

# **MELHORIAS EM UM TANQUE DE ONDAS DE DIMENSÕES REDUZIDAS**

Dr. João Alcino de Andrade Martins, Pesquisador  
Prof. Dr. Célio Taniguchi, Professor Titular.

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 uso de modelos reduzidos para ensaios em tanque de onda é uma prática de simulação, bastante empregada em Engenharia Oceânica. Por motivos de viabilidade econômica, é desejável que as instalações tenham o menor custo possível, tanto de implantação quanto de operação. No entanto, por questões físicas e técnicas, deve-se considerar limites inferior e superior de operação, tanto no projeto de construção quanto na utilização de uma instalação.

O trabalho realizado mostra as melhorias introduzidas em um tanque de ondas de dimensões reduzidas e o ganho obtido em termos de limites operacionais de frequências. A metodologia aplicada é fundamentalmente experimental, com medidas de elevações de ondas e outras variáveis físicas do sistema de geração, sob diversas condições de ensaios.

Os resultados são comentados a partir de índices medidos nas situações original e modificada, demonstrando-se o ganho em espectro e qualidade de ondas.

## INTRODUÇÃO

Uma das grandes riquezas do Brasil, e principal fonte de energia, é o petróleo. A produção nacional em 2003 atingiu, em média diária, cerca de 2 milhões de barris de petróleo e 54 milhões de m<sup>3</sup> de gás natural, sendo 80% proveniente de poços marítimos.

Portanto, é fundamental conhecer e estudar os oceanos e a interação com sistemas oceânicos e estruturas costeiras. Uma forma prática e útil de investigar as ondas, um dos fenômenos marítimo mais importante, é a simulação em condições de laboratório. Isso é feito em um tanque de ensaios, no qual é possível reproduzir-se, em escala e controladamente, ondas e sistemas oceânicos.

O tanque de ensaios com ondas é uma ferramenta experimental bastante valiosa no desenvolvimento da Engenharia Naval e Oceânica e ao longo da História Naval, os tanques de provas sempre foram voltados para ensaios com modelos de embarcações, notadamente para determinação de resistência ao avanço, com ou sem ondas. Devido ao aumento na velocidade das embarcações, os tanques mais modernos foram construídos com várias centenas de metros de comprimento.

Mais recentemente, aproveitando-se das instalações existentes, a Engenharia Oceânica lançou mão dessas instalações para ensaios, tendo em vista o custo elevado de construção, manutenção e operação de um tanque com essas dimensões. No entanto, ao projetar-se a construção ou utilizar-se um tanque de ondas para Engenharia Oceânica, o questionamento sobre as dimensões é perfeitamente justificável, tendo em vista a especificidade da instalação.

Este trabalho procura explorar o conceito de tanque de dimensões reduzidas, a partir de modificações feitas em um tanque existente, e da medida comparativa da melhoria alcançada com as alterações.

## ONDAS OCEÂNICAS EM LABORATÓRIO

Segundo Wiegel (1964), não existe uma solução matemática geral e completa para as ondas oceânicas, que têm sido modeladas de várias formas, abstraindo-se certas propriedades, ou variáveis físicas do problema. A respeito das abstrações, Feynman (1963) relata que o matemático John Von Neumann referia-se, jocosamente, ao fluido idealizado como "dry water".

As equações que procuram representar o problema da onda, que para um rigor maior nas demonstrações matemáticas podem ser consultadas em Wehausen e Laitone (1960), e também Dean e Dalrymple (1991), necessitam de condicionantes para serem resolvidas, e no caso de escoamento homogêneo, invíscido, irrotacional, e bi-dimensional, utilizam-se:

$$\text{Equação de Laplace ; } \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Fundo Impermeável ; } \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad ; y = -d, \quad (2)$$

$$\text{Cinemática da Superfície Livre ; } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad ; y = 0, \quad (3)$$

$$\text{Dinâmica da Superfície livre, sem tensão superficial ; } \frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad y = 0, \quad (4)$$

