

## Resultados Preliminares da Medição do Transporte Litorâneo de Sedimentos Não Coesivos em Bacia de Ondas com Fundo Móvel

Jose Antonio Scotti Fontoura

PPGRHS/Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS  
Rua Marechal Deodoro, 305 – CEP 96211-480 – Rio Grande – RS - [toura@dmc.furg.br](mailto:toura@dmc.furg.br)

Luiz Emilio de Sá Brito Almeida, Regina Figueiredo Pinto da Cunha

Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS – Porto Alegre – RS, Caixa Postal 15029  
CEP 91501-970 – Porto Alegre – RS - [luis.almeida@ufrgs.br](mailto:luis.almeida@ufrgs.br)

Recebido: 07/10/02 – revisado: 18/03/03 – aceito: 19/09/03

---

### RESUMO

*Este trabalho apresenta as atividades da bacia de ondas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e realiza uma avaliação preliminar das suas condições operacionais visando utilizá-la como modelo costeiro reduzido. São descritos os aspectos construtivos, com apresentação de planta esquemática e especificação dos principais componentes. A metodologia adotada durante os experimentos, a forma de aquisição e registro dos dados, bem como o roteiro completo dos ensaios, são apresentados em detalhe.*

*Os dados adquiridos são utilizados para ajustar duas equações que descrevem o comportamento da bacia e são capazes de representar de forma contínua as relações entre as principais variáveis de interesse: velocidade da corrente longitudinal e intensidade do transporte litorâneo. A velocidade da corrente longitudinal é descrita pela equação de Longuet-Higgins (1970) modificada pelo CERC (1973). A intensidade do transporte litorâneo é descrita pela equação do CERC (1973). Ambas as equações são ajustadas para as características da bacia de ondas, morfometria e características do sedimento através de coeficientes de proporcionalidade encontrados por análise de regressão simples. Os resultados obtidos destas equações são comparados com os resultados de oito modelos empíricos disponíveis na literatura. As fortes coincidências encontradas sugerem a consistência dos dados gerados.*

*As comparações são efetuadas tanto com os resultados individuais de cada modelo como com a média dos valores gerados por estas equações, sendo que os melhores ajustes ocorreram por conta da última situação.*

**Palavras-chave:** Bacia de Ondas, Transporte Longitudinal, Deriva Litorânea.

---

### INTRODUÇÃO

O uso de bacias de ondas e modelos costeiros reduzidos, construídos com a finalidade de representar e simular em laboratório, sob condições controladas, os fenômenos que ocorrem na natureza, tem sido relativamente comum e já ocorre há muito tempo.

A bacia de ondas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) foi construída no início dos anos sessenta para modelar o comportamento da embocadura do rio Tramandaí e a região costeira do seu entorno, objetivando substanciar o projeto e a obra de construção dos molhes para manutenção da profundidade do canal de entrada. Segundo Motta (1964): "na fase inicial de sua regulação, a bacia, foi utilizada como modelo costeiro esquemático; com escala horizontal de 1/300 e vertical de 1/50; e o material de fundo era areia com granulometria média de 0,19 mm. A distorção, estabelecida em canal de

ondas, revelou-se correta, pois as declividades no estirâncio e ao largo da arrebentação, geradas pelas ondas-modelo, permaneceram imutáveis, enquanto que as características das ondas, reduzidas a escalas froudianas, bem representavam as características das ondas registradas em Tramandaí durante todo um ano". Entretanto, na década de setenta, o modelo foi desativado e desmontado. Para maiores informações sobre a sua utilização como modelo costeiro reduzido sugerimos Motta (1964).

Posteriormente a bacia de ondas foi remontada com objetivo de apoio à pesquisa, e muito embora o esforço em manter as suas características iniciais, neste trabalho, ela não será reconhecida como modelo costeiro reduzido, pois não representa nenhum protótipo costeiro específico.

O objetivo deste trabalho é verificar as condições de uso da bacia de ondas, a validade dos fenômenos nela simulados e a possibilidade de sua reutilização como modelo costeiro esquemático. Visa confirmar também, a

confiabilidade da metodologia escolhida para coleta dos dados durante os experimentos. Uma discussão ampla sobre as escalas de redução e o seu reflexo na descrição das forças de escoamento estará no foco de artigo futuro (em construção) encaminhando a dedução de uma equação para o transporte costeiro que relacione a energia de onda com a morfometria da praia e as características do sedimento.

Os dados medidos foram utilizados para ajustar equações capazes de representar de forma contínua as relações entre as variáveis envolvidas no processo. Os resultados destes modelos foram comparados sucessivamente com oito modelos empíricos disponíveis na literatura, para validação das características das ondas geradas, velocidade da corrente longitudinal, intensidade do transporte litorâneo e variabilidade do perfil praiial.

A discussão detalhada dos resultados encontrados e as conclusões deles extraídas configuram o encerramento do presente do trabalho.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Bacia de ondas

A bacia de ondas é formada, em planta, por um retângulo de 21,5 m x 12,5 m, com escala horizontal original 1/300, e altura da lâmina d'água de 30 cm junto aos geradores, que na escala vertical original de 1/50 corresponde a batimétrica de -15 m. Durante os ensaios o nível da água é mantido na cota zero. O gerador de ondas é do tipo batedor com eixo único e foi construído pelo IPH a partir de projeto cedido pelo Laboratório de Hidráulica Experimental do Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis.

Do ponto de vista mecânico, o gerador de ondas é constituído por 10 pás construídas em chapas de aço-carbono medindo 2,0 m x 0,5 m, acionadas por um conjunto moto-reductor de 10 HP associado a um variador hidráulico de velocidade tipo 'Varimot'. Com o objetivo de facilitar as medições e observações foi construída uma passarela móvel, que permite acesso seguro a todos os pontos da bacia.

As pás possuem apenas o movimento de rotação em torno do eixo horizontal, situado no fundo. Varia-se o período da onda alterando a velocidade de rotação do eixo comum. Varia-se a altura da onda modificando a excentricidade das bielas que ligam as pás aos excêntricos montados sobre eixo único. As fases das bielas podem ser ajustadas à vontade do pesquisador. Aos leitores interessados em maiores detalhes sugerimos Cunha (1994).

O arranjo original da bacia tinha como objetivo gerar ondas de SE (sudeste) quando as pás do gerador estivessem alinhadas e em fase, garantindo a geração de ondas desta direção para qualquer frequência desejada.

Segundo Motta (1964), é desta direção que provêm ondas mais longas, de maior energia e com maior frequência de ocorrência, responsáveis pela predominância do transporte litorâneo de SW (sudoeste) para NE (nordeste), na região do protótipo (Praia de Tramandaí). Detalhes da bacia de ondas podem ser vistos na Figura 1. Os ensaios foram realizados aproveitando-se esta característica original, de tal forma que as ortogonais às cristas das ondas, na profundidade de geração, mantiveram ângulos fixos de 6° com a normal a linha de praia, durante todo o experimento.

