

O Cálculo do Transporte de Sedimentos Litorâneo: Estudo de Caso das Praias de Suarão e Cibratel (Município de Itanhaém, São Paulo)

Rodrigo Nogueira de Araújo e Paulo Alfredini

Depto. de Engenharia Hidráulica e Sanitária/Escola Politécnica/USP - Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues, 120
05508-900 São Paulo, SP - rnausp@hotmail.com e alfredin@usp.br

Recebido: 10/05/00 - revisão: 10/10/00 - aceito: 06/04/01

RESUMO

A vazão do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal é um dos principais parâmetros que a maioria das obras de Engenharia Costeira necessita para a avaliação de sua viabilidade técnica, econômica e ambiental.

O presente estudo realizou o cálculo da vazão do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal das praias de Suarão e Cibratel, município de Itanhaém-SP, utilizando para o cálculo as fórmulas mais apropriadas e confiáveis disponíveis na atualidade.

Os dados de ondas utilizados nas fórmulas para obtenção das vazões de transporte foram obtidos através de cálculos de empenamento e refração de ondas reais originalmente registradas em uma campanha de medições na Praia do Una (Juréia) no período de 1982 a 1985.

Além do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal, o trabalho identificou os dados de onda representativos em água profunda para uma região delimitada do litoral centro-sul paulista. Apresentou-se ainda uma proposta de balanço sedimentar para a região de estudo.

Pode-se concluir que, na arrebentação das praias de Suarão e Cibratel, o transporte de sedimentos litorâneo longitudinal resultante tem rumo SW e sua magnitude pode oscilar de 350.000 a 550.000 m³/ano.

Os dados de onda representativos mostram uma grande dominância energética e de frequência das ondas provenientes do octante SE.

Palavras-chave: transporte de sedimentos; engenharia costeira; transporte litorâneo.

INTRODUÇÃO

O conhecimento relativo ao transporte de sedimentos litorâneo é um dos temas básicos da Engenharia Costeira, estando diretamente vinculado ao impacto ambiental produzido pelas obras costeiras e portuárias.

Desde a metade do nosso século diversos pesquisadores têm trabalhado intensamente no desenvolvimento de fórmulas e metodologias que resultem em uma estimativa precisa e confiável do transporte de sedimentos litorâneo. Ano após ano, observa-se o surgimento de novas fórmulas e métodos para o cálculo do transporte de sedimentos litorâneo. Isto ocorre principalmente devido aos avanços dos recursos computacionais e também ao aumento da disponibilidade de dados, medições e monitoramento de praias em todo o mundo.

O transporte de sedimentos litorâneo longitudinal consiste no caminhamento longitudinal dos sedimentos paralelamente à costa, ora num sentido ora noutro, e ocorre quando do ataque oblíquo das ondas, responsável por criar pseudo-correntes hi-

dráulicas longitudinais, que possuem capacidade de mobilizar e transportar grandes quantidades de sedimentos. Assim que a onda arrebenta, colocando em suspensão os sedimentos, a corrente longitudinal induzida movimenta-os através de forças hidrodinâmicas de arrastamento e passa a carregá-los em suspensão turbulenta ou por arrastamento de fundo.

O conhecimento do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal é fundamental para o projeto de qualquer obra costeira que interfira na movimentação dos sedimentos na zona litorânea. Este conhecimento não se resume a orientar o projeto no que diz respeito aos seus requisitos de informações e dados intrínsecos, mas também é importante para estimar os impactos que esta obra pode causar nas praias e áreas costeiras adjacentes. Além disso, é importante porque contribui na determinação de alguma tendência de migração da linha de costa em curto e longo prazos de tempo.

O sentido do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal em um determinado instante depende do rumo de incidência do trem de ondas atuante neste instante, além da batimetria, alinhamento e exposição da costa. A convenção clássica nestes estudos atribui como positivos os transportes originados por ondas que arrebatam provenientes da esquerda de um observador que observa o mar perpendicularmente à linha de costa, e negativos os transportes originados por ondas que arrebatam provenientes da direita do observador.

A somatória absoluta destes transportes fornece o valor do transporte de sedimentos global na linha de costa. A somatória dos transportes, considerando seu sentido, fornece o valor do transporte de sedimentos resultante.

É importante o conhecimento tanto dos valores globais como dos resultantes do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal. Existem casos em que o transporte de sedimentos global é muito elevado e o transporte de sedimentos resultante é bem pequeno, isto é, praticamente o mesmo volume de sedimentos é transportado em cada sentido. Em outros casos a vazão de transporte de sedimentos global praticamente iguala-se à vazão de transporte de sedimentos resultante, configurando uma forte dominância do transporte de sedimentos em um sentido.

OBJETIVOS E ÂMBITO DO ESTUDO

Este trabalho pretende apresentar os resultados e metodologia do cálculo do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal em sua aplicação em um estudo de caso real. Esta aplicação é o objetivo principal do estudo e consiste no conhecimento e quantificação relativos ao transporte de sedimentos litorâneo longitudinal das praias de Suarão e Cibratel do Município de Itanhaém (SP).

O presente trabalho também contempla a identificação dos parâmetros de onda representativos em água profunda para as referidas praias a partir dos dados de ondas registrados por ondógrafo, da campanha promovida pelo CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear.

O trabalho não contempla o transporte de sedimentos litorâneo transversal, que se processa na direção mar-costa, nos dois sentidos, isto é sensivelmente ortogonal à linha de costa. Este trabalho também não contempla a quantificação de um balanço sedimentar para a região de estudo, mesmo porque não há medições suficientes. No entanto é proposta uma esquematização deste balanço que pretende justificar os resultados obtidos.

Os resultados apresentados têm a intenção de servir de base para avaliação do impacto de projetos de engenharia na linha de costa.

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As praias de Suarão e Cibratel, município de Itanhaém (Figuras 1, 2 e 3), fazem parte de uma planície costeira que apresenta praias retilíneas e extensas intercaladas por morros cristalinos e todas as características de uma costa baixa onde a ação construtiva do mar se fez sentir em larga escala. São praias bem evoluídas e estabilizadas, isto é, têm apresentado variações pouco significativas em suas características físicas e morfológicas, não indicando alguma tendência natural de mudança de linha de costa, deposição ou erosão de sedimentos.