nas quais  $\partial$  é a diferencial parcial,  $\phi$  o potencial de velocidades,  $x$  e  $y$  coordenadas do plano vertical,  $d$  a profundidade,  $\eta$  a elevação do nível d'água,  $t$  o tempo e  $g$  a aceleração gravitacional. Empregando-se, o método da separação de variáveis na equação 1, linearizando-se as condições, e arbitrando-se forma senoidal e periodicidade, obtém-se a solução para  $\phi$ , da forma

$$\phi = \{A \sin(kx) + B \cos(kx)\} C e^{kd} 2 \cosh k(d+y) \{D \sin(\omega t) + E \cos(\omega t)\} \quad (5)$$

sendo que  $k = 2\pi/L$  é o número de onda, real e não nulo, e

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (6)$$

com  $L$  o comprimento,  $\omega = 2\pi f$  a frequência angular,  $f$  a frequência, da onda e  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  e  $E$  constantes. Utilizando-se a relação  $c = L.f$ , na qual  $c$  é a velocidade de fase, reescreve-se a equação 6 como:

(6.a)

Essa  $\frac{g}{c} \sqrt{\frac{g}{\tanh(kd)}}$  é a equação da dispersão, que expressa um fenômeno importante das ondas oceânicas, a dependência entre a velocidade e a frequência, diferente, por exemplo, das

$$\eta = (H/2) \cos(kx - \omega t)$$

ondas acústicas, que têm a velocidade constante. A característica linear dessa modelagem matemática permite que uma série de soluções seja obtida, em senos e co-senos, e que combinações lineares dessas equações também sejam soluções.

Supondo-se a elevação do nível d'água, com  $\eta$ ,  $H$  a altura da onda, aplicando-se a condição da equação 4, e examinando-se apenas as soluções para ondas progressivas, pode-se determinar o potencial

$$\phi = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh(kd)} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (7)$$

e sendo  $k$  e  $\omega$  positivos, a onda é progressiva para direção positiva de  $x$ .

Define-se a velocidade de grupo,  $c_g$ , examinando-se o caso de duas ondas com frequências ligeiramente diferentes, tal que, agrupando-se os termos e rearranjando-se, identifica-se uma envoltória cuja velocidade é:

$$c_g = \frac{1}{2} \underbrace{\left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]}_n c \quad (8)$$

notando-se que,  $n$  varia em função da relação  $d/L$ , entre 1 e 0,5, para águas rasas e águas profundas, respectivamente.

Para um tanque estuda-se também o caso de ondas produzidas por um corpo em movimento, dentro d'água. Considerando-se uma parede que se move de forma harmônica, a condição de contorno específica é:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \omega s(y) \cos \omega t \quad (9)$$

com  $s(y)$  a amplitude do deslocamento em  $x = 0$ . Conforme Chakrabarti (1994), a solução para o potencial de velocidades pode ser escrita como:

$$\phi = -\frac{\omega}{k} A \cosh ky \text{sen}(\omega t - kx) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega}{k_n} A_n \cos k_n y \exp[-k_n x] \cos \omega t \quad (10)$$

na qual  $k$  satisfaz a equação 6. Se o movimento for do tipo placa basculante ("flap"), o deslocamento pode ser descrito em termos de seu curso no nível de água estático,  $S$ , resultando em:

$$\frac{S}{H} = \frac{kd [\sinh 2kd + 2kd]}{4\sinh kd [kdsenh kd - \cosh kd + 1]} \quad (11)$$

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

Após a geração, a onda propaga-se e reflete-se na extremidade oposta do tanque, dependendo da inclinação e características físicas da estrutura absorvedora, e de  $H/L$ , a declividade da onda. A absorção de energia pela praia pode ser quantificada pelo coeficiente de reflexão  $K_R$ , proposto por Miche, conforme Horikawa (1978), pela expressão:

$$K_R = \chi \left( \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \frac{\sin^2 \alpha}{\pi} \right) / \left( \frac{H_o}{L_o} \right)_{MED} \quad (12)$$

na qual  $\chi$  é um coeficiente, que vale 1 para praia impermeável e lisa, 0,3 para rugosas e entre 0,3 e 0,6 para enrocamentos,  $\alpha$  é a inclinação da praia e os subscritos “o” referem-se a águas profundas e MED a valores medidos.

