

APRIMORAMENTO DA GERAÇÃO DE ONDAS NO CANAL DO LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA EPUSP VISANDO A MODELAÇÃO DO ESPECTRO DE ENERGIA DA AGITAÇÃO APLICADA À ENGENHARIA COSTEIRA E PORTUÁRIA

Tiago Zenker Gireli¹; Ricardo Roberto da Costa Gonçalves²; Paolo Alfredini³; Odair José de Souza⁴.

¹ Engenheiro Civil, Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Professor Lúcio Martins Rodrigues, 120 – Cidade Universitária
Fone: +55 11 3039-3284. e-mail: tiago.gireli@poli.usp.br

² Engenheiro Eletrônico, Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
e-mail: ricardo.goncalves@poli.usp.br

³ Professor Livre-Docente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
e-mail: alfredin@usp.br, paolo.alfredini@poli.usp.br

⁴ Professor da Universidade Presbiteriana Mackenzie

RESUMO

A disponibilidade de um canal de ondas para a comunidade acadêmica envolvida em Hidráulica Marítima no âmbito da EPUSP, é fundamental para o conhecimento da ação das ondas sobre o litoral e estruturas costeiras e portuárias, bem como no subsídio ao Gerenciamento Costeiro do grande potencial turístico e portuário do litoral do Estado de São Paulo, além da solução das várias questões com relação a impactos ambientais causados por obras necessárias à região para este fim. Este trabalho descreve as atividades envolvidas no levantamento da lei de transferência entre o movimento da placa do gerador e a forma do trem de ondas gerado para o canal de ondas do Laboratório de Hidráulica da EPUSP – LHEPUSP -, para ondas regulares, visando a geração de ondas irregulares.

ABSTRACT

An operational wave flume to be used by the academic community of EPUSP involved with Coastal Engineering is of great interest for an adequate wave – littoral/structures interaction knowledge, for the improving of Coastal Management measures in São Paulo State according to the great touristic and port resources, and providing solutions for the environmental impacts of such works or measures. This paper describes the improvement measures adopted in the Laboratório de Hidráulica da EPUSP – LHEPUSP – to provide its operational feasibility in reproducing random waves, beginning with the transfer functions for regular waves.

Palavras-Chave: hidráulica marítima, engenharia costeira, ondas, modelação física

1. INTRODUÇÃO

O canal de ondas do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo –LHEPUSP - é especificamente voltado ao estudo de obras costeiras e portuárias, as quais têm notável importância no desenvolvimento das cidades litorâneas do Estado de São Paulo e do Brasil.

A Área de Hidráulica Marítima do LHEPUSP, que em 2003 comemora 50 anos de atividades, é a pioneira no Estado de São Paulo na utilização de sistemas geradores de ondas monocromáticas visando aplicações à Engenharia Costeira e Portuária.

Em 1992 foi construído no Grande Hall de modelos do LHEPUSP o novo Canal de Ondas em estrutura metálica, seguindo projeto adaptado de sistema similar que operava na Osaka City University (Japão), que substituiu o canal de ondas anterior do laboratório.

O Canal de Ondas (Foto 1) é prismático e tem dimensões internas de 50 m de comprimento, 1,42 m de altura e 1,00 m de largura, estando provido numa lateral de visor em cristal laminado (de espessura de 2 cm) para visualização da agitação e das obras estudadas numa extensão de 20 m. A extensão terminal do canal, a sotamar do visor, é de 10 m e a extensão a barlar do visor, aonde está instalado o gerador de ondas, é de 20 m.

O Gerador de Ondas (Foto 2) consiste de uma placa acoplada superiormente a um carrinho, que translada em duas guias cilíndricas sob o acionamento de duas hastes que utilizam o princípio mecânico de movimentação de um fusô e porca roletada.