A granulometria dos sedimentos presentes na zona de arrebatção das duas praias é constituída de areia fina e média, São Paulo (1991 a 1999). Ao largo de ambas as praias, as isóbatas acompanham a linha de costa, sem grandes desvios e com granulometria caracterizada por areias finas. A análise granulométrica efetuada por São Paulo

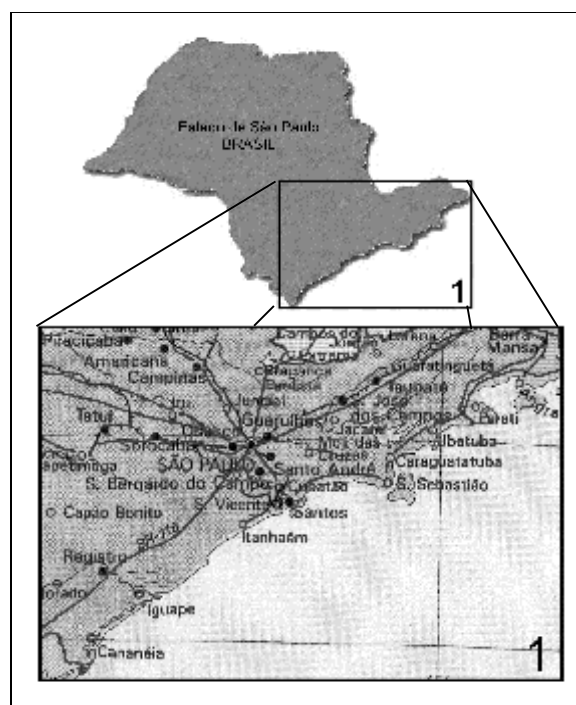


Figura 1. Localização geográfica de Itanhaém 24°11'08" S 46°47'15" W.

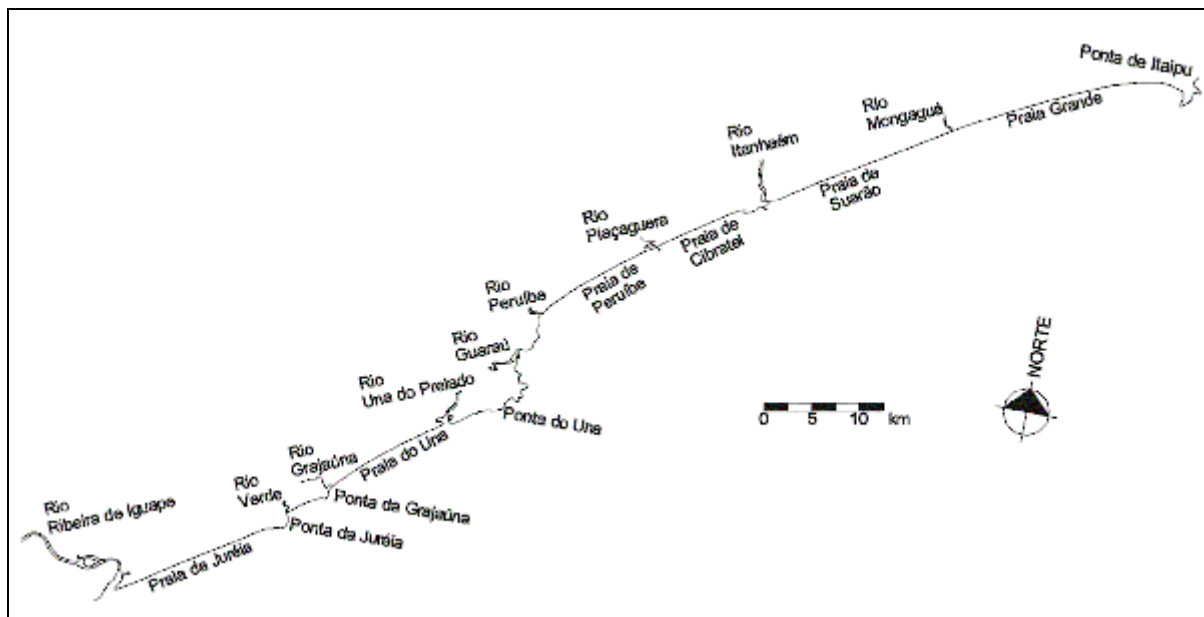


Figura 2. Costa paulista do rio Ribeira de Iguape à Ponta de Itaipu.

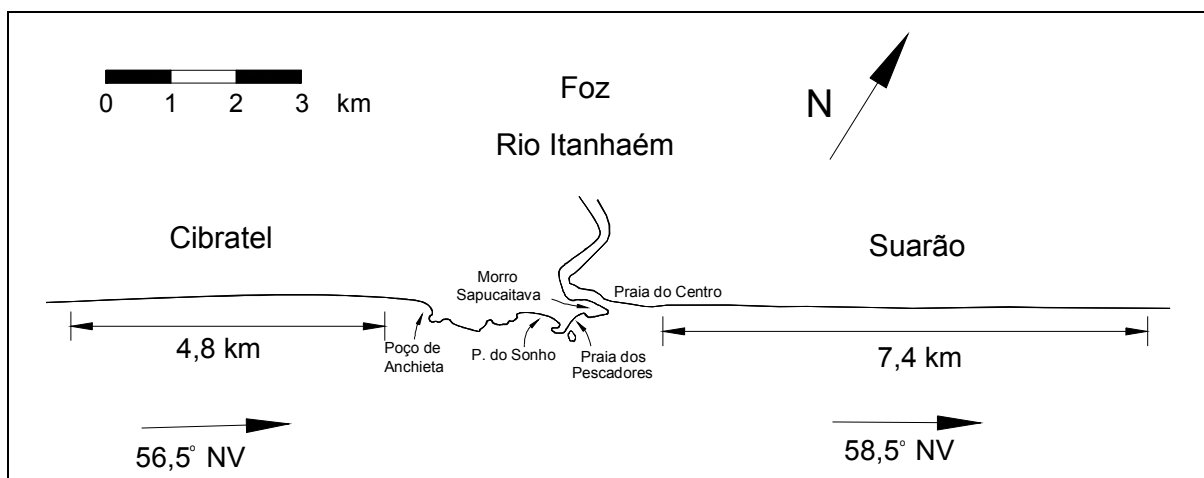


Figura 3. Compartimentos Cibratel e Suarão e suas respectivas extensões e alinhamentos.

(1991 a 1999) permite estimar uma granulometria de diâmetro mediano $D_{50} = 0,40$ mm para a zona de arrebenção destas duas praias.

Suarão e Cibratel são praias próximas, separadas pela foz do rio Itanhaém e por afloramentos rochosos que intercalam as pequenas praias dos Pescadores e do Sonho, que encontram-se à SW da desembocadura (Figura 3). Suarão e Cibratel encontram-se em um trecho da costa aberto, desabrigado e sem obstáculos à incidências das ondas. Ambas as praias possuem declividades suaves, com largura média da faixa praial em torno de 90 m.

A Figura 3 apresenta as praias de Suarão e Cibratel e a compartimentação adotada afim de proceder-se ao estudo de caso. Considera-se como

compartimento Cibratel a região de linha de costa delimitada entre o Poço de Anchieta até cerca de 4,8 km para SW, à foz do rio Piaçaguera. O compartimento Suarão compreende a região delimitada pela Praia do Centro, logo ao lado da foz do rio Itanhaém, até 7,4 km à NE, rumo à foz do rio Mongaguá.

A direção média da linha de praia do compartimento Suarão é de $58,5^\circ$ NV e de Cibratel $56,5^\circ$ NV (Figura 3).

