

GERADOR DE ONDAS SERVO-CONTROLADO PARA TANQUE DE DIMENSÕES REDUZIDAS

João Alcino de Andrade Martins, Pesquisador Doutor

Célio Taniguchi, Professor Titular

Carlos Alberto Guedes Freire de Souza, Mestre Eng^a

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica

Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – Butantã

05508-900 – São Paulo – SP - BRASIL

RESUMO

O tanque de ensaios em ondas é uma das principais ferramentas experimentais da Engenharia Naval e Oceânica. A qualidade de resultados de ensaios em tanques está diretamente associada à capacidade de geração, propagação e absorção desse tipo de instalação. O gerador de ondas é uma das principais partes de um tanque, devendo ser robusto, fácil de operar e manter e, principalmente, o mais fiel possível ao sinal de comando.

Este trabalho procura relatar brevemente o desempenho de um gerador de ondas especialmente desenvolvido e construído para um tanque de dimensões reduzidas. Para tal, foram instalados vários sensores no gerador de ondas para a medida de variáveis tais como, força, aceleração, deslocamento, rotação, entre outras.

A análise dos resultados obtidos mostra a adequação do gerador ao tanque e o bom desempenho do equipamento. Confrontando com a teoria mostrou-se que os dados ajustam-se bem ao modelo linear.

Finalmente, mostrou-se que é possível o projeto e construção de um gerador de ondas, para tanque de dimensões reduzidas, com tecnologia brasileira e apoio da teoria linear.

INTRODUÇÃO

Uma ferramenta bastante valiosa no desenvolvimento da Engenharia Naval, principalmente nas áreas de Oceânica e Costeira, tem sido a simulação em tanque de ensaios, com modelos físicos em escala.

Usualmente, essas simulações são feitas em tanques de grande extensão, com capacidade de simular alguns fenômenos marítimos, fundamentalmente as ondas. Para simular ondas em tanques são necessárias instalações bastante específicas com a capacidade básica de gerar, propagar e absorver a energia advinda desse processo.

A fidelidade da simulação é associada a qualidade da onda gerada, que depende diretamente do gerador de ondas. O gerador de ondas é uma das peças chaves do sistema que compõe o tanque e pode ser de vários tipos e configurações.

Dentre os mais utilizados estão os eletro-mecânicos, hidráulicos, pneumáticos, ou combinações desses tipos. Um relato da variedade de geradores de ondas existentes pode ser encontrado em Chakrabarti (1994).

Para uma análise mais acurada de um gerador de ondas, tipo placa basculante, desenvolvido e implantando no Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP, foram feitas medidas de diversas variáveis físicas e comparadas com a teoria linear da onda, sob condições de contorno apropriadas.

A seguir, apresenta-se, resumidamente, o modelo matemático linear usado para a onda e para o gerador de ondas analisados.

MODELO TEÓRICO

A teoria da onda linear, apesar de restrita, consegue representar de forma satisfatória a realidade para uma ampla gama de situações, conforme Le Mehauté (1976), e será empregada para os propósitos deste trabalho. As equações a seguir visam modelar a onda, sendo que um rigor maior nas demonstrações matemáticas pode ser consultado, por exemplo, em Wehausen e Laitone (1960).

Modelo da Onda

No caso de escoamento homogêneo, invíscido, irrotacional e bidimensional, a equação de Laplace aplicável é:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

com ∂ a diferencial parcial, ϕ o potencial de velocidades, x e y coordenadas do plano vertical.

Como já foi demonstrado por Dean e Dalrymple (1991), entre outros, uma solução para $\phi(x,y,t)$, pode ser escrita como:

$$\phi = \{A \sin(kx) + B \cos(kx)\} * \{C e^{kd} + 2C \cosh(k(d-y))\} \{D \sin(\omega t) + E \cos(\omega t)\} \quad (2)$$

com $k = 2\pi/L$, o número de onda real e não nulo, L o comprimento, $\omega = 2\pi f$ a frequência angular, f a frequência, d a profundidade, t o tempo e A, B, C, D, E constantes.