Foto 1: Vista do canal de ondas do LHEPUSP



Foto 2: Vista do sistema gerador de ondas

Além disso, o sistema possui um servo motor de corrente alternada para acionar a placa, um sensor potenciométrico de 100cm para promover a realimentação do sistema com relação à

posição do carrinho no tempo, filtros metálicos para minimizar os efeitos de harmônicos parasitas oriundos do processo de geração de ondas, estruturas absorvedoras em ambas as extremidades do canal para minimizar a reflexão das ondas e uma tubulação de 500mm ligando as extremidades de barlar e sotamar do canal para promover a compensação do nível d'água.

2. OBJETIVO

Este trabalho visa descrever as atividades envolvidas no levantamento da lei de transferência entre o movimento da placa do gerador e a forma do trem de ondas gerado para o canal de ondas do Laboratório de Hidráulica da EPUSP - LHEPUSP -, para ondas regulares, visando a geração de ondas irregulares.

3. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

Em 1952 Biesel e Suquet [1] publicaram uma análise do movimento da placa para geração de ondas em canal. Batedores tipo pistão fundamentam-se no movimento de translação horizontal de uma placa. Deste fato resulta que este tipo de gerador dá melhores resultados para ondas de grandes comprimentos de onda em relação à profundidade visto que, nestes casos, mesmo partículas muito próximas ao fundo tem amplitude de movimentação considerável quando da passagem da onda. Sendo assim, este tipo de gerador é ideal para estudos de obras costeiras, onde invariavelmente a relação comprimento de onda pela profundidade é grande. Além disso, por ter uma grande inércia, o batedor pistão não responde a frequências superiores a 3Hz.

Os autores chegaram aos seguintes resultados gerais para o potencial de velocidades Φ , os deslocamentos das partículas X, Y e a amplitude da onda a :

$$\Phi = -\frac{k}{m} \cdot c \cdot \cosh(my) \cdot \text{sen}(kt - mx) - \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \frac{k}{m_n} \cdot \cos(m_n y) \cdot e^{-m_n x} \cdot \cos(kt) \quad (1)$$

$$X = c \cdot \cosh(my) \cdot \text{sen}(kt - mx) + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \cos(m_n y) \cdot e^{-m_n x} \cdot \text{sen}(kt) \quad (2)$$

$$Y = c \cdot \text{senh}(my) \cdot \cos(kt - mx) + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \text{sen}(m_n y) \cdot e^{-m_n x} \cdot \text{sen}(kt) \quad (3)$$

$$a = c \cdot \text{senh}(mh) \quad (4)$$

onde:
$$c = 2 \cdot m \cdot \frac{\int_0^h \xi(\alpha) \cdot \cosh(m\alpha) d\alpha}{\text{senh}(mh) \cdot \cosh(mh) + mh};$$

m é a solução da equação: $k^2 = m \cdot g \cdot \tanh(mh)$;

k é a frequência angular da onda: $k = 2\pi/T$, e

o termo da somatória tende a zero quando se afasta da placa pelo menos três vezes a profundidade.

No caso do batedor pistão a função $\xi(y)$ tem a forma muito simples: $\xi(y) = e$, onde e é a excursão da placa, sendo assim, pode-se calcular a amplitude da onda como:

$$a = K \cdot e \quad (5)$$

onde:
$$K = \frac{2\text{senh}^2(mh)}{\text{senh}(mh) \cdot \cosh(mh) + mh}$$

sendo que K varia com a relação comprimento de onda pela profundidade λ/h . Este fato dificulta a aplicação desta teoria, visto que o comprimento de onda é mais difícil de medir do que o período, por exemplo.

Para solucionar este problema Gilbert, Thompson e Brewer [2] publicaram em 1977 uma análise empregando adimensionais que dependem diretamente do período T , ao invés do comprimento de onda, apresentando seus resultados graficamente.

Os três adimensionais a seguir puderam ser definidos:

$$\eta = \frac{h}{g \cdot T^2} \quad (6)$$

$$\frac{h}{\lambda} = G_1(\eta) \quad (7)$$

$$\frac{a}{e} = G_2(\eta) \quad (8)$$

onde h é a profundidade junto ao batedor, λ é o comprimento de onda, a é a amplitude da onda e e é a amplitude de excursão do batedor.

