

Teoria e Prática da Geração e Propagação de Ondas Monocromáticas em um Canal de Laboratório

Nara Maria Luzzi Rosauero

Instituto de Pesquisas Hidráulicas / UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500.
CEP 91501-970 / Porto Alegre / RS - nara.rosauero@ufrgs.br

Recebido: 04/02/02 – revisado: 25/05/02 – aceito: 30/03/04

Resumo

Apresentam-se aqui estudos realizados num canal de ondas construído com a finalidade de pesquisar fenômenos relacionados à propagação de ondas e seus efeitos em praias e estruturas. Para tanto, fazia-se necessário conhecer em detalhe o comportamento do canal, do gerador de ondas, e das sondas a serem utilizadas em estudos posteriores. Foram estudados aspectos relativos às características das ondas logo após o gerador e ao longo do canal. Com o objetivo de avaliar o desempenho do novo gerador, ondas de diferentes alturas e períodos foram geradas, medidas e comparadas com as características esperadas de acordo com estudos teóricos e práticos realizados por outros autores e encontrados na bibliografia. A “qualidade” da forma da onda, isto é, a sua semelhança com a onda senoidal perfeita, foi analisada por comparação com dados de outros autores e por dois outros métodos aqui introduzidos. São apresentadas algumas conclusões sobre como a qualidade da forma da onda gerada varia em função do período e da altura da onda. A evolução da altura da onda e da qualidade de sua forma à medida que ela se propagava ao longo do canal, onde existia um degrau que dava acesso a uma parte mais rasa, foram analisadas através da comparação com a teoria da onda linear e através de um novo índice chamado de Taxa de Espalhamento, que mede a deformação da onda entre dois pontos ao longo de sua trajetória.

Palavras chave: canal de ondas; gerador de ondas; ondas monocromáticas; índice de espalhamento; taxa de espalhamento; percentual de energia, teoria da onda linear.

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Com o objetivo de estudar o comportamento de ondas monocromáticas propagando-se sobre obstáculos de fundo, construiu-se um gerador de ondas eletro-mecânico, o qual foi instalado num canal já existente. Antes da realização dos testes de propagação de ondas sobre obstáculos (Rosauero, 1999), vários testes iniciais foram realizados já que tanto o canal, como o gerador de ondas e os instrumentos de medição, estavam sendo utilizados pela primeira vez. Os testes iniciais tinham seis objetivos principais:

- a) conhecer os equipamentos de medição de onda e estabelecer sistemáticas eficientes de calibração dos equipamentos e de aquisição dos dados;
- b) consolidar a sistemática de análise dos dados;
- c) conhecer, com a maior precisão possível, a curva de eficiência do gerador, ou seja, a curva representativa da relação existente entre o movimento do gerador e as características da onda gerada para que se pudesse fazer um planejamento dos testes a serem realizados, bem como realizar a comparação entre a curva de eficiência do gerador com algumas curvas semelhantes encontradas na bibliografia;
- d) saber quão “perfeita” era a onda gerada pelo

gerador, tomando como padrão uma onda senoidal pura (monocromática);

e) investigar o modo como a forma da onda era influenciada por um degrau existente no canal, já que os bancos deveriam ser montados em um local afastado do gerador e situado na parte rasa, após o degrau;

f) conhecer os tempos de propagação da onda ao longo do canal para que se pudesse estabelecer o intervalo de tempo a ser usado na análise dos dados, de modo a evitar os efeitos de reflexão da onda.

Neste artigo, descreve-se primeiramente o canal e os instrumentos utilizados e discute-se a sistemática adotada na calibração das sondas e na aquisição e análise dos dados registrados pelas mesmas. Posteriormente discutem-se as comparações feitas entre as características das ondas geradas e os dados apresentados por outros autores. Finalmente, estuda-se a evolução da forma da onda ao longo do canal, mostrando-se que a presença do degrau não compromete a qualidade da onda, que chega à parte rasa ainda com uma forma muito próxima à forma senoidal pura.

CARACTERÍSTICAS DO CANAL DE ONDAS UTILIZADO

Os experimentos foram realizados num canal já existente no Pavilhão Fluvial do IPH o qual havia sido construído para funcionar em condições de escoamento contínuo. Este canal foi adaptado para trabalhar com um volume de água estacionário e um gerador de ondas foi instalado na extremidade do canal. O canal tem ~ 43 m de comprimento e 1 m de largura e se constitui de uma parte mais funda e uma parte mais rasa com um desnível de 47 cm entre elas (Figura 1). O canal é construído de alvenaria e revestido com cimento alisado e impermeabilizado. Todos os testes foram realizados com um volume de água tal que a profundidade na parte mais funda (junto ao gerador) era de 87 cm e na parte mais rasa de 40 cm.

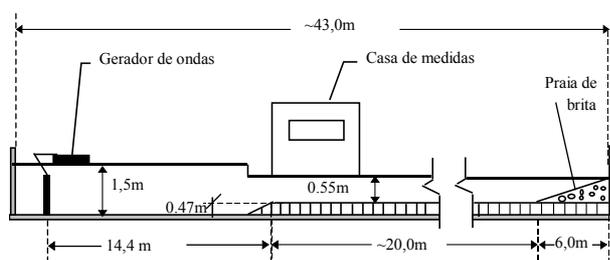


Figura 1 - Esquema do canal de ondas utilizado

O gerador foi instalado a uma distância de 14,4 m a montante da parte mais rasa. Atrás do gerador foi deixada uma área de amortecimento preenchida de material poroso de modo a absorver as ondas geradas na parte posterior do gerador. A parte rasa do canal ficou com um comprimento aproximado de 26 m. No final do canal foi construída uma praia de brita de 6 m de comprimento. Para assegurar que o degrau não interferiria na qualidade da onda que chegava ao banco, algumas análises foram feitas, verificando-se, então, que a presença do fundo falso podia ser incorporada à análise dos dados, de modo que sua presença foi mantida. Outros autores efetuaram testes em situações semelhantes (Mizutani et al., 1998). Neste caso um fundo falso (de 19 cm) foi construído para que nele se instalassem instrumentos de medição de pressão. Neste trabalho não foi reportada nenhuma influência do degrau na forma das ondas utilizadas nos testes.

GERADORES DE ONDAS – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os geradores de onda utilizados atualmente em canais são basicamente de dois tipos: de pistão ou articulados no fundo (Figura 2), sendo que os modelos de pistão

podem apresentar um movimento de giro na vertical (pistão articulado). Ambos os modelos apresentam vantagens e desvantagens. A grande vantagem do gerador de pistão é a sua resposta rápida e precisa a pequenas variações de frequência e por isso estes geradores são muito utilizados para gerar ondas irregulares. A grande vantagem dos geradores articulados no fundo, é que eles são de fácil construção.

O gerador de ondas instalado no canal é do tipo articulado no fundo. Ele é constituído de uma pá plana movimentada por um braço regulável que gira em um eixo acionado por um variador de frequência. A frequência da onda é totalmente comandada pelo variador. A altura da onda é função da regulagem do braço bem como da frequência da onda gerada.

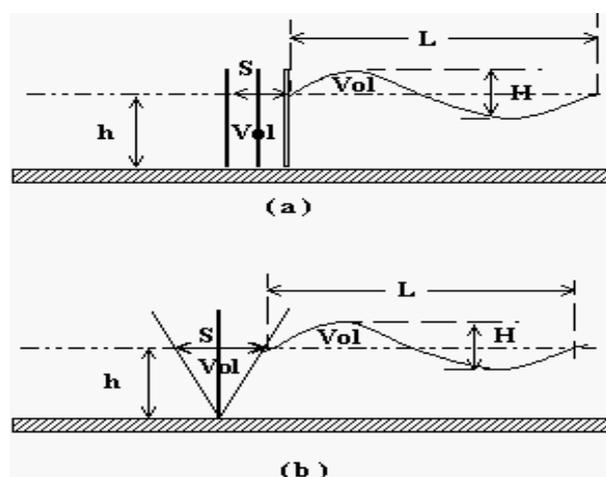


Figura 2 - Geradores de onda de pistão (a) e articulado no fundo (b)

Apesar da simplicidade do aparato de geração de onda, a relação entre o movimento da pá e as características da onda gerada não é imediata. Isto se deve a vários fatores. Em primeiro lugar, a onda pode estar sendo gerada em diferentes regiões e por isso apresentarem diferentes características de distribuição de velocidades na vertical. As regiões de propagação das ondas são delimitadas pelos valores de uma relação entre a profundidade (h) e o comprimento de onda (L), ou pelo número de onda, dado por $k = 2\pi / L$. Usando a relação kh , as águas são consideradas profundas quando $kh \geq \pi$, rasas quando $kh < 0,1\pi$; e intermediárias quando os valores de kh caem entre esses dois extremos.

A primeira consideração que pode ser feita diz respeito à geração de ondas com características de águas profundas, para as quais os geradores são inadequados. Nesta região as ondas têm a característica de não apresentarem velocidade junto ao fundo, o que é incompatível

com o movimento das partículas gerado por qualquer um dos geradores acima mencionados. Em águas rasas, onde a velocidade horizontal das partícula é aproximadamente constante ao longo da vertical, os geradores do tipo pistão fixo são adequados já que toda a pá se desloca com a mesma velocidade ao longo da profundidade. Para ondas geradas em águas intermediárias, os geradores articulados parecem ser os mais adequados já que o movimento das partículas na saída da pá se assemelha ao movimento das ondas nesta região, ou seja, variando quase linearmente com a profundidade.

Em águas rasas ($kh < \pi/10$) uma teoria simples foi apresentada por Galvin (1964) (em Dean e Dalrymple, 1992). Segundo este autor, o volume de água (por unidade de largura do canal) que é deslocado a cada movimento da pá deve ser igual ao volume de água sob a crista da onda gerada. Para um gerador articulado no fundo (Figura 2.b):

$$Sh/2 = \int_0^{L/2} (H/2) \sin(kx) dx = H/k \quad (1)$$

onde S é o deslocamento horizontal da pá, h é o tirante de água, k é o número de onda e H é a altura da onda gerada, donde obtém-se que:

$$H / S = (k h) / 2 \quad (2)$$

Fora da região de águas rasas outra relação deve ser encontrada. Uma teoria completa para ondas geradas por um gerador de ondas de laboratório é apresentada por Dean e Dalrymple (1992). A teoria é desenvolvida resolvendo as equações de Laplace escritas para o potencial de velocidades e introduzindo formas linearizadas das condições de contorno dinâmica e cinemática na superfície livre, condição de contorno impermeável no fundo e duas condições de contorno adicionais. Para valores grandes de x impõe-se uma condição de contorno de radiação (Sommerfeld, 1964). Para $x = 0$ uma condição de contorno cinemática relaciona o valor de x com o movimento horizontal da pá do gerador $S(z)$. Esta equação é então resolvida supondo-se pequenos deslocamentos da pá e pequenas velocidades. A solução da equação de Laplace sujeita a estas condições de contorno é composta de duas partes, uma referente a uma onda progressiva e outra referente a uma onda estacionária que se forma junto ao gerador de ondas. A onda estacionária decai para valores de x afastados da pá. Um estudo do decaimento desta onda estacionária mostra que ela se torna desprezível para distâncias iguais a duas a três vezes o tirante de água. Os coeficientes da solução são obtidos a partir da condição de contorno lateral do gerador de ondas integrada na vertical. A amplitude da onda progressiva é finalmente dada em função do

deslocamento horizontal da pá como:

$$H / S = 4 (\sinh kh / kh) (kh \sinh kh - \cosh kh + 1) / (\sinh kh + 2kh) \quad (3)$$

Esta equação encontra-se plotada na figura 3.