Estas equações, e outras envolvidas na teoria da onda, necessitam de condições de contorno específicas para serem resolvidas, podendo ser mencionadas a cinemática e a dinâmica da superfície livre, bem como a ausência de tensão superficial, e o fundo impermeável e horizontal.

Aplicando-se as condições de contorno convenientes e linearizando, mostra-se que:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (3)$$

na qual g é a aceleração da gravidade, sendo esta equação denominada relação de dispersão, que estabelece uma importante dependência entre ω e k .

Modelo do Gerador de Ondas

A simulação de ondas, em laboratórios de Engenharia Naval, usualmente conta com grandes instalações, dispendiosas na implantação e manutenção, e complexas de operar. A hipótese de instalações de menor porte, mais baratas e simples, faz surgir questões sobre a validade da simulação e qualidade do espectro de ondas.

Qualquer que seja a instalação, a onda gerada deve atender a vários requisitos de precisão e reprodutibilidade, para que o espectro das ondas no tanque seja o mais fiel possível aos parâmetros especificados.

No caso de ondas geradas em um tanque, por um atuador, essas são produzidas pelo movimento de um corpo dentro d'água. Considerando-se uma placa da largura do tanque e altura maior que o nível de água máximo, movendo-se harmonicamente, a condição de contorno específica é:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \omega s(y) \cos \omega t \quad (4)$$

com $s(y)$ a amplitude do deslocamento em $x = 0$. Segundo Chakrabarti (1994), uma solução para o potencial de velocidades, sob as condições mencionadas, escreve-se como:

$$\phi = -\frac{\omega}{k} A \cosh ky \sin(\omega t - kx) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega}{k_n} A_n \cos k_n y \exp[-k_n x] \cos \omega t \quad (5)$$

na qual k satisfaz a equação 3 e n é inteiro positivo.

Com o movimento sendo do tipo placa basculante ("flap"), o deslocamento pode ser descrito em termos de seu curso no nível de água estático, S , resultando em:

$$\frac{S}{H} = \frac{kd[\sinh 2kd + 2kd]}{4 \sinh kd[kd \sinh kd - \cosh kd + 1]} \quad (6)$$

Esta é a equação linearizada do gerador de ondas tipo placa basculante, ou seja, a função que relaciona o curso da placa e a altura da onda, com a frequência e a profundidade.

EXPERIMENTOS REALIZADOS

O gerador aqui descrito é eletro-mecânico, com acionamento de um motor CA servo-controlado em malha fechada, fuso com esfera re-circulantes e atuador tipo placa basculante, conhecido como “flap”. O equipamento, descrito em detalhes por Souza (2002), encontra-se instalado e operando em um tanque, no Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica do DENO-EPUSP, é ilustrado na figura 1.

O tanque mede, aproximadamente, 22 m por 5 m por 1,8 m, valores totais do comprimento, largura e profundidade, respectivamente, apresentado na figura 2. Na extremidade oposta ao gerador há um absorvedor tipo rampa com dupla inclinação, ripada, elevada em relação ao fundo do tanque.