Para um dado período T e uma profundidade h , η pode ser calculado pela Equação (6) e G_1 e G_2 a partir da Figura 1. Das Equações 7 e 8 resultam o comprimento de onda L e a amplitude e do movimento do batedor necessário para gerar uma onda de amplitude a .

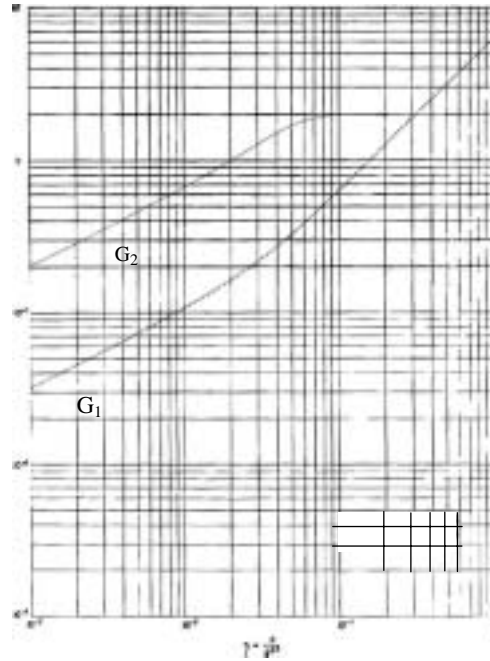


Figura 1: Adimensionais na geração de ondas

Monocromáticas

As ondas randômicas já não podem ser definidas em termos de uma altura e um período, ao invés disso o espectro de energia define o estado do mar e as variações na altura de onda devem ser consideradas em termos estatísticos.

Longuet-Higgins [3] evidencia que a distribuição estatística das alturas de ondas segue a curva de distribuição de Rayleigh, contanto que as frequências sejam relativamente próximas. Portanto, a função densidade de probabilidade da altura de onda $p(H)$ é dada por:

$$p(H)dH = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H}{H_z^2} \cdot e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H_z}\right)^2} dH \quad (9)$$

Onde:

H_z = a altura da onda média, ou seja, a média das alturas de onda.

Sendo assim, a probabilidade de ocorrência de uma onda com amplitude maior que um certo H é dada por:

$$P(H)dH = 1 - \int_0^H p(H)dH = e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H_z}\right)^2} \quad (10)$$

Além disso, a n ésima altura de onda superior, ou seja, a altura de onda que só é superada em $n\%$ dos casos é dada por:

$$H_{1/n} = \frac{\int_{H_n}^{\infty} H \cdot p(H)dH}{P(H_n)} = n \cdot \int_{H_n}^{\infty} H \cdot p(H)dH \quad (11)$$

Já a distribuição do período das ondas difere, dependendo do estágio de desenvolvimento da mesma, entretanto para ondas plenamente desenvolvidas a distribuição do período das ondas pode ser dada por:

$$p(T)dT = 2,7 \cdot \frac{T^3}{T_z^4} \cdot e^{-0,675 \left(\frac{T}{T_z}\right)^4} dT \quad (12)$$

sendo $p(T)$ a função densidade de probabilidade do período das ondas.

Considerando que a forma da onda pode ser bem descrita por uma soma de senóides de diferentes frequências, amplitudes e fases, o termo espectro de energia de onda pode ser definido. Os espectros expressam a distribuição de densidade de energia da onda como função da frequência e Gilbert, Thompson e Brewer [2] mostra que as propriedades estatísticas das ondas dependem da raiz da média quadrática da elevação da superfície da água $M_0^{1/2}$ e do parâmetro de largura espectral ε , ambos podendo ser calculados a partir do espectro.