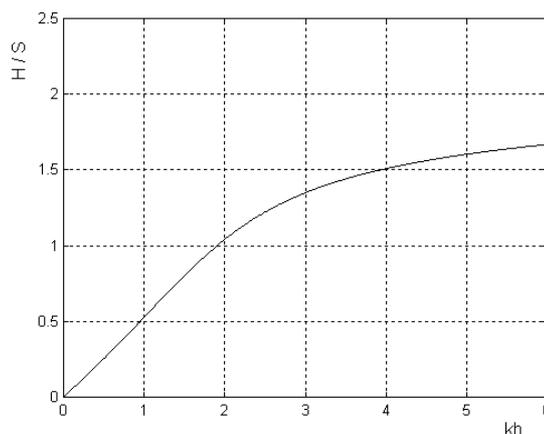


Figura 3 - Curva teórica que relaciona o movimento da pá de um gerador articulado no fundo com as características da onda (Dean e Dalrymple, 1992)

Tanto em águas rasas como em águas mais profundas, kh é fixo para um dado período de onda e uma dada profundidade, e a altura da onda (H) varia linearmente com o deslocamento da pá (S). Conforme citado anteriormente, esta equação foi deduzida fazendo-se a suposição de que o movimento da pá e a altura da onda gerada fossem pequenos. Quando o movimento da pá é grande, no entanto, efeitos não lineares ocorrem e ondas “secundárias” podem ser geradas. Na verdade, as ondas produzidas pelo movimento de uma pá não têm a forma senoidal pura, ideal e constante que deveria ser esperada a partir do movimento regular do gerador. Vários autores apresentam dados que mostram como os “erros” são introduzidos na geração da onda e como estes se propagam ao longo do canal.

MEDIÇÕES DE NÍVEL E ANÁLISE DOS DADOS

Sondas utilizadas

Nos ensaios realizados neste trabalho foram utilizadas 4 sondas, todas do tipo capacitivas. As sondas capacitivas consistem de dois eletrodos de aço inoxidável que, quando imersos na água medem a condutividade do volume instantâneo de água existente entre eles, condutividade esta que varia proporcionalmente com as variações da elevação da superfície de água. Como a condutividade da

água é função da temperatura, estes instrumentos devem ser calibrados antes de cada utilização.

Duas destas sondas tinham sido adquiridas recentemente e estavam sendo usadas pela primeira vez, e por isso serão aqui denominadas de sondas novas. As outras duas sondas vinham sendo utilizadas há vários anos e por isso serão aqui denominadas de sondas antigas. As duas sondas novas têm hastes de 60 cm de comprimento. As duas sondas antigas têm tamanhos diferentes entre si, sendo que uma tem hastes de 60 cm e a outra de 40 cm.

As sondas são ligadas a amplificadores de onda que possuem uma saída analógica (volts). As sondas antigas tinham originalmente a saída do amplificador ligada a um 'plotter' de modo que a variação da superfície livre era registrada em um gráfico. O registro gráfico foi abandonado e a saída do amplificador foi adaptada para entrar diretamente na placa de aquisição de dados. As sondas novas já prevêem a existência de uma placa de aquisição e transformação de dados analógicos em digitais.

Os amplificadores de onda são dotados de mecanismos de ajuste de ganho de modo que se possa fazer a escolha do fator de conversão entre os dados analógicos (volts) e a altura da superfície livre (em cm).

Metodologia de aquisição e calibração

A aquisição do sinal de saída dos amplificadores de todas as sondas era feita numa placa MQI12/8PC de 8 canais instalada num computador. Esta placa tem a função de converter sinais analógicos em digitais.

Foram utilizados dois programas escritos em Pascal: um para leitura direta dos dados de entrada na placa e sua visualização na tela do computador e outro para aquisição dos dados. O primeiro programa foi usado em substituição ao osciloscópio e servia para se efetuar a calibração das sondas. O programa de aquisição era utilizado para aquisição e registro simultâneo dos dados das sondas. Este programa permite que se escolha a frequência de aquisição bem como o número de pontos a serem adquiridos e gravados.

Antes de iniciar os procedimentos de calibração, alguns testes foram feitos com os objetivos de medir o nível de ruído das várias sondas e decidir sobre o ganho a ser utilizado na aquisição dos dados. Os testes de ruído foram feitos com as sondas no canal estacionário e utilizando-se diferentes frequências de aquisição ($f_{aq} = 20, 50$ e 100 Hz).

As sondas antigas apresentaram um nível de ruído maior, provavelmente por se tratarem de equipamentos fabricados há muito tempo e, portanto, sem o nível de sofisticação dos equipamentos atuais.

Plotando-se os espectros dos dados obtidos em condições de nível constante no canal, com diferentes

frequências de aquisição aparece em todos os gráficos um pico relativo à frequência da fonte (60 Hz). Como a frequência de corte ($f_c = f_{aq} / 2$) é menor do que a frequência da fonte, o ruído aparece na frequência f dada pela relação $2n f_c \pm f = 60$, onde n é um número inteiro (Bendat and Piersol, 1971). Assim, para os testes feitos com $f_{aq} = 100$ Hz o espectro apresenta um pico em $f = 40$ Hz ($n = 1$); para os testes feitos com $f_{aq} = 50$ Hz o pico localiza-se em $f = 10$ Hz ($n=1$), e para os testes feitos com $f_{aq} = 25$ Hz o pico localiza-se em $f = 10$ Hz ($n=2$).

Nos espectros das sondas novas não se observaram ruídos em outras frequências, mas nos espectros das sondas antigas eles podiam ser identificados. Estes ruídos apresentam pequenas amplitudes que variam inversamente com o ganho utilizado.

O objetivo final era o de se estudar a geração de harmônicos na passagem de ondas sobre obstáculos submersos. As ondas geradas no canal podiam ter períodos variando entre 1,1s e 4,2 s. Desta forma, ao se calcular o espectro das ondas, ter-se-ia, nos casos em que a onda fosse composta de 10 harmônicos, por exemplo, as frequências destes harmônicos variando entre 0,9Hz e 9,1Hz para o primeiro caso e 0,23Hz e 2,4Hz para o segundo caso. Utilizando-se uma f_{aq} de 100Hz estaríamos trabalhando com a certeza de que o ruído da fonte não interferiria nas frequências da onda estudada e um filtro passa baixas não se faria necessário. Além disso, a frequência de 100Hz garante uma perfeita leitura das oscilações do nível de água mesmo para ondas muito deformadas como as que ocorrem na passagem sobre o banco. Por este motivo, todas as aquisições foram feitas com a frequência de 100Hz.

Várias possibilidades de ganhos foram testadas para os dois tipos de sonda. Como a placa de aquisição de dados admite a entrada de sinais oscilando entre $-10V$ e $+10V$, a escolha do ganho é muito importante para que não se perca parte dos registros nos casos em que haja saturação da placa.

As sondas antigas dispõem de apenas três possibilidades de seleção de ganho, a qual é feita num botão no painel. Para o primeiro ajuste, tem-se uma relação de $10V \cong 5$ cm e a placa ficaria saturada para as ondas maiores ($H > 10$ cm). Os outros dois ajustes poderiam ter sido utilizados já que para o segundo ajuste tem-se $5V \cong 5$ cm e para o terceiro ajuste tem-se $2,5V \cong 5$ cm. No entanto, para o último caso, o nível de ruído é maior, o que nos levou à escolha do segundo ajuste para as sondas antigas.

O ajuste de ganho nas sondas novas é bastante refinado possibilitando uma gama muito grande de ajuste. No entanto, não foi possível a utilização do mesmo ganho utilizado nas sondas antigas, e como o ruído destas sondas é muito pequeno, escolheu-se um ganho de $2,5V \cong 5$ cm nas sondas novas.

Para facilitar o trabalho de calibração, todas as sondas encontravam-se montadas em suportes providos de uma ponta linimétrica. A calibração era feita medindo-se a leitura do sinal de saída da sonda (volts) em três posições conhecidas (em cm): posição zero, posição (+ a) e posição (- a). Como a variação da saída é linear, três pontos são suficientes. Nos testes iniciais, fazia-se a calibração com muitos pontos (até 7 pontos), mas mais tarde verificou-se que esta precisão era desnecessária já que a linearidade dos instrumentos era muito boa.

A calibração das sondas era feita no início de cada série de testes que tinha normalmente a duração de duas horas e eram realizados pela manhã, quando o canal não sofria incidência solar. Se novos testes fossem feitos à tarde, nova calibração era feita, devido a possíveis alterações na temperatura da água, e, conseqüentemente, da condutividade.

Metodologia utilizada na análise dos dados medidos

Os registros de onda feitos no canal, tanto na fase inicial, que é aqui descrita, quanto no estudo da propagação de ondas sobre obstáculos, que era o objetivo final do trabalho, e está descrita em outro artigo a ser publicado, encaixam-se na classificação de ‘Dados Periódicos Complexos’ (Complex Periodic Data) dada por Bendat e Piersol (1971). Segundo estes autores, dados periódicos complexos são aqueles tipos de dados que podem ser expandidos em uma série de Fourier da forma:

$$x(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \cos(2 \pi n f_1 t - \theta_n) \quad (4)$$

onde $X_0 = a_0 / 2$

$$X_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$n=1,2,3,\dots$

$$\theta_n = \tan^{-1}(b_n / a_n)$$

$n=1,2,3,\dots$

$$a_n = (2 / T_p) \int_0^{T_p} x(t) \cos 2 \pi n f_1 t dt$$

$n=1,2,3,\dots$

$$b_n = (2 / T_p) \int_0^{T_p} x(t) \sin 2 \pi n f_1 t dt$$

$n=1,2,3,\dots$

Ou seja, dados periódicos complexos consistem de uma componente estática X_0 e um número infinito de componentes senoidais chamadas harmônicos que têm amplitudes X_n e fases θ_n e as frequências todas múltiplas de f_1 , que é a frequência fundamental. Quando analisando dados periódicos na prática, os ângulos de fase são freqüentemente ignorados. Neste caso, a equação 4 pode ser

caracterizada por um espectro discreto como o apresentado na figura 4.