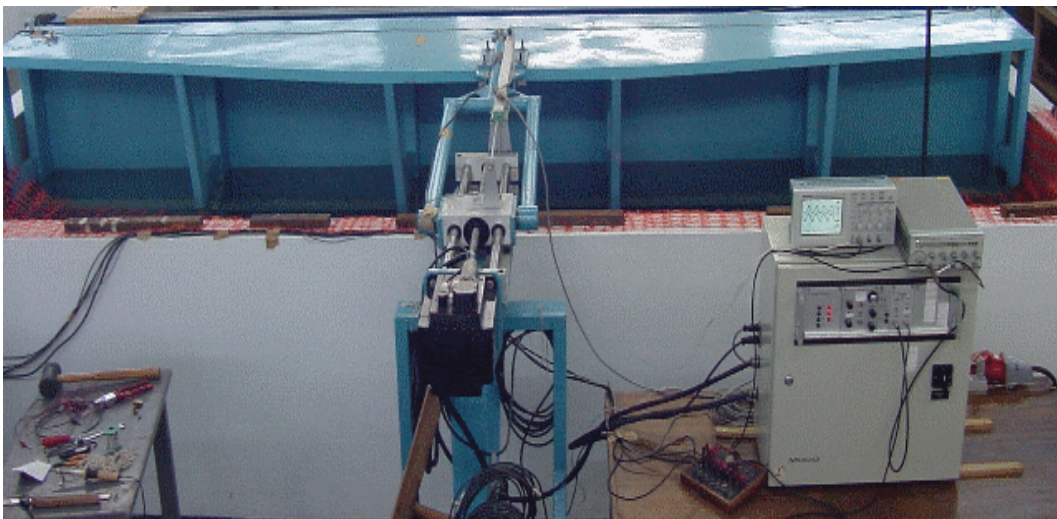


Figura 1 - Vista geral do gerador de ondas. Em primeiro plano os sistemas de acionamento mecânico, no centro, e de comando e geração de sinais, a direita.

No espaço entre a rampa elevada e o fundo do tanque estão instaladas telas plásticas verticais, esticadas no sentido transversal do tanque, ortogonal à propagação da onda, distantes 0,35 m entre cada uma. Uma descrição e análise dessa instalação é relatada por Martins (2003).

A determinação dos parâmetros de desempenho do gerador foi feita pela instalação de sensores no sistema, tanto na parte de comando e acionamento quanto no atuador. A

localização dos sensores pode ser visualizada na figura 3. Para cada configuração do sistema repetiu-se o mesmo procedimento de ensaio e de medidas.

As medidas foram feitas com um sistema de aquisição de dados de 16 canais, conectado a um computador tipo PC e programa de aquisição de dados Lynx. O sistema, figura 4, permite a calibração dos transdutores, visualização dos dados, durante e após a aquisição, e armazenamento das medidas das variáveis em função do tempo.

Os sensores instalados mediram a força, o torque, os movimentos (acelerações e deslocamentos) do sistema de acionamento e do atuador, o sinal de comando eletrônico e as elevações das ondas a 5,88 m do atuador, no centro do tanque.

Os sinais de comando empregados foram senoidais, com amplitude constante, na forma simples e varredura. A varredura produz senóides sucessivas, entre dois valores pré selecionados, com um intervalo e velocidade escolhidos pelo operador. O resultado do espectro gerado é similar a uma banda de ruído branco.

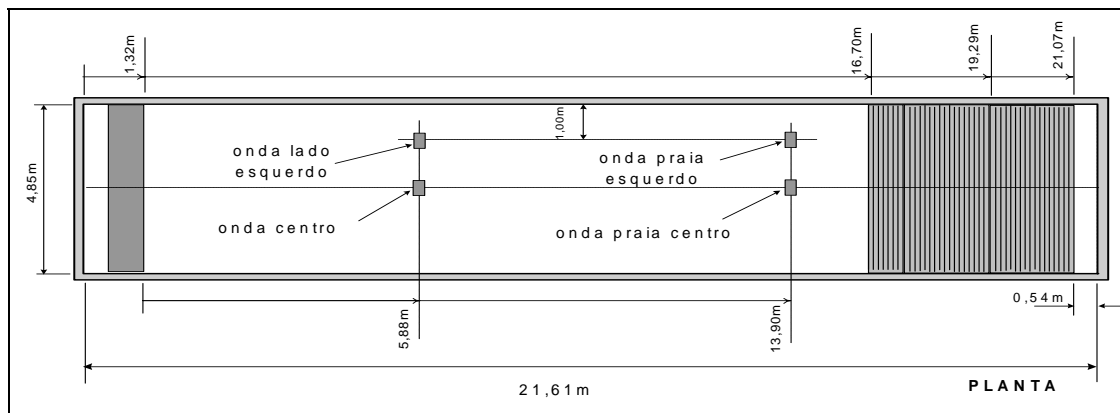


Figura 2 - Desenho ilustrativo do tanque de ensaios e dos medidores de ondas instalados