O espectro de Pierson - Moskowitz (Figura 2), para ondas de vento totalmente desenvolvidas, dado pela Equação 13, foi o escolhido para ser modelado.

$$E(f) = \frac{8,10 \cdot 10^{-3} \cdot g^2}{(2\pi)^4 \cdot f^5} \cdot e^{-0,74 \left(\frac{g}{2\pi \cdot U \cdot f}\right)^4} [m^2 \cdot s] \quad (13)$$

onde U é a velocidade do vento em m/s para uma elevação de 19,5m acima do nível médio do mar.

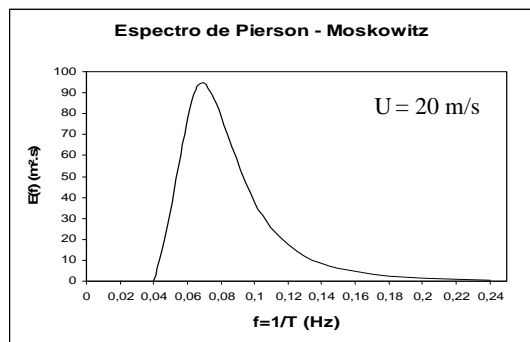


Figura 2: Exemplo de espectro de Pierson-Moskowitz

Este espectro é completamente definido pela velocidade do vento U , e se este for modelado numa escala linear L , em um canal com água de profundidade h , demonstra-se que o estado do mar de modelo pode ser definido por:

$$\gamma = \frac{ghL}{U^2} \quad (14)$$

Deste modo o valor de M_0 pode ser calculado a partir da Figura 3, considerando $M_0^{1/2} = hH_0^{1/2}$. Já a partir da Figura 4 pode-se obter o valor de $\xi_{máx}$, a maior altura de onda, e N , o número de máximos consecutivos de interesse. N é determinado pelo número de ondas em um experimento. É necessário supor um valor para $\xi_{máx}$ tal que haja uma probabilidade de que $\xi_{máx}$ venha a ser excedido somente em um experimento a cada cem, em média.

O valor médio quadrático para o deslocamento da placa, M_1 , a velocidade da placa, M_2 , a aceleração da placa, M_3 , podem ser obtidos a partir da Figura 3 e são dados por:

$$M_1 = h^2 H_1 \quad (15)$$

$$M_2 = ghH_2 \quad (16)$$

$$M_3 = g^2 H_3 \quad (17)$$

O espectro de Pierson - Moskowitz se aplica estritamente a águas profundas, mas tem-se assumido que o espectro pode ser imposto para água de qualquer profundidade. Esta suposição deve falhar quando a água se tornar muito rasa, mas não é possível definir um valor limite para a profundidade. Entretanto, a suposição não será certamente válida quando a altura da crista da onda for igual à profundidade, ou seja:

