s.

Tabela 4: Ocorrência de porcentagem de ondas para cada intervalo de altura de acordo com a direção para o meses de outono.

Direção	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
outono	0.5	0.2	32.4	17.6	45.9	3.27	0	0.01	100
<1		0	0.68	0.16	0.11				0.98
1-1,5	0.3	0.1	7.23	5.63	7.76	0.81	0	0.01	21.8
1,5-2	0.2	0	15.2	6.18	14.8	0.5			37
2-2,5		0	7.21	3.44	14	1.22			25.9
2,5-3	0		1.54	1.72	6.32	0.57			10.2
3-3,5			0.38	0.45	1.9	0.14			2.86
3,5-4			0.14	0.03	0.97	0.02			1.17
<4					0.08				0.08

Figura 17: Direção de Hs e T para o estado de São Paulo no outono.

Durante o inverno: junho, julho e agosto (Fig. 18 e tabela 5), o clima de ondas apresentou predominância de direção das ondas de leste com 48,4% e sul com 30,6%, seguido pelas ondas de sudeste com 18,9%, totalizando 97,9% do montante. As alturas predominantes foram de 1,5 a 2 m com 35,2% e 2 a 2,5 m com 34%, seguido pelas ondas de 2,5 a 3 m com 14,5%, 1 a 1,5 m com 9,2% e 3 a 3,5 m com 4,9%, totalizando 97,7%. As ondas de maior ocorrência foram a leste entre 1,5 e 2,5 m com 36,6% e de sul entre 1,5 e 3 m com 25,6%, seguido pelas de sudeste entre 1,5 e 3 m com 15,4%. As ondas de sul apresentam período de onda predominante entre 10 e 12 s, sudeste entre 8 e 10 s e leste entre 6 e 8 s.

Tabela 5: Ocorrência de porcentagem de ondas para cada intervalo de altura de acordo com a direção para os meses de inverno.

Direção	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
inverno	0.3	0.3	48.4	18.9	30.6	1.44			100
<1			0.26	0.06	0.17				0.49
1-1,5	0.3	0.3	4.25	1.98	2.33	0.06			9.18
1,5-2	0	0	20.3	5.99	8.38	0.44			35.2
2-2,5			16.3	6.79	10.4	0.55			34
2,5-3			4.89	2.56	6.76	0.31			14.5
3-3,5			1.79	1.13	1.87	0.06			4.85
3,5-4			0.53	0.36	0.6				1.49
<4			0.09	0.05	0.11	0.02			0.27

Figura 18: Direção de Hs e T para o estado de São Paulo no inverno.

Durante a primavera: setembro, outubro e novembro (Fig. 19 e tabela 6), o clima de ondas apresentou predominância de direção das ondas de leste com 47,6% e sul com 22,7%, seguido pelas ondas de sudeste com 15,5% e nordeste com 11%, totalizando 96,6% do montante. As alturas predominantes foram de 1,5 a 2 m com 44,6% e 1 a 1,5 m com 33,5%, seguido pelas ondas de 2 a 2,5 m com 14,5%, 2,5 a 3 m com 3,2 e menores que 1 m com 2,9%, totalizando 98,7%. As ondas de maior ocorrência foram a leste entre 1 e 2 m com 41,8% e de sul entre 1 e 2,5 m com 20%, seguido pelas de sudeste entre 1 e 2,5 m com 14,9% e nordeste entre 1 e 2 m com 8,7%. As ondas de leste e nordeste apresentam período de onda predominante entre 6 e 8 s, sudeste entre 8 e 10 s e sul entre 8 e 12 s.

Tabela 6: Ocorrência de porcentagem de ondas para cada intervalo de altura de acordo com a direção para os meses de primavera.

[illegible]

Figura 19: Direção de Hs e T para o estado de São Paulo na primavera.

A figura 20 mostra a distribuição do total dos dados de onda com relação à altura significativa e período de onda, mostrando a maior concentração das ondas entre 1,5 e 2 metros de H_s com período próximo de 7 s.

Figura 20: Distribuição das ondas, altura significativa por período médio.

6.2. Modelo numérico de propagação de ondas, Mike 21

6.2.1 Simulações

Foram realizadas 90 simulações das ondas com maior ocorrência para o clima de ondas geral e para cada estação do ano, como mostram as Tabelas 6 e 7.

Tabela 7: Ondas com maior porcentagem de ocorrência, selecionadas para as simulações, com a média da altura e do período.