O coeficiente de reflexão pode também ser medido diretamente a partir dos registros de ondas no tanque, desde que sejam instalados dois sensores de ondas, aplicando-se, por exemplo, a formulação de Goda e Suzuki (1976), resumida a seguir.

$$\eta_n = a_i \cos(kx_1 + \Delta_n - \omega t) + a_r \cos(kx_1 + \Delta_n + \omega t - \theta)$$

$$a_i = \frac{1}{2|\sin \Delta|} [A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos(\Delta + \delta)]^{\frac{1}{2}}$$

$$a_r = \frac{1}{2|\sin \Delta|} [A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos(\Delta - \delta)]^{\frac{1}{2}}$$

$$\lambda = 2kx_1 - \varepsilon \quad ; \quad \cos \lambda = \frac{A_1^2 - a_i^2 - a_r^2}{2a_i a_r}$$

onde i e r são referentes a onda incidente e refletida, respectivamente,  $\Delta$  e  $\delta$  são distâncias relativas e  $\lambda$  o ângulo de fase.

ANÁLISE DE ONDAS EM TANQUE DE DIMENSÕES REDUZIDAS

Para quantificar alguns dos problemas e investigar a aplicabilidade de um tanque de ondas de dimensões reduzidas, em Engenharia Oceânica, foram planejados e realizados ensaios com ondas no tanque de ensaios do Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica do DENO-EPUSP. O tanque mede, aproximadamente, 22 m por 5 m por 1,8 m, valores totais do comprimento, largura e profundidade, respectivamente, descrito em detalhes por Martins e Souza (1993).

A instalação conta com um gerador de ondas tipo placa basculante ("flap"), acionado por um conjunto eletro-mecânico constituído por um servo motor, um fuso de esferas e unidades eletrônicas de potência e comando. Também há um absorvedor tipo rampa com dupla inclinação, ripada, construído com madeira e devidamente lastrado.

As medidas foram realizadas em duas etapas, iniciando-se pela determinação da resposta do tanque na configuração original, principalmente quanto ao desempenho do absorvedor de ondas. Na outra etapa, após serem feitas as modificações físicas necessárias, para otimizar o sistema de geração e o absorvedor, repetiu-se a série de ensaios a cada modificação introduzida no sistema, conforme detalhado por Martins (2003).

A primeira série foi feita com o tanque na configuração denominada "original", ou seja, absorvedor com rampa de dupla inclinação, do fundo até o topo da parede. A segunda série foi realizada após as modificações, principalmente no absorvedor, que permanece uma rampa com dupla inclinação, mas com ângulos menores, e elevada em relação ao fundo do tanque. No espaço entre a rampa elevada e o fundo do tanque instalaram-se telas plásticas verticais, esticadas no sentido transversal do tanque, ortogonal à propagação da onda, distantes 0,35 m entre cada uma, apresentadas na figura 1, adiante.

Os instrumentos utilizados nas medidas foram instalados tanto no sistema de geração, para determinação das variáveis de excitação, quanto ao longo do tanque, para caracterizar a resposta. As posições dos sensores podem ser visualizadas na figura 2.

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. Os sensores utilizados mediram: força de acionamento do atuador; posição da mesa do sistema de acionamento; sinal de controle; altura de onda próxima do gerador de ondas (montante); altura de onda na região próxima do absorvedor (jusante); sendo estas duas últimas em dois eixos, um eixo central e outro a 1 m da parede lateral esquerda.