Os valores das variáveis físicas de excitação e respostas foram armazenados em computador e posteriormente analisados com o programa SisDin da Lynx. Os resultados foram espectros e funções de transferência dos sinais escolhidos, para as diversas condições de ensaio, apresentados a seguir.

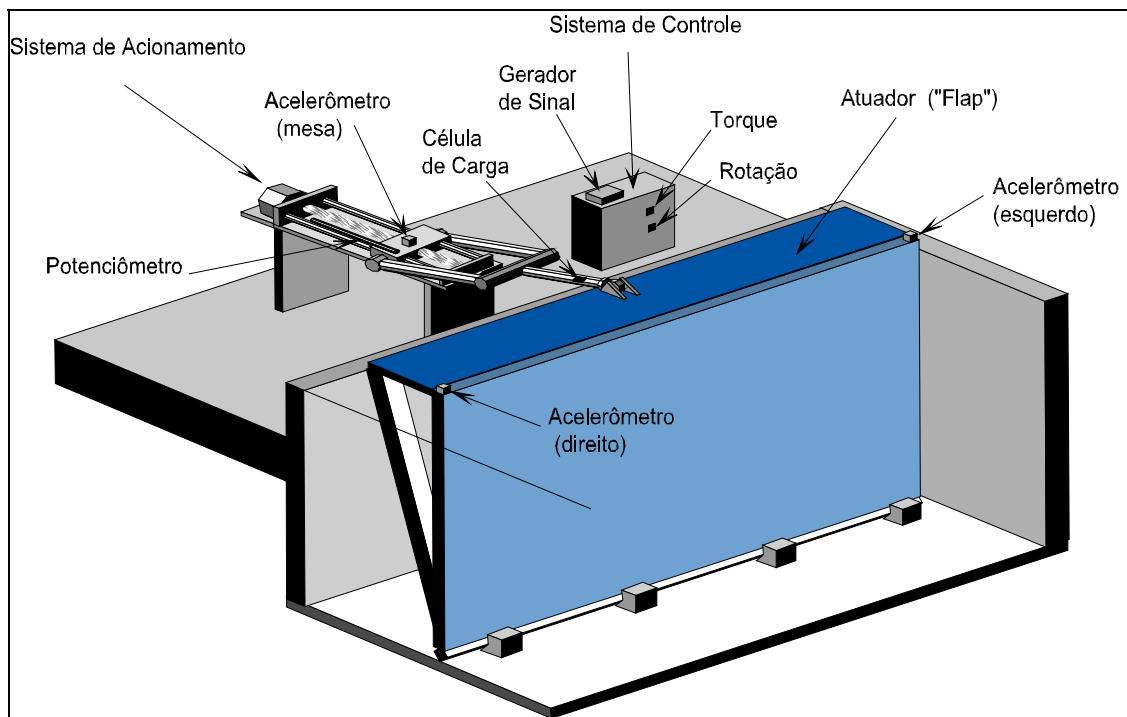


Figura 3 - Esquema da instrumentação utilizada no gerador de ondas.



Figura 4 - Vista da bancada de instrumentação e dos medidores de ondas

RESULTADOS OBTIDOS

Inicialmente fez-se um ensaio com o tanque vazio, para verificação da instalação do sistema gerador e identificação de possíveis ressonâncias de montagem. A figura 5 ilustra os espectros RMS das principais variáveis de excitação e da resposta do gerador, sem água no tanque.