Ondas de verão					Ondas de outono				
direção	Hsig (m)	Hm (m)	Tm (s)	% de ocorrência	direção	Hsig (m)	Hm (m)	Tm (s)	% de ocorrência
e	1-1.5	1.26	6.66	25.60%	e	1-1.5	1.26	7.02	7.23%
e	1.5-2	1.71	6.85	18.40%	e	1.5-2	1.72	7.18	15.20%
e	2-2.5	2.18	7	3.02%	e	2-2.5	2.2	7.34	7.21%
s	1-1.5	1.28	8.82	10.60%	s	1-1.5	1.3	9.81	7.76%
s	1.5-2	1.75	9.03	10.44%	s	1.5-2	1.75	9.66	14.80%
s	2-2.5	2.23	9.49	3.10%	s	2-2.5	2.25	10.05	14.00%
se	1-1.5	1.27	7.45	7.08%	s	2.5-3	2.72	10.45	6.32%
se	1.5-2	1.72	7.84	3.32%	se	1-1.5	1.27	8.22	5.63%
ne	1-1.5	1.26	6.34	3.85%	se	1.5-2	1.74	8.64	6.18%
ne	1.5-2	1.74	6.26	2.55%	se	2-2.5	2.22	9.16	3.44%
total %				87.96%	total %				87.77%
Hemax	3.51		7.66		Hemax	4		7.2	
Hsmax	4.19		8.39		Hsmax	5.14		10	
Hsemax	3.67		8.4		Hsemax	4.94		11.34	
Hnemax	3		7.26		Hnemax	3.03		7.01	
Temax	3.08		10.07		Temax	2.91		10.27	
Tsmax	2.55		14.76		Tsmax	3.47		14.8	
Tsemax	1.63		12.03		Tsemax	2.46		14.47	
Tnemax	2.72		8.14		Tnemax	3.03		7.01	
Ondas de inverno					Ondas de primavera				
direção	Hsig (m)	Hm (m)	Tm (s)	% de ocorrência	direção	Hsig (m)	Hm (m)	Tm (s)	% de ocorrência
e	1-1.5	1.27	7.33	4.25%	e	1-1.5	1.29	7.07	20.60%
e	1.5-2	1.75	7.94	20.30%	e	1.5-2	1.74	7.31	21.20%
e	2-2.5	2.22	7.9	16.30%	e	2-2.5	2.22	7.51	3.63%
e	2.5-3	2.72	7.79	4.89%	s	1-1.5	1.34	8.47	4.93%
s	1-1.5	1.28	9.43	2.33%	s	1.5-2	1.78	8.73	9.44%
s	1.5-2	1.75	9.96	8.38%	s	2-2.5	2.24	9.14	5.48%
s	2-2.5	2.25	9.87	10.40%	se	1-1.5	1.32	7.78	3.87%
s	2.5-3	2.74	10.37	6.76%	se	1.5-2	1.75	8.16	6.58%
se	1.5-2	1.76	9.04	5.99%	ne	1-1.5	1.31	6.17	3.20%
se	2-2.5	2.21	9.1	6.79%	ne	1.5-2	1.73	6.3	5.60%
total %				86.39%	total %				84.53%
Hemax	3.85		8.44		Hemax	4.38		8.88	
Hsmax	5.51		10.97		Hsmax	4.4		9.16	
Hsemax	5.02		10.22		Hsemax	4.36		9.17	
Hnemax	3.37		7.53		Hnemax	4.16		7.21	
Temax	2.41		10.7		Temax	2.12		10.23	
Tsmax	3.48		15.15		Tsmax	3.46		14.52	
Tsemax	1.54		14.47		Tsemax	4.07		12.08	
Tnemax	2.97		7.84		Tnemax	2.89		8.33	

Tabela 8: Ondas com maior porcentagem de ocorrência, selecionadas para as simulações, com a média da altura e do período.

Ondas do clima geral				
direção	Hsig (m)	Hm (m)	Tm (s)	% de ocorrência
e	1-1.5	1.27	6.96	13.17%
e	1.5-2	1.73	7.29	10.15%
e	2-2.5	2.21	7.53	4.90%
s	1-1.5	1.3	9.29	6.30%
s	1.5-2	1.76	9.44	10.70%
s	2-2.5	2.24	9.66	9.10%
s	2.5-3	2.73	10.15	5.40%
se	1-1.5	1.28	8.13	5.30%
se	1.5-2	1.74	8.39	6.40%
se	2-2.5	2.22	8.75	3.80%
total %				75.22%
Hemax	4.38		8.9	
Hsmax	5.51		10.97	
Hsemax	5.02		10.22	
Hnemax	4.16		7.43	
Temax	2.41		10.7	
Tsmax	2.99		15.82	
Tsemax	2.46		14.47	
Tnemax	2.69		8.54	

As ondas de sul, predominantes no outono e inverno, apresentaram mais influência da refração na porção sul do estado de São Paulo. Isso devido à plataforma continental se estender, nesta porção, em direção ao sul, sofrendo influência da plataforma continental dos estados da região sul do Brasil. Uma área de grande influência dessas ondas é a região logo a oeste da Ilha de São Sebastião que apresenta uma orientação leste-oeste, amenizando a refração, e não sofre mais a influência da plataforma dos estados ao sul, em contra partida, protege a região logo ao norte, pois é uma barreira física onde as ondas sofrem difração (Fig. 21).

Figura 21: Resultado de altura significativa e direção da simulação de uma onda de sul com 2,73 m e 10,15 s.

As ondas de sudeste são as que menos sofrem refração devido à orientação das linhas batimétricas e da costa do estado de São Paulo. Assim sofrendo menores mudanças na altura de onda quando comparadas com as ondas de sul, leste e nordeste (Fig. 22).

Figura 22: Resultado de altura significativa e direção da simulação de uma onda de sudeste com 2,22 m e 8,75 s.