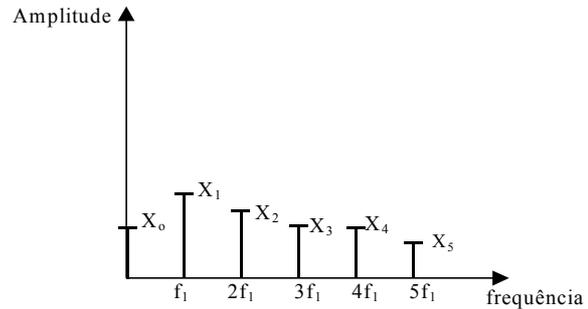


Figura 4 - Espectro de dados periódicos complexos (Bendat e Piersol, 1971)

De acordo com os autores: “Fenômenos físicos que produzem dados periódicos complexos são muito mais comuns do que aqueles que produzem dados senoidais simples. Na verdade, a classificação de dados como sendo senoidais é normalmente apenas uma aproximação para dados que são na realidade complexos. Por exemplo, a saída em voltagem de um alternador elétrico pode na verdade mostrar, sob inspeção cuidadosa, algumas contribuições em frequências harmônicas mais altas. Em outros casos, componentes harmônicas intensas podem estar presente em dados físicos periódicos.”

Os dados de onda registrados no canal e classificados desta forma nos levaram a estabelecer uma sistemática de análise que inclui dois passos. O primeiro consiste na interpolação de uma onda senoidal através de uma sistemática descrita por Bloomfield (1976) e que possibilita estabelecer com precisão o período do harmônico mais importante, sua amplitude (e a fase da onda, que não foi aqui utilizada). Uma vez determinada com precisão a frequência do harmônico mais importante, um espectro é calculado de modo que as frequências de todos os harmônicos múltiplos deste coincidam com valores exatos das ordenadas do espectro, obtendo-se assim um espectro discreto semelhante ao da figura 4. A metodologia mostrou-se extremamente eficiente na avaliação das amplitudes dos harmônicos das ondas registradas nos ensaios.

O método de interpolação da onda senoidal mais importante em um registro é apresentado por Bloomfield (1976) e descrito resumidamente a seguir.

Tomemos um registro que represente a variação de x com o tempo, representada por n valores discretos, o qual apresenta uma certa periodicidade a ser pesquisada. Estes dados podem ser modelados pela soma de uma onda senoidal de amplitude R , período T e fase ϕ e um resíduo ϵ de modo que se tenha:

$$x_t = \mu + R \cos(\omega t + \phi) + \epsilon_t, \quad t=0,1,\dots,n \quad (6)$$

onde x_t representa o $t^{\text{ésimo}}$ valor de dado; μ é uma

constante; ω é a frequência angular da senóide interpolada = $2\pi / T$ e ϵ_t o $t^{\text{ézimo}}$ resíduo.

Dizemos que o modelo é bom se ele se ajusta bem aos dados, ou seja, se o resíduo é pequeno. Desejamos encontrar os valores de μ , R , ω , e ϕ que minimizem a soma do resíduo quadrado S :

$$S(\mu, R, \omega, \phi) = \sum_{t=0}^n \{x_t - \mu - R \cos(\omega t + \phi)\}^2 \quad (7)$$

Sendo o termo em colchetes, o $t^{\text{ézimo}}$ resíduo para valores fixos de μ , R , ω e ϕ . Este método (dos mínimos quadrados) é mais simples quando o modelo é uma função linear dos parâmetros incógnitas, já que a função a ser minimizada é quadrática. A equação 6 é não linear em R e ϕ mas pode ser rescrita como:

$$x_t = \mu + A \cos \omega t + B \sin \omega t + \epsilon_t \quad (8)$$

onde $A = R \cos \phi$ e $B = -R \sin \phi$

Tem-se agora A e B como os parâmetros incógnitas, que uma vez determinados possibilitam o cálculo de R e ϕ , já que:

$$R^2 = A^2 + B^2 \quad (9)$$

e o valor de ϕ é dado por:

$$\phi = \begin{cases} \arctg(-B / A), & A > 0, \\ \arctg(-B / A) - \pi, & A < 0, B > 0, \\ \arctg(-B / A) + \pi, & A < 0, B \leq 0, \\ -\pi / 2, & A = 0, B > 0, \\ \pi / 2, & A = 0, B < 0, \\ \text{arbitrário}, & A = 0, B = 0, \end{cases} \quad (10)$$

A solução exata nos leva ao sistema de equações abaixo:

$$\begin{bmatrix} \sum (\cos \omega t)^2 & \sum \cos \omega t \sin \omega t \\ \sum \cos \omega t \sin \omega t & \sum (\sin \omega t)^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum \cos \omega t x_t \\ \sum \sin \omega t x_t \end{Bmatrix} \quad (11)$$

que uma vez resolvido nos fornece os valores de A e B .

Para ajuste da função senoidal pelo método acima descrito desenvolveu-se uma função genérica para uso no software MATLAB® (Função AJUFE). A estimativa inicial de ω , necessária no processo de ajuste, é obtida dentro da própria função a partir de um espectro inicial calculado com os dados. Já que o espectro inicial e o resíduo são ambos calculados, aproveitou-se para calcular o percentual de energia representado pela senóide interpolada. Assim, a subrotina apresenta a seguinte seqüência de cálculo:

- i) calcula espectro dos dados e energia total
- ii) determina frequência onde ocorre o maior pico do espectro
- iii) a frequência assim determinada é utilizada para cálculo da primeira tentativa de ω
- iv) variando-se os valores de ω obtém-se uma função erro (ω)
- v) localiza-se o valor de ω para o qual o erro é mínimo
- vi) ajusta-se a curva determinando-se os valores de A e B
- vii) calculam-se os valores de R , T e ϕ
- viii) cria-se uma onda senoidal interpolada com altura R , período T e fase ϕ
- ix) diminui-se dos dados originais a onda interpolada encontrando-se a onda residual
- x) calcula-se o espectro do resíduo e a energia correspondente
- xi) calcula-se o percentual de energia correspondente ao harmônico interpolado

Através do uso da função AJUFE encontra-se as características do harmônico mais importante do registro de dados, que normalmente é o primeiro harmônico. Para determinação dos demais harmônicos, dois procedimentos foram usados, dependendo do caso.

Um dos procedimentos consiste em reutilizar a função AJUFE tendo como entrada o resíduo encontrado após a interpolação da primeira onda encontrando-se o segundo harmônico mais importante e assim sucessivamente.

O outro procedimento consiste em calcular o espectro dos dados com um tamanho de bloco tal que as frequências dos diversos harmônicos coincidam com ordenadas exatas do espectro. O objetivo é determinar o espectro discreto, adequado ao tipo de dados analisado.

Uma vez conhecido com precisão o período do primeiro harmônico, determina-se o tamanho do bloco (t_B) a ser usado no cálculo do espectro de modo que os diferentes harmônicos recaiam em abscissas de cálculo do espectro objetivando a obtenção de um espectro discreto.

As abscissas do espectro variarão desde zero até a frequência de corte $f_c = f_{aq} / 2$, ou seja, no nosso caso, desde zero até $f_c = 50$ Hz, já que para todos os experimentos a frequência de aquisição foi de 100Hz. O incremento Δf será dado por $\Delta f = f_{aq} / t_B$. Queremos que o incremento Δf seja um submúltiplo da frequência f_1 ou seja, queremos ter $\Delta f = (f_1 / n)$ onde n é um inteiro. O valor de n foi tomado diferente para cada período de onda, e de forma tal que o tamanho do bloco ficasse sempre em torno de 1000 pontos.

O cálculo do espectro foi feito utilizando-se o software MATLAB[®]. A abscissa do espectro calculado é dada em um vetor $f(nf)$ de tamanho $nf = (f_c / \Delta f)$ e as ordenadas, na primeira coluna de uma matriz $p(nf, 2)$. O espectro foi sempre calculado com um bloco único, e com uma janela de Hanning com o mesmo tamanho do bloco. Uma vez calculado o espectro, analisam-se as ordenadas do resultado através de uma subrotina escrita para o MATLAB[®] que localiza os picos e ordena-os por ordem decrescente de valor. Uma vez encontrados os picos do espectro os valores das alturas de onda correspondentes aos picos são calculados levando-se em conta o tipo e tamanho da janela através da seguinte equação (Krauss et al., 1995):

$$H = 4 \sqrt{p \cdot \text{norm}(\omega) / \text{sum}(\omega)^2} \quad (12)$$

onde norm é a norma do vetor e sum é a soma dos termos do vetor e, neste caso, ω é a função que descreve a janela de Hanning de tamanho t_B .

As ondas quase senoidais geradas no gerador de ondas irão se decompor ao passar pelo banco de forma diversificada dependendo de variáveis como o período e a altura da onda. A visualização dos espectros discretos calculados pelo método descrito acima permite que se faça distinção entre os vários casos, mas não se constitui num método simples e eficiente de classificação. Pensou-se então em criar um índice que pudesse retratar a existência e a distribuição dos diversos harmônicos. Um índice que nos pareceu apropriado e que foi denominado de Índice de Espalhamento é o que se poderia chamar de ‘centro de gravidade’ do espectro discreto, adimensionalizado pela frequência do primeiro harmônico, ou seja:

$$I_e = \left[\sum_{i=1}^n H_i f_i \right] \left[\sum_{i=1}^n H_i \right]^{-1} f_1^{-1} \quad (13)$$

de modo que I_e é igual à unidade para uma onda senoidal pura (um único harmônico) e cresce à medida que o núme-

ro e a magnitude dos harmônicos crescem.

Outro parâmetro que foi utilizado é o que se convencionou chamar de Taxa de Espalhamento e corresponde à relação entre os Índices de Espalhamento calculados em duas posições diferentes. Objetivou-se com isso avaliar o aumento do número de harmônicos entre duas posições na passagem da onda.

GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM CANAIS DE LABORATÓRIO – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Conforme tem sido demonstrado em trabalhos de vários autores, as ondas produzidas artificialmente em canais de laboratório de um modo geral são ondas que apresentam algum tipo de deformação, ou melhor dizendo, que diferem da forma senoidal perfeita. Não apenas elas diferem da forma senoidal perfeita na saída do gerador, mas também diferem da propagação linear perfeita ao longo do canal. Estudos analíticos (Mei, 1989) e experimentais mostram que mesmo a mais perfeita das ondas geradas irá se deformar à medida em que se propaga por longas distâncias em um canal de laboratório. Não apenas os harmônicos de menor período tendem a crescer como também existe uma troca de energia entre harmônicos, de modo que a relação entre as alturas dos diferentes harmônicos tende a variar ao longo do canal.