O fundo da bacia é composto por duas partes independentes, uma com 20 m de comprimento, situada no lado de barlar, contendo fundo móvel constituído por areia fina e descrito por sete diferentes perfis praiiais distantes 1 metro entre si, medidos ao fim de cada ensaio. A outra parte, localizada no limite de sotamar da primeira, possui um fundo fixo destinado a recolher o material transportado pela deriva litorânea, possibilitando a sua cubagem.

Sobre o trecho de fundo móvel, construiu-se uma grade de barbante com malha quadrada de 1 m de lado para facilitar a medição da velocidade da corrente longitudinal e a posição da linha de arrebenção.

### Descrição dos ensaios e medição dos parâmetros de processo

A seguir apresenta-se o roteiro adotado para realização dos ensaios na bacia de ondas. O experimento foi realizado de forma que todos os ensaios seguissem o mesmo procedimento padrão.

#### 1ª. Etapa: preparação

(i) Nivelar o fundo móvel, de acordo com os sete perfis pré-estabelecidos e com o auxílio de moldes de madeira; (ii) construir e instalar a grade de barbantes; (iii) inundar a bacia de ondas até o nível de cota zero; (iv) ajustar os excêntricos dos batedores (altura da onda) e variador de velocidade (período da onda); (v) colocar o gerador de ondas em funcionamento por 1 hora (gerar rugosidades no fundo) e tornar turbulenta a camada limite oscilatória das ondas geradas (Motta, 1964); (vi) esvaziar a bacia de ondas; (vii) remover, do fundo fixo, os sedimentos transportados.

#### 2ª. Etapa: ensaio

(viii) Colocar o gerador de ondas em funcionamento por um período entre 1,5 e 2 horas (conforme a intensidade do movimento ondulatório); (ix) introduzir manualmente quantidades adicionais de areia no limite de barlar de modo a manter a coincidência entre

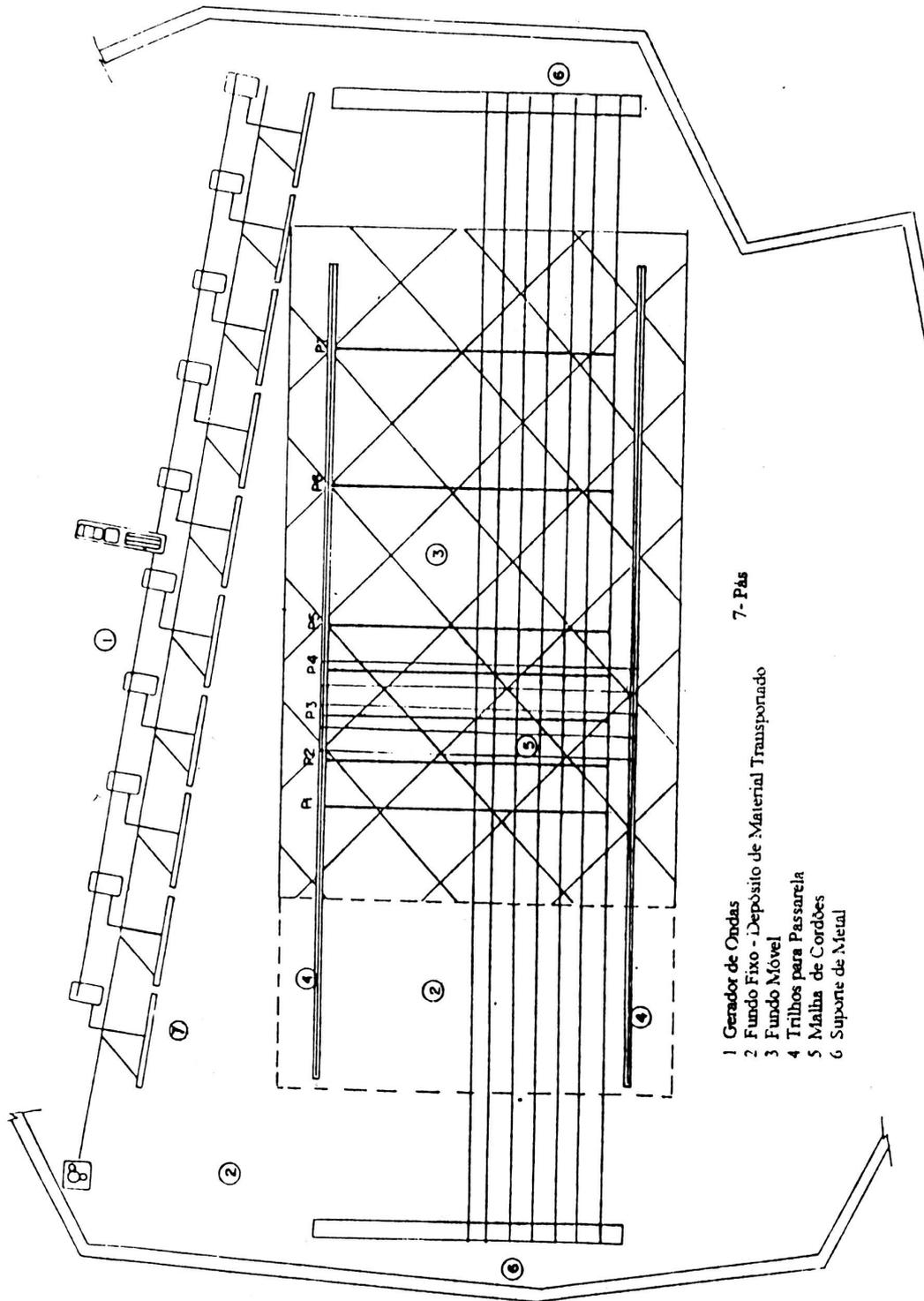


Figura 1 - Vista em planta da bacia de ondas.

as secções limites dos fundos móvel e fixo no limite de sotamar do fundo móvel, bem como o alinhamento retilíneo da praia nas proximidades daquele limite; (x) medir a temperatura da água, utilizando termômetro de mercúrio, a temperatura manteve-se constante durante todos os ensaios em 20°C; (xi) medir o período da onda com o auxílio de um cronômetro; (xii) observar a arrebentação e determinar o tipo de quebra da onda segundo a classificação típica: deslizante e mergulhante; (xiii) medir a altura da onda na zona de arrebentação (Hb) com o auxílio de uma régua plástica, fazendo leitura na crista e na cava; (xiv) medir a profundidade na zona de arrebentação (db), utilizando uma régua plástica, entre o fundo móvel e o nível médio da água; (xv) medir a altura da onda na zona de geração (H), utilizando um ondógrafo com registro gráfico, a profundidade (d) nesta zona foi fixada em 30 cm; (xvi) medir a velocidade da corrente litorânea (V) dentro da zona de arrebentação, com auxílio de traçador e malha de barbante.

### 3ª. Etapa: encerramento

(xvii) Esvaziar a bacia de ondas, recolher e cubar o sedimento transportado pela corrente litorânea acumulado na zona de fundo fixo, utilizando uma caixa de 5600 cm<sup>3</sup>; (xviii) aguardar a secagem da bacia de ondas; (xix) levantar o perfil da praia, em cada um dos sete perfis pré-estabelecidos, utilizando levantamento topográfico; (xx) medir a declividade da praia com auxílio de levantamento topográfico, o valor da declividade manteve-se constante ao longo de todos os ensaios.