As ondas de leste, predominantes durante a primavera e verão, apresentaram maior influência da refração na porção norte do estado de São Paulo, devido à grande extensão da plataforma continental em direção a leste. A ilha de São Sebastião, diferentemente das ondas de sul, protege a região logo a oeste da influência das ondas de leste (Fig. 23).

Figura 23: Resultado de altura significativa e direção da simulação de uma onda de leste com 2,21 m e 7,53 s.

As ondas de nordeste aparecem com maior frequência somente durante o verão e, devido à orientação da costa paralela a sua direção, sofrem grande refração ao se propagarem sobre a plataforma continental de São Paulo, e também por serem menos energéticas influenciam muito pouco na remobilização de sedimentos (Fig. 24).

Figura 24: Resultado de altura significativa e direção da simulação de uma onda de leste com 2,21 m e 7,53 s.

A influência da morfologia desta plataforma continental na propagação das ondas pode ser observada nos resultados das áreas de remobilização apresentadas no tópico subsequente.

6.3. Mobilidade sedimentar

6.3.1 Área de remobilização

Para o clima de ondas estudado, entre 1997 e 2008, (Fig. 25) a onda de leste com 1,27 m de altura significativa e 6,96 s de período remobiliza areia muito fina (0,062 mm de diâmetro médio) em média até 12,04 m de profundidade, chegando a remobilizar até 16,12 m. A onda de leste com 1,73 m e 7,29 s remobilizou em média até a profundidade de 15,6 m, atingindo a profundidade máxima de 20,66 m. A onda de leste com 2,21 m e 7,53 s remobilizou em média até a profundidade de 20 m, alcançando 23 m. A onda de sudeste com 1,28 m e 8,13 s remobilizou em média até a profundidade de 19 m, seu máximo foi de 22 m. A onda de sudeste de 1,74 m e 8,34 s remobilizou em média até a profundidade de 23 m, atingindo 27 m. A onda de sul com 1,3 m e 9,29 s remobilizou em média até a profundidade de 20 m, atingindo 22m. A onda de sul com 1,76 m e 9,44 s remobilizou em média até a profundidade de 25 m, chegando até 37 m. A onda de sul com 2,24 m e 9,66 s remobilizou em média até a profundidade de 32 m, atingindo 42 m. A onda de sul com 2,73 m e 10,15 s remobilizou em média até 39 m de profundidade e alcançou 55 m. A onda com maior altura significativa de 5,51 m e período de 10,97 s remobilizou em média até 61 m profundidade e chegou até 64 m de profundidade.

Figura 25: Resultados da área de remobilização de sedimentos para as ondas de maior ocorrência para o clima de ondas geral na Plataforma Continental do Estado de São Paulo.

O clima de ondas do verão, meses de dezembro a fevereiro, apresenta as menores alturas e períodos relacionados comparados com as outras estações do ano. As ondas de nordeste são as menos energéticas e ocorrem com menor frequência na região, sendo mais observadas durante o verão.

Na figura 26 é possível observar que as ondas de nordeste com 1.26 m de altura significativa e 6.34 s de período, remobilizam sedimentos com diâmetro médio de 0,062 mm (areia muito fina) em média até 10 m de profundidade, chegando a 19 m. As ondas nordeste com 1,74 m e 6,26 s remobilizam em média até a profundidade de 15 m, chegando a 21 m. As ondas de leste com 1,26 m e 6,66 s remobilizam em média até a profundidade de 16 m, chegando a 22 m. As ondas de leste com 1,71 m e 6,85 s remobilizam em média até a profundidade de 17 m, chegando a 27 m. As ondas de leste com 2,18 m e 7,1 s remobilizam em média até a profundidade de 19 m, chegando a 27 m. As ondas de sudeste com 1,27 m e 7,45 s remobilizam em média até 18 m, chegando a 23 m. As ondas de sudeste com 1,72 m e 7,84 s remobilizam em média até 22 m, chegando a 33 m. As ondas de sul com 1,28 m e 8,82 s remobilizam em média até 19 m, chegando a 28 m. As ondas de sul com 1,75 m e 9,03 s remobilizam em média até 23 m, chegando a 38 m. As ondas de sul com 2,23 m e 9,49 s remobilizam em média até a profundidade de 32 m, chegando a 40m. A onda de maior altura no verão com 4,19 m e 8,39 s remobilizou em média até a profundidade de 35 m, chegando a 45 m.

Figura 26: Área de remobilização de sedimentos com 0,062 mm para as ondas de verão.

Durante o outono, entre março e maio, o sedimento areia muito fina com diâmetro médio de 0,062 mm, a onda de leste com 1,26 m de altura significativa e 7,02 s de período, remobilizou em média até a profundidade de 15 m, atingindo 24 m. A onda de leste 1,72 m e 7,18 s remobilizou em média até a profundidade de 18 m, chegando a 22 m. A onda de leste com 2,2 m e 7,34 s remobilizou em média até a profundidade de 20 m, atingindo 25 m. A onda de sudeste com 1,27 m e 8,22 s remobilizou em média até a profundidade de 20 m, chegando a 25 m. A onda de sudeste com 1,74 m e 8,64 s remobilizou em média até a profundidade de 25 m, atingindo 28 m. A onda de sul com 1,3 m e 9,31 s remobilizou em média até a profundidade de 21 m, chegando a 24 m. A onda de sul com 2,72 m e 10,45 s remobilizou em média até a profundidade de 40 m, chegando a 45 m. A onda de sudeste com maior altura significativa de 4,94 m e 11,34 s de período, remobilizou em média até a profundidade de 65 m e atingiu seu máximo a 68 m (Fig. 27).