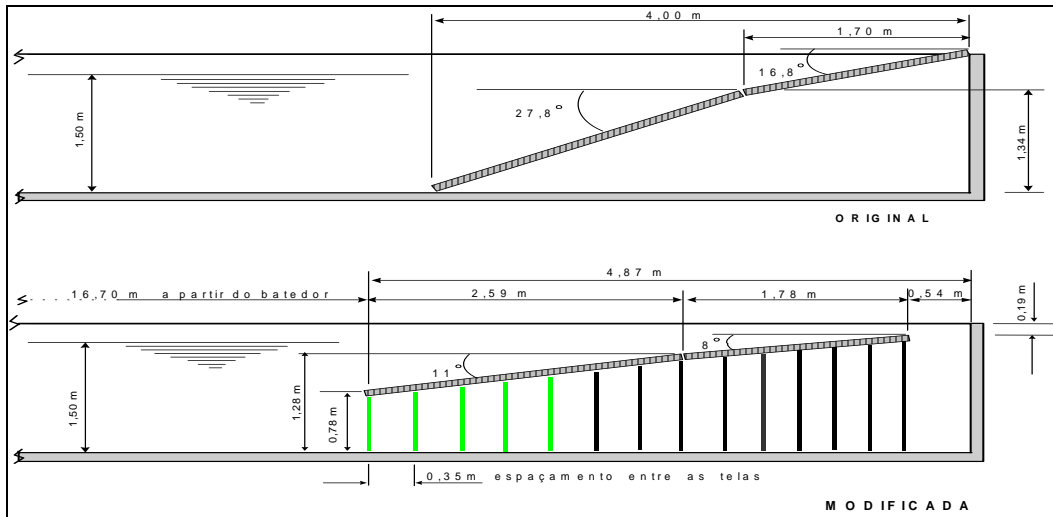


Figura 1 - Croquis das configurações do absorvedor de energia de onda.

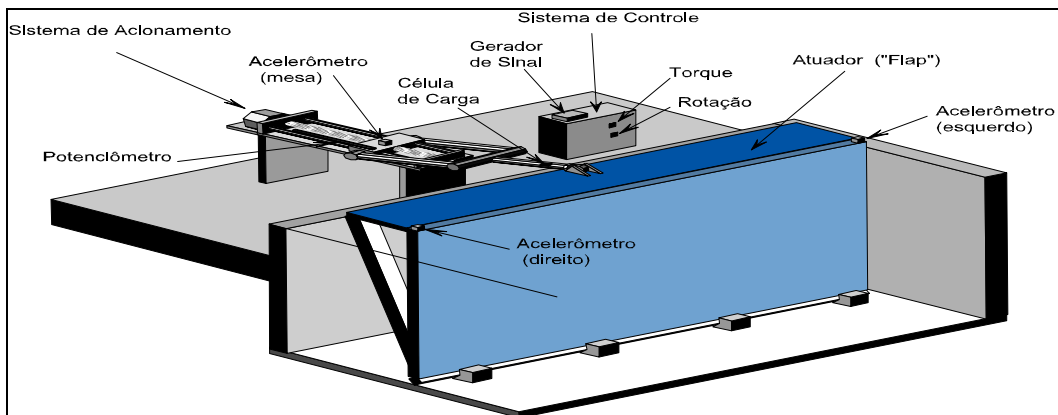
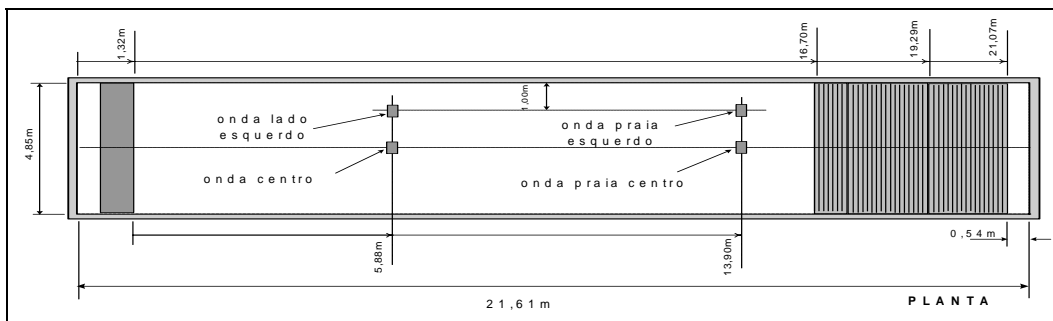


Figura 2 - Esquema e posições da instrumentação utilizada.

Foram investigadas ondas senoidais puras nas frequências de 0,5 Hz; 0,9 Hz; 1,5 Hz; 2 Hz; 2,5 Hz e 3 Hz, em pelo menos duas séries de amplitudes, que resultassem em uma declividade de onda abaixo e outra acima de 3,5%, conforme recomendado por Ursell

et al. (1960). A figura 3 ilustra a faixa abrangida pelos ensaios e formas de ondas, associadas às teorias aplicáveis, em função de parâmetros da onda.