O rio Itanhaém é caracteristicamente um rio de planície, meandrante e de regime fluvial de baixa energia. A orientação da foz do rio é desviada para E pelas formações dos morros em sua margem SW, sendo o último o Morro do Sapucaitava.

FÓRMULAS ADOTADAS PARA O CÁLCULO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS LITORÂNEO LONGITUDINAL

Fórmula de Caldwell (1956)

A fórmula de Caldwell (1956), apud Castanho (1966), baseia-se na pura proporcionalidade entre a capacidade de transporte de sedimentos e a energia transmitida. Constitui-se em uma expressão simples, tendo a vantagem de requerer somente os dados de agitação marítima, evitando a necessidade de estimar ou medir muitos parâmetros. É uma fórmula empírica e não homogênea e considera a potência da onda solitária. Dos testes realizados por Schoonees e Theron (1994), a fórmula de Caldwell foi considerada a segunda melhor estimativa. A fórmula de Caldwell é apresentada na Equação (1) em unidades do S.I.:

$$Q_s = 5,006 \cdot (P_{lsb} \cdot 10^{-6})^{0,8} \quad (1)$$

Sendo:

$$P_{lsb} = \frac{2,2 \cdot \rho \cdot g \cdot H_{sb}^3}{T_z} \quad (2)$$

Q_s : vazão de transporte de sedimentos litorâneo longitudinal, P_{lsb} : potência transmitida paralelamente à costa e por unidade de comprimento de praia na arrebentação calculada pela teoria da onda solitária, ρ : massa específica do fluido, g : aceleração da gravidade, T_z : período médio de onda e H_{sb} : altura da onda significativa na arrebentação.

Fórmula de Kamphuis (1991)

Sabe-se que a vazão de transporte de sedimentos litorâneo longitudinal é função de uma combinação dos parâmetro da onda incidente, do fluido, do sedimento e da forma do perfil praial, cujos efeitos são inter-relacionados. A solução encontrada por Kamphuis para simplificar esta análise foi fazer uso das propriedades adimensionais deste grande número de parâmetros.

Assim, Kamphuis (1991) propõe uma expressão baseada em análise dimensional ajustada a partir de dados de experimentos em laboratório. A

fórmula de Kamphuis (1991) é apresentada na Equação (3) em m^3/ano :

$$Q_s = 6,4 \cdot 10^4 \cdot H_{sb}^2 \cdot T_p^{1,5} \cdot \dots \cdot m^{0,75} \cdot D_{50}^{-0,25} \cdot \sin^{0,6}(2\alpha_b) \quad (3)$$

sendo T_p : período de pico espectral de onda, m : declividade do perfil praial na zona de arrebentação e α_b : ângulo formado pela frente da onda com a isóbata na arrebentação.

Fórmula de Kamphuis (1991) aprimorada por Schoonees e Theron (1996)

Schoonees e Theron (1996), em função de um extenso banco de dados fizeram a re-calibração da fórmula de Kamphuis (1991), resultando em uma melhora significativa, provavelmente devido à utilização somente de dados de campo. Dados de laboratório usualmente contêm efeitos de escala ou utilizam ondas regulares apenas. A fórmula recalibrada proposta foi:

$$Q_s = 9,9 \cdot 10^4 \cdot H_{sb}^2 \cdot T_p^{1,5} \cdot \dots \cdot m^{0,75} \cdot D_{50}^{-0,25} \cdot \sin^{0,6}(2\alpha_b) \quad (4)$$

Depois da re-calibração feita por Schoonees e Theron em 1996, a fórmula de Kamphuis pode ser considerada como o melhor do estado da arte atual das fórmulas de transporte de sedimentos litorâneo longitudinal, observando-se que a mesma considera a ação de ondas reais através de H_{sb} e T_p .

DADOS UTILIZADOS

Os dados de onda utilizados no presente trabalho para o cálculo da vazão de transporte de sedimentos litorâneo longitudinal provêm da campanha do CDTN (1982 a 1985) e compreendem o período de medições de fevereiro de 1982 a setembro de 1984. Os dados de período e altura de onda foram registrados por ondógrafo e a direção por visada à bóia. As localizações do ondógrafo e da bóia são mostradas na Figura 4. Foram aproveita-

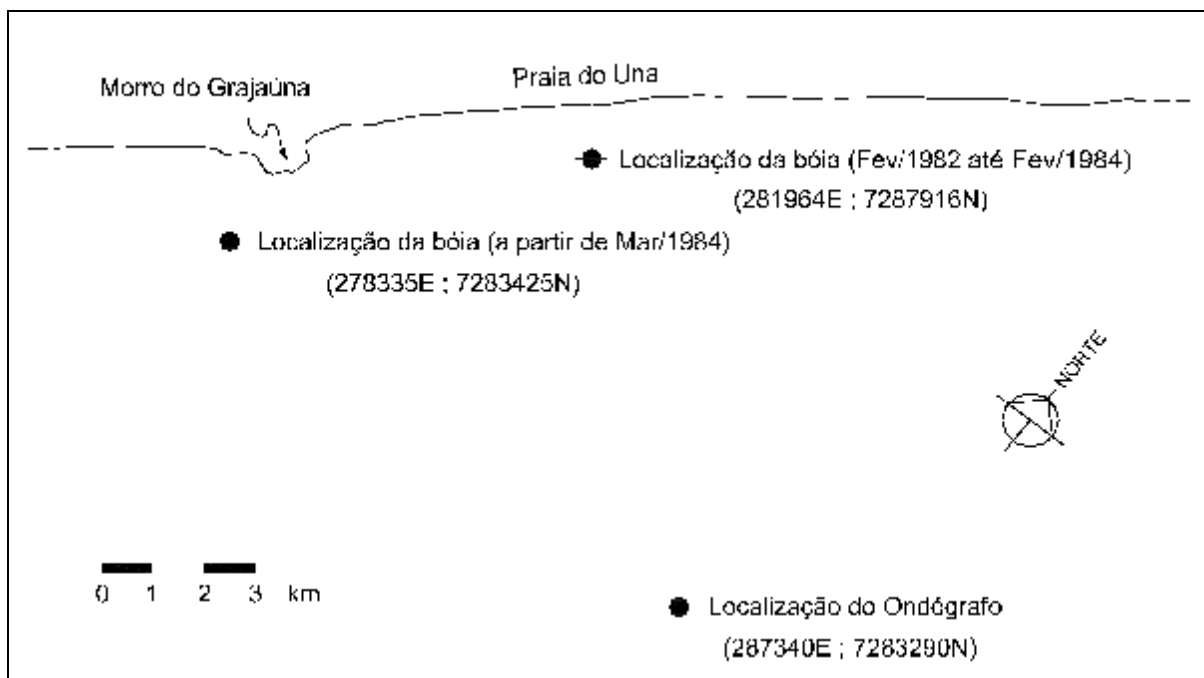


Figura 4. Localizações do ondógrafo e da bóia (coordenadas UTM - Córrego Alegre).

dos somente os dados de onda que contemplavam os três parâmetros (altura significativa, rumo e período médio) registrados simultaneamente, totalizando 1147 dados.