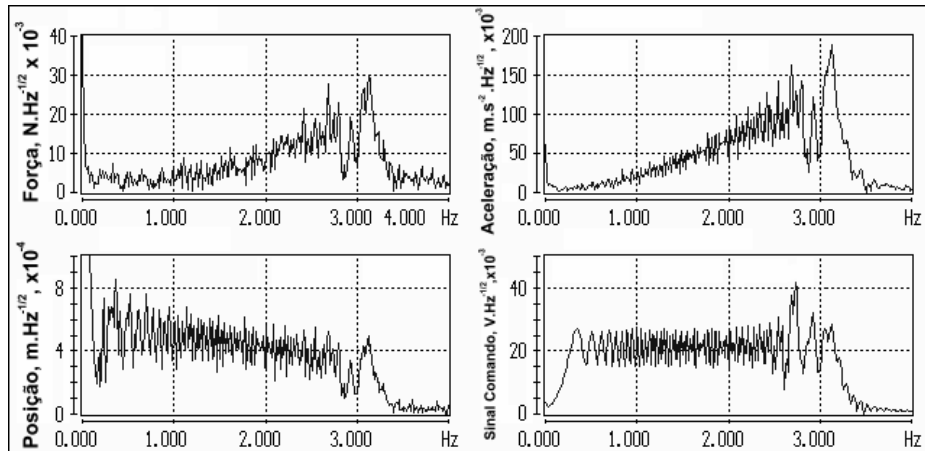


Figura 5 - Espectros RMS dos valores medidos das principais variáveis, vazio.

Os gráficos mostram que apenas na região superior a 2,9 Hz ocorrem algumas oscilações da placa que podem interferir na geração de ondas com frequência próxima a este valor. Esta região está no limite superior do espectro desejado e não deverá causar problemas.

Na etapa seguinte, empregou-se uma lâmina d'água de 1 m no tanque e os ensaios foram repetidos. A figura 6 apresenta os resultados que podem ser comparados com os resultados do gerador em vazio.

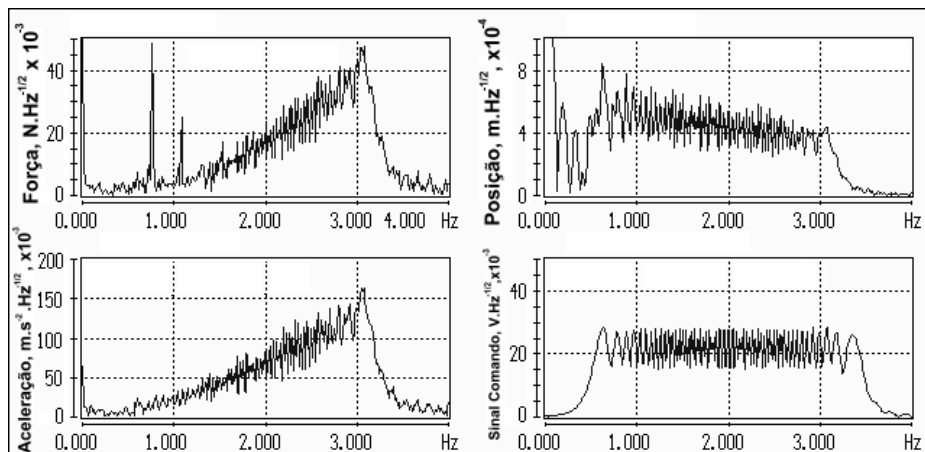


Figura 6 - Espectros RMS dos valores medidos das principais variáveis, para lâmina d'água de 1m.

No gráfico da força destaca-se o surgimento de frequências naturais nas vizinhanças de 0,76 Hz e outra, de menor amplitude, ao redor de 1,09 Hz. Estas frequências são associadas ao espaço existente na parte traseira do atuador, onde verificou-se a ocorrência de ondas de amplitudes significativas, durante os ensaios.