Figura 27: Área de remobilização de sedimentos das ondas com maior ocorrência durante o outono.

As ondas de inverno, meses de junho a agosto, são as que apresentam maiores alturas significativas, com maior frequência das ondas de sul e leste.

As ondas de leste com altura significativa de 1,27 m e período de 7,33 s, remobilizam em média areia muito fina com diâmetro médio de 0,062 mm até a profundidade de 14 m, chegando a 30 m. As ondas de leste com 1,75 m e 7,94 s remobilizam em média até a profundidade de 20 m, chegando a 31 m. As ondas de leste com 2,22 m e 7,9 s remobilizam em média até a profundidade de 22 m, chegando a 33 m. As ondas de sudeste com 1,76 m e 9,04 s remobilizam em média até a profundidade de 26 m, chegando a 35 m. As ondas de sudeste com 2,21 m e 9,1 s remobilizam em média até a profundidade de 32 m, chegando a 40 m. As ondas de sul com 1,28 m e 9,43 s remobilizam em média até a profundidade de 19 m, chegando a 30 m. As ondas de sul com 1,75 m e 9,96 s remobilizam em média até a profundidade de 27 m, chegando a 33m. As ondas de sul com 2,25 m e 9,87 s remobilizam em média até a profundidade de 32 m, chegando a 41 m. As ondas de sul com 2,74 m e 10,37 s remobilizam em média até a profundidade de 39 m, chegando a 49 m. A onda de maior altura com 5,51 m e período de 10,97 s remobilizou em média até a profundidade de 62 m, chegando a profundidade máxima de 64 m (Fig. 28).

Figura 28: Área de remobilização de sedimentos de 0,062 mm para ondas de inverno.

Na primavera, meses de setembro a novembro, a predominância das ondas de leste e sul, como no verão, apresentou maiores alturas e períodos associados em comparação com o verão.

As ondas de nordeste com altura significativa de 1,73 m e período de 6,3 s, remobilizaram sedimentos de diâmetro médio 0,062 mm (areia muito fina), em média até a profundidade de 10 m, chegando a 21 m. As ondas de sudeste com 1,32 m e 7,78 s remobilizaram em média até a profundidade de 19 m, chegando a 23 m. as ondas de sudeste com 1,75 m e 8,16 s remobilizaram em média até a profundidade de 23 m, chegando a 35 m. As ondas de leste com 1,29 m e 7,07 s remobilizaram em média até a profundidade de 16 m, chegando a 23 m. As ondas de leste com 1,74 m e 7,31 s remobilizaram em média até a profundidade de 19 m, chegando a 24 m. As ondas de leste com 2,22 m e 7,51 s remobilizaram em média até a profundidade de 21 m, chegando a 23 m. As ondas de sul com 1,34 m e 8,47 s remobilizaram em média até a profundidade de 19 m, chegando a 22 m. As ondas de sul com 1,78 m e 8,73 s remobilizaram em média até profundidade de 21 m, chegando a 24 m. As ondas de sul com 2,24 m e 9,14 s remobilizaram em média até a profundidade de 28 m, chegando a 38 m. A onda de maior altura com 4,4 m e período de 9,16 s remobilizou em média até a profundidade de 41 m, chegando a 43 m (Fig. 29).

Figura 29: Área de remobilização de sedimentos de 0.062 mm das ondas de maior ocorrência na primavera.

6.3.2 Probabilidade de remobilização

Com os resultados da remobilização para cada tipo de onda, foi calculada a probabilidade de tempo que a velocidade orbital máxima junto ao fundo supera a velocidade crítica de arrasto para cada tipo de sedimento.

Para um sedimento com 0,125 mm de diâmetro médio (areia fina), a área da plataforma que sofre ressuspensão devido à ação da altura significativa e período médio chega a 40 m, sendo que a profundidade que está sobre influência dessas ondas em 50 % do tempo está próximo da costa com profundidade média de 10 m (Fig. 30).

Figura 30: Probabilidade que um sedimento de 0,125 mm (areia fina) sofre remobilização com altura significativa e período médio.

A figura 31 mostra a área atingida pela ação da altura máxima e período de pico, onde a profundidade limite que um grão de 0,125 mm é ressuspensionado está um pouco acima de 60 m, chegando a 70 m.

Figura 31: Probabilidade que um sedimento de 0,125 mm (areia fina) sofre remobilização com altura máxima e período de pico.

Para um sedimento com 0,062 mm de diâmetro médio (areia muito fina), a área da plataforma que sofre ressuspensão devido à ação da altura significativa e período médio chega a 45 m, sendo que a profundidade que está sobre influência dessas ondas em 50 % do tempo está próximo da costa com profundidade média de 10 m (Fig. 32).

Figura 32: Probabilidade que um sedimento de 0,062 mm (areia muito fina) sofre remobilização com altura significativa e período médio.

A figura 33 mostra a área atingida pela ação da altura máxima e período de pico, onde a profundidade limite que um grão de 0,062 mm é ressuspensionado está um próximo isóbata de 80 m.