Demais dados batimétricos, maregráficos, granulométricos, de correntometria e de fotografias aéreas também foram utilizados e estão pormenorizadamente descritos em Araújo (2000).

METODOLOGIA EMPREGADA E RESULTADOS OBTIDOS

Como a distância entre Itanhaém e o ponto de medições do ondógrafo, na Praia do Una (Figura 2), é pequena, cerca de 50 km, é possível supor que as duas regiões apresentam o mesmo clima de ondas em água profunda. Assim, pode-se considerar os dados de ondas em água profunda da Praia do Una como os mesmos existentes nas praias de Itanhaém. Uma vez obtidos os dados de onda em água profunda, os mesmos podem ser propagados para a região de arrebentação das praias de Suarão e Cibratel, onde reside o interesse deste estudo.

Os dados de onda registrados pelo ondógrafo e os rumos visados na Praia do Una situam-se em água de profundidade intermediária e devem ser primeiramente transpostos para o largo, região de água profunda, através de cálculos de propagação, considerando-se a batimetria real existente. No caso utilizou-se para estes cálculos o programa IERAD, o qual é pormenorizadamente descrito em São Paulo (2000). O grande desafio da propagação

destas ondas para água profunda é o fato do rumo não ter sido medido na mesma posição em que o ondógrafo registrou a oscilação ondulatória. Não é possível admitir que o rumo medido na bóia seja o mesmo encontrado no ondógrafo, principalmente pela diferença de profundidades que há entre suas posições, a bóia fundeada ora em 6 m (DHN) ora em 8,5 m (DHN) e o ondógrafo em 16 m (DHN) de profundidade.

A solução encontrada é uma forma de transpor o rumo medido na bóia para a posição do ondógrafo, obtendo-se assim os três parâmetros (altura, rumo, período) conhecidos para a posição do ondógrafo e sucessivamente para água profunda.

O programa IERAD não permite que o rumo seja transposto com os cálculos de propagação de ondas diretamente entre pontos de água rasa e intermediária, que seria o caso de transpor os dados de rumo medidos na bóia para o ondógrafo. Assim, a idéia foi obter as seguintes relações completas para todo espectro de direções possível dos rumos de ondas para cada um dos períodos exis-

tentes registrados, uma vez que o período é um parâmetro invariante quando da propagação da onda e a alteração da direção pela refração independe do fenômeno do empinamento. Assim, as relações obtidas foram:

$$\boxed{\text{Rumo na bóia}} \times \boxed{\text{Rumo em água profunda}} e$$

$$\boxed{\text{Rumo no ondógrafo}} \times \boxed{\text{Rumo em água profunda}}$$

A partir da igualdade dos rumos em água profunda, foi possível consequentemente criar a seguinte relação:

$$\boxed{\text{Rumo na bóia}} \times \boxed{\text{Rumo no ondógrafo}}$$

E então, através desta relação hipotética, pode-se converter o rumo da onda medido na bóia para a posição do ondógrafo, no momento em que se registrou a onda.

Assim, após a obtenção da altura, rumo e período dos dados de onda em água profunda, com o auxílio do programa IERAD, uma a uma das 1147 ondas foi refratada do largo para as praias de Suarão e Cibratel, obtendo-se os parâmetros de onda quando da sua arrebentação e possibilitando o cálculo das vazões do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal em Itanhaém pelas fórmulas adotadas, obtendo-se as Tabelas 1 e 2.

O banco de dados de ondas em água profunda criado neste estudo tornou-se bem extenso. Esta grande quantidade de dados necessitou de intensivo uso computacional para ser manipulada. Assim, propõe-se um simples conjunto de dados para representar todo este acervo e facilitar sua aplicação em futuros estudos de forma simplificada quando isto for possível.

Inicialmente, os dados de ondas foram divididos considerando-se intervalos de rumos. O tamanho dos intervalos é pequeno, apenas de 2,5 a 5 graus, afim de que as ondas representativas sintetizem bem todo o espectro de direções.

Assim, para um dado intervalo de rumo em que as ondas foram divididas, calculou-se a média do período de todas as ondas contidas nele. A partir de então considerou-se este período calculado como o período representativo deste intervalo de rumo. A determinação da altura representativa de cada intervalo de rumo foi calculada a partir da média das potências das ondas contidas em um intervalo de rumo. Os dados de ondas representativos em água profunda estão apresentados na Ta-

Tabela 1. Transporte de sedimentos litorâneo longitudinal (m³/ano) para a praia de Suarão.

Formula de:	Transporte de sedimentos	
	Global	Resultante
Caldwell	540.000	500.000
Kamphuis (1991)	389.000	353.000
Schoonees (1996)	602.000	547.000

Tabela 2. Transporte de sedimentos litorâneo longitudinal (m³/ano) para a praia de Cibratel.

Formula de:	Transporte de sedimentos	
	Global	Resultante
Caldwell	531.000	480.000
Kamphuis (1991)	400.000	352.000
Schoonees (1996)	618.000	545.000

bela 3, e foram obtidos a partir dos dados calculados em água profunda através dos dados do CDTN (1982 a 1985).

A aferição da confiabilidade dos resultados quanto ao rumo do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal foi conseguida mediante a comparação dos seguintes elementos:

- levantamentos aerofotogramétricos da migração livre dos rios Mongaguá (Figuras 5, 6 e 7) e Piaçaguera (Figuras 8, 9 e 10) na mesma unidade morfológica (Figura 2);
- evidências geomorfológicas em associação com o cálculo de evolução de linha de costa;

Observando as praias de Suarão e Cibratel nota-se, além de uma pequena variação da direção da linha de costa, um desalinhamento brusco entre as linhas de costa na direção ortogonal às mesmas, estando a praia de Suarão mais avançada do que a de Cibratel rumo ao mar. Esta defasagem das linhas de costa é atribuída à presença dos afloramentos cristalinos das formações rochosas entre o Morro Sapucaitava e o Poço de Anchieta, produzindo o efeito de um molhe natural que interrompe o transporte de sedimentos litorâneo longitudinal, uma vez também que não há falhamento geológico encontrado nesta região. Além disso há o efeito de “molhe hidráulico” do rio Itanhaém.

Tabela 3. Dados de ondas representativos em água profunda.