A intensidade do transporte litorâneo (Qs) é determinada a partir do peso seco de amostra retirada do sedimento cubado. O valor de 'Qs' é o quociente do volume de sedimento recolhido pelo tempo de duração do ensaio. O diâmetro mediano (D50) do grão de sedimento do fundo móvel foi determinado por análise granulométrica segundo o método de Folk & Ward (1957).

Cada ensaio foi repetido pelo menos três vezes para confirmar os dados coletados.

### Equações da bacia de ondas

O objetivo deste trabalho é comparar os resultados obtidos de um conjunto de equações empíricas tradicionais da literatura (Tabela 1) com os valores medidos na bacia de ondas (Tabela 4). A fim de realizar comparações extrapolando os valores medidos, optou-se pela utilização dos dados para construção e ajuste de duas equações empíricas, que descrevam de forma genérica o comportamento da bacia de ondas, ao invés de, utilizar os valores medidos para comparação direta.

Estas equações, têm como embasamento físico a teoria da tensão radiante (Longuet-Higgins, 1972), que se

vale da quantidade de movimento lateral gerada dentro da zona de surfe pela arrebentação oblíqua das ondas, para explicar e quantificar os fluxos e o transporte sedimentar nesta região.

A velocidade da corrente longitudinal é expressa pela equação de Longuet-Higgins (1970) modificada pelo CERC (1973).

A intensidade do transporte litorâneo é expressa, em função do fluxo de energia da onda ao longo da praia, pela equação do CERC (1973).

Nos dois casos utilizou-se o recurso estatístico da análise de regressão simples para determinar e acrescentar às equações os parâmetros empíricos que representam características específicas da bacia de ondas, da morfometria e das características do sedimento.

A independência estatística entre as variáveis legítima o uso da análise de regressão no ajuste dos coeficientes de proporcionalidade tendo como base os dados medidos.

### Velocidade da corrente longitudinal

$$V = a.\Phi^n, \quad (1)$$

onde

$$\Phi = m.\sqrt{g.H_b} .sen2\alpha_b, \quad (2)$$

Nas equações acima, 'V' é a velocidade da corrente longitudinal em cm/s, 'a' e 'n' são os coeficientes de proporcionalidade, 'Φ' equação de Longuet-Higgins (1970) modificada pelo CERC (1973), 'm' declividade do fundo, 'g' constante gravitacional, 'αb' ângulo de incidência da onda na arrebentação e 'Hb' altura da onda na arrebentação.

Para realizar comparações dos resultados obtidos na bacia de ondas e da Equação (6) ajustada por eles, com as equações empíricas disponíveis na literatura, foram selecionados oito modelos relacionados na Tabela 1.

### Intensidade do transporte litorâneo

$$Qs = k.E^n \quad (3)$$

onde

$$E = \frac{1}{16} .\rho.g.Hb^2 .\frac{Lb}{T} .sen2ab, \quad (4)$$

A Equação (4) representa o fluxo de energia da onda ao longo da praia expressa pela equação do CERC (1973), apresentada na Tabela 1. Nas Equações (3) e (4), 'Qs' é a intensidade de transporte litorâneo em cm<sup>3</sup>/s, 'k' e 'n' são os coeficientes de proporcionalidade, 'E' é o fluxo de energia da onda, 'ρ' massa específica da água, 'g' constante gravitacional, 'Hb' altura da onda na linha de quebra, 'Lb' comprimento da onda na zona de arrebentação, 'T' período da onda e 'αb' o ângulo de

incidência da onda na linha de quebra. A relação 'Lb/T' corresponde à celeridade da onda no ponto de quebra.

Com o objetivo de realizar comparações dos resultados obtidos na bacia de ondas e da Equação (7) ajustada por eles, com as equações empíricas disponíveis na literatura, foram selecionados os oito modelos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações empíricas da velocidade da corrente longitudinal, disponíveis na literatura, escolhidas para comparação com dados obtidos na bacia de ondas.

Item	Autor	Equação
1	CERC (1973)	$V = 20,7.m.(g.H_b)^{1/2} \text{sen}2\alpha_b \quad (8)$
2	Komar (1975)	$V = 2,7.Um.\text{sen}\alpha_b.\text{cos}\alpha_b$ $Um = 0,4416(g.H_b)^{1/2} \quad (9)$
3	Komar & Inman (1970)	$V = 2,7.Um.\text{sen}\alpha_b$ $Um = 0,4416(g.H_b)^{1/2} \quad (10)$
4	Galvin & Eagleson (1965)	$V = K.g.m.T.\text{sen}2\alpha_b \quad (11)$
5	Harrison (1968)	$V = -0,1705 + 0,0374\alpha_b + 0,0318T + 0,2412H_b + 0,0309\beta \quad (12)$
6	Per Bruun (1963)	$V = Cf \left[ \frac{H_b^{3/2}.m.\text{sen}2\alpha_b}{T.g^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (13)$
7	Putnam et ali. (1949)	$V = \frac{a}{2} \left[ \left( 1 + \frac{4.c_b.\text{sen}\alpha_b}{a} \right)^{1/2} - 1 \right]$ $a = 2,61.m.H_b.\text{cos} \frac{\alpha_b}{K.T} \quad (14)$ $c_b = (2,28.H_b)^{1/2}$
8	Inman & Quinn (1952)	$V = \left[ \left( \frac{1}{4.\varepsilon^2} + c_b.\text{sen}\alpha_b \right)^{1/2} - \frac{1}{2.\varepsilon} \right]^2$ $\varepsilon = 108 \left( \frac{H_b}{T} \right) m.\text{cos}\alpha_b \quad (15)$ $c_b = (2,28.H_b)^{1/2}$

V=velocidade da corrente; m=declividade do fundo; g=constante gravitacional; Hb=altura da onda no ponto de quebra; αb=ângulo de incidência da onda no ponto de quebra;K=constante; T= período da onda; β=arc tg m; Cf=coeficiente de fricção.

**Tabela 2 – Equações empíricas da intensidade do transporte longitudinal, disponíveis na literatura, escolhidas para comparação com dados obtidos na bacia de ondas.**

Item	Autor	Equação
1	CERC (1973)	$Q_s = 5734.E(m^3 / ano)$ (16)
2	Watts (1953)	$Q_s = 8510.E^{0.9}(m^3 / ano)$ (17)
3	Komar (1969)	$Q_s = 5600.E(m^3 / ano)$ (18)
4	Caldwell (1956)	$Q_s = 8265.E^{0.8}(m^3 / ano)$ (19)
5	Savage (1962)	$Q_s = 3142.E(m^3 / ano)$ (20)
6	Inman & Bagnold (1963)	$Q_s = 3016.E(m^3 / ano)$ (21)
7	Kamphuis (1986)	$Q_s = 1,28 \frac{m_b \cdot H_b^{7/2}}{D_{50}} \cdot \text{sen} 2\alpha_b (Kg / s)$ (22)
8	Kamphuis (1991)	$\frac{Q_s \cdot T}{\rho \cdot H_b^3} = 1,3 \cdot 10^{-3} \left(\frac{H_b}{L_0}\right)^{-1,25} m_b^{0,75} \left(\frac{H_b}{D_{50}}\right)^{0,25} \text{sen}^{0,6} 2\alpha_b (Kg / s)$ (23)

$Q_s$ =intensidade do transporte;  $E$ = Eq. do fluxo de energia da onda ao longo da praia (4);  $\rho$ =massa específica da água;  $g$ =constante gravitacional;  $H_b$ =altura da onda no ponto de quebra;  $C_b$ =celeridade da onda no ponto de quebra;  $\alpha_b$ =ângulo de incidência da onda no ponto de quebra;  $m_b$ =declividade da praia na zona de surfe;  $D_{50}$ =diâmetro mediano do grão;  $T$ =período da onda;  $L_0$ =comprimento da onda em águas profundas.