$$\frac{\xi_{máx}}{M_0^{1/2}} < \frac{1}{2H_0^{1/2}} \quad (18)$$

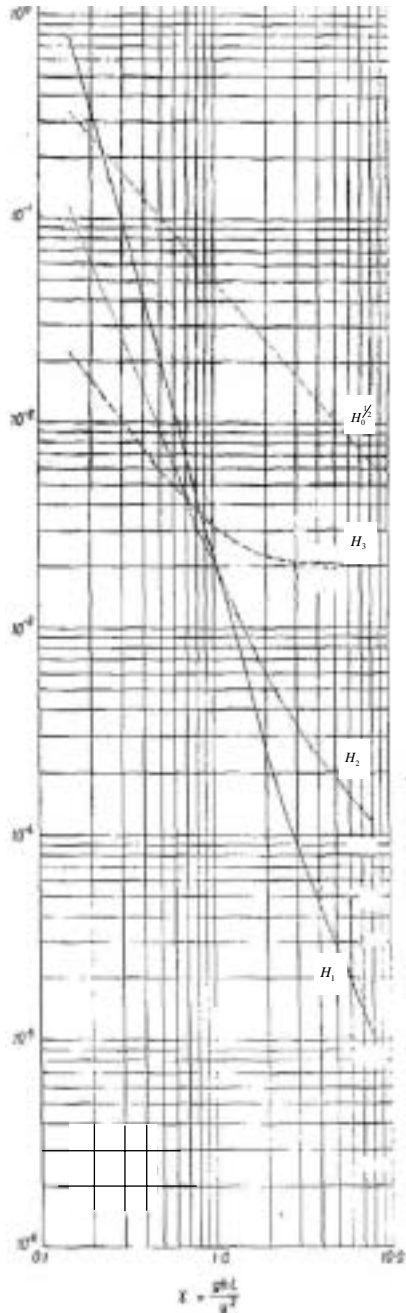


Figura 3: Adimensionais na geração de ondas randômicas

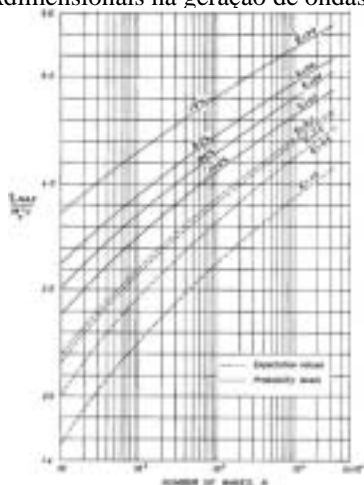


Figura 4: Curvas de probabilidade

4. PROCEDIMENTOS PRÁTICOS

4.1. Calibração do Sistema de Aquisição de Ondas

Para aquisição das ondas geradas, optou-se por utilizar pontas capacitivas de resposta linear (Foto 3). O sistema de aquisição e armazenamento das leituras da ponta capacitiva foi feito injetando em um computador, através de uma placa A/D (analógica/digital), o sinal da ponta e confeccionando um programa na linguagem LabView® (Foto 4).

Este programa foi elaborado de forma a aquisitar o sinal com uma certa frequência, plotá-los na tela e, quando acionado o comando de geração de arquivo, transferir as leituras para um arquivo “.txt”, permitindo que estas possam ser posteriormente importadas no software Excel®, onde foi feito o tratamento dos dados dos ensaios para a elaboração da função de transferência do canal de ondas.

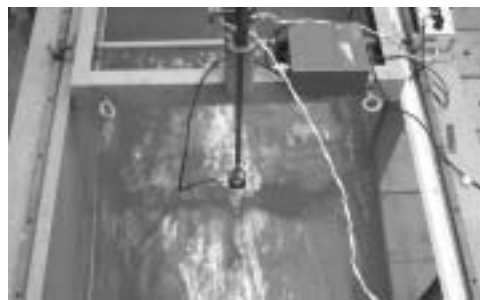


Foto 3: Ponta capacitiva



Foto 4: Programa de aquisição de ondas

Como mostra a Foto 3, a ponta capacitiva foi instalada sob uma ponta limnométrica, procedendo-se à calibração da mesma.

4.2. Levantamento Da Lei De Diferença Entre O Movimento Da Placa E A Altura Da Onda Gerada

O circuito elaborado para controlar o motor consiste de um PID que faz a leitura de um gerador de sinais analógicos, que representa a referência da senóide que se pretende gerar, compara este sinal com o do potenciômetro instalado no canal, que indica a posição do pistão ao longo do tempo e aplica uma tensão proporcional a esta diferença no controlador do motor fazendo com que o sistema se movimente seguindo o sinal de referência e, portanto, gerando a onda.

Além disso, foi empregado um micro-controlador para que se pudesse visualizar em um display a frequência, o período e a amplitude dos sinais elétricos gerados.

Como o sinal de controle do inversor é de ± 10 Volts, optou-se por adimensionalizá-lo, e mostrá-lo no display em termos de percentagem com relação ao fundo de escala.

Entendido o funcionamento do sistema de controle, o procedimento efetuado para o levantamento da função de transferência foi primeiramente realizado empregando ondas regulares, para uma profundidade de 1 metro, e cobrindo a seguinte faixa de frequências, em Hertz: 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,80; 0,90; 1,00; 1,20; 1,40; 1,60; 1,80; 2,00.