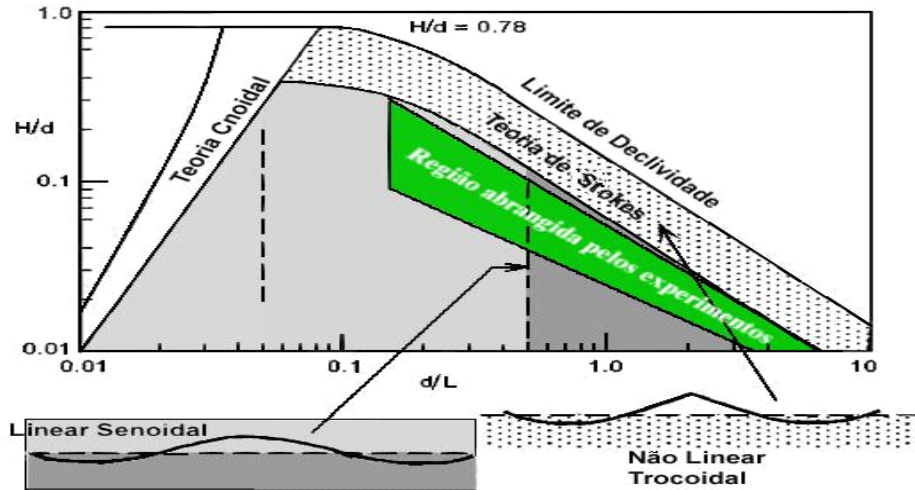


Figura 3 - Ilustração da região abrangida pelos ensaios

A verificação inicial da qualidade das ondas no tanque foi realizada comparando-se os valores medidos com uma co-senóide teórica, hipótese empregada para chegar-se à equação 7. As amplitude, frequência e fase, da curva teórica, foram ajustadas para comparação com os valores realmente medidos nos ensaios.

As medidas foram adimensionalizadas, pelo valor máximo, e correlacionadas com a teoria pelo método dos mínimos quadrados. Os coeficientes das regressões obtidas permitiram afirmar que a forma senoidal da onda para as frequências de 0,5 Hz a 2,5 Hz é mantida dentro dos desvios toleráveis para ensaios com modelos. A frequência 3,0 Hz teve a forma deteriorada, principalmente por ruídos elétricos nas medidas, em face da pequena intensidade requerida dos sinais de comando.

A figura 4 apresenta, à esquerda, o histórico no tempo do sinal de comando e das elevações da onda medidas, na seção frontal ao gerador a 1 m da parede esquerda, comparadas com a curva teórica e, à direita, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) dos sinais de comando e de elevação de onda.

A frequência de 0,5 Hz exemplificada, foi considerada a mais crítica, em termos de interferências devido a reflexões. Percebe-se no exemplo que, pelo menos 5 a 6 ciclos da onda, abrangendo 12 s de sinal, não mostram quaisquer alterações relevantes na frequência

e nem na amplitude. Os espectros, quando comparados, mostram a precisa resposta da frequência da onda à frequência do sinal de comando.

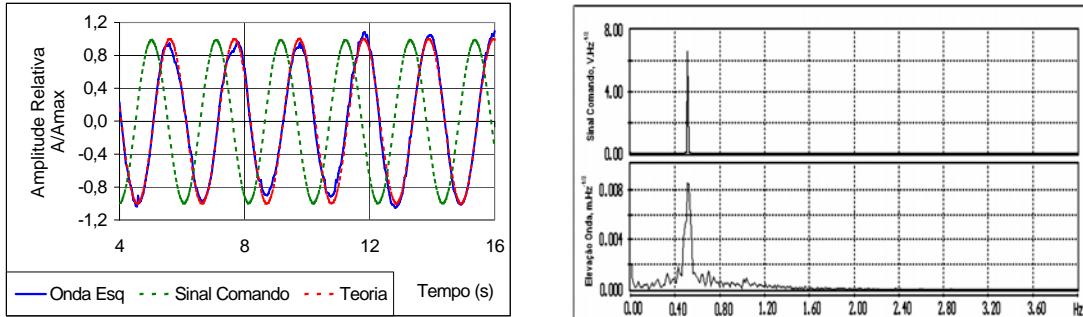


Figura 4 – Gráficos da comparação entre elevações de onda medida e calculada no tempo e dos espectros RMS dos sinais de comando e da elevação de onda, para  $f=0,5$  Hz