Hansen e Svendsen (1974) apresentam dados medidos em um canal de laboratório provido de um gerador de pistão. Os experimentos mostram que para $0,10 < h / L < 0,65$ a onda produzida pelo movimento do pistão pode ser descrita como uma onda de Stokes de segunda ordem. Segundo os autores, a deformação da onda na sua origem se deve ao fato de que o movimento das partículas gerado pelo batedor não corresponde exatamente ao movimento que ocorre numa onda progressiva de forma constante.

Já que os movimentos do pistão eram controlados por computador, os autores tentaram alterar o movimento do pistão para que a onda gerada fosse o mais próximo possível da forma senoidal. Além do movimento senoidal puro ($S \sin \omega t$) duas alternativas de correção foram testadas:

- movimento senoidal combinado com uma rotação e uma translação:
($S_b (1 + S_s z / (S_b h)) \sin(\omega t)$), sendo S_b e S_s as amplitudes do movimento do pistão no fundo e na superfície respectivamente
- movimento do pistão composto de dois senos:
($S \sin \omega t + e_{22} \sin (2\omega t + \theta)$), sendo e_{22} a amplitude do segundo harmônico

Quanto à primeira correção, os autores concluíram que o segundo harmônico gerado pode ser reduzido desta forma, mas não a tal ponto que torne os resultados aceitá-

veis, principalmente para ondas em águas profundas.

Quanto à segunda correção, o objetivo foi o de introduzir uma onda igual ao segundo harmônico gerado, mas em antifase com este, de modo a anulá-lo. Com este artifício os autores conseguiram reduzir a amplitude do segundo harmônico para 1 a 2% da amplitude do primeiro harmônico, exceto para as ondas mais longas ($h/L < 0.1$).

Outro trabalho sobre origem e supressão de ondas secundárias em canais de laboratório foi apresentado no mesmo ano por Hulsbergen (1974). Os autores iniciam o artigo dizendo que: “a formação do perfil de praia pode ser severamente afetada por ondas secundárias que, juntamente com a onda principal, sempre se originam a partir de uma pá movendo-se de forma senoidal”. Na verdade, o trabalho em questão surgiu de observações feitas em um trabalho anterior no qual foi verificado que diferentes perfis de praia eram desenvolvidos para condições idênticas do canal e das ondas incidentes. Os perfis em questão eram fortemente influenciados pela formação de barras, que por sua vez estavam fortemente relacionadas com a existência de ondas secundárias. Neste trabalho, a supressão de ondas secundárias geradas junto à pá foi feita através de um método diferente. Conhecendo o fato de que uma barra colocada no caminho de uma onda senoidal gera ondas secundárias, os autores usaram este artifício para suprimir as ondas secundárias geradas junto à pá. O objetivo era encontrar a altura e a posição da barra de modo que ela ocasionasse a formação de uma onda secundária de igual amplitude, mas defasada de 180° . Apesar da utilização de alguns estudos teóricos, a supressão das ondas foi praticamente feita por tentativa e os resultados apresentados pelos autores são bons resultados.

Flick e Guza (1980) apresentam um trabalho onde estendem as teorias apresentadas por Fontanet (1961) e Madsen (1971) para englobar uma variedade de configurações de geradores de onda. Segundo os autores, os geradores de onda que operam em movimentos biharmônicos de frequências σ_1 e σ_2 geram harmônicos livres na diferença de frequências $\Delta\sigma = |\sigma_1 - \sigma_2|$ além da frequência primária e seus harmônicos. Quando o movimento com esta baixa frequência $\Delta\sigma$ satisfaz as condições de ressonância do canal, grandes ondas estacionárias de baixa frequência se formam e influenciam significativamente o comprimento da zona de espraiamento (‘run-up zone’). Os autores concluem que em experimentos envolvendo ondas monocromáticas, as ondas secundárias geradas pela pá contaminam os resultados a menos que elas sejam eliminadas através de uma correção conveniente inserida na geração do movimento da pá ou quando se tratar de estudos em fundos inclinados, pois nestes casos estas tendem a se tornarem pequenas. Em estudos feitos em canais com fundo inclinado onde as ondas primárias são geradas em águas profundas ou intermediárias de modo que o número de

Ursell¹ da onda principal é pequeno, interações não lineares entre as ondas irão gerar harmônicos forçados muito maiores do que os harmônicos secundários livres provenientes da pá.

Os trabalhos acima descritos demonstram as dificuldades encontradas na utilização de ondas geradas em canais de laboratório, principalmente se o gerador for um dispositivo eletro-mecânico simples. Além dos problemas de deformação da onda na sua geração e propagação em canais longos, tem-se ainda o problema da reflexão das ondas no fim do canal. Vários estudos têm sido feitos sobre dispositivos de absorção a serem colocados no final do canal para minimizar o fenômeno da reflexão das ondas geradas. De um modo geral, no entanto, o procedimento mais comum é o de utilizar os dados medidos antes da onda refletida chegar ao instrumento de medição. Outros autores, como Beji and Battjes (1993) utilizam todos os dados anteriores ao instante em que a onda refletida chega de volta no gerador.

CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS GERADAS NO CANAL DE ENSAIO

O gerador de ondas utilizado no canal é do tipo articulado no fundo e constituído de uma pá com as características mostradas na figura 5. A pá tem uma altura de 1,0m e é conectada ao braço de movimentação por uma haste vertical. O variador e o motor de acionamento encontram-se apoiados na parede lateral do canal que, nesta parte inicial, apresenta uma altura de 1,5m (Figura 6). O eixo do disco onde se fixa o braço de movimentação da pá está situado a uma altura de 1,75m do fundo e admite deslocamentos (S_0) de até 40 cm. Para um tirante de água de 0,87m a redução no valor de S_0 é de 50%, ou seja, para deslocamentos S_0 de 40 cm, os deslocamentos na linha d'água (S) serão de 20 cm.

A pá utilizada apresenta alguns problemas construtivos principalmente no que diz respeito a pequenas frestas existentes no fundo e nas laterais. Por exemplo, a pá não se encontra engastada no fundo do canal, mas sim num pequeno degrau construído sobre o fundo, deixando uma altura de aproximadamente 11 cm sem movimentação de água. Esta zona não participa na formação da onda e pode explicar parte das diferenças encontradas entre os

¹ O número de Ursell (U_r) é definido como uma relação entre $\mu = H/h$ e $\sigma^2 = (b/L)^2$, onde muitas vezes o comprimento da onda (L) é substituído pelo número de onda k e a altura da onda pela sua amplitude a . Várias formas do número de Ursell podem ser encontrados na bibliografia.

Segundo Mei, (1989): $U_r = \frac{a}{k^2 h^3}$

valores medidos e as curvas de eficiência encontradas na bibliografia. O volume real, ou seja, o volume que efetivamente contribui para a geração da onda é dado por (Figura 5):

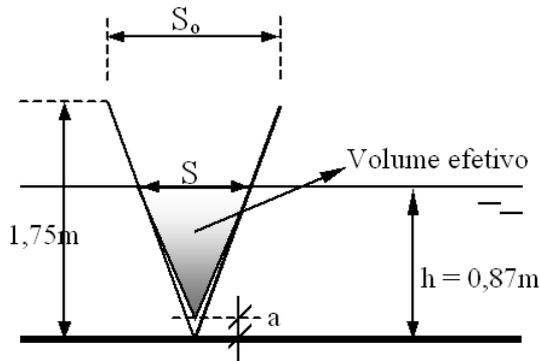


Figura 5 - Esquema da pá instalada no canal de ondas, com volume teórico e efetivo (equações 14 e 15)

$$V_{\text{efetivo}} = S(h-a) / 2 \quad (14)$$

ou, em relação ao volume 'teórico':

$$\frac{V_{\text{efetivo}}}{V_{\text{teorico}}} = \frac{S(h-a)}{2} \frac{2}{Sh} = 1 - (a/h) = 0,874 \quad (15)$$

Como $V = Sh/2 = \int_0^{L/2} (H/2) \text{sen}kx dx = H/k$ para águas rasas, tem-se que H efetivo será menor do que o teórico, ou $H_{\text{real}} = 0,874 H_{\text{teórico}}$. Assim, para comparar os valores medidos com os valores dados na curva teórica, estes devem ser divididos por 0,874, ou multiplicados por 1,144 (acréscimo de 14,4 %).

A curva de eficiência do gerador foi obtida fazendo-se uma série de testes para diferentes posições do variador e do braço e adquirindo os dados de onda numa posição fixa distante de 6,5 m da pá. Na foto da figura 7 mostra-se a sonda junto à pá que mede onda gerada, a qual fica evidenciada pelo reflexo da luz na superfície livre.

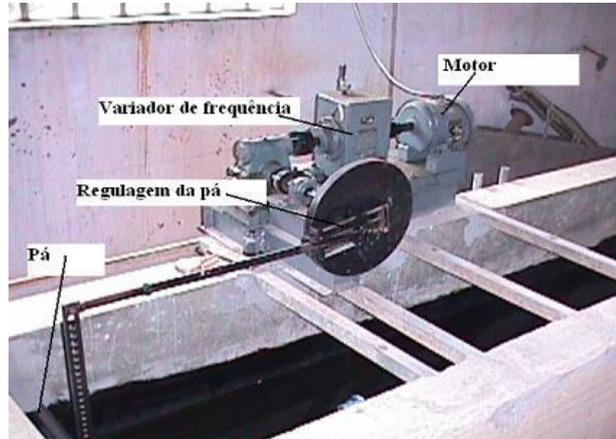


Figura 6- Foto do gerador utilizado no canal

O intervalo de valores de frequência utilizado foi menor do que o disponível para o variador, já que para períodos maiores do que aproximadamente 4,3 s, as ondas geradas são muito longas para serem utilizadas no canal. Assim, o intervalo de valores de período utilizada, tanto na determinação da curva de eficiência como nos demais testes utilizados na pesquisa, foi de $1,1 \text{ s} < T < 4,3 \text{ s}$. Como a altura da onda é função tanto do ajuste do variador como do ajuste do braço, para as ondas mais longas não foram utilizadas todas as possibilidades de ajuste do braço, já que a partir de um certo valor de deslocamento do braço as ondas geradas eram extremamente pequenas.

A tabela 1 mostra os valores mínimos e máximos de ajuste do braço para cada posição do variador e as características das ondas geradas nos ensaios efetuados para determinação da curva de eficiência do gerador. A determinação das características da onda (H e T) foi feita através do método de interpolação de Bloomfield (1976) descrito anteriormente, sendo o percentual de energia representado pela onda senoidal interpolada calculado durante este processo.