As ondas atrás do atuador não interferem muito nas ondas geradas no tanque, afetando mais a força necessária para manter a amplitude do deslocamento especificada. O deslocamento é atingido com o sistema fazendo variar a força, na medida necessária, pela realimentação da malha de controle.

Comparando-se as condições do tanque vazio e com 1 m de água, a força total mostra um aumento geral, mais pronunciado para as frequências mais altas. Todos os sinais apresentaram uma atenuação de picos, notadamente nas frequências mais elevadas, causada pelo amortecimento viscoso da água.

No estágio final, o tanque foi completado até 1,5 m de lâmina d'água e repetiu-se o procedimento de ensaio, cujos valores medidos resultaram nos gráficos da figura 7. Analisando-se os valores fica evidente o grande aumento da força total e as oscilações da aceleração, principalmente em baixas frequências, devido ao espaço na parte traseira do atuador.

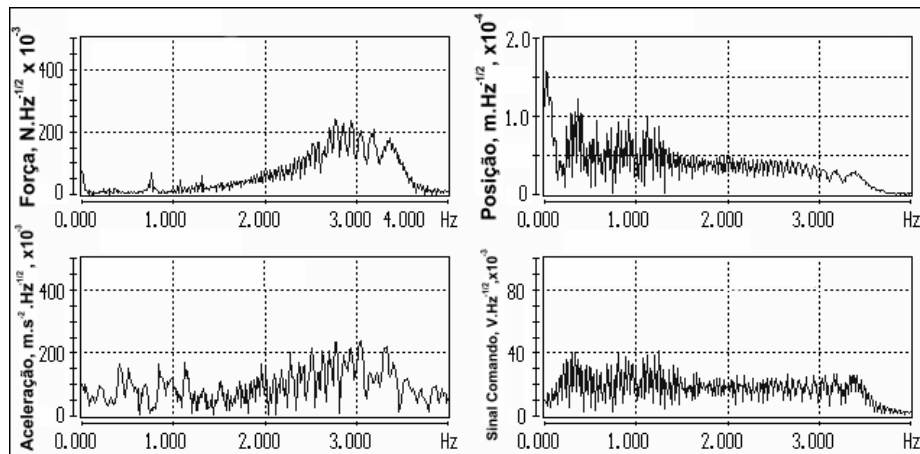


Figura 7 - Espectros RMS dos valores medidos das principais variáveis, para lâmina d'água de 1,5 m.

O aumento verificado nos gráficos da força é condizente com o aumento da lâmina d'água de 1 m para 1,5 m. Percebe-se ainda que, as frequências naturais referentes ao

espaço atrás do atuador, abaixo de 1,1 Hz, estão presentes nos sinais da força e da aceleração.

Apesar das oscilações em baixas frequências que perturbaram os sinais da posição e de comando, visíveis nos gráficos da figura 7, nota-se que a média dos valores não sofreu alteração significativa, quando comparadas com os gráficos anteriores

Assim, demonstrada a capacidade do sistema de executar um movimento sob o comando de um sinal elétrico especificado, de forma proporcional e em toda a faixa de frequências desejada, investigou-se a capacidade do gerador de produzir uma onda, no tanque, de forma controlada, em amplitude e frequência, determinando-se a função de transferência onda/curso, experimentalmente.

Analisando-se os resultados dos ensaios e a função de transferência teórica, equação 6, obteve-se o gráfico da figura 8, para diversas declividades de onda e para todas as frequências utilizadas.