Figura 33: Probabilidade que um sedimento de 0,062 mm (areia muito fina) sofre remobilização com altura máxima e período de pico.

Para um sedimento com 0,025 mm de diâmetro médio (silte), a área da plataforma que sofre ressuspensão devido à ação da altura significativa e período médio chega na isóbata de 60 m, sendo que a profundidade que está sobre influência dessas ondas em 50 % do tempo está próximo da isóbata de 20 m (Fig. 34).

Figura 34: Probabilidade que um sedimento de 0,025 mm (silte) sofre remobilização com altura significativa e período médio.

A figura 35 mostra a área atingida pela ação da altura máxima e período de pico, onde a profundidade limite que um grão de 0,025 mm é ressuspensionado é acima de 80 m, chegando a 90 m.

Figura 35: Probabilidade que um sedimento de 0,025 mm (silte) sofre remobilização com altura máxima e período de pico.

As figuras 36 e 37 mostram a porcentagem do tempo que a velocidade orbital junto ao fundo ultrapassa a velocidade crítica de arrasto para os sedimentos de tamanho 0,125 mm (areia fina), 0,062 mm (areia muito fina) e 0,025 mm (silte) em função da profundidade, para altura significativa e período médio e para altura máxima e período de pico respectivamente.

Figura 36: Porcentagem de tempo que a velocidade orbital junto ao fundo excede a velocidade crítica de arrasto para sedimento com diâmetro médio de 0,125 mm, 0,062 mm e 0,025 mm, para altura significativa e período médio.

Figura 37: Porcentagem de tempo que a velocidade orbital junto ao fundo excede a velocidade crítica de arrasto para sedimento com diâmetro médio de 0,125 mm, 0,062 mm e 0,025 mm, para altura máxima e período de pico.

7. Discussão

O clima de ondas foi caracterizado utilizando dados do modelo global de ondas WAVEWATCH III (NCEP-NOOA). As ondas que atingem a plataforma continental do estado de São Paulo estão bem divididas por sul e leste com aproximadamente 45% cada, com um pequeno percentual a mais das de sul, que apresentam maiores alturas e períodos.

Durante o verão e a primavera, há o domínio de ondas de leste que possuem altura e período menores comparado às ondas de sul e sudeste. O outono e inverno apresentaram maior ocorrência das ondas de sul.

Mostrando a influência das frentes frias, originadas da região polar e que atravessam a costa sul e sudeste brasileira, com maior intensidade durante o outono e inverno (Gan, 1991).

Pianca et al. (2010), caracterizaram o clima de ondas de toda a costa brasileira utilizando o mesmo modelo. Os resultados mostraram que a energia das ondas é maior na região sul do Brasil e decresce em direção à região norte, conforme as frentes frias perdem energia se propagando para o norte.

Por existir poucos dados de onda disponíveis no Brasil, este tipo de análise é de grande importância podendo ser utilizado para diversas aplicações na área da oceanografia.

Apesar do dado de onda retirado do modelo estar próxima a quebra da plataforma continental, este foi inserido em uma única borda que se estende desde o estado de Santa Catarina até Rio de Janeiro.

O estabelecimento da área batimétrica do modelo é uma das etapas mais importantes para o processo de modelagem, uma vez que, a qualidade dos resultados será diretamente relacionada com a qualidade e resolução da

batimetria utilizada no modelo (Siegle et al., 2003).

Os pontos batimétricos coletados em cruzeiros oceanográficos cobrem grande parte da plataforma continental do estado de São Paulo, porém apresentaram grandes áreas com falta de dados na região sul do estado e quebra da plataforma. Para solucionar este problema foram utilizado os dados do ETOPO2, que tem uma resolução de dois minutos, aproximadamente 3,6 km. Assim foi aumentado o domínio e deixou a área de interesse longe das bordas do modelo.

O modelo MIKE 21 possui uma malha triangular flexível que permite o refinamento de uma área de maior interesse, deixando áreas ao redor com menor resolução. Assim diminui o tempo de simulação e otimiza a capacidade computacional.

As simulações mostraram que, com uma plataforma continental extensa, com cerca de 180 km de distância da costa, e com a quebra da plataforma a 200 m de profundidade, as ondas sofrem grande transformação ao se propagarem sobre ela. Devido à sua orientação sudoeste-nordeste, as ondas de sudeste quase não sofrem o efeito da refração, diferentemente das ondas de sul e leste onde observa-se a mudança de sua direção ou se aproximarem da costa. As ondas de nordeste

Mapas das áreas de remobilização de sedimentos foram feitos para as ondas com frequências acima de 3 %, mostrando a profundidade máxima que cada uma consegue atuar sobre o sedimento de 0,062 mm (areia muito fina). E assim foi feito tanto para o clima de ondas geral como para cada estação do ano. Mostrando que as ondas que mais influenciam na mobilidade sedimentar da região são as de sul, seguidos pelas de sudeste.

Mapas da probabilidade do sedimento sendo remobilizado pelas ondas na plataforma continental de estado de São Paulo foram feitos adaptando o método de Potter-Smith et al. (2004). Mostram que as alturas máximas e período de pico apresentam um potencial de ressuspensão do sedimento através da plataforma continental até a profundidade de 80 m, e que as alturas significativas e período médio influenciam mais a região mais interna da plataforma com profundidade de 50 m.