**Tabela 3 - Tipo de arrebentação identificada para cada ensaio utilizando-se o método de Guza & Inman (1975).**

( $\xi$  = “Surf scalling factor”)

Ensaio	$\xi$	Tipo	Ensaio	$\xi$	Tipo	Ensaio	$\xi$	Tipo
1	0,45	Deslizante	6	0,48	Deslizante	11	1,78	Mergulhante
2	0,46	Deslizante	7	1,03	Mergulhante	12	2,41	Mergulhante
3	1,03	Mergulhante	8	1,48	Mergulhante	13	1,11	Mergulhante
4	0,93	Mergulhante	9	2,44	Mergulhante	14	1,26	Mergulhante
5	1,40	Mergulhante	10	0,89	Mergulhante	15	1,88	Mergulhante

## RESULTADOS

### Bacia de ondas

A partir de 15 ensaios realizados e com o auxílio do método de Guza & Inman (1975) determinou-se os tipos de arrebentação das ondas apresentados na Tabela 2. Este método relaciona a energia dissipada ou refletida pelas ondas com a morfometria da praia, estabelecendo o tipo de arrebentação dominante através do parâmetro ‘ $\xi$ ’ (surf scalling factor), definido pela equação:

$$\xi = \frac{a \cdot 2 \cdot \pi}{g \cdot T \cdot m^2}, \quad (5)$$

onde ‘ $a$ ’ é a amplitude da onda e ‘ $m$ ’ a declividade da praia, ‘ $g$ ’ e ‘ $T$ ’ são a aceleração gravitacional e período da onda respectivamente.

As características das ondas, a velocidade longitudinal e a intensidade do transporte litorâneo são apresentadas na Tabela 3. Finalmente, os perfis praias (num total de 105 perfis) levantados em cada ensaio sobre cada um dos sete perfis físicos denotados em planta e verificados pela metodologia de Kraus & Larson (1988) e Larson & Kraus (1989), apresentaram características de perfil de acreção.

### Equações da bacia de ondas

#### Velocidade da corrente longitudinal

Ajustados os parâmetros da Equação (1) para os valores medidos na bacia de ondas e com o auxílio de regressão linear, obteve-se, para um coeficiente de determinação de 91,26%, a seguinte equação:

$$V = 0,57\Phi^{1,039}, \quad (6)$$

Tabela 4 - Parâmetros de processo medidos durante os ensaios.

Ensaio	A	B	T	Hb	db	H	Resultados Obtidos						
							V	W	Lb	D50	m	$\alpha b$	Qs
			(s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm/s)	(cm/s)	(cm)	(mm)			(cm <sup>3</sup> /s)
1	3	5,80	1,24	2	3	0,78	2,34	2	66	0,177	0,0588	1,50	0,30
2	3	6,30	1,13	1,70	3,15	1,01	2,95	2	62	0,177	0,0588	1,67	0,28
3	3	7	1	3	3,30	1,44	3,32	2	55	0,177	0,0588	1,90	0,63
4	3	7,70	0,86	2	2,70	1,91	4,09	2	43	0,177	0,0588	2,16	0,34
5	3	8,50	0,70	2	3,30	2,55	4,09	2	38	0,177	0,0588	2,59	0,37
6	5	6,30	1,13	1,80	3,40	1,80	3,85	2	64	0,177	0,0588	2,03	0,41
7	5	7	1	3	3,75	2,55	5,65	2	59	0,177	0,0588	2,32	0,92
8	5	7,70	0,86	3,20	3,65	3,42	6,80	2	50	0,177	0,0588	2,65	0,76
9	5	8,50	0,70	3,50	5	4,44	8,15	2	45	0,177	0,0588	3,16	2,21
10	7	5,80	1,24	4	5,50	2,30	4,67	2	89	0,177	0,0588	2,20	1,64
11	7,10	7	1	5,20	6,90	3,36	6,39	2	78	0,177	0,0588	2,55	2,49
12	7	7,70	0,86	5,20	8,40	4,43	7,71	2	72	0,177	0,0588	2,90	3,49
13	9	5,80	1,24	5	5,50	3,12	6,75	2	89	0,177	0,0588	2,44	1,71
14	9	6,30	1,13	4,70	6,65	4,43	8,45	2	87	0,177	0,0588	2,77	3,11
15	9	7	1	5,50	7	5,12	9,62	2	79	0,177	0,0588	2,96	5,09

A = posição do excêntrico; B = posição do variador de velocidade; T = período da onda; Hb=altura da onda na arrebentação; db= profundidade no ponto de arrebentação; H = altura da onda no ponto de geração; V =velocidade da corrente litorânea; W =velocidade de queda do sedimento; Lb=comprimento da onda na arrebentação; D50 =diâmetro mediano do grão; m =declividade da praia;  $\alpha b$ =ângulo de incidência da onda na arrebentação; Qs= intensidade do transporte litorâneo.

Tabela 5 - Valores das velocidades longitudinais medidas (Vm), valores determinados pela Equação (6), e valores obtidos pelo emprego de diferentes equações encontradas na literatura [(8)-(15)]. Valores em cm/s.

Ensaio	Vm	Resultados Obtidos								
		Eq.(6)	Eq.(8)	Eq.(9)	Eq.(10)	Eq.(11)	Eq.(12)	Eq.(13)	Eq.(14)	Eq.(15)
1	2,34	2,62	2,6	1,4	1,4	3,8	3,47	2,15	1,69	0,01
2	2,95	2,64	3,1	1,41	1,41	3,79	3,59	2,09	1,69	0,01
3	3,32	4,07	3,8	2,14	2014	3,82	4,36	3,63	2,6	0,09
4	4,09	3,76	4,4	1,99	1,99	3,73	4,64	3,08	2,39	0,05
5	4,09	4,54	5,4	2,38	2,38	3,64	5,75	3,74	2,87	0,10
6	3,85	3,35	4,5	1,77	1,77	4,62	4,97	2,41	2,1	0,02
7	5,65	5,01	5,5	2,61	2,61	4,66	5,92	4,01	3,14	0,13
8	6,8	5,94	6,6	3,08	3,09	4,58	6,77	4,86	3,72	0,26
9	8,15	7,48	7,9	3,85	3,85	4,45	8,25	6,29	4,66	0,64
10	4,67	5,57	5,5	2,87	2,87	5,49	6,49	4,36	3,45	0,17
11	6,39	7,36	6,7	3,79	3,79	5,13	7,33	6,36	4,6	0,66
12	7,71	8,42	7,9	4,31	4,32	5,02	8,21	7,32	5,24	1,02
13	6,75	6,9	6,7	3,56	3,56	6,1	7,65	5,43	4,28	0,39
14	8,45	7,62	8,3	3,92	3,92	6,31	8,46	5,79	4,7	0,49
15	9,62	8,84	8,9	4,52	4,53	5,96	8,94	7,15	5,46	0,97