Figura 7 - Foto da sonda junto à pá e da onda sendo medida

Tabela 1- Resumo dos ensaios efetuados para determinação da curva de eficiência do gerador

Regulagem do variador	Valores mínimos e máximos de S	Características da onda gerada					
		T (s)	H (cm)	L (m)	h / L	H / h	Nº Ursell
(a)	18	4,3	2,5	12,2	0,071	0,029	0,071
(b)	06	3,4	1,0	9,42	0,092	0,011	0,017
	20	3,4	3,0	9,42	0,092	0,034	0,051
(c)	04	2,9	0,8	7,88	0,110	0,009	0,010
	20	2,9	4,6	7,88	0,110	0,053	0,055
(d)	04	2,4	0,3	6,30	0,138	0,003	0,002
	20	2,4	5,0	6,30	0,138	0,057	0,038
(e)	05	1,9	1,8	4,65	0,187	0,021	0,007
	20	1,9	7,6	4,65	0,187	0,087	0,031
(f)	04	1,5	2,2	3,27	0,266	0,025	0,005
	20	1,5	12,3	3,27	0,266	0,141	0,023
(g)	04	1,1	3,3	1,88	0,463	0,038	0,002
	18	1,1	16,2	1,88	0,463	0,186	0,011

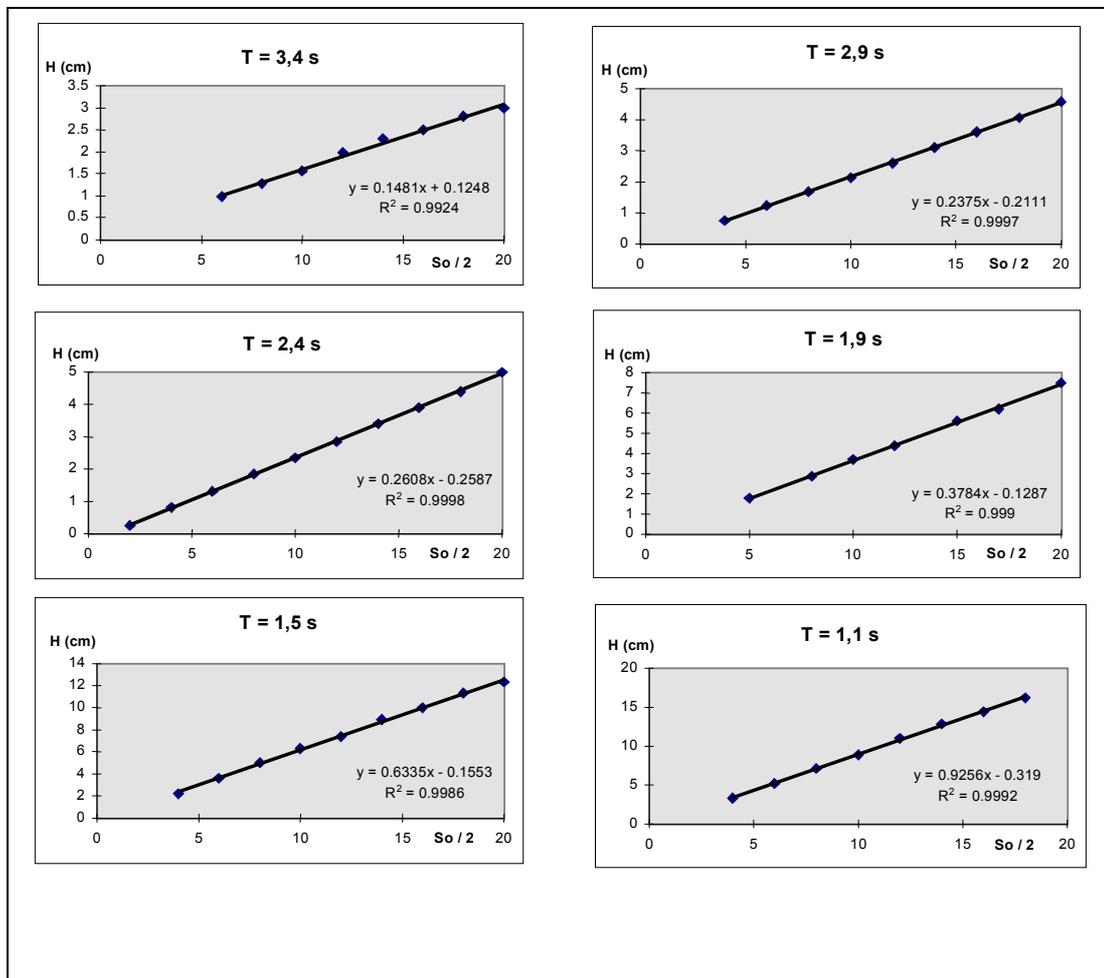


Figura 8 - Altura da onda gerada, para diferentes períodos e deslocamentos ($S_o / 2$) da pá

Para um período fixo, a variação entre S_o e H é perfeitamente linear, como previsto. Na figura 8 encontram-se as retas interpoladas nos pontos experimentais para diferentes valores do período de onda.

As ondas geradas nos testes de calibração do gerador de ondas foram plotadas, para comparação, em três gráficos encontrados na bibliografia. O primeiro deles é o gráfico da figura 9 obtido a partir da equação 3. A diferença entre a curva e os valores experimentais é grande, principalmente para valores maiores de kh , ou seja, para ondas de maiores períodos. Mesmo corrigindo os valores com o percentual de 14,4% justificado pela diferença entre a profundidade do fluido e a profundidade efetiva, as diferenças são grandes.

Os dados experimentais foram também comparados com o gráfico obtido por Gilbert et al. (1970) e apresentado por Vergara Sanchez (1995). Para um batedor articulado o gráfico é apresentado na figura 10. Neste gráfico, ao invés do comprimento de onda usa-se o período da onda (T) na abcissa, o qual é adimensionalizado com a gravidade (g) e a profundidade (h).

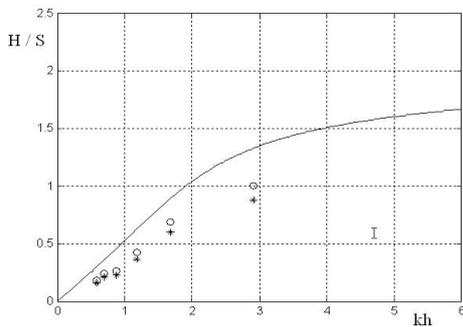


Figura 9 - Curva teórica (—) do batedor articulado (Dean e Dalrymple, 1992) e valores experimentais médios. Dados originais (*) e corrigidos (o) de 14.4 %

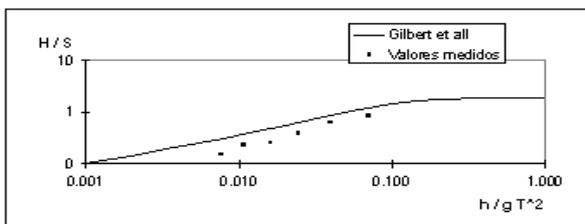


Figura 10 - Curva de Gilbert, Thompson e Brewer, 1970 (em Vergara Sanchez, 1995) e valores medidos na saída do gerador de ondas

Novamente, as diferenças entre os valores previstos e os valores medidos são relativamente grandes, o que mostra que a eficiência do gerador de ondas utilizado é bastante pobre. Como isto não alterava os resultados da pesquisa, nenhuma tentativa de melhorar a eficiência do gerador foi feita. No entanto, acredita-se que algumas providências

simples poderiam ser tomadas futuramente no sentido de melhorar o desempenho do gerador de ondas:

- engastar a pá diretamente na laje de fundo do canal de modo a eliminar a diferença de 11 cm hoje existente entre a altura efetiva da pá e o tirante de água
- minimizar as perdas pelas frestas laterais, já que, principalmente nas ondas longas, a fuga de água por estas frestas pode modificar significativamente o volume de água que efetivamente participa na formação da onda.

Para facilitar o trabalho de planejamento de experimentos, as curvas de eficiência do gerador utilizado foram plotadas em termos de valores absolutos (não adimensionalizados) do período e da altura de onda gerada para cada regulagem do braço ($S_o / 2$). Estas curvas encontram-se na figura 11. O gerador apresenta uma severa restrição no que diz respeito ao valor máximo de altura de onda quando o período é grande. Para o maior período utilizado nos testes ($T=4.3s$), a maior altura de onda gerada é de 2,8 cm.

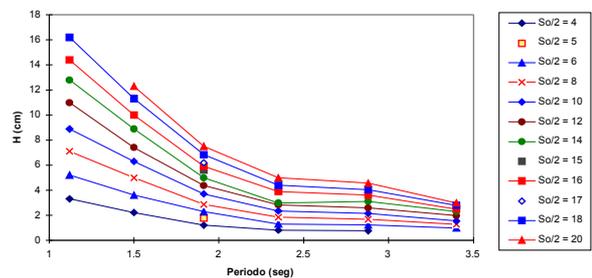


Figura 11- Curvas de eficiência do gerador utilizado. Altura da onda gerada (H) em função do deslocamento da pá ($S_o/2$) dado em centímetros, para diferentes valores de período.

Outro aspecto pesquisado nas ondas geradas nos canal diz respeito à semelhança das mesmas com ondas senoidais perfeitas. Uma primeira análise foi feita utilizando-se o gráfico desenhado por Galvin (1970) e apresentado por Smith e Kraus (1990). Este gráfico encontra-se na figura 12. Galvin (1970) definiu, a partir de 137 observações, várias regiões de acordo com a presença e o número de ondas secundárias ('solitons'). Galvin (1970) define 'ondas secundárias' como "ondas múltiplas que se separam das ondas individuais produzidas pelo gerador em águas rasas". Galvin (1970) observou que a formação destas ondas não é restrita a nenhum tipo de equipamento em particular e sugere que elas são geradas porque o movimento da pá não corresponde ao movimento das partículas sob a onda gerada. De acordo com o gráfico de Galvin

(1970), existiria uma região ideal onde as ondas geradas são perfeitamente regulares. Esta região ocorreria para uma faixa grande de altura relativa de onda em águas intermediárias ($\sim 0.1 < H/h < \sim 0.4$) ou ondas de pequenas alturas relativas ($H/h < \sim 0.1$) em águas rasas e profundas.

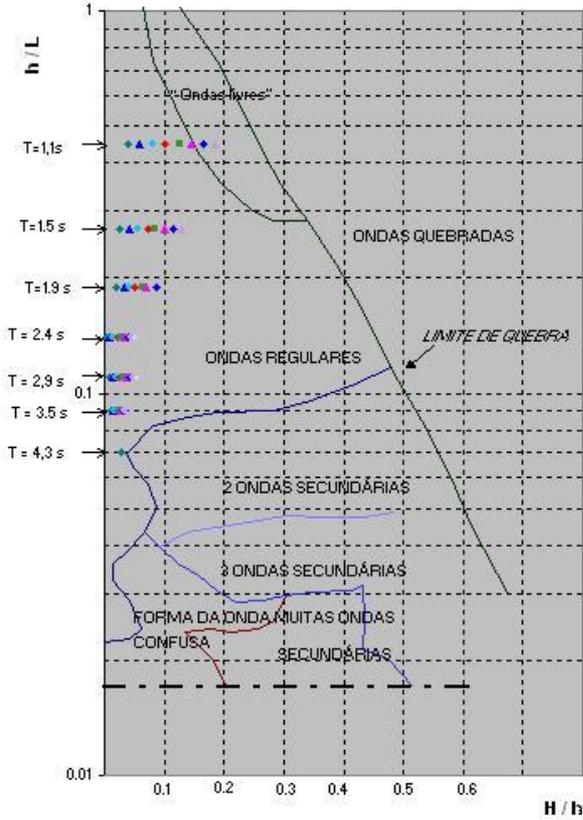


Figura 12- Gráfico apresentado por Galvin (1970) (em Smith e Kraus,1990) e plotagem dos valores correspondentes às ondas geradas no canal: várias alturas para os diferentes períodos utilizados.