Griffin et al. (2008) aplicaram esta metodologia para a plataforma de New South Wales, Austrália. As alturas significativas e períodos médios remobilizaram sedimentos com diâmetro médio de 0,062 mm até uma profundidade de 90 m, apresentando na isóbata de 30 m, 30 % do tempo onde a velocidade orbital junto ao fundo excede a velocidade crítica de arrasto.

Este trabalho mostra que a altura significativa e período médio remobilizou o mesmo sedimento até a profundidade de 50 m e que na isóbata de 30 m, apenas 4 % do tempo a velocidade orbital junto ao fundo excede a velocidade crítica de arrasto.

A expressiva diferença pode ser explicada pela morfologia das duas plataformas. A plataforma continental de New South Wales apresenta uma extensão variando de 20 a 50 km e a quebra da plataforma possui uma profundidade de 150 m.

Campos e Dominguez (2010) obtiveram valores de 45 a 60 m de profundidade para os limites de remobilização de sedimento na costa norte do estado da Bahia. Porém a plataforma continental e o clima de ondas apresentam profundas diferenças entre as duas áreas.

Os resultados para cada tipo de grão mostram que alturas significativas

e períodos médios podem regularmente ressuspender areia muito fina até a profundidade de 40 m e que as alturas máximas e períodos de pico podem ocasionalmente remobilizar sedimentos areia muito fina até a profundidade de 60 m.

O balanço sedimentar na plataforma é dependente do aporte de sedimentos originados de rios ou vindos de plataformas adjacentes. O estado de São Paulo não apresenta nenhum grande rio, com descarga fluvial considerável. Porém possui uma serra próxima à costa, a Serra do Mar, onde ocorre o maior índice de pluviosidade do país.

Próximo à costa, onde ocorre a zona de surfe, a ação das ondas é intensa. Neste ambiente, as ondas realizam transporte de massa e geram correntes paralelas e transversais a linha de costa, deriva litorânea, costa adentro, costa a fora, espraçamento, corrente de retorno. E ainda há a presença de desembocaduras, onde a água fluvial transporta sedimentos.

No norte do estado de São Paulo, a Serra do Mar está bem próxima ao litoral, é caracterizada por uma costa sinuosa, com relevo irregular e ilhas, apresentando baías e enseadas. Na porção sul a Serra do Mar está mais distante do litoral e apresenta praias maiores e mais retilíneas, com a presença de dois grandes estuários, o complexo estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape e o estuário de Santos. Tanto as baías e enseadas quanto os estuários são grandes retentores de sedimentos provindos desta grande serra que sofre grande intemperismo e erosão.

Durante o verão o volume de chuvas é mais intenso, juntamente com os maiores ocorrências de ventos de nordeste e leste. Isso faz com que a Água Costeira (AC) atinja maiores distâncias com relação à costa e,

consequentemente, transporte sedimentos em suspensão sobre a plataforma. Simultaneamente ocorre próximo ao leito marinho a penetração da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) em direção à costa, que ao recuar pode ajudar no transporte de sedimentos na plataforma continental média.

Furtado e Mahiques (1990) aplicando técnicas de análise de superfície de tendência em dados sedimentológicos e associando-os a informações sobre a circulação da área, concluem que o fundo é constituído por areias finas e muito finas, com características de sedimentos palimpsestos. A contribuição continental atual é restrita às proximidades das fontes costeiras nas enseadas e o material pelítico, embora retido predominantemente nas enseadas, pode atingir a plataforma na altura da isóbata de 50 m, pela saída de águas costeiras durante o verão, essa hipótese associa-se ao mecanismo de entrada da ACAS, na plataforma continental interna de São Paulo. Durante os meses de primavera e verão, essa massa d'água, mais fria, penetra pelo fundo, atingindo regiões mais rasas. Essa ingressão ocasiona a saída da AC em superfície (Castro Filho et al., 1987), que se propaga para além da isóbata de 50 metros. Durante esses períodos, que são coincidentes com os maiores índices de pluviosidade na área e, consequentemente, com o maior aporte de pelitos para a plataforma interna, pode ocorrer o transporte de finos para áreas mais profundas.

As correntes oceânicas podem influenciar no transporte de sedimentos, principalmente em áreas onde a ação das ondas não está presente. A Corrente do Brasil não chega a atingir as plataformas média e interna do estado de São Paulo, porém a ocorrência de vórtices sobre a plataforma continental externa pode mobilizar sedimentos desta e do talude continental.

A maré na região é classificada como micro maré, onde a variação da altura é menor que 2 metros, podendo ser amplificada por eventos climáticos que causam maré meteorológica, quando há empilhamento de água na costa devido a ação dos ventos. Dessa forma, a ação da maré fica restrita às proximidades da desembocadura causando pouca interferência na plataforma continental.

No oceano Atlântico Sul, não há a ocorrência de eventos extremos, como furacões e tsunamis, que são causadores de grande mobilidade sedimentar em sua passagem sobre uma plataforma continental.