Intervalo de Rumo (°) NV	T _z (s)	H _{os} (m)	Frequência (%)
95 - 100	6,8	1,43	0,35
100 - 105	8	1,25	0,52
105 - 110	7,7	1,47	1,05
110 - 115	7,5	1,02	1,48
115 - 120	7,7	1,35	1,31
120 - 125	7	1,40	2,18
125 - 127,5	6,9	1,44	1,83
127,5 - 130	6,2	0,97	3,75
130 - 132,5	6,8	0,95	12,82
132,5 - 135	7,2	1,15	23,63
135 - 137,5	7,7	1,41	21,97
137,5 - 140	7,6	1,54	12,38
140 - 142,5	6,8	1,55	3,23
142,5 - 145	7,1	1,34	2,88
145 - 147,5	7,4	1,48	2,96
147,5 - 150	7,4	1,22	2,18
150 - 152,5	9,2	1,21	1,92
152,5 - 155	7,5	1,56	0,96
155 - 160	8,5	1,43	0,87
160 - 165	9,3	1,92	0,35
165 - 170	8,8	1,43	0,52
170 - 175	7,7	1,30	0,52
175 - 180	8,5	1,88	0,35

Para explicar tal desalinhamento foi empregado o método de Pelnard-Considère (1956), apud Massie (1980), para avaliar a mudança de uma linha de costa inicialmente retilínea na qual é inserida uma obstrução de sentido perpendicular, que neste caso real foi o Morro Sapucaitava.

- Informações de práticos locais;
- Comparação da migração livre de rios na unidade morfológica (Figura 2) associada ao Maciço Juréia-Itatins, que apresenta semelhante ângulo azimutal e mesma exposição às ondas:

Rio Ribeira do Iguaçu, Geobrás (1966);
Rio Una do Prelado, Bomtempo (1991);
Rio Verde, Bomtempo (1991).

Todos os três rios citados desenvolvem acentuados desvios para SW em suas planí-

**Figura 5. Fotografia da foz do rio Piaçaguera, 1959.****Figura 6. Fotografia da foz do rio Piaçaguera, 1973.**

cies costeiras, conforme citado nas mencionadas referências.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Evento ENSO (*El Niño Southern Oscillation*)

Durante o período de registro do ondógrafo ocorreu o evento do ENSO (*El Niño Southern Oscillation*). Em princípio poder-se-ia esperar que tal evento causasse uma mudança significativa nos dados de onda, uma vez que as frentes frias intensi-



Figura 7. Fotografia da foz do rio Piaçaguera, 1994.



Figura 8. Fotografia da foz do rio Mongaguá, 1959.

ficaram-se. No entanto, a análise dos dados de ondas registrados não demonstram que o ENSO influenciou os parâmetros das ondas de forma significativa no período 1982-1983 relativamente aos demais dados de ondas, embora este tenha sido o ENSO mais forte registrado.

Dados de ondas em água profunda

A partir dos dados de onda em água profunda calculados com os dados de onda do CDTN (1982 a 1985), obteve-se que mais de 70% das ondas registradas possuem período entre 6 e 8 s, sendo que o período médio é calculado em 7,4 s.

Os dados de rumo de onda em água profunda, obtidos através dos cálculos de refração a partir dos dados do CDTN (1982 a 1985), demonstram a dominância das ondas em água profunda provenientes do octante SE. Embora as ondas pro-



Figura 9. Fotografia da foz do rio Mongaguá, 1972.



Figura 10. Fotografia da foz do rio Mongaguá, 1997.

venientes do octante S, associadas às frentes frias, sejam pouco mais energéticas, o balanço energético total das ondas demonstra nitidamente grande dominância energética das ondas de SE, que são as mais frequentes. As ondas provenientes do octante SE representaram mais de 90% dos rumos de incidência das ondas em água profunda.

Os dados de onda representativos obtidos na Tabela 3 demonstram a grande frequência das ondas incidentes com rumo em torno de 135° NV, sendo que dentro da faixa de 130 a 140° NV encontra-se mais de 70% das ondas calculadas.

Durante o tempo de registro do ondógrafo, observou-se que as ondas provenientes do octante S

apresentaram média de período ligeiramente maior, igual a 8,2 s, enquanto que as provenientes do octante SE, média de 7,3 s. Apenas o ano de 1982 teve comportamento diferente, apresentando período de 8,8 para as ondas provenientes do octante S e 8,2 s para o octante SE. Entretanto, não houve variação neste ano para a frequência de ondas provenientes do octante S em relação ao do octante SE, que permaneceu com mais de 90% dos registros com ondas do octante SE.

Os dados de altura de onda em água profunda, obtidos através dos cálculos de empinamento e refração a partir dos dados do CDTN (1982 a 1985) do período de 1982 a 1984 apresentaram média de 1,19 m. A média dos dados de altura das ondas provenientes do octante S foi de 1,28 m e as provenientes do octante SE de 1,18 m. Computando-se a altura média anual calculada por Bomtempo (1991) para o ano de 1985, a média global dos anos de 1982 a 1985, cai para 1,10 m, visto que este ano apresentou uma média de altura baixa, de apenas 0,82 m.

Rumo do transporte

Efetivamente, o transporte de sedimentos litorâneo longitudinal tem resultante positiva, isto é, rumo SW, como indicaram os resultados das Tabelas 1 e 2. Em mais de 90% dos cálculos do transporte o resultado é positivo, isto é, as ondas arrebentam com rumo de ortogonal proveniente à esquerda da ortogonal da linha de costa das praias de Suarão e Cibratel.

Os rios Mongaguá e Piaçaguera, sendo o primeiro no extremo NE da Praia de Suarão e o segundo no extremo SW da Praia de Cibratel, são de pequena vazão. Localizados em regiões de costa retilínea e aberta, pode-se afirmar que os rumos tomados pelas fozes destes rios são principalmente dependentes do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal existente. Os desvios em suas fozes apontam claramente que o rumo resultante do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal das ondas na arrebentação é SW. Monteiro (1999), em comunicação pessoal a Alfredini, P., revelou que em 85% do tempo a foz do rio Mongaguá permanecia desviada para SW anteriormente à sua fixação, e que maior assoreamento ocorre junto ao atual enrocamento NE. As fotografias aéreas apresentadas dos dois rios retratam condições que evidenciam estes desvios dominantes para SW.

Cazzoli (1997) constatou que a foz do rio Piaçaguera sempre apresentou rumos variando de S a E. Analisando-se estes rumos levantados por Cazzoli (1997), nota-se que o rumo da foz tem direção pertencente ao octante S em mais de 75% do tempo. Assim, estes rumos, que foram avaliados durante mais de um ano climático, são outra evidência da dominância do transporte de sedimentos para SW. Da mesma forma as migrações livres dos rios Ribeira de Iguape, Una do Prelado e Verde também evidenciam o sentido SW do transporte de sedimentos.

O cálculo do método de Pelnard-Considère, que ajustou-se bem à linha de costa atual a partir dos dados de onda em água profunda e do transporte litorâneo calculados, confirmam claramente que o transporte de sedimentos litorâneo longitudinal em longo prazo mantém rumo SW.

O modelo calcula a evolução da linha de costa, considerando o nível do mar invariante. Certamente, a evolução do desalinhamento não ocorreu com esta condição, pois a obstrução natural, o Morro Sapucaitava, aumentou gradativamente devido à elevação do nível do mar na última transgressão marinha. No entanto, pode-se considerar que a variação do nível do mar nesta região foi menor que 0,5 m nos últimos 1800 A.P., tempo que foi considerado para os cálculos.