Os valores de H e L utilizados nos testes foram plotados no gráfico de Galvin (figura 12) e, com exceção dos dois maiores valores para o período de 1,1 segundos, todos eles se encaixam na região de ondas regulares. Aparentemente, então, todas as ondas geradas deveriam ser perfeitamente regulares, com exceção das duas maiores ondas com período $T = 1,1$ s que recaem na faixa de ‘ondas livres’ (‘bound-free waves’). No entanto, podia-se observar que as ondas se diferenciavam da forma pura em maior ou menor grau conforme o período da onda e a altura da mesma.

Para avaliar com mais precisão a forma das ondas geradas com a forma senoidal pura, três parâmetros foram utilizados:

- (i) percentual de energia representado pela onda

senoidal interpolada (sobre a energia total calculada a partir do espectro);

- (ii) valor percentual do segundo harmônico (amplitude do segundo harmônico em relação à amplitude do primeiro harmônico);

- (iii) índice de espalhamento I_e .

Nas figuras 13 a 15 encontram-se plotadas, em função de h/L e H/h , as isolinhas destes parâmetros.

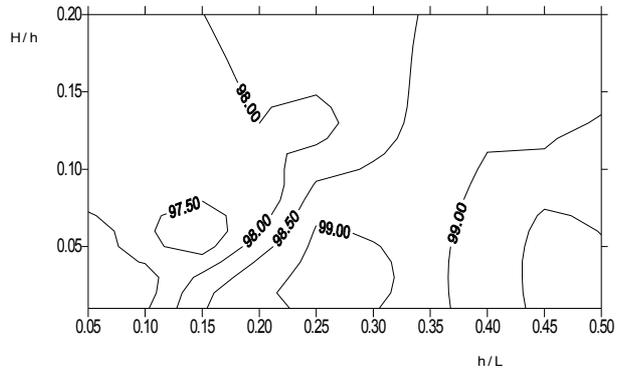


Figura 13 - Isolinhas de percentual de energia representado pelo primeiro harmônico na saída do gerador de ondas

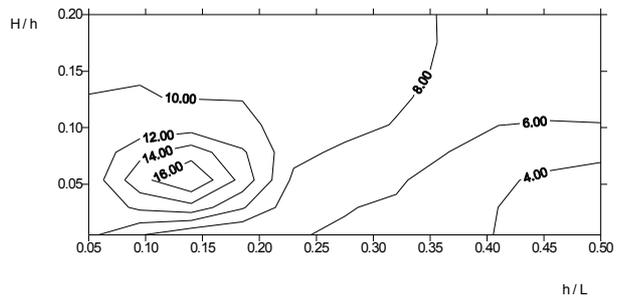


Figura 14 - Isolinhas de valor percentual do segundo harmônico na saída do gerador ($H_2^o \text{ harm} / H_1^o \text{ harm}$)

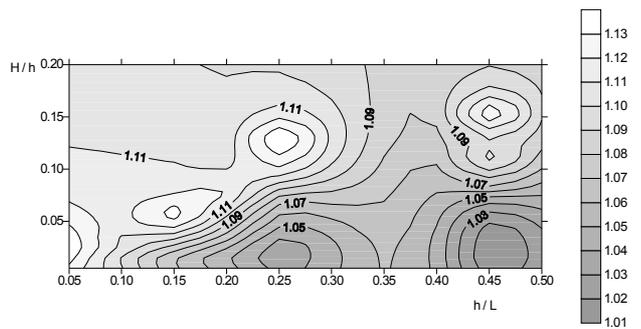


Figura 15 - Isolinhas de Índice de Espalhamento na saída do gerador

A análise dos gráficos nos leva às seguintes conclusões:

(i) o percentual de energia representado pela curva senoidal interpolada (Figura 13) depende do período da onda e da altura da mesma. Os menores valores de percentual de energia encontrados referem-se a valores grandes do período (valores pequenos de h / L) e valores pequenos da altura da onda (pequenos valores H / h). Para estes mesmos valores de período, no entanto, o percentual melhora com o aumento da altura da onda, chegando a valores da ordem de 98%. Para valores pequenos do período (valores grandes de h / L), a variação do percentual de energia com a altura da onda é inverso, ou seja, os melhores percentuais encontram-se na zona de pequenas alturas de onda. Para valores pequenos de período e altura de onda os percentuais de energia chegam em alguns casos a 99,9%. De todos os dados disponíveis, o valor máximo de percentual de energia na saída do gerador foi de 99,9% e o menor de 94,8% (um valor apenas, referente a $T = 4,3$ s e $H = 2,3$ cm).

(ii) o valor do percentual da altura do segundo harmônico (Figura 14) apresenta uma variação compatível com a variação do percentual de energia. Os maiores valores percentuais encontram-se na região de grandes períodos de onda e pequenas alturas de onda e os menores valores percentuais na região de pequenos períodos de onda e pequenas alturas. Em alguns casos o terceiro harmônico também aparece no registro da onda medido na saída do gerador. Apesar de não ter sido feita uma análise específica destes casos, a presença destes harmônicos influencia o cálculo do Índice de Espalhamento que é analisado a seguir.

(iii) o Índice de Espalhamento (Figura 15) também apresenta uma variação compatível com a variação do percentual de energia e do valor percentual da altura do segundo harmônico. A onda gerada é mais 'perfeita', ou seja, o Índice de Espalhamento é mais próximo da unidade na região de pequenos períodos e pequenas alturas de onda. Para grandes períodos, o Índice de Espalhamento apresenta os maiores valores.

A análise destes três parâmetros nos leva a concluir que todos eles representam uma boa medida da semelhança da onda gerada com uma curva senoidal pura. O valor percentual da altura do segundo harmônico é um parâmetro que já havia sido utilizado por outros autores. Quanto aos outros dois parâmetros que foram aqui introduzidos, pensou-se inicialmente que talvez o percentual de energia não fosse um parâmetro adequado porque parte da energia restante poderia ser proveniente apenas de ruídos de períodos aleatórios introduzidos na aquisição dos da-

dos, sem nenhuma componente harmônica. No entanto, como o valor da altura do segundo harmônico e o Índice de Espalhamento confirmam as conclusões obtidas da análise deste parâmetro, ele passou a ser calculado como mais um indicador da forma da onda na análise de todos os dados medidos nos testes.

PROPAGAÇÃO E REFLEXÃO DAS ONDAS NO CANAL DE ENSAIO

Alguns testes de propagação de onda foram efetuados no canal antes da colocação dos bancos na parte mais rasa. Foram feitas duas medições de nível, uma junto à pá e outra no final do canal, de modo que entre elas existia um trecho de aproximadamente 8 m na parte funda e um trecho de aproximadamente 20 m na parte rasa. Os tempos de propagação da onda foram calculados para os diferentes períodos pela teoria linear de Airy e encontram-se na tabela 2.

Na figura 16 encontram-se plotados alguns registros feitos no início e no fim do canal de ondas, aonde foram desenhadas as envoltórias superiores. Em todos os registros evidencia-se o desenvolvimento da frente de onda que é consequência da diferença entre a celeridade da onda (c) e a celeridade de grupo (C_g) já que todas as ondas estão se propagando em águas intermediárias. A relação c / C_g é diferente para os dois períodos o que justifica a diferença no aspecto da frente de onda nos dois casos. Mei (1989) discute a evolução de um trem de ondas (Figura 17) e apresenta uma equação teórica que descreve a evolução da frente de onda em águas profundas, onde $C_g = c / 2$. A equação, plotada na figura 18, mostra a evolução da envoltória, dada pela relação A / A_0 onde A é a amplitude final da onda e A_0 a amplitude no instante t . O comprimento da frente de onda é função de β , que por sua vez é uma função das características da onda (C_g, L, T) e da profundidade.

Como se observa na figura 18, a equação sugere que a envoltória da onda nesta região varia oscilatoriamente desde zero até o valor $A / A_0 = 1$. Valores experimentais, no entanto, diferem um pouco da solução teórica, apresentando um pico mais significativo logo no início e tendendo quase sem oscilação ao valor constante. Os resultados encontrados no canal se assemelham aos valores experimentais apresentados por Mei (1989).

Uma análise dos gráficos obtidos no canal e plotados na figura 16 nos leva aos seguintes tempos aproximados de propagação do grupo de ondas: 15 s; 17 s e 23 s. Pela teoria de Airy: 14,5 s; 17,2 s e 23,7 s. Para ida e volta teríamos os seguintes tempos de propagação aproximados: 30 s, 34 s e 46 s, ou seja, na saída do gerador aproximadamente 10 ondas, 18 ondas e 35 ondas

Tabela 2 - Tempos teóricos de propagação das ondas no canal . Trecho 01 é um trecho de 8m localizado na parte funda e trecho 02 é um trecho de 20 m localizado na parte rasa do canal. C_g é a celeridade de grupo, T_{t1} é o tempo de translação do grupo de ondas

T (s)	Trecho 01			Trecho 02		
	L (m) (h=0,87m)	C (ms ⁻¹)/ C _g (ms ⁻¹)	T _{t1} (s) grupo	L (m) (h=0,4m)	c (ms ⁻¹)/ C _g (ms ⁻¹)	T _{t2} (s) grupo
2,9	7,88	2,72/2,36	3,39	5,56	1,92/1,8	11,11
2,6	6,94	2,67//2,24	3,57	4,94	1,9/1,76	11,36
2,4	6,30	2,62/2,14	3,74	4,53	1,89/1,72	11,62
2,1	5,32	2,53/1,94	4,12	3,90	1,86/1,64	12,20
1,9	4,65	2,45/1,78	4,50	3,48	1,83/1,58	12,66
1,7	3,97	2,34/1,58	5,06	3,05	1,8/1,49	13,51
1,5	3,27	2,18/1,35	5,93	2,62	1,74/1,37	14,60
1,3	2,56	1,97/1,10	7,27	2,17	1,67/1,22	16,39