Vm= Velocidade longitudinal medida; Equação (6); Eq. do CERC (1973) (8); Eq. de Komar (1975) (9); Eq. de Komar & Inman (1970) (10); Eq. de Galvin & Eagleson (1965) (11); Eq. de Harrison (1968) (12); Eq. de Per Bruun (1963) (13); Eq. de Putnam et ali. (1949) (14); Eq. de Inman & Quinn (1952) (15).

Os valores da velocidade da corrente longitudinal (V), calculados pela Equação (6) estão na Tabela 4, juntamente com as velocidades medidas. São fornecidos também, os valores da velocidade longitudinal a partir das oito equações apresentadas na Tabela 1.

### Intensidade do transporte litorâneo

Ajustados os parâmetros da Equação (3) para os valores medidos na bacia de ondas e com o auxílio de regressão linear, obteve-se, para um coeficiente de determinação de 95,11 %, a seguinte equação:

$$Q_s = 1,75 \cdot 10^{-5} \cdot E^{0,825}, \quad (7)$$

Os valores da intensidade do transporte litorâneo (Qs) calculados pela Equação (7) e as intensidades de transporte medidas, estão na Tabela 5. São fornecidos também os valores da intensidade de transporte obtidos a partir das equações apresentadas na Tabela 1.

## ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### Bacia de ondas

Inicialmente ajustou-se as equações da bacia de ondas conforme descrito anteriormente. A partir destas equações foram calculados os valores da velocidade longitudinal e do transporte litorâneo utilizando-se os parâmetros característicos das ondas ensaiadas. Os valores medidos foram comparados aos valores calculados determinando-se os desvios existentes.

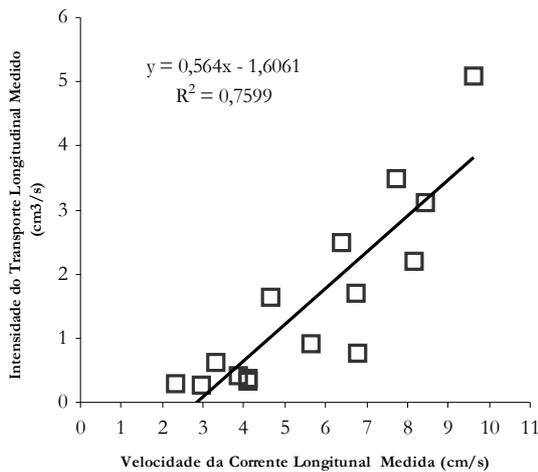


Figura 2 – Relação entre a velocidade da corrente longitudinal e a intensidade do transporte longitudinal, determinados a partir dos dados medidos na bacia de ondas.

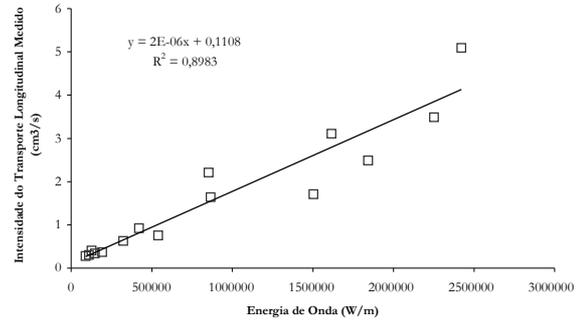


Figura 3 – Relação entre a energia de onda, na direção da sua propagação, e a intensidade do transporte longitudinal medido, determinados a partir dos dados medidos na bacia de ondas.

Posteriormente, valendo-se das equações apresentadas na Tabela 1 calculou-se a velocidade da corrente longitudinal e a intensidade do transporte litorâneo, considerados os mesmos parâmetros das ondas ensaiadas. Estas grandezas foram comparadas aos valores medidos e aos resultados das equações da bacia.

As comparações foram feitas através de teste de hipótese em uma distribuição gaussiana, aplicado às diferenças entre as médias dos valores comparados e considerando-se um intervalo de confiança de 95%.

É importante salientar que, ao serem relacionados os valores medidos da corrente longitudinal e do fluxo de energia da onda na direção da sua propagação com os valores da intensidade do transporte medido, observou-se um comportamento diretamente proporcional entre estas grandezas, conforme pode ser visto na Figuras 2 e 3.

### Equações da bacia de ondas

#### Velocidade da corrente longitudinal

Os resultados das equações (8)-(15) foram comparados com os resultados da Equação (6) e apresentados na Tabela 5. Aplicado o teste de hipótese verificou-se não haver diferença estatística significativa, para um nível de significância de 5%. Foram comparados também os resultados de cada ensaio, para valores medidos (Vm) e valores da Equação (6), conforme Figura 4. Por outro lado, observou-se, que a diferença entre as médias dos valores medidos e da Equação (6) não ultrapassou 0,04 cm/s, ou seja, a média dos valores calculados para a corrente longitudinal diferiu da média dos valores medidos em apenas 0,76 %.

Das oito equações analisadas, somente três, CERC (8), Harrison (12) e Per Bruun (13), respectivamente, apresentaram concordância com a distribuição apresentada pela Equação (6) (Fig. 5) e, ao

mesmo tempo, não foram rejeitadas no teste de hipótese. Para a equação do CERC (8) a diferença média foi de 0,24 cm/s, ao passo que para as equações de Harrison (12) e Per Bruun (13) estas diferenças foram 0,9 cm/s e 1,0 cm/s respectivamente.

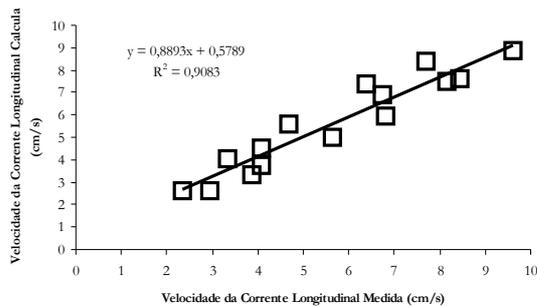


Figura 4 – Relação entre a velocidade da corrente longitudinal medida, determinada na bacia de ondas e a velocidade da corrente longitudinal calculada, obtida a partir da Equação (6).