Para cada uma dessas frequências procurou-se ensaiar o maior número de amplitudes possível com a seguinte discretização em percentagem com relação à amplitude máxima de tensão: 1; 5; 10; 20; 30; etc.. As limitações observadas para o aumento da amplitude foram: o comprimento útil da ponta capacitiva (≈ 25 centímetros) e a projeção de água para fora do canal, seja na região de barlamar do canal, seja logo à frente da placa do batedor de ondas.

Quanto à amostragem das ondas, procurou-se aquisitar pelo menos seis períodos completos de cada onda, para que se pudesse ter idéia da variabilidade das alturas e dos períodos das ondas geradas.

No que diz respeito ao tratamento dos dados, calibrou-se uma planilha no software Excel[®] para onde foram importados os arquivos de texto de cada ensaio, gerados pelo programa de aquisição, e onde os seguintes tratamentos foram empregados:

Inicialmente, a partir dos parâmetros obtidos na calibração da ponta capacitiva, transformou-se os valores lidos de tensão, em nível d'água de onda;

Em seguida criou-se uma sub-rotina que procurasse os pontos de cruzamento ascendente da onda com o nível da água em repouso;

Empregando-se a expressão abaixo pode-se calcular os períodos das ondas aquisitadas em cada ensaio.

$$T_i = ZA_i - ZA_{i-1} \quad 1 \leq i \leq n \quad (19)$$

Onde:

ZA_i = instante do i -ésimo zero ascendente;

n = número de ondas aquisitadas no ensaio;

T = período da i -ésima onda.

Utilizando-se as correspondentes funções presentes no software pode-se calcular a média e o desvio padrão do período das ondas amostradas em cada ensaio.

Na sequência, encontrou-se os valores de níveis máximos e mínimos entre cada zero ascendente e, seguindo a expressão abaixo, calculou-se a Altura (H) das ondas amostradas.

$$H_i = \text{nível}_{\text{máx } i} - \text{nível}_{\text{mín } i} \quad 1 \leq i \leq n \quad (20)$$

Onde:

$\text{nível}_{\text{máx } i}$ = máximo valor de nível encontrado para a i -ésima onda (≥ 0);

$\text{nível}_{\text{mín } i}$ = mínimo valor de nível encontrado para a i -ésima onda (≤ 0);

n = número de ondas aquisitadas no ensaio;

H_i = Altura da i -ésima onda.

Novamente utilizando-se as correspondentes funções presentes no software pode-se calcular a média e o desvio padrão da altura das ondas amostradas em cada ensaio.

Visto que as ondas não se formam simétricas com relação ao nível de repouso, calculou-se a partir da expressão abaixo, o nível médio da onda.

$$h_{0i} = \text{nível}_{\text{máx } i} + \text{nível}_{\text{mín } i} \quad 1 \leq i \leq n \quad (21)$$

Onde:

$\text{nível}_{\text{máx } i}$ = máximo valor de nível encontrado para a i -ésima onda (≥ 0);

$\text{nível}_{\text{mín } i}$ = mínimo valor de nível encontrado para a i -ésima onda (≤ 0);

n = número de ondas aquisitadas no ensaio;

h_{0i} = nível médio da i -ésima onda.

Como a aquisição pode iniciar em qualquer instante, dentro do período da onda, criou-se outra sub-rotina para encontrar a diferença de fase do sinal amostrado.

De posse dos parâmetros acima calculados, foi modelada uma onda senoidal que correspondesse à forma de onda lida pela ponta capacitiva. Para tanto foi empregada a seguinte expressão:

$$h = \frac{\bar{h}_0}{2} + \frac{\bar{H}}{2} \cdot \text{sen} \left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t_0 \right) \quad (22)$$

Onde:

t_0 = diferença de fase do sinal [s];

\bar{T} = média dos períodos das ondas medidas [s];

\bar{H} = média das Alturas das ondas medidas [mm];

\bar{h}_0 = média dos níveis médios das ondas [mm].