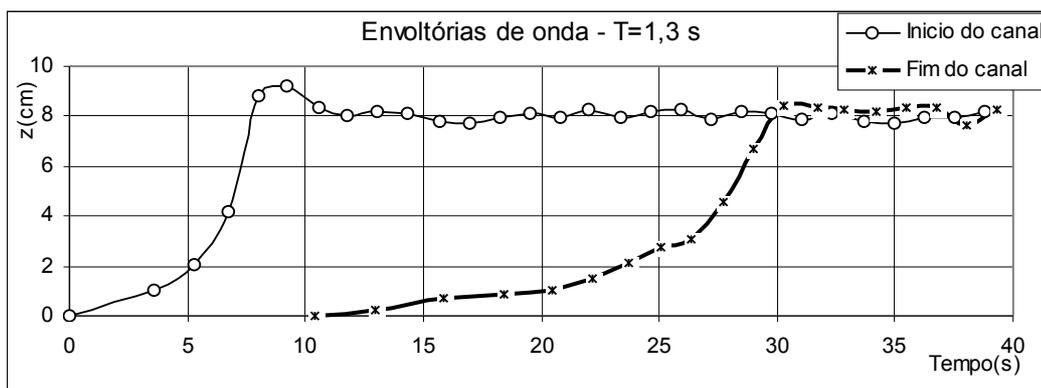
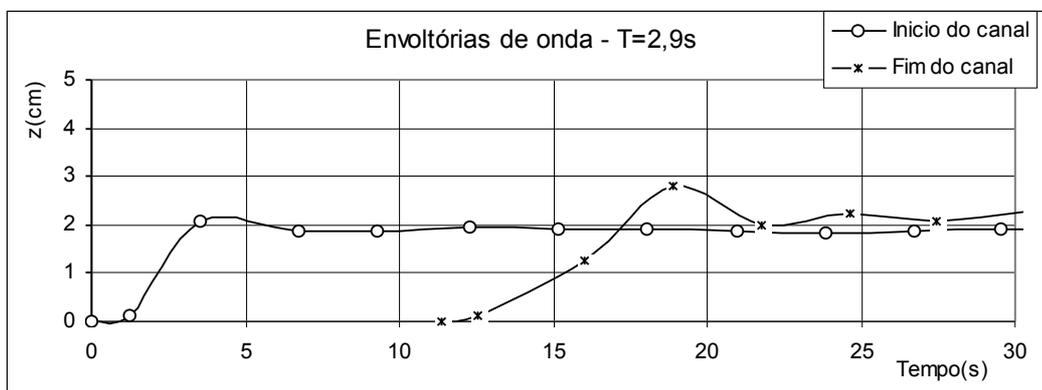


Figura 16 - Envoltórias dos registro de ondas de diferentes períodos no início e no fim do canal.

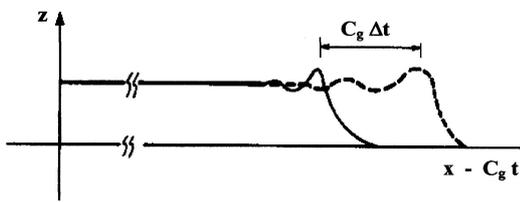


Figura 17 - Envoltórias de um trem de ondas senoidais em dois instantes diferentes (Mei, 1989)

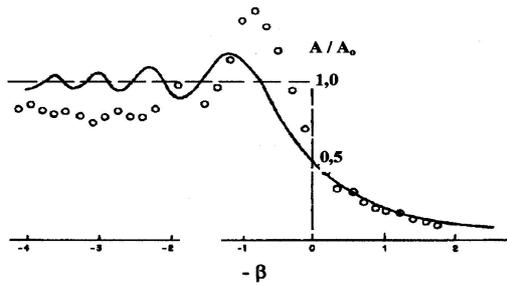


Figura 18 - Evolução da envoltória da frente de um trem de ondas. Comparação entre teoria (—) (Miles,1962) e experimentos (○) (Mei, 1989)

estariam livre da interferência das ondas refletidas para os três casos, respectivamente. Neste cálculo não se está levando em conta a reflexão parcial que ocorre devido ao degrau que separa a parte funda da parte rasa. Esta onda refletida levaria um tempo igual a $2T_{H1}$ para chegar de volta à sonda junto à pá, o que daria para os três casos examinados, respectivamente, 6,78 s, 9,0 s e 14,54 s, ou aproximadamente 2,3 ondas, 4,7 ondas e 11,2 ondas. Através deste estudo, pode-se determinar o número máximo de pontos (ou o intervalo de tempo máximo) a ser usado na análise dos dados de modo a evitar o uso de dados já afetados pela reflexão da onda.

Finalmente, algo deve ser dito sobre a influência do degrau na forma da onda na sua chegada à parte mais rasa, já que estes foram os dados utilizados nas análises feitas nos testes dos vários bancos. De uma maneira geral, as ondas geradas eram aproximadamente senoidais e ao passar da parte mais funda para a parte mais rasa tinham o seu comprimento de onda e altura modificados. A partir da altura da onda medida na saída da pá e utilizando-se a teoria de onda linear de Airy, foram calculados os valores esperados para a parte mais rasa, os quais foram comparados com os valores de H medidos. As diferenças encontradas são pequenas de um modo geral, variando na média entre 4 e 5%.

Como já foi mencionado, no entanto, as ondas de grandes períodos geradas pelo baterador apresentam normalmente uma forma bastante deformada, principalmente

no início do registro, e a utilização destas ondas deformadas foi inevitável. Nestes casos, no entanto, um fato interessante foi constatado. Ao passar da parte mais funda para a parte mais rasa do canal, estas ondas longas sofriam um alisamento, e mesmo aquelas que haviam saído bem deformadas da pá, chegavam à parte mais rasa, na entrada dos bancos, com uma forma bem mais próxima da forma senoidal pura. Apesar do Índice de Espalhamento aumentar ligeiramente, o percentual de energia representado pelo primeiro harmônico aumentava, significando, aparentemente, que o ruído tinha sido eliminado.

O Índice de Espalhamento da onda normalmente aumenta um pouco ao passar da parte mais funda para a parte mais rasa, mas em alguns casos ele diminui, e não é raro o caso em que o Índice de Espalhamento na saída da pá é maior do que 1,0 e ao chegar na parte rasa ele passa a ser igual a 1,0. Isto ocorre principalmente nas ondas de períodos médios ($T=2,9s$ e $T=2,4s$). O motivo deste comportamento não foi investigado, mas poderia ser um efeito semelhante ao relatado por Hulsbergen (1974), ou seja, de que o degrau induz uma onda secundária de período semelhante ao do segundo harmônico, mas em antifase com este, o que faz com que ele se anule.

Na figura 19 encontram-se plotados os valores do Índice de Espalhamento para as sondas 01 e 02, situadas antes e depois do degrau que separa a parte mais funda da parte mais rasa do canal. Como se pode observar, na maioria dos casos, o Índice de Espalhamento aumenta ligeiramente na passagem da parte mais funda para a parte mais rasa. Em alguns casos o aumento é substancial, mas em outros casos ocorre uma diminuição do índice, significando que a onda ganhou uma forma mais livre de harmônicos de mais alta ordem. Em alguns casos, o índice de espalhamento passa de maior do que 1,0 para igual a 1,0. Na figura 20 encontram-se plotadas os valores das Taxas de Espalhamento entre as ondas 02 e 01 em função h / L e H / h , ou seja, Ie_2 / Ie_1 .

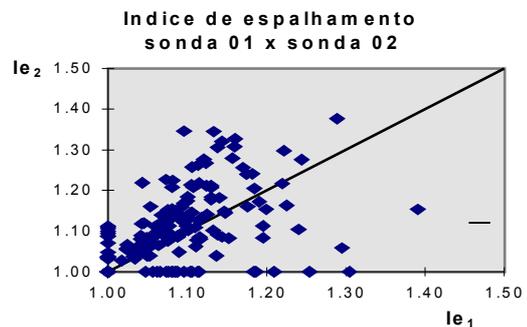


Figura 19 - Comparação entre Índices de Espalhamento das sondas 01 e 02, Pontos experimentais e reta identificando o

lugar geométrico dos pontos de valores iguais

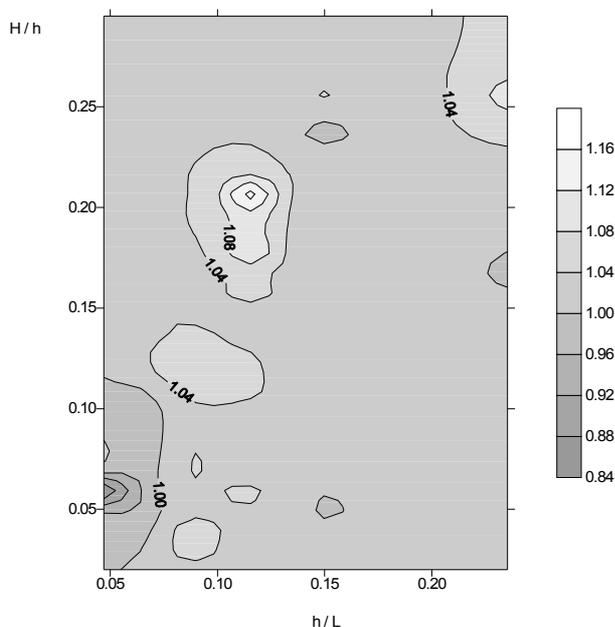


Figura 20 - Isolinhas de Taxa de Espalhamento entre sondas 02 e 01

RESUMO E CONCLUSÕES

Em relação aos objetivos principais estabelecidos para os testes de desempenho do canal e dos equipamentos, concluiu-se que:

(a) Quanto aos equipamentos de medição de nível utilizados no canal (sondas capacitivas), estes apresentaram um bom desempenho de um modo geral. A frequência de aquisição escolhida ($f_{aq} = 100$ Hz) era de tal ordem que superava em muito a frequência de corte necessária para evitar que o fenômeno de 'aliasing' se produzisse sobre a faixa de frequências a serem analisadas. As sondas mais antigas apresentavam um nível grande de ruído, mas em frequências que não interferiam nas frequências dos harmônicos a serem estudados. Por estes motivos, nenhum tipo de filtro passa baixas foi utilizado na aquisição ou no tratamento dos dados.

(b) Quanto aos dados de onda obtidos no canal, estes se enquadram perfeitamente na classificação de Dados Periódicos Complexos dada por Bendat e Piersol (1971), com componentes do espectro localizadas em múltiplos da frequência principal. Para que se obtenha a maior precisão possível na determinação das amplitudes dos harmônicos, portanto, é necessário que o incremento Δf nas

abscissas do espectro seja um submúltiplo da frequência principal. Para calcular com precisão a frequência do primeiro harmônico utilizou-se a técnica de interpolação de uma curva senoidal dada por Bloomfield (1976). Esta mesma técnica permite que se calcule as amplitudes dos demais harmônicos, pois pode ser aplicada ao resíduo obtido subtraindo-se do registro original a curva senoidal interpolada. Uma vez determinada a frequência principal, pode-se determinar o tamanho de bloco a ser usado na análise espectral para que se tenha um Δf submúltiplo desta frequência, já que o pacote matemático utilizado permite o cálculo do espectro com blocos de qualquer tamanho.

