

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA VALIDAÇÃO DE UM TANQUE DE ONDAS NUMÉRICO

Leonardo Rangel Dias Ferreira ¹, leonardordf@hotmail.com
José Andrés Santisteban Larrea ^{1,2}, jasatisteban@vm.uff.br
Roger Matsumoto Moreira ^{1,3}, roger@vm.uff.br
Paolo Contim Nicolato ⁴, paolopcn@hotmail.com
Domingos de Farias Brito David ⁵, domingos@vm.uff.br

Universidade Federal Fluminense / Escola de Engenharia

¹PGMEC / ²TEE / ³TDT / ⁴TEQ / ⁵TEM

Rua Passo da Pátria 156, bl.D, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil, CEP 24210-240.

Resumo: Em reservatórios que transportam e armazenam líquidos, ondas com grande energia podem ser geradas a partir de uma simples excitação do sistema. Quando embarcados em um veículo, essas ondas podem eventualmente causar danos estruturais, podendo também dificultar a sua manobrabilidade. Em particular, o “sloshing” é um fenômeno de interesse, onde uma onda com grande quantidade de energia impacta sobre uma parede de um reservatório. Esse tipo de fenômeno tem sido estudado numericamente por alguns autores via método de volumes finitos (Moreira et al. 2006, Nicolato & Moreira 2009) e sua validação depende de experimentos. O presente trabalho objetiva desenvolver uma bancada de testes para a verificação experimental da formação de ondas não-lineares em um reservatório prismático para a validação dos resultados numéricos. A bancada consiste de uma plataforma móvel controlada por um motor elétrico que, por sua vez, é comandada por um computador para seguir determinadas trajetórias de deslocamento que gerem as ondas desejadas no reservatório. No experimento, são utilizadas interfaces eletrônicas que permitem um controle do tipo digital, implementado com auxílio do programa de desenvolvimento Labview. Os perfis da superfície livre são registrados na forma de fotos e filmes, para posterior comparação com as ondas simuladas. Resultados preliminares mostram uma boa concordância entre os perfis.

Palavras-chave: Fluidodinâmica computacional, escoamento com superfície livre, controle digital.

1. INTRODUÇÃO

A agitação de um reservatório parcialmente cheio de líquido pode gerar ondas gravitacionais extremamente energéticas. Este fenômeno, conhecido por *sloshing*, é um problema de autovalor clássico na Mecânica dos Fluidos. Grandes cientistas, como Poisson, Rayleigh e Kirchhoff, já realizaram investigações sobre este tema (para uma revisão completa, veja Lamb 1932) e, atualmente, vários livros tratam especificamente sobre esse assunto (Ibrahim 2005, Faltinsen & Timokha 2009).

Tanques de combustível em caminhões, aviões, espaçonaves e navios podem, sob certas circunstâncias, estar sujeitos a cargas harmônicas de alta amplitude, podendo alcançar modos de ressonância. Tais ondas, quando refletidas nas paredes do compartimento, impõem forças hidrodinâmicas que podem gerar um efeito desestabilizante. Esta interação entre o fluido e a estrutura pode causar a ruptura do container, instabilidade e perda de manobrabilidade em veículos que transportam substâncias líquidas. Navios petroleiros e plataformas do tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading Unit*) e FSO (*Floating Storage and Offloading Unit*) são exemplos de veículos que transportam tanques de carga de grande porte e que naturalmente estão sujeitos aos movimentos de jogo, afundamento, arfagem, deriva, avanço e guinada.

É de suma importância conhecer o mecanismo de formação dessas ondas, diagnosticando os principais modos de excitação do sistema que poderiam acarretar em impactos violentos de líquido nas estruturas do container e comprometer a estabilidade do veículo transportador. Neste sentido, pesquisadores da área têm atuado na identificação das frequências excitadoras responsáveis pelo *sloshing* e na modelagem da propagação dessas ondas não-lineares em meios confinados (Bredmose et al. 2003, Moreira et al. 2006, Kim 2007, Nicolato & Moreira 2009). Os efeitos do impacto dessas ondas nas paredes do reservatório também são de interesse do ponto de vista científico (Peregrine 2004).