8. Conclusões

Utilizando os dados do WAVEWATCH III, foi possível caracterizar o clima de ondas da região, que apresentou predominância das ondas de sul com 36,5% e de leste com 34,1%, e alturas entre 1 e 2 metros com 58% do total. O trabalho estatístico permitiu quantificar e selecionar as alturas significativa e máxima com seus respectivos períodos médio e de pico, que forma utilizados como entrada no modelo numérico.

O modelo numérico MIKE 21, simulou as transformações das ondas sobre a plataforma continental, mostrando que as ondas de sul sofre maior refração na porção sul do estado e as ondas de leste na porção norte, e as ondas de sudeste quase não mudam de direção ao se propagarem pela plataforma continental. Também permitiu, com os resultados de saída, que toda a área de estudo apresentasse dados relevantes para o cálculo do comprimento de onda e consequentemente da velocidade orbital máxima junto

ao fundo e velocidade crítica de arrasto.

O método de Pottter-Smith et al. (2004) foi aplicado mostrando a área de influência da ação das ondas sobre a plataforma continental do estado de São Paulo. A altura significativa e período médio chegam a remobilizar areia fina até 40 m, areia muito fina até 45 m e silte até 60 m de profundidade. Altura máxima e período de pico, remobilizam areia fina até 60 m, areia muito fina até 80 m e silte até 90m de profundidade. Os resultados obtidos são de grande importância para o entendimento da mobilidade sedimentar deste ambiente.

A falta de dados oceanográficos e meteorológicos disponíveis da plataforma continental do estado de São Paulo, como onda, correntes superficiais, da coluna d'água e de fundo, e vento, impossibilitam a validação da modelagem e dos resultados obtidos na remobilização.

A modelagem numérica é de grande valor para o entendimento dos processos que atuam neste ambiente. Neste trabalho foi possível isolar algumas das variáveis que influenciam a mobilidade sedimentar da plataforma continental do estado de São Paulo.

O presente trabalho é de grande valor para entender a influência da ação das ondas na plataforma continental do estado de São Paulo.

9. Referências bibliográficas

- Abbott, M.B., & Larsen, J. 1985. Modelling circulations in depth-integrated flows. *Journal of Hydraulic Research*, 23, 309-326.
- Abbott, M.B., McCowan, A.D., & Warren, U.I.R. 1988. Numerical modelling of free-surface flows that are two-dimensional in plan. In: H.B. Fisher (Ed.).

- Transport Models for Inland and Costal Waters. Academic Press, 222-283p.
- Alves, E. C.; Ponzi, V. R. A. 1984. Características morfológico-sedimentares da plataforma continental e talude superior da margem continental sudeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia. V. 4. P. 1629-1642.
- Butler, L.W. 1970. Shallow structure of the continental margin, Southern Brasil and Uruguay. Geol. Soc. Am. Bull. V81:1079-1096.
- Campos, R. H. S.; Dominguez, J. M. L. 2010. Mobility of sediments due to wave action on the continental shelf of the northern coast of the State of Bahia. Brazilian Journal of Oceanography. 58(special issue PGGM):57-63.
- Castro Filho, B. M. 1996. Correntes e massas d'água da plataforma continental norte de São Paulo. Tese de Livre Docência, DOF/IOUSP, 248p.
- Castro Filho, B.M.; MIRANDA, L.B.; MYAO, S.Y. 1987. Condições hidrográficas na plataforma continentatl ao largo de Ubatuba: variações sazonais em média escala. Boletim do Instituto Oceanográfico. São Paulo, 35(2):135-151.
- Clifton, H.E., Dingler, J.R., 1984. Wave formed structures and paleoenvironmental reconstruction. Mar. Geol. 60, 165-198.
- Coimbra, A.M., Furtado, V.V., Tessler, M.G., Yamamoto, M.F., Todeschini, E., 1980. dispersão de sdeimentos de fundo na plataforma continental do estado de São Paulo – Santos a Ilha Grande. In: Coimbra Brasileiro de Geologia, 31. v.1:557-568.
- Cookman, J.L., Flemings, P.B., 2001.STORMSED 1.0: hydrodynamics and sediment transport in a 2-D, steady-state, wind- and wave-driven coastal circulation model. Comput. Geosci. 27, 647-674.

- Decker, R.H., 1988. The wave regime on the inner shelf south of Orange River and its implications for sediment transport. *S. Afr. J. Geol.* 91, 358-371.
- Dyer, K.R., 1986. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*. Wiley, Chichester, New York.
- Folk, R. L. 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *Journal of Geology* 62: 344–359.
- Folk, R. L., Ward, W. C. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 3–26.
- Furtado, V. V.; Tessler, M. G.; Eichler, B. B., 1984. Distribuição de sedimentos de superfície de fundo na plataforma continental do Estado de São Paulo. In: *Simpósio Brasileiro sobre Recursos do Mar. 2. Resumos*. Rio de Janeiro, CIRM/UERJ. p. 15.
- Furtado, V.V.; Mahiques, M.M. 1990. Distribuição de sedimentos em regiões costeiras e plataforma continental norte do Estado de São Paulo. In *Simpósio de ecossistemas da Costa Sul e Sudeste Brasileira, 2. Publ. AC. Ciênc. Est. S. Paulo* no 71-1:20-29.
- GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. *American Meteorological Society*, 1991. v. 119, p. 1293-1302.
- Grant, W.D., Madsen, O.S., 1979. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *J. Geophys. Res.* 84, 1797-1807.
- Griffin, J.D., Hemer, M.A., Jones, B.G., 2008. Mobility of grain size distributions on a wave dominated continental shelf, southeastern Australia. *Mar. Geol.* 252, 13-23.
- Harris, P.T., Coleman, R., 1998. Estimating global shelf sediment mobility due to swell waves. *Mar. Geol.* 150, 171-177.