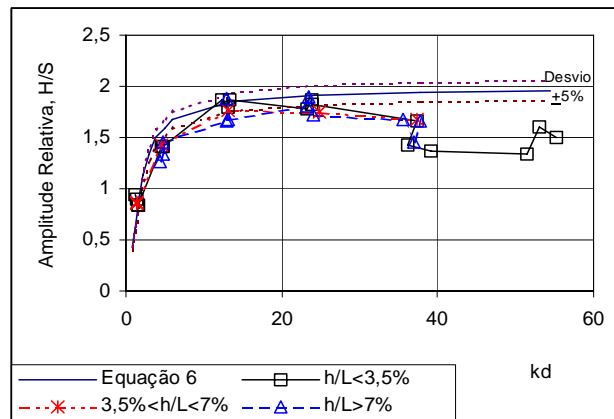


Figura 8 - Funções de transferência teórica e experimentais, entre amplitudes da onda e do curso do atuador.

Os valores apresentados foram obtidos a partir de uma excitação senoidal simples, em cada uma das frequências e pelo menos tres amplitudes diferentes para cada frequência, constantes em cada ensaio. Após um número suficiente de ciclos o ensaio era finalizado e esperava-se a água do tanque voltar ao repouso para, somente então, iniciar outra frequência.

Os valores medidos de altura de onda e de amplitude pico a pico da posição da mesa foram extraídos dos gráficos e divididos, o primeiro pelo segundo, para cada frequência. O gráfico da figura 8 evidencia que, pelo menos 67% dos pontos experimentais da função de transferência entre onda e curso, para diversas declividades, aderem bem à curva teórica, dentro de um desvio de $\pm 5\%$. No entanto, para frequências acima de 2,5 Hz e declividades acima de 3,5%, verificaram-se discrepâncias entre os dados experimentais e a equação 6.

A falta de concordância entre os valores experimentais e a curva teórica, acima de 2,5 Hz, deve-se à ocorrência de ressonâncias. Para esta faixa de frequências, ocorrem coincidências entre frequências naturais do atuador e do tanque, longitudinais e transversais. Este fenômeno foi observado e extensamente discutido por Martins *op. cit.*

Resumidamente, as frequências naturais transversais são excitadas, quando há a geração de frequências coincidentes, causando ondas transversais que interferem nas ondas longitudinais, perturbando as medidas das elevações de ondas.

Refinando-se a análise constata-se que, para ondas com declividade menores que 3,5% o ajuste à curva teórica é muito bom, principalmente até 2,2 Hz, e diminui com o aumento da declividade.

Estas observações são concordantes com Ursell et al. (1960), que atribui o fato ao emprego de uma equação linear, em desacordo com a hipótese de que declividades acima de 4% implicariam em não-linearidades, suficientes para causar os desvios.

Finalmente, para ilustrar a fidelidade do movimento do atuador, determinaram-se as funções de transferências entre o acelerômetro e a posição da mesa e entre os acelerômetros das extremidades do atuador. Os resultados são mostrados na figura 9, como gráficos do módulo e da fase em função da frequência. A excitação usada foi uma varredura entre 0,3 Hz e 3,3 Hz, com velocidade de 0,02 Hz/s, e amplitude pico a pico de 1,0 V.

Ressalta-se a qualidade muito boa da resposta do atuador, analisando-se os gráficos dentro da faixa de 0,5 Hz a 3,0 Hz. Na função de transferência entre o acelerômetro e a posição da mesa, vê-se que o experimento coincidiu muito bem com o resultado teórico ω^2 , em cada frequência onde a fase é zero ou muito próxima de zero. Apenas para frequências abaixo de 0,5 Hz ocorrem variações de fase devido às ressonâncias anteriormente mencionadas.