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma bancada de testes para a verificação experimental da formação de ondas não-lineares em um reservatório prismático para a validação das simulações numéricas. A bancada consiste de uma plataforma móvel controlada por um motor elétrico que, por sua vez, é comandada por um computador

para seguir determinadas trajetórias de deslocamento que gerem as ondas desejadas no reservatório. No experimento, são utilizadas interfaces eletrônicas que permitem um controle do tipo digital, implementado com auxílio do programa de desenvolvimento Labview. Os perfis da superfície livre são registrados na forma de fotos e filmes, para posterior comparação com as ondas simuladas.

2. A BANCADA EXPERIMENTAL

A seguir são mostrados alguns detalhes dos componentes da bancada experimental. A Figura (1) mostra uma ilustração simplificada da bancada de testes montada.

2.1. Os componentes do experimento

A mesa móvel utilizada no experimento consiste de uma estrutura em aço com dimensões aproximadas de 1,5 x 1,0 m² com possibilidades de controle em dois graus de liberdade. Entretanto, neste trabalho apenas um grau de liberdade foi utilizado. Cada motor é conectado, através de polias, a um parafuso sem fim e a um mecanismo de deslocamento por esferas. Apoiado nesta mesa se encontra um reservatório retangular, de vidro, com dimensões internas de 393 x 194 x 265 mm³ (comprimento, largura e altura). Este foi selado hermeticamente para proteger os demais equipamentos do experimento e foi fixado de tal forma que o movimento horizontal da mesa desloque o fluido no reservatório de forma paralela ao eixo *x*.

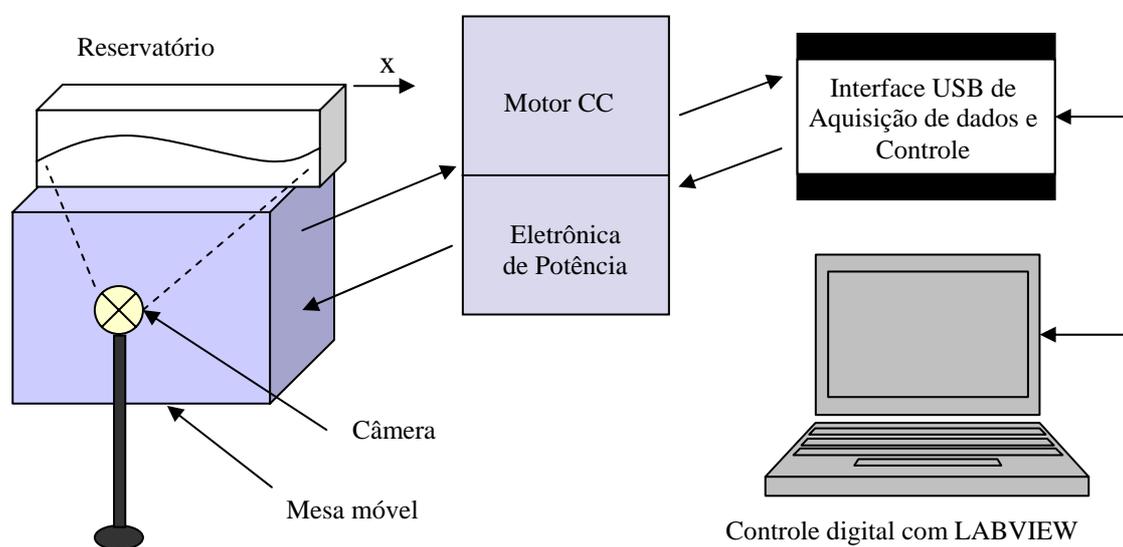


Figura 1. Bancada de testes.

Para acionar os motores que controlam a mesa foi construída uma placa eletrônica de potência que consiste de semi-drivers do fabricante Semikron e transistores do tipo IGBT na configuração de ponte completa, disparados por sinais binários gerados a partir de uma placa eletrônica auxiliar que converte um sinal analógico, fornecido pelo computador, para um sinal do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*). Uma terceira placa eletrônica do fabricante *National Instruments*, modelo USB-6001, foi utilizada como interface dos sinais digitais e analógicos entre as outras duas placas e o computador. Para a filmagem e fotografias do movimento das ondas geradas pelo experimento foi utilizada uma câmera de vídeo capaz de produzir fotografias a uma taxa de 33 quadros por segundo.