- Hemer, M.A., 2006. The magnitude and frequency of combined flow bed shear stress as a measure of exposure on the Australian continental shelf. *Continental Cont. Shelf Res.* 26, 1258-1280.
- Hemer, M.A., Harris, P.T., Coleman, R., Hunter, J., 2004. Sediment mobility due to currents and waves in the Torres Strait-Gulf of Papua region. *Cont. Shelf Res.* 24, 2297-2316.
- Hjulström, F., 1935, Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris: Uppsala University, Geological Institute Bulletin 25, p. 221–527.
- Johnson, H.D., Baldwin, C.T., 1996. Shallow Clastic Seas, In: *Sedimentary Environments: processes, facies and stratigraphy*, Editor(s): Reading, Blackwell Scientific Publications. P. 236-286
- Komar, P.D., 1976. *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 429 pp.
- Manly Hydraulics Laboratory(2006). http://mhl.nsw.gov.au/www/wave_glossary.
- Miranda, L.B. 1982. Análise de massas de água da plataforma continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) à Ilha de São Sebastião (SP). Tese de Livre Docência, instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 194 pp.
- Nielsen, P.; Green, M. O.; Coffey, F. C. 1982. Suspended sediment under waves. Tech. Rep. 82/6, Coastal Studies Unit, Dept. of Geography, Univ. of Sydney.
- Nitttrouer, C. A., and L. D. Wright (1994), Transport of particles across continental shelves, *Rev. Geophys.*, 32(1), 85–113.
- Pianca, C.; Luigi F., P.; Siegle, E., 2010. Brazilian offshore wave climate based

- on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1):53-70.
- Post, A.L., Wassenberg, T.J., Passlow, V., 2006. Physical surrogates for macrofaunal distributions and abundance in a tropical gulf, *Mar. Freshw. Res.* 57, 469-483.
- Poter-Smith, R., Harris, P.T., Anderson, O.B., Coleman, R., Greenslade, D. Jenkins, C.J., 2004. Classification of the Australian continental shelf based on predicted sediment threshold exceedance from tidal currents and swell waves. *Mar. Geol.* 211, 1-20.
- Rodrigues M., Furtado V.V., Tessler M.G., Mahiques M.M. (orgs) 2001. Atlas Sedimentológico da plataforma continental do estado de São Paulo. Grupo de Oceanografia Geológica. IO-USP. 34 p.
- Rodrigues, M.; Furtado, V. V.; Tessler, M. G.; Mahiques. 2003. Atlas sedimentológico da plataforma continental do Estado de São Paulo. IOUSP. 34p.
- Shields, A. (1936) Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. California Institute of Technology , Pasadena, CA.
- Siegle, E.; Huntley, D.A.; Davidson, M.A., 2003. Sediment transport patterns and morphodynamics at a complex inlet system. *Coastal Sediments'03* (ASCE), CD-ROM.
- Swift, D.J.P., Han, G., Vincent, C.E., 1986. Fluid processes and sea-floor response on a modern storm-dominated shelf: Middle Atlantic shelf of north America: Part 1. The storm-current regime. In: Knight, R.J., McLean, J.R. (Eds.), *Shelf Sands and Sandstones*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Calgary, pp. 99-119.
- Swift, D.J.P., Thorne, J.A., 1991. sedimentation on continental margins: I. A

- general model for shelf sedimentation. Spec. Publ. Int. Assoc. Sedimentol. 14, 3-31.
- Tessler, M. G. 1988. Dinâmica sedimentar quaternária no litoral sul paulista. Phd Thesis. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. 277p
- Tessler, M.G., Mahiques, M.M., 2001. Processos oceânicos e fisiografia dos fundos marinhos. *In*: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R. & TAIOLI, F. (orgs.). Decifrando a Terra. Oficina de Textos, São Paulo, p. 262-284.
- Tolman, H.L. 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB. Tech. Note 166. 110p. edn. Disponível em: <http://polar.ncep.noaa.gov/wwaves/wavewatch>.
- Tolman, H.L. 2002. User Manual and System documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA.
- Vriend, H.J. De, Ziserman, J., Roelvink, J.A., Péchon, P., & Southgate, H.N. 1993. Médium term 2DH coastal área modeling. Coastal Engineering, 21, 193-244.
- Walker, R.G., 1984. Shelf and shallow marine sands. *In*: Walker, R.G. (Ed.), Facies Models. Geological Association of Canada, Toronto, pp. 141-170.
- Wright, J., 1999. Waves, tides and shallow water processes. Open University, Oceanography Course Group. 227 p.
- Zembruski, S.G. 1979. Geomorfologia da margem continental brasileira (Relatório Final) Série Projeto REMAC, 7 Rio de Janeiro, p. 129-177.