O modelo conduz a uma situação de equilíbrio, este que no final deve ser o mesmo para o modelo e a natureza. A explicação detalhada do método, das hipóteses e condições utilizadas para sua aplicação neste caso encontram-se em Araújo (2000).

A Figura 11 apresenta a geometria da linha de costa que, progressivamente, desenvolveu-se a partir da suposta costa retilínea inicial em 1800 A.P. que passou a ser interrompida pelo Morro Sapucaitava, secundado pelo efeito de “molhe hidráulico” do rio Itanhaém.

Embora todos estes indicadores apontem que o transporte de sedimento litorâneo longitudinal tem rumo SW, diversos trabalhos, incluindo Ponçano (1976), Giannini (1987), IPT (1994), Souza (1997) e Cazzoli (1997) apontam que a deriva longitudinal tem rumo resultante para NE.

O presente estudo, fundamentado em dados de onda registrados por longo tempo, evidencia inequivocamente que o rumo do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal na zona de arrebentação das Praias de Suarão e Cibratel tem rumo SW. Possivelmente os autores citados anteriormen-

te, que afirmam rumo oposto, não obtiveram dados suficientemente longos, precisos e simultâneos para efetuar suas conclusões ou então, o que é mais provável, estejam referindo-se aos movimentos sedimentares oriundos da ação da água costeira, que podem ser evidenciados por medições de correntes ao largo da zona de arrebentação, que teria rumo dominante para NE.

Magnitude do transporte

O valor da vazão do transporte litorâneo longitudinal foi calculado pelas fórmulas mais apropriadas disponíveis no momento. Houve grande preocupação em fornecer dados de entrada os mais próximos dos reais possíveis para estas fórmulas, daí todo o trabalho realizado com os dados de onda. O valor da vazão do transporte litorâneo longitudinal resultante pode ser calculado pelas fórmulas adotadas entre 350.000 e 550.000 m³/ano para os compartimentos de Suarão e Cibratel, com respectivo transporte global entre 400.000 e 600.000 m³/ano.

Esta dispersão de estimativas é comum em estudos de transporte de sedimentos litorâneos, como atestam as referências de Schoonees e Theron.

Dados de onda representativos

Os dados de onda representativos em água profunda calculados a partir dos dados de onda do CDTN (1982 a 1985) certamente podem ser utilizados para uma longa faixa do litoral sul paulista. Considera-se que tais dados tenham validade dentro de uma extensão que tem como limites a Ponta de Itaipu e a Barra do Ararapira (extremidade S da Ilha do Cardoso), isto é, aproximadamente uma distância de 100 km a NE e a SW do ponto de registro dos dados, a Praia do Una.

Tal consideração pode ser feita baseando-se no fato de que a agitação marítima em água profunda existente nesta região delimitada do litoral sul paulista tem em comum os mesmos formadores, que são o Anticiclone Polar e o Anticiclone Tropical do Atlântico Sul, que atuam de forma semelhante na região como um todo e também da não existência de ilhas ou obstáculos às ondulações.

Balanço sedimentar

Apesar da grande escassez de estudos e medições de parâmetros na região que compreende

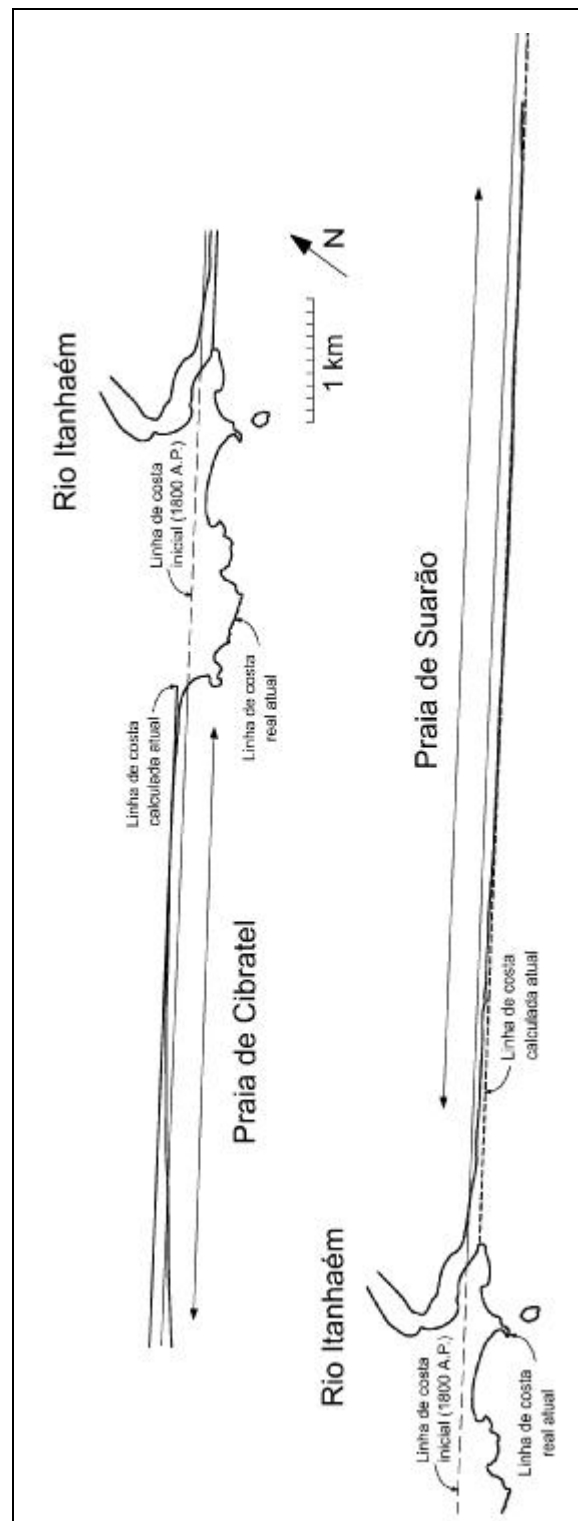


Figura 11. Comparação da linha de costa real atual com a calculada para a data atual através do método de Pelnard-Considère.

este trabalho, e a dificuldade própria inerente ao entendimento do balanço sedimentar, propõe-se a esquematização fundamentada em hipóteses de um balanço que pretende justificar os resultados obtidos (Figura 12).

Os ventos atuantes nesta região como um todo não têm grande intensidade e as dunas que porventura existiam entre a Ponta de Itaipu e o rio Peruíbe não existem mais pois, ou foram removidas ou impermeabilizadas. Entre o rio Una do Prelado e a Praia da Juréia estas formações são desprezáveis. Assim, o balanço proposto não considera qualquer tipo de transporte de sedimentos eólico para esta região.