A resposta do tanque às ondas geradas pode ser avaliada pela função de transferência entre curso e altura de onda, tal como explicitado pela equação 11. A comparação dessa função, determinadas experimentalmente nas configurações original e modificada revela a melhoria alcançada.

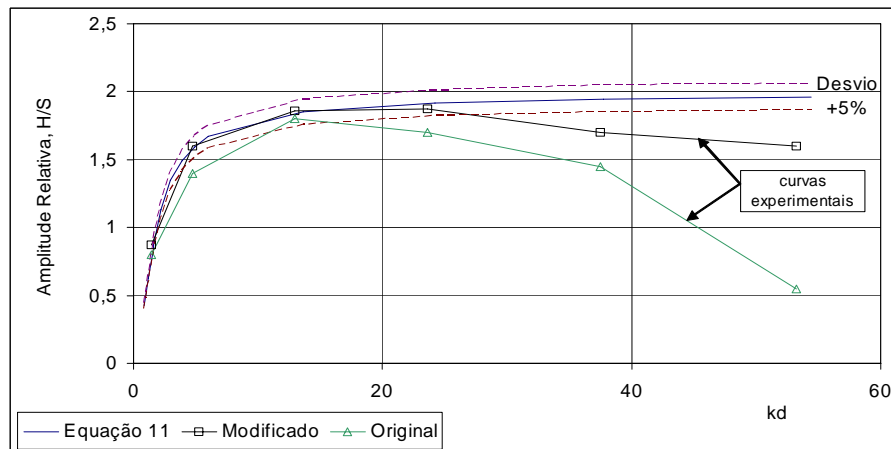


Figura 5 – Funções de Transferência do tanque, teórica e experimentais.

Um exemplo da propagação da onda no tanque pode ser visto na figura 6 adiante, onde os sinais dos quatro medidores de onda são apresentados, para a frequência de 0,5

Hz. Destaca-se a boa concordância entre os valores e forma das ondas registradas pelos medidores, posicionados conforme figura 2, anterior.

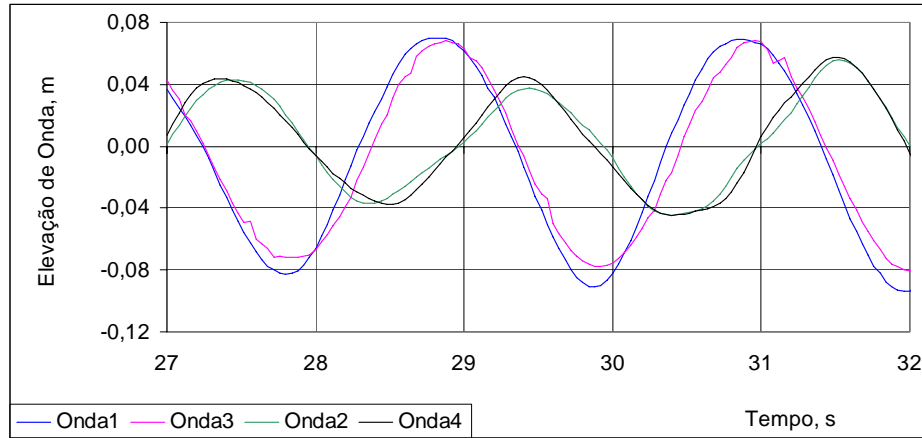


Figura 6 – Amostra de registro obtido de sinais dos medidores de onda ao longo do tanque.

Outro aspecto a salientar é referente às reflexões de ondas e o resultado conseguido após as modificações. Na configuração original verificavam-se sérias interferências devido a reflexão, perceptíveis nos registros de elevações de onda em função do tempo. Também ocorriam excitações das frequências próprias transversais, que interferiam nas ondas geradas, reduzindo bastante as amplitudes. Este fato é o principal causador da falta de ajuste da função de transferência original, a partir de 1,7 Hz, mostrado na figura anterior.