2.2. O sinal de excitação do reservatório

Um sinal de excitação senoidal foi utilizado como referência do movimento horizontal do reservatório e conseqüente geração de ondas,

$$x(t) = 11 \text{ sen } (5,236 t), \quad (1)$$

onde a amplitude de deslocamento da mesa é de 11 mm e a frequência do movimento utilizado foi de 5,236 radianos / segundo. Esse sinal possui uma frequência de 0,83 Hz e um período de 1,2 s, como ilustrado na Figura (2).

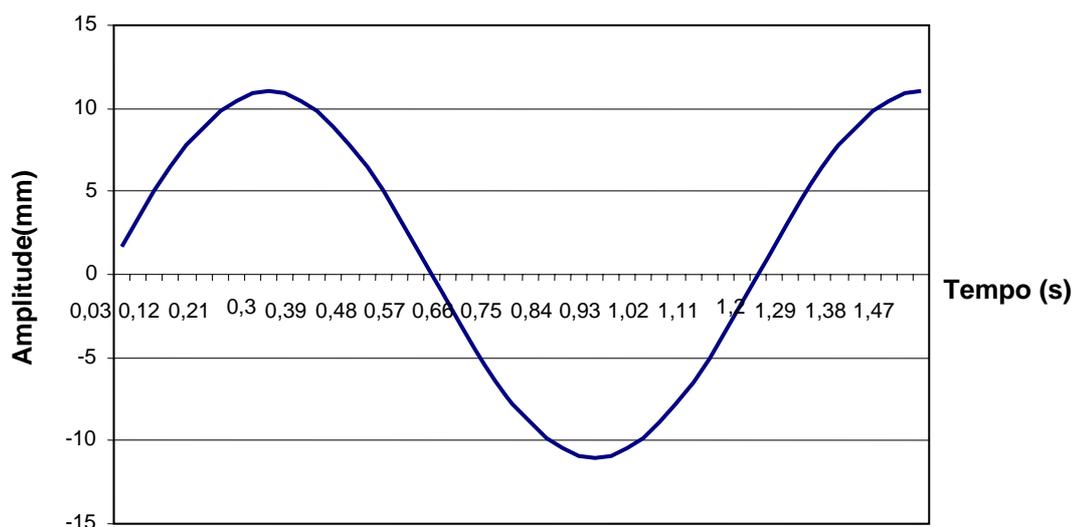


Figura 2. Referência de deslocamento do reservatório.

2.3. O sinal de controle da mesa

O sinal de controle da mesa, que é responsável pelo movimento da mesma nos dois sentidos de deslocamento desejados, na direção do eixo x , é do tipo PWM, onde o ciclo de serviço do sinal é mudado de acordo com o sinal de referência do posicionamento. Para uma tensão elétrica de aproximadamente 1,97V, o ciclo de serviço do PWM é de 50%. Nessa condição os transistores geram uma tensão média nula que mantém o motor parado. Para qualquer outro ciclo de serviço o motor gira no sentido desejado. A frequência de disparo dos IGBT's foi fixada em 2,0kHz.

2.4. O programa de controle da mesa

O programa de controle foi desenvolvido no ambiente Labview, onde foi possível implementar um sistema de controle de deslocamento em malha aberta. De uma forma simplificada, pode-se descrevê-lo da seguinte forma.

- Módulo para a geração da referência senoidal.

O primeiro módulo é o responsável pela geração do sinal de referência senoidal com a frequência e a amplitude desejadas. Nesse módulo o ajuste do ciclo de serviço do PWM é obtido somando a um bloco senoidal, de amplitude unitária, um patamar de tensão de 1,97V. A saída deste módulo e uma referência de tensão que pode mudar manualmente são as entradas de um multiplexador cuja saída é conectada ao seguinte módulo.

- Módulo de envio de sinais.

No segundo módulo, o bloco "DAQ Assistant" do Labview se encarrega de enviar o sinal de tensão gerado para os terminais da placa eletrônica USB da *National Instruments*. Nesse bloco se programa o canal de saída analógico utilizado.

- Interface gráfica.

A interface gráfica do programa permite a visualização do sinal senoidal de referência e o botão de controle de operação manual e automática.

As Figuras (3) e (4) ilustram o diagrama de blocos do programa principal e a respectiva interface gráfica.