Na zona de arrebenção de todas estas praias certamente o transporte resultante tem rumo SW. O presente estudo calcula uma vazão de transporte de sedimentos litorâneo longitudinal para os compartimentos Suarão e Cibratel de 350.000 a 550.000 m³/ano rumo SW. Bomtempo (1991) quantificou a vazão do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal das praias do Una e do Rio Verde entre 400.000 e 600.000 m³/ano. Assim, excetuando-se algumas pequenas praias de características particulares, como a praia dos Pescadores, do Sonho e do Guaraú por exemplo, as demais praias de toda esta região entre o rio Ribeira de Iguape e a Ponta de Itaipu devem apresentar transporte de sedimentos litorâneo longitudinal resultante rumo SW.

O aporte de sedimentos fluvial nesta região de maior relevância certamente é causado pelos rios Ribeira de Iguape, Itanhaém e Una do Prelado e em menor relevância pelos rios Guaraú e Peruíbe.

O rio Itanhaém funcionaria como um molhe hidráulico, expulsando parte das areias provenientes do transporte litorâneo longitudinal para zonas de maiores profundidades além de, em situações de grandes vazões, contribuir com uma parcela de areias. O rio Ribeira de Iguape, da mesma forma, contribuiria fornecendo grande quantidade de areia quando das suas cheias de forte intensidade. Mesmo assim, em situações de cheias, a granulometria do sedimento fornecido por tais rios provavelmente não deve exceder a um $D_{50} = 0,15$ mm, sendo que em condições normais de escoamento a granulometria do sedimento é muito fina, conforme a granulometria encontrada ao largo da arrebenção por Cazzoli (1997).

A partir dos dados de corrente de Bomtempo (1991), constata-se uma dominância das correntes existentes logo após a zona de arrebenção ao largo no sentido SW. De fato, as correntes

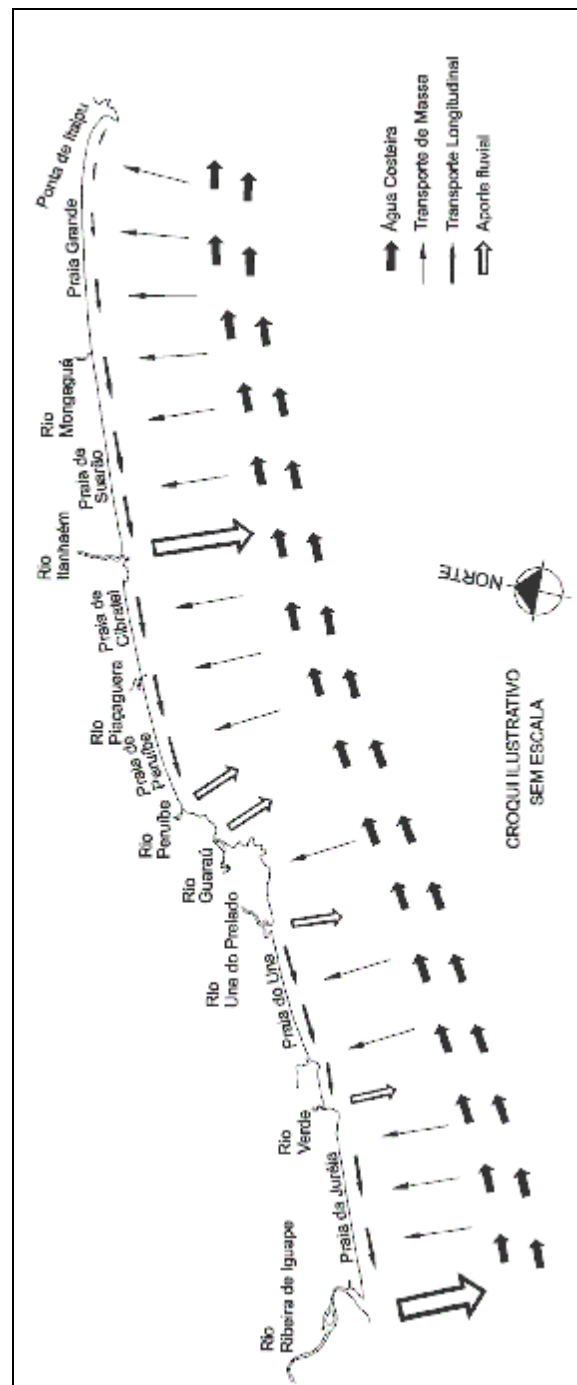


Figura 12. Balanço sedimentar proposto.

induzidas pelas ondas estendem-se na direção rumo ao largo por certa distância além do início das arrebenções. Bomtempo (1991) apresenta resultados de campanha com traçadores radiativos na Praia do Una, concluindo que a zona de influência

da arrebentação atinge profundidades de até 7 m. Analogamente, pode-se concluir que tal ocorra semelhantemente nas praias de Suarão e Cibratel, uma vez que estas praias possuem alinhamento da costa de rumo semelhante à Praia do Una. Assim, até esta profundidade conclui-se que o transporte dominante é de sentido SW.

Partindo para profundidades maiores tem-se a influência da corrente da água costeira, que segundo Mahiques et al. (1999) tem rumo NE. Tal corrente, combinada com a velocidade de transporte de massa das ondas, pode ter capacidade de mobilizar e transportar o sedimento mais fino. Esta corrente atuaria em uma faixa de largura extensa e sua resultante de transporte seria rumo NE. Em uma região como a que foi delimitada para a proposta de balanço, tal transporte ao largo pode ter grande significância, pois ocorre neste caso em uma plataforma interna rasa e em uma faixa grande de largura.

Entretanto, a corrente da água costeira, que tem rumo resultante para NE, não tem capacidade de transportar sedimentos da mesma granulometria que os encontrados na zona de arrebentação restringindo-se a sedimentos de granulometria fina e muito fina.

Outro aspecto de relevância é a diferença energética das ondas provenientes do octante SE e do octante S, estas últimas mais energéticas. Estas ondas mais energéticas e a velocidade de transporte de massa originada por elas, têm a capacidade de transportar sedimentos de granulometria maior, que em situações de ondas proveniente do octante SE, mais frequentes, pouco se mobilizariam.

Tendo em vista que a Ponta de Itaipu não possibilita o transpasse de sedimentos de NE para SW e, sabendo-se que o transporte de sedimentos na arrebentação tem rumo SW, é de se esperar que haveria erosão na Praia Grande junto à Ponta de Itaipu, o que não ocorre. Entretanto, os dados de ondas, devidamente calculados e aferidos neste estudo, indicam inequivocamente o transporte de sedimentos litorâneo resultante sentido SW. Ainda que outros estudos apontem sentido oposto para o transporte de sedimentos, isto seria nada além do que inverter o problema do balanço sedimentar que ainda continuaria a existir, pois não há dúvidas que estas praias encontram-se estabilizadas.

No caso específico das praias junto à Ponta de Itaipu, a mudança de alinhamento da linha de costa em sua proximidade realmente indica a deposição de sedimentos que é gerada por uma vazão de transporte de sedimentos litorâneo longitudinal resultante NE nesta pequena área, simplesmente porque a ponta barra a entrada de parte das ondas do octante SE. Após este trecho espera-se um crescimento gradual da vazão de transporte de sedimentos litorâneo longitudinal no sentido SW. Assim, a partir de então seria em princípio esperada

erosão nas praias seguintes por falta de fonte de sedimentos, o que não ocorre naturalmente.