Após a instalação do novo absorvedor de ondas verificou-se que as reflexões diminuíram, bem como as ressonâncias transversais. Para comprovar a melhoria, aplicou-se a formulação de Goda e Suzuki, op. cit., em alguns dos sinais, para determinação do coeficiente de reflexão. A figura 7 apresenta a comparação entre as configurações e também entre os métodos utilizados.

O efeito das ressonâncias transversais surgiu mais pronunciadamente para frequências geradas entre 2,5 Hz e 3 Hz. Uma estimativa dos autovalores para o tanque de dimensões reduzidas foi feita, usando-se a equação 6, e mostrada na Tabela 1, sabendo-se que, as ondas formadas tem o comprimento de onda, múltiplo do comprimento do tanque, tal que  $L=2l/n$ , com n inteiro positivo.

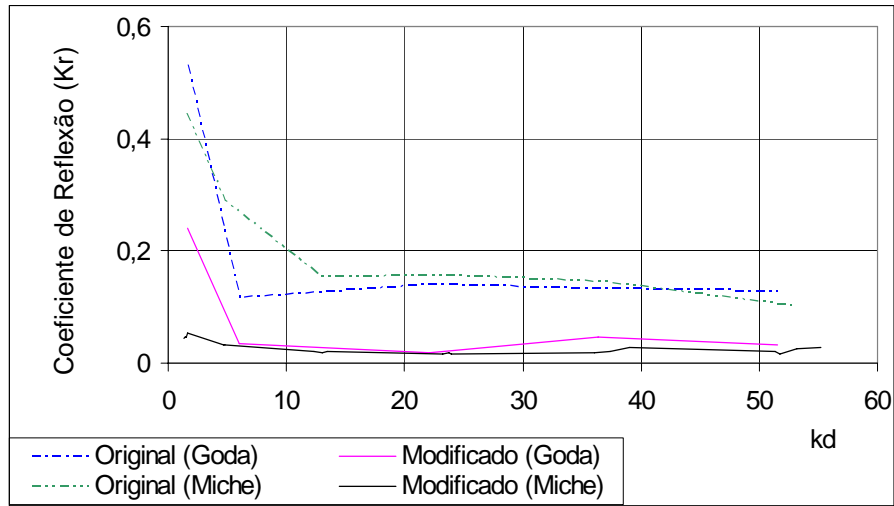


Figura 7 – Coeficientes de Reflexão nas duas configurações, medidos pelos métodos Miche (equação 12), e Goda e Suzuki.

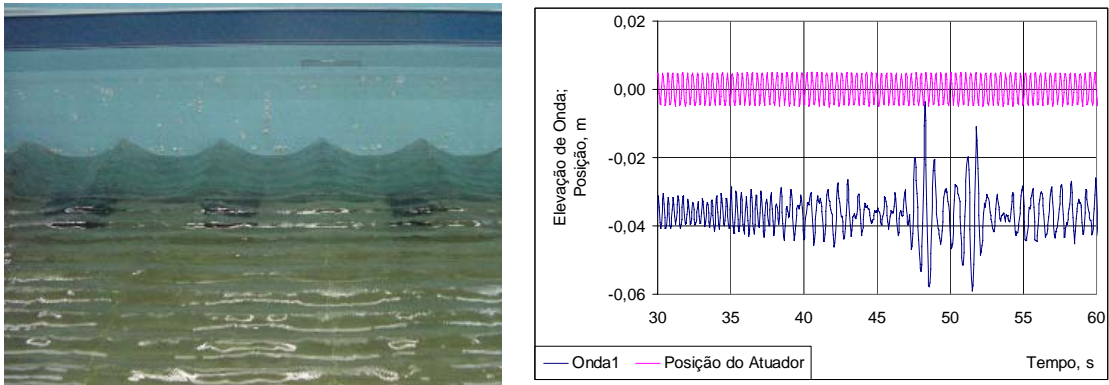


Figura 8 – Ilustração da ocorrência de ressonância transversal

Note-se na foto que a frente da onda gerada avança no sentido para fora do papel, enquanto que a onda transversal propaga-se de um lado para outro. No gráfico fica evidenciado que a frequência da onda é idêntica à frequência do movimento do atuador até cerca de 38 s de registro. A partir daquele instante surge o fenômeno da ressonância transversal, com frequência igual a metade da frequência gerada, anulando por completo a propagação da onda principal. As frequências naturais não podem ser significativamente alteradas em um tanque mas a ressonância pode ser evitada programando-se as frequências