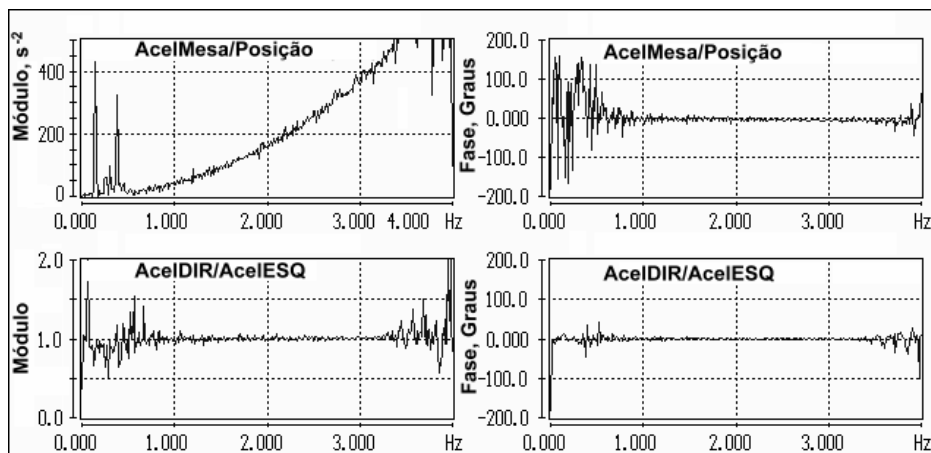


Figura 9 - Funções de transferências entre acelerômetros e posição.

A função de transferência entre os acelerômetros instalados nas extremidades do atuador, indica que a placa trabalha como um corpo rígido, não havendo qualquer diferença de fase significativa, dentro de toda a faixa analisada. Apenas o módulo apresenta flutuações relevantes para frequências abaixo de 0,6 Hz e acima de 3,2 Hz, portanto, nos limites da faixa de interesse.

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

As análises aqui apresentadas permitem concluir que é possível projetar e construir um gerador de ondas tipo placa basculante, empregando-se a teoria da onda linear, com resultados muito bons.

A função de transferência entre altura de onda e curso, equação 6, pode ser usada como envoltória superior, mas cuidando-se para que a declividade da onda seja compatível com o objetivo do projeto.

O sistema eletro-mecânico com servo-motor CA em malha fechada, provou ser capaz de produzir as forças e deslocamentos necessários para atender os requisitos de ondas geradas no tanque, tanto nas amplitudes quanto nas frequências, dentro de uma ampla gama de valores.

Pode-se empregar um atuador em forma de placa basculante com 5 m de largura e 2 m de altura e com água na parte traseira, desde que as frequências naturais estejam fora do espectro desejado e devidamente vedada nas laterais.

A instrumentação e os programas de aquisição e análise, bem como a metodologia utilizada, provaram ser eficientes e consistentes, fornecendo resultados plenamente satisfatórios.

Finalmente, mostrou-se que é possível construir e operar um tanque de ondas com dimensões reduzidas, com tecnologia nacional e dentro dos parâmetros de qualidade e confiabilidade exigidos para esse tipo de instalação.

BIBLIOGRAFIA

DEAN, R.G.; DALRYMPLE, R. A. Water wave mechanics for engineers and scientists. 2.ed. New Jersey : World Scientific, 1991. (Advanced Series on Ocean Engineering, v.2).

CHAKRABARTI, S.K. Offshore structure modelling. Singapore : World Scientific, c.1994. 470p. (Advanced series on ocean engineering, v. 9).

LE MÉHAUTÉ, B. An introduction to hydrodynamics and water waves. New York : Springer-Verlag, 1976. 310 p.

MARTINS, J. A. de A.. Análise de ondas em tanque de dimensões reduzidas com vistas à engenharia oceânica. Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP-São Paulo, 2003. 188 p.

SOUZA, C. A. G. F de. Implantação e análise de desempenho de um gerador de ondas tipo placa basculante. Dissertação (Mestrado em Engenharia) EPUSP, São Paulo, 2002. 117 p.

URSELL, F.; DEAN, R.G.; YU, Y.S. Forced small-amplitude water waves : a comparison of theory and experiment. Journal of Fluid Mechanics, v.7, pt 1, p. 33-52, jan. 1960.

WEHAUSEN, J. V.; LAITONE, E. V. Surface waves. In : ENCYCLOPEDIA of Physics. [s.l.] : Springer Verlag, 1960. v.9., p. 446-778.