Assim, a hipótese principal deste balanço sedimentar é que haveria uma grande interação de material sedimentar no sentido perpendicular à costa, principalmente fino. Parte deste material estaria em constante recirculação, parte seria perdida e outra adicionada através dos rios.

Novamente, ressalta-se que este balanço proposto é fundamentado em hipóteses, sendo que somente os dados de ondas e transporte de sedimentos litorâneos longitudinal calculados são comprovados por este trabalho. Embora justifiquem o transporte calculado dentro do balanço sedimentar, estas hipóteses são aqui expostas com a intenção de fomentar futuras pesquisas e estudos que possam comprovar realmente qual o verdadeiro balanço sedimentar existente.

CONCLUSÕES

Claramente demonstra-se que o rumo do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal na zona de arrebentação das praias de Suarão e Cibratel tem sentido SW. A magnitude calculada através da metodologia apresentada para o cálculo do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal resultante pode ser avaliada de 350.000 a 550.000 m³/ano. Esta magnitude é bem considerável, pois esta ordem de grandeza de transporte gera respostas rápidas da linha de costa às obras de engenharia.

Os dados de onda calculados em água profunda evidenciam a pequena frequência de ondas provenientes do octante S, que são pouco mais energéticas, em relação às do octante SE, que permaneceram com mais de 90% dos registros.

Os dados de onda representativos apresentados, calculados a partir da metodologia proposta de divisão do rumo em pequenos setores representa muito bem todo o espectro de direções e certamente terá grande utilidade para o estudo do clima de onda em todo o litoral sul paulista por sua aplicabilidade.

Através dos dados do CDTN não se evidencia a atuação significativa do ENSO de 1982-83 no clima ondulatório desta região.

Com esta contribuição torna-se possível afirmar a ação das correntes longitudinais presentes na zona de arrebenção e propor a das correntes da água costeira ao largo da arrebenção, conforme a proposta de balanço sedimentar apresentada, isto é: dominância do transporte de sedimentos litorâneo longitudinal de NE para SW e dominância de deriva litorânea de SW para NE produzida pela corrente da água costeira.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com recursos de uma Bolsa de Mestrado da CAPES e do Convênio DAEE-USP.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, R. N. (2000). *“O cálculo do transporte de sedimentos litorâneo: estudo de caso das praias de Suarão e Cibratel, Município de Itanhaém, São Paulo”* Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- BOMTEMPO, V. L. (1991). *“Características hidráulicas e sedimentológicas de trecho do litoral Sul do Estado de São Paulo.”* Dissertação (Mestrado), COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro.
- CASTANHO, J. (1966). *“Rebentação das ondas e transporte litoral”*. Memória número 275 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- CAZZOLI, S. V. (1997). *“Dinâmica sedimentar atual das praias de Cibratel e Itanhaém-Suarão, Município de Itanhaém, Estado de São Paulo.”* Dissertação (Mestrado) - Instituto Oceanográfico da USP.
- CDTN - CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR – DIVISÃO DE ENGENHARIA AMBIENTAL (1982 a 1985). *“Relatórios de progresso da campanha de medições oceanográficas na região das Praias do Una e do Rio Verde, no litoral Sul do Estado de São Paulo”*. 11 volumes, Belo Horizonte.
- GEOBRÁS S. A. ENGENHARIA E FUNDAÇÕES (1966). *“Complexo Valo Grande, Mar Pequeno e Rio Ribeira de Iguape.”* Relatório para o Serviço do Vale do Ribeira do DAEE, São Paulo.
- GIANNINI, P. C. F. (1987). *“Sedimentação quaternária na planície costeira de Peruíbe-Itanhaém (SP).”* Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1994). *“Carta geotécnica do Estado de São Paulo”* IPT, São Paulo.
- KAMPHUIS, J. W. (1991). *“Alongshore sediment transport rate”*. J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, v. 117 (6), 624-640.
- MAHIQUES, M. M.; MISHIMA, Y.; RODRIGUES, M. (1999). *“Characteristics of the sedimentary organic matter on the inner and middle continental shelf between Guanabara Bay and São Francisco do Sul, Southern Brazilian margin”*. Continental Shelf Research 19 775-798, Pergamon.
- MASSIE, W. W. (ed.) (1980). *“Coastal Engineering”*. Coastal Engineering Group, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- MONTEIRO, J.; MONTEIRO, I. A. (1999). *“Reminiscências de Mongaguá”* Editora Danúbio, São Vicente.
- PONÇANO, W. L. (1976). *“Características gerais da sedimentação e correntes costeiras entre Santos e Cananéia”*. Notícia Geomorfológica, Campinas 16 (31), 107-111.
- SÃO PAULO, ESTADO (1991 a 1999). DAEE – EPUSP - Centro Tecnológico de Hidráulica *“Estudos do melhoramento da Barra do Rio Itanhaém”*. Relatórios. São Paulo.
- SÃO PAULO, ESTADO (2000). DAEE – EPUSP - Centro Tecnológico de Hidráulica *“Aprimoramento de software para cálculo de refração e arrebenção de ondas de oscilação monocromáticas visando aplicações em Engenharia Costeira”*. São Paulo.
- SCHOONEES, J. S.; THERON, A. K. (1994). *“Accuracy and applicability of the SPM longshore transport formula”*. 24 Intern, Conf. On Coastal – Eng. ASCE, Kobe Japan, v. 3, 2595-2609.
- SCHOONEES, J. S.; THERON, A. K. (1996). *“Improvement of the most accurate longshore transport formula”* 25 Intern, Conf. On Coastal – Eng. ASCE, v. 4, 3652-3665.
- SOUZA, C. R. G. (1997). *“As células de deriva litorânea e a erosão nas praias do Estado de São Paulo”* Tese (Doutorado), Instituto de Geociências da USP.

Calculation of Littoral Sediment Transport: Case Study of the Beaches of Suarão and Cibratel (Municipality of Itanhaém, São Paulo)

ABSTRACT

Longshore sediment transport rate is one of the most important features needed to evaluate the technical, economical and environmental feasibility of Coastal Engineering projects.

This study calculated the longshore sediment transport rate for the Suarão and Cibratel beaches, which belong to the Municipal district of Itanhaém-SP-Brazil. The most accurate and reliable longshore sediment transport formulas currently available were used.

Transport rates were obtained from wave data calculated taking into account shoaling and refraction of waves measured in a field survey at Una beach in the period from 1982 to 1985.

It is clearly concluded that the net longshore sediment transport rate in the surf zone of Sonho and Cibratel beaches is in a southwesterly direction and its calculated rate is between 350.000 and 550.000 m³/year.

The representative wave data show a great energetic and frequency dominance of the waves that come from the southeast sector.

Key-words: sediment transport; coastal engineering; longshore sediment transport.