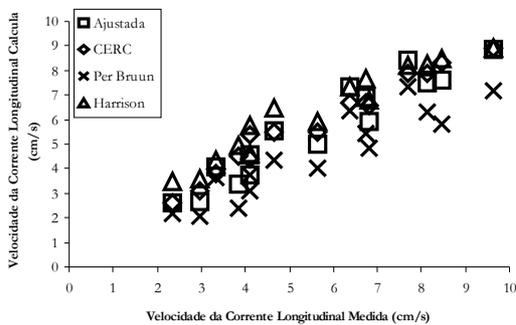


Figura 5 – Relação entre a velocidade da corrente longitudinal medida, obtida na bacia de ondas e a velocidade da corrente longitudinal calculada, determinada a partir das equações: Equação (6), Harrison (12), Per Bruun (13) e CERC (8).

Por outro lado, para as equações de Komar (9), Komar & Inman (10), Putnam et ali. (14) e Inman & Quinn (15) os valores de corrente encontrados apresentaram-se muito baixos, enquanto que o teste de hipótese foi rejeitado nos quatro casos. Em relação às equações de Komar (9) e Komar & Inman (10) a diferença média foi de 2,7 cm/s ao passo que para Putnam et ali. (14) e Inman & Quinn (15) a diferença foi respectivamente de 2,1 cm/s e 5,3 cm/s.

No caso da equação de Galvin & Eagleson (11) o teste de hipótese não foi rejeitado, obtendo-se uma diferença média de 0,87 cm/s, ou seja, uma defasagem da ordem de 15,44% entre os valores comparados, entretanto

as tendências das distribuições apresentaram comportamento diverso, conforme mostrado na Figura 6.

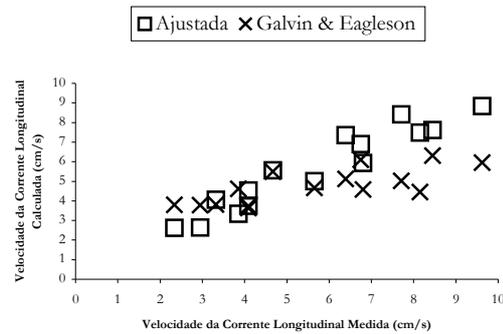


Figura 6 – Relação entre a velocidade da corrente longitudinal medida, obtida na bacia de ondas e a velocidade da corrente longitudinal calculada, encontrada a partir das equações: Equação (6) e Galvin & Eagleson (11)

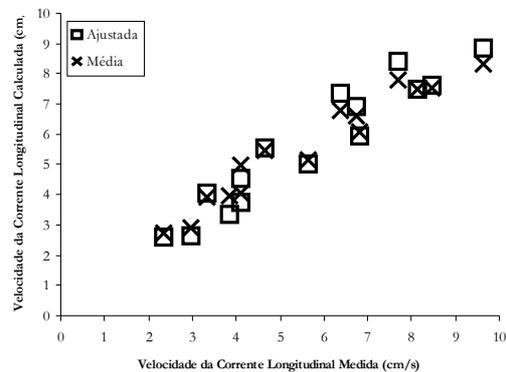


Figura 7 – Relação entre a velocidade da corrente longitudinal medida, obtida na bacia de ondas e a velocidade da corrente longitudinal calculada, encontrada a partir da Equação (6) e da média dos valores das equações de Harrison (12), Per Bruun (13) e CERC (8).

A partir das concordâncias encontradas se obteve uma distribuição média, resultante da interação das três equações melhor ajustadas, e que se aproxima dos valores ensaiados com maior precisão (99,46%) do que qualquer uma das equações tomadas individualmente, como pode ser visto na Figura 7.

### Intensidade do transporte litorâneo

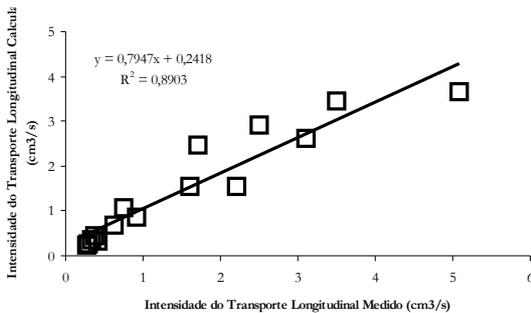
Os resultados das equações (16)-(23) foram comparados com os resultados da Equação (7), e apresentados na Tabela 6. Aplicado o teste de hipóteses a estes valores verificou-se não haver diferença estatística significativa entre eles, para um nível de significância de 5%. Foram comparados também os resultados de cada

**Tabela 6 - Apresenta os valores das intensidades de transporte medidas (Qsm), os valores determinados pela Equação (7), e os valores obtidos pelo emprego de diferentes equações encontradas na literatura [(16)-(23)], Os valores encontram-se em cm<sup>3</sup>/s.**

Ensaio	Qsm	Resultados Obtidos								
		Eq.(7)	Eq.(16)	Eq.(17)	Eq.(18)	Eq.(19)	Eq.(20)	Eq.(21)	Eq.(22)	Eq.(23)
1	0,29	0,28	0,28	0,80	0,27	1,48	0,15	0,14	0,01	0,13
2	0,28	0,24	0,23	0,66	0,22	1,26	0,12	0,12	0,01	0,08
3	0,63	0,69	0,82	2,09	0,80	3,48	0,45	0,43	0,07	0,24
4	0,34	0,36	0,34	1,03	0,36	1,86	0,20	0,19	0,01	0,09
5	0,37	0,45	0,49	1,31	0,47	2,30	0,26	0,25	0,02	0,07
6	0,41	0,32	0,32	0,90	0,31	1,66	0,17	0,17	0,01	0,11
7	0,92	0,86	1,07	2,66	1,04	4,31	0,58	0,56	0,08	0,27
8	0,76	1,06	1,37	3,32	1,34	5,26	0,75	0,72	0,12	0,27
9	2,21	1,54	2,17	5,01	2,12	7,58	1,18	1,14	0,20	0,26
10	1,61	1,56	2,20	5,08	2,15	7,68	1,20	1,16	0,22	0,65
11	2,49	2,92	4,69	10,04	4,58	14,05	2,57	2,46	0,65	0,87
12	3,49	3,44	5,73	12,02	5,60	16,49	3,14	3,01	0,74	0,75
13	1,71	2,47	3,82	8,35	3,73	11,93	2,09	2,01	0,54	1,09
14	3,11	2,62	4,11	8,92	4,02	12,65	2,25	2,16	0,49	0,90
15	5,09	3,66	6,17	12,84	6,02	17,48	3,38	3,24	0,91	1,07

Qsm= Intensidade de transporte medida; Equação (7); Eq. do CERC (1973) (16); Eq. de Watts (1953) (17); Eq. de Komar (1969) (18); Eq. de Caldwell (1956) (19); Eq. de Savage (1962) (20); Eq. de Inman & Bagnold (1963) (21); Eq. de Kamphuis (1986) (22); Eq. de Kamphuis (1991) (23).

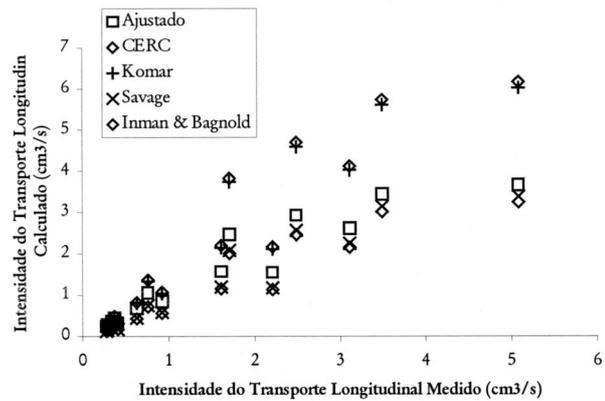
ensaio, para valores medidos (Qsm) e valores obtidos da Equação (7), conforme Figura 8. Por outro lado, observou-se que a diferença entre as médias dos valores medidos e da Equação (7) chegou no máximo a 0,08 cm<sup>3</sup>/s, ou seja, a média dos valores calculados para o transporte longitudinal diferiu da média dos valores medidos em 5,08 %.



**Figura 8 – Relação entre a Intensidade do transporte longitudinal medido, obtida na bacia de ondas e a intensidade do transporte longitudinal calculada, determinada a partir da Equação (7).**

Das oito equações analisadas, quatro, CERC (16), Savage (20), Komar (18) e Inman & Bagnold (21), respectivamente, apresentaram concordância com a

distribuição oriunda da Equação (7) (Fig. 9) e ao mesmo tempo não foram rejeitadas no teste de hipótese.



**Figura 9 – Relação entre a intensidade do transporte longitudinal medido, obtido na bacia de ondas e a intensidade do transporte longitudinal calculado, determinada a partir das equações: Equação (7), Inman & Bagnold (21), Savage (20), Komar (18) e CERC (16).**

Para as equações CERC (16) e Komar (18) a diferença média encontrada foi de 0,7 cm<sup>3</sup>/s, ao passo que para as equações de Savage (20) e Inman & Bagnold (21) esta diferença foi de 0,3 cm<sup>3</sup>/s. Importante salientar, que

no caso das duas primeiras equações (CERC e Komar) observa-se um aumento na defasagem entre as distribuições comparadas, que aumenta com o crescimento da intensidade do transporte. Este deslocamento é claramente percebido principalmente a partir do 12º ensaio. Como o aumento da intensidade do transporte responde a um crescimento da altura das ondas no ponto de quebra (Tabela 4) a superestimação da equação do CERC (1973) parece estar de acordo com as observações feitas por Wang et ali. (1998) e Miller (1999), para observações na natureza.

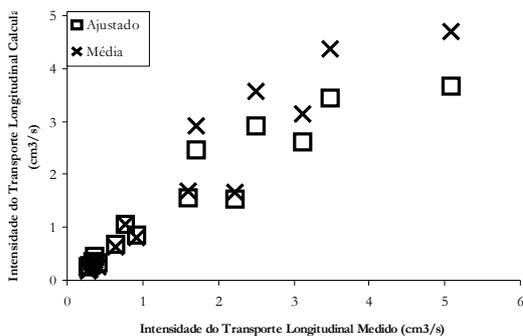


Figura 10 – Relação entre a intensidade do transporte longitudinal medido, obtida na bacia de ondas e a intensidade do transporte longitudinal calculado, determinada a partir da Equação (7) e da média dos valores das equações de Inman & Bagnold (21), Savage (20), Komar (18) e CERC (16).

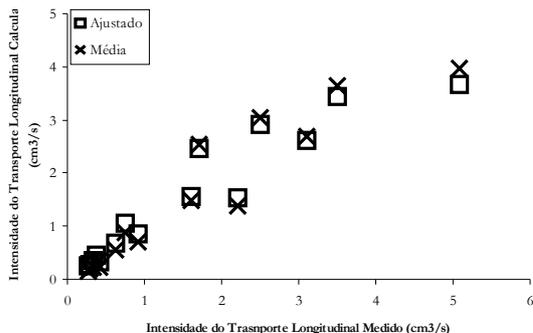


Figura 11 – Relação entre a intensidade do transporte longitudinal medido, obtido na bacia de ondas e a intensidade do transporte longitudinal calculado, determinada a partir da Equação (7) e da média dos valores das equações de Inman & Bagnold (21), Savage (20), Komar (18), CERC (16) e Kamphuis (1991) (23).

Por outro lado, as equações de Watts (17) e Caldwell (19) apresentam defasagem quase constante com relação à Equação (7) magnificando-se a partir do 7º

ensaio, muito embora, as distribuições sejam muito parecidas. Neste caso, o teste de hipótese foi rejeitado com uma diferença média de 4,0 cm³/s. As equações de Kamphuis (1986 e 1991), (22) e (23) respectivamente, subestimaram os valores do transporte em relação à Equação (7) e o teste de hipótese foi rejeitado com uma diferença média de 1,25 cm³/s.

Posteriormente, determinou-se uma distribuição média, resultante da interação das quatro equações mais representativas, e verificou-se que esta média oferece melhor ajuste do que qualquer uma das equações, tomadas individualmente. Além do mais, observou-se que a inserção da equação de Kamphuis (1991) (23) neste grupo de equações, melhorou o ajuste da curva (Figuras 10 e 11), embora esta equação tenha sido rejeitada no teste de hipótese.

## CONCLUSÃO

A análise dos resultados preliminares da medição do transporte litorâneo de sedimentos não coesivos, feitos na bacia de ondas com fundo móvel do IPH da UFRGS, deu origem às conclusões e recomendações abaixo relacionadas:

1. Após sua remontagem com base nos planos originais, a bacia de ondas mostrou estar apta a ser utilizada como uma ferramenta importante e confiável nas operações de modelagem costeira esquemática.
2. A metodologia utilizada para obtenção e medição dos parâmetros de processo durante o experimento demonstrou ser adequada à bacia de ondas gerando dados confiáveis.
3. Conforme demonstrado na análise de consistência, o conjunto de dados gerados pela bacia de ondas durante o experimento, é estatisticamente representativo dos fenômenos simulados, tanto qualitativa quanto quantitativamente.
4. Conclui-se, que neste caso específico, o melhor ajuste foi encontrado pela média entre os valores obtidos de modelos empíricos cientificamente reconhecidos. A média destes valores permitiu ajuste superior ao das equações individuais, tanto para a velocidade da corrente longitudinal como para a intensidade do transporte litorâneo.
5. O presente experimento foi realizado em praia arenosa, de uma única classe de tamanho de grão, portanto recomenda-se que ensaios sejam realizados considerando-se outros tipos de sedimentos.
6. O presente experimento foi realizado considerando-se ângulo fixo de incidência da

onda em águas profundas, sendo recomendados novos ensaios com diferentes ângulos de incidência.

7. Sugere-se também, ensaios utilizando espectros de ondas que promovam variações mais significativas na declividade da praia modelo, além de uma maior diversidade nos períodos de onda utilizados.

## REFERÊNCIAS

- CALDWELL, J. 1956. *Wave action and sand movement near Anaheim Bay*. California, Technical Memorandum, N° 68, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers. In: Sayao, O.F.S.J. & Kamphuis, J.W. 1982. *Littoral sand transport: Review of the state of the art*. Department of Civil Engineering, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, p.66.
- CERC (U.S. Army Coastal Engineering Research Center). 1973. *Shore Protection Manual*, vol. 1, Virginia, USA.
- CUNHA, R.G.F. 1994. *Contribuição ao estudo do transporte de sedimentos na zona costeira*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH, Dissertação de Mestrado, p. 102.
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27 (1): 3-26.
- GALVIN, C.J. & EAGLESON, P.S. 1965. *Experimental study of longshore currents on a plane beach*. Coastal Engineering Research Center, US Army, Corps of Engineers, T.M.-10, p.1-80. In: Lanfredi, N.W. and Framinã, M.B. 1986. *Field study and prediction of longshore currents, argentine coast*. *Journal of Coastal Research*, 2(4), p.412.
- GUZA, R. & INMAN, D. 1975. *Edge waves and beach cusps*. *Journal of Geophysical Research*, 80(21), 2997-3012.
- HARRISON, W. 1968. *Empirical equation for longshore current velocity*. *Journal of Geophysical Research*, 73, 6929-6936. In: Lanfredi, N.W. and Framinã, M.B. 1986. *Field study and prediction of longshore currents, argentine coast*. *Journal of Coastal Research*, 2(4), p.412.
- INMAN, D.L. & QUINN, W.H. 1952. *Currents in the surf zone*. In: Second conference on coastal engineering (ASCE), California, USA, 1, 84-36. In: Lanfredi, N.W. and Framinã, M.B. 1986. *Field study and prediction of longshore currents, argentine coast*. *Journal of Coastal Research*, 2(4), p.412.
- INMAN, D.L. & BAGNOLD, R.A. 1963. *Beach and nearshore processes part II: littoral processes*. In: Contributions to 'The Sea', Vol. 3, General Editor M. N. Hill, John Wiley & Sons, p.259-253.
- KAMPHUIS, J.W., DAVIES, M.H., NAIRN, R.B. & SAYAO, O.J. 1986. *Calculation of littoral sand transport rate*. *Coastal Engineering*, 10:1-26, p.1-21.
- KAMPHUIS, J.W. 1991. *Alongshore sediment transport rate*. *Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering*, 117(6):624-640.
- KOMAR, P.D. 1969. *The longshore transport of sand on beaches*. San Diego. p.141. PhD Thesis, University of California, USA.
- KOMAR, P.D. 1975. *Nearshore currents: generation by obliquely incident waves and longshore variations in breaker height*. In: J. Hails and A. Carr (eds.), *Nearshore sedimentation*. New York: Wiley, p.17-45. In: Lanfredi, N.W. and Framinã, M.B. 1986. *Field study and prediction of longshore currents, argentine coast*. *Journal of Coastal Research*, 2(4), p.412.
- KOMAR, P.D. & INMAN, D.L. 1970. *Longshore sand transport on beaches*. *Journal of Geophysical Research*, 75(33), 6778-6789. In: Lanfredi, N.W. and Framinã, M.B. 1986. *Field study and prediction of longshore currents, argentine coast*. *Journal of Coastal Research*, 2(4), p.412.
- KRAUS, N.C. & LARSON, M. 1988. *Beach profile change measured in the tank of large waves, 1956-1957 and 1962*. Tech, Report-88-6, U.S. Army coastal engineering research center, Vicksburg. In: Dalrymple, R. A. 1992. *Prediction of storm/normal beach profiles*. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 118, n° 2, Mar/Apr, p. 193-200.
- LARSON, M. & KRAUS, N.C. 1989. *SBEACH: Numerical model for simulating storm induced beach change*. Tech, Report-89-9, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Vicksburg. In: Dalrymple, R. A. 1992. *Prediction of storm/normal beach profiles*. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 118, n° 2, Mar/Apr, p.193-200.
- LONGUET-HIGGINS, M.S. 1970. *Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 2*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, N° 33, p. 6790-6801. In: Sayao, O.F.S.J. & Kamphuis, J.W. 1983. *Littoral sand transport: review of the state of the art*. C. E. Report N° 78, Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, p. 66.
- LONGUET-HIGGINS, M.S. 1972. *Recent progress in the study of longshore currents*. Contribution to: 'Waves on beaches and resulting sediment transport'. Edited by R. E. Mayer, Academic Press, New York.
- MOTTA, V.F. 1964. *Resultados de algumas medições de transporte litorâneo em modelo costeiro esquemático*. Folheto interno n° 1257, Biblioteca do IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS, p.35.
- MILLER, H.C. 1999. *Field measurements of longshore sediment transport during storms*. *Costal Engineering*, n° 36, p. 301-321.
- PER BRUNN. 1963. *Longshore currents and longshore troughs*. *Journal of Geophysical Research*, 68, 1065-1078.
- PUTNAM, J.A., MUNK, W.H. & TRAYLOR, M.A. 1949. *The prediction of longshore currents*. *Transaction of the American Geophysical Union*, 30(3), 337-345. In: Lanfredi, N.W. and Framinã, M.B. 1986. *Field study*

- and prediction of longshore currents, argentine coast.* Journal of Coastal Research, 2(4), p.412.
- SAVAGE, R.P. 1962. *Laboratory determination of littoral transport rates.* Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, N° WW2, p. 555-565.
- WANG, P.; KRAUS, N.C. & DAVIS JR., R.A. 1998. *Total longshore sediment transport rate in the surf zone: field measurements and empirical predictions.* Journal of costal research, vol. 14, n° 1, p. 269-282.
- WATTS, G.M. 1953. *A study of sand movement at South Lake Worth Inlet, Florida.* Technical Memorandum, N° 42, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers. In: Sayao, O.F.S.J. & Kamphuis, J.W. 1982. *Littoral sand transport: Review of the state of the art.* Departament of Civil Engineering, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, p.66.

### ***Preliminary Results of Measuring Littoral Transport of Non-Cohesive Sediments in a Wave Basin With a Mobile Bed***

#### ***ABSTRACT***

*In the early sixties the IPH (Instituto de Pesquisas Hidráulicas) at UFRGS(Universidade Federal do Rio Grande do Sul), in Porto Alegre, RS, Brazil, built a wave-basin to model the interaction between the flow of Tramandaí River (in Southern Brazil) and the coastal zone around its mouth. The model was to support the design and construction of a breakwater in Tramandaí River by Petrobrás (the Brazilian Oil Company). However, this model was disassembled during the seventies.*

*Recently, the wave-basin was reconstructed to support new research and a great effort was made to maintain the original characteristics.*

*This study presents the new basin and performs a preliminary evaluation of operational conditions for further basic coastal model use. Building details are described here, with the schematic plan and specification of the main equipment. Other aspects presented are the methodology used during the experiments, data acquisition and recording method and a complete guide to operations.*

*Data acquired were used to adjust two statistical models for both the longshore current and littoral drift. These statistical models were compared with eight empirical models available in the literature, and marked coincidences between theirs values suggest the consistency of acquired data.*

*Comparisons were made using both the individual result of each equation and the mean value of several models.*

*Key-words: Wave Basin, Longshore Transport, Littoral Drift*