(c) A curva de eficiência do gerador utilizado foi estabelecida e comparada às curvas apresentadas por outros autores. Como o gerador de ondas utilizado era bastante rudimentar, foram encontradas algumas diferenças relativamente grandes entre as curvas de eficiência encontradas na bibliografia e a curva determinada para este gerador. No entanto, a relação linear esperada entre movimento do braço e altura da onda apresentava-se perfeita para o gerador utilizado, sugerindo que o seu funcionamento era adequado e não apresentava nenhum problema maior.

As diferenças encontradas não interferiam na geração das ondas a serem utilizadas não se tentou melhorar o desempenho do gerador, mas algumas sugestões são apresentadas para estudos futuros.

A outra conclusão a que se pode chegar é a de que cada gerador apresentará características construtivas e de instalação que o tornará diferente dos demais e, portanto, é sempre aconselhável que se estabeleça a curva de eficiência própria do gerador a ser utilizado. As curvas encontradas na bibliografia fornecem uma ordem de grandeza das alturas de ondas esperadas e podem ser úteis no projeto de um gerador de ondas, mas este deve ser aferido posteriormente.

(d) Quanto à perfeição da onda gerada pelo batido, ou seja, quanto à sua semelhança a uma senoidal pura, esta varia de acordo com as características da própria onda (período, T e altura, H). A perfeição da onda foi aqui medida de três maneiras distintas: através do percentual de energia representado pelo primeiro harmônico sobre o energia total contida no registro; através do valor percentual da amplitude do segundo harmônico sobre a amplitude do primeiro harmônico e através do Índice de Espalhamento, índice este criado

com o objetivo de descrever as características do espectro de energia de uma dada onda.

Quanto aos métodos de análise empregados concluiu-se que:

(i) os três parâmetros utilizados na análise da perfeição da onda gerada forneceram os mesmos resultados, como mostram os gráficos das figuras 13 a 15. O Índice de Espalhamento, parâmetro aqui criado para descrever a distribuição das amplitudes dos vários harmônicos no espectro, é um parâmetro eficiente na determinação da perfeição da onda gerada.

(ii) como o parâmetro de percentual de energia do primeiro harmônico fornece as mesmas informações que os demais parâmetros utilizados, conclui-se que a energia proveniente de ruídos não é significativa.

(iii) o valor máximo de percentual de energia representado pelo primeiro harmônico foi de 99,9% ($T = 1,1s$, várias alturas) e o menor de 94,8% ($T = 4,3s$; $H = 2,3cm$).

(iv) na maioria dos registros de onda na saída do gerador, o número máximo de harmônicos identificáveis é dois, mas em alguns casos o terceiro harmônico também pode ser identificado.

(v) o menor valor do Índice de Espalhamento calculado foi $I_e = 1,0$ e o maior foi $I_e = 1,39$.

A análise dos registros de onda na saída do gerador, através de qualquer um dos parâmetros utilizados leva às seguintes conclusões:

(i) as ondas mais perfeitas, ou seja, aquelas que mais se aproximam da forma senoidal pura, são aquelas com pequenos períodos, e portanto, pequenos comprimentos (grandes valores de $\sigma = h / L$) e pequenas alturas (pequenos valores de $\mu = H / h$), ou seja, pequenas amplitudes (S) de movimento da pá;

(ii) as ondas mais deformadas são aquelas com grandes períodos, e portanto, grandes comprimentos (pequenos valores de σ) e valores pequenos da altura de onda (pequenos valores de μ), ou seja, pequenas amplitudes de movimentos da pá;

(iii) para as ondas de pequeno período, a perfeição da onda piora à medida que a altura da onda cresce, ou seja, piora à medida que aumenta a amplitude de movimento da pá;

(iv) para as ondas de grande período, verifica-se o contrário, ou seja, a perfeição da onda melhora com o aumento da altura da onda, ou seja, melhora à medida que aumenta a amplitude de movimento da pá;

(v) plotando-se os pontos experimentais no gráfico de Galvin (1970) (Figura 12) estes recaem na zona considerada pelo autor como livre de ondas secundárias. Apesar de desconhecermos as técnicas de identificação das ondas secundárias utilizadas por Galvin (1970), podemos em princípio concluir que o gráfico em questão é válido para o gerador utilizado pelo autor, mas não pode ser generalizado para outros geradores de onda;

(vi) o desempenho diferenciado do gerador no que diz respeito à qualidade da onda gerada pode ser, aparentemente, explicado pela diferença no seu comportamento mecânico. Observando-se o gerador em funcionamento vemos que para ondas muito longas, o movimento da pá é muito lento e as trepidações inerentes ao funcionamento mecânico do aparelho, principalmente no início do movimento devido à inércia do equipamento, se fazem sentir com mais intensidade. Isto justifica, em parte, a diferença encontrada na perfeição das ondas de períodos longos e curtos. Para estas mesmas ondas longas, à medida que aumentamos a altura da onda, esta fica mais definida e cheia de energia, e menos sujeita às trepidações do gerador. Para as ondas curtas, no entanto, o aumento da altura da onda faz com que o gerador se aproxime do seu limite de funcionamento, provavelmente introduzindo também trepidações que não se verificam no funcionamento do equipamento dentro dos valores médios;

(vii) a influência do degrau existente no canal sobre a forma da onda foi avaliada através da análise do Índice de Espalhamento, calculado para as sondas existentes na saída do gerador e na entrada da parte rasa, e da Taxa de Espalhamento entre estas duas sondas. Também foram comparadas as altura medidas na parte rasa do canal com as alturas calculadas a partir da teoria linear de Airy para esta profundidade, tomando como referência a altura da onda junto ao gerador. Os resultados foram considerados muito bons na maioria dos casos (diferenças da ordem de 4 a 5%).

Comparando a faixa de variação dos valores do Índice de Espalhamento para a sonda situada na parte rasa e a faixa de variação do mesmo Índice para a sonda situada junto ao gerador verificou-se que estas eram praticamente iguais, o que nos levou a concluir que o degrau não tornava as ondas menos adequadas do que aquelas existentes logo após o ponto de geração.

Analisando os valores da Taxa de Espalhamento entre estas duas sondas verificou-se que na maioria dos casos esta era diferente da unidade, o que evidenciava que existia uma certa transformação da onda ao se propagar

entre estes dois pontos. No entanto, os valores desta taxa eram muitas vezes menores do que a unidade, o que evidenciava que muitas vezes as ondas se alisavam na passagem sobre o degrau, tornando-se mais próximas da forma senoidal pura. A justificativa deste fato pode estar na dissipação das perturbações introduzidas pela pá durante a propagação da onda (principalmente para as ondas de maior período), ou na interação de ondas secundárias geradas pelo próprio degrau, conforme experimento descrito por Hulsbergen (1974) e apresentado anteriormente.

De qualquer forma, concluiu-se que a presença do degrau não comprometia os resultados esperados nos testes de transformação das ondas sobre os bancos, e por isso ele foi mantido.

REFERÊNCIAS

- Beji, S., Battjes, J. A . 1993. Experimental investigation of wave propagation over a bar. *Coastal Eng.*, 19, 151-162.
- Bendat, J.S., Piersol, A . G. 1971. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley & Sons Inc.
- Bloomfield, P. 1976. *Fourier Analysis of Time Series: an Introduction*. John Wiley & Sons.
- Dean, G. D. and Dalrymple, R. A .1992. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Advanced Series on Ocean Eng. – Vol.2. World Scientific –Singapore, 2nd. Printing.
- Flick, R.E., Guza, R.T. 1980. Paddle generation waves in laboratory channels. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol 106. Feb.
- Fontanet, P. 1961. Theorie de la generation de la houle cylindrique par um batteur plan. *Houille Blanche*, vol.16, n° 1, p.3.
- Galvin, C.J. 1970. Finite-amplitude, shallow water-waves of periodically recurring form. *Proc. Symposium Long Waves*, pp 1-32.
- Gilbert, G., Thompson, D.M., Brewer, A. J. 1970. Design curves for regular and random waves generator. REP. INT'81, Hydr. Res. St. Wallingford, England, jun 1970.
- Hansen, J.B., Svendsen, I.A . 1974. Laboratory generation of waves of constant form. *Proc. 14th. Int. Conf. On Coastal Eng., ASCE, 1974*, 321-339.
- Hulsbergen, C.H. 1974. Origin, effect and supression of secondary waves. In: *Proc. 14th. Coastal Eng. Conf. Copenhagen, ASCE, New York, Ch.22*, pp 392-411.
- Krauss, T.P., Shure, L., Little, J.N. 1995. *Signal processing Toolbox - For Use with MATLAB® - User's Guide*. The Math Works Inc. USA.
- Madsen, O.S. 1971. On the generation of long waves. *J.Geoph.Res.*, vol.76, n°36, pp 8672-8673.
- Mei, C.C. 1989. *The applied dynamics of ocean surface waves*. Advanced Series on Ocean Eng. – Vol.1, World Scientific – Singapore.
- Mizutani, N., Mostafa, A.M., Iwata, K. 1998. Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction. *Coastal Eng.*,33,pp177-202.
- Rosauro, N.M.L. 1999. Transformações de ondas dispersivas não-lineares na passagem sobre obstáculos de fundo - análise e simulação. Tese de Doutorado. PPG Rec. Hid. e Saneam. Amb. IPH/UFRGS, Junho 1999.
- Smith, E.R., Kraus, N.C. 1990. Laboratory study of wave-breaking over bars and artificial reefs. *Journal of Waterways, Port, Costal and Ocean Eng.* Vol.117, N°4, Jul/Aug 1991.
- Sommerfeld, A. 1964. *Mechanics of Deformable Bodies, Lectures on Theoretical Physics, Vol.2*, Academic Press, N.Y.
- Vergara Sanchez, M.A. 1995. *Técnicas de Modelacion de Hidraulica*. Alfaomega Grupo Editor S.A., Colombia.

Theory and Practice of the Generation and Propagation of Monochromatic Waves in a Laboratory Wave Channel

ABSTRACT

This paper presents initial research results from a wave channel built for the study of wave propagation phenomena and their effects on beaches and structures. For this, it was necessary to know in detail the behaviour of the wave generator and of the wave probes to be used later. Wave characteristics just below the generator and along the channel were studied. To assess performance of the new generator, waves of different heights and periods were generated, measured and compared to expected characteristics, according to results of theoretical and practical studies published in the literature. The quality of the wave shape, i.e. its resemblance to the ideal sinusoidal shape, was analysed by comparison with published data and by two other methods here introduced. Conclusions are presented concerning how the generated wave shape varies as a function of period and height. The evolution of wave height and quality along the channel, up to a point where a step led to a shallower part, was analysed by comparison with linear wave theory and by a new index here termed Spreading Rate, which measures wave deformation between two points of its trajectory.

Key words: wave channel; wave generator; monochromatic waves; spreading index; spreading rate; energy percentage; linear wave theory.