das ondas geradas com valores diferentes daquelas que excitam as frequências próprias do tanque.

Tabela 1 - Alguns autovalores longitudinais e transversais, e frequências naturais medidas no tanque do Laboratório DENO-EPUSP.

Frequência Natural Calculada				Medida
Modo	Long ( $f_L$ )	Modo	Transv ( $f_T$ )	( $f_m$ )
1	0,099	-x-	-x-	0,098
4	0,351	1	0,347	0,390
8	0,561	2	0,556	0,561
14	0,755	-x-	-x-	0,757
16	0,808	4	0,802	0,806
31	1,125	8	1,134	1,123
35	1,195	9	1,203	1,196
39	1,262	10	1,268	1,270
43	1,325	11	1,330	1,331
51	1,443	13	1,446	1,440
55	1,499	14	1,500	1,502
59	1,552	15	1,553	1,550

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

A análise de ondas é um procedimento aparentemente simples mas cheio de detalhes, inclusive a experiência do operador, que podem afetar significativamente os resultados. As ondas geradas e analisadas apresentaram uma boa concordância com a teoria linear, quanto a forma, amplitude e frequência, em toda a faixa utilizada. Algumas das ondas apresentaram variados graus de deterioração, identificadas como aquelas que excitaram frequências naturais transversais do tanque, e que foram excluídas do processamento dos dados finais.

Respeitando-se as limitações mencionadas no texto, e aplicando-se uma metodologia de ensaios consistente, mostrou-se que as ondas no tanque de dimensões reduzidas são fidedignas, conservando as forma, amplitude e frequência da onda gerada.

Os valores determinados dos coeficientes de reflexão satisfazem as exigências da ITTC (2002), dentro da faixa das frequências pesquisadas, sendo que entre 0,9 Hz e 2,5 Hz os coeficientes de reflexão são muito melhores do que os exigidos.

Os métodos para determinação do coeficiente de reflexão que necessitam do ângulo de fase são muito sensíveis ao critério de escolha do sinal e de parâmetros do sistema de medida, levando a variações inaceitáveis dos resultados.

Por fim, provou-se que um tanque de dimensões reduzidas é capaz de produzir um campo de ondas útil para aplicações em engenharia oceânica, respeitando-se as condições aqui expostas, desde que seja estabelecida uma metodologia consistente e fundamentada na teoria linear de ondas.

## BIBLIOGRAFIA

CHAKRABARTI, S.K. Offshore structure modelling. Singapore : World Scientific, c1994. 470p. (Advanced series on ocean engineering , v. 9)

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)

FEYNMAN, R.P. Waves. In: The Feynman lectures on physics. Reading : Adison-Wesley, 1963. v.2, Cap. 40.

HORIKAWA, K. Coastal engineering : an Introduction to Ocean Engineering. Tokyo : University of Tokyo Press, 1978. 405 p.

ITTC - The Specialist Committee on Waves. Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC. Proceedings, V. II, Veneza, 2002.

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 EPUSP-São Paulo, 2003. 188 p.

MARTINS, J. A. de A.; SOUZA, C. A. G. F. Um tanque de ensaios em ondas para ensino e pesquisa exploratória. In: PANAMERICAN CONGRESS OF NAVAL ENGINEERING, 13., Caracas, 1993. Anais do IPEN'93. [São Paulo] : [s.n.], 1993.

PETROBRÁS - Petróleo Brasileiro S/A. Petrobrás em Números.. Disponível em <http://www.petrobras.com.br>. Acesso em 24/06/2005.

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.

WIEGEL, R. L. Oceanographical engineering. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1965. 535 p.