Por fim, foi elaborado um gráfico para cada ensaio realizado, onde se encontra o trem de ondas oriundo da leitura da ponta capacitiva e a respectiva forma de onda senoidal que o representa.

Para o levantamento das funções de transferência foram retirados de todos os ensaios realizados, para cada frequência, os parâmetros médios e traçado gráficos entre o sinal aplicado e a altura de onda gerada.

Como exemplo, é mostrado a seguir um registro de onda e a função de transferência para a frequência de 0,60Hz.

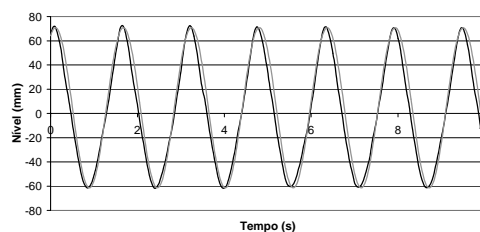


Figura 5: Registro de onda $f = 0,60\text{Hz}$ e $A=30\%$

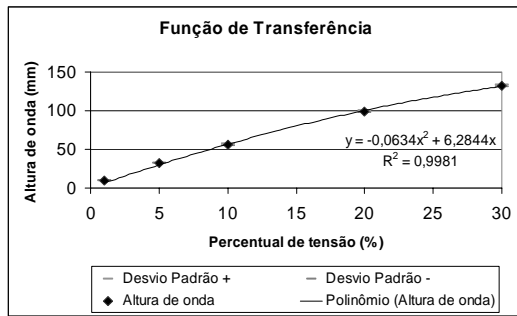


Figura 6: Função de transferência frequência 0,60Hz.

5. DISCUSSÃO

Perceberam-se diferenças consideráveis entre as frequências ajustadas no display do circuito e as verificadas no ensaio, o que pode ser atribuído à leitura do display, visto que os desvios padrão dos períodos medidos são muito baixos.

Quanto às funções de transferência levantadas, pode-se observar que as frequências ditas baixas (até 1,00Hz) deram melhor aderência à função polinomial proposta do que as ditas altas frequências (acima de 1,00Hz). Esta observação está plenamente justificada na teoria, pois com o aumento da frequência diminui o comprimento de onda, fazendo com que diminua a relação entre este e a profundidade, saindo da faixa ideal de trabalho do gerador pistão.

Infelizmente o circuito de controle do inversor do motor criado não permitia a aquisição da amplitude de excursão do batedor durante os ensaios. Outra característica das ondas não mensurada foi o seu comprimento, e como a relação L/h varia conforme a amplitude do sinal empregado nos ensaios, para que se pudesse estimar o comprimento das ondas a partir de equações teóricas ter-se-ia que lançar mão de equações de segunda ou até terceira ordem. Isso impossibilitou que se pudesse verificar as equações que relacionam a amplitude de excursão do batedor com a amplitude das ondas geradas descritas na conceituação teórica.

De maneira geral, pode-se comprovar o grande potencial do canal de ondas do LHEPUSP na geração de ondas longas, o que permitirá aplicações em estudos de obras costeiras e portuárias.

Na continuidade dos estudos no canal de ondas do LHEPUSP pretende-se, a partir das funções de transferência levantadas, aperfeiçoar o circuito de controle do inversor para que se possa gerar ondas randômicas baseadas em espectro de energia da agitação. Além disso, pretende-se validar o sistema com a repetição do estudo de estabilidade do quebra-mar de Praia Mole realizado no antigo canal de ondas do LHEPUSP, na década de setenta, com ondas randômicas ao invés das regulares empregadas no estudo inicial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - BIESEL, F. & SUQUET, F. Les appareils générateurs de houle en laboratoire. Grenoble: La Houille Blanche, 1952. 75p.

[2] - GILBERT, G.; THOMPSON, D.M. & BREWER, A.J. Design curves for regular and random wave generators. Wallingford: HRS, 1977.

[3] - HORIKAWA, K. Coastal engineering: an introduction to ocean engineering. Tokyo: John Wiley, 1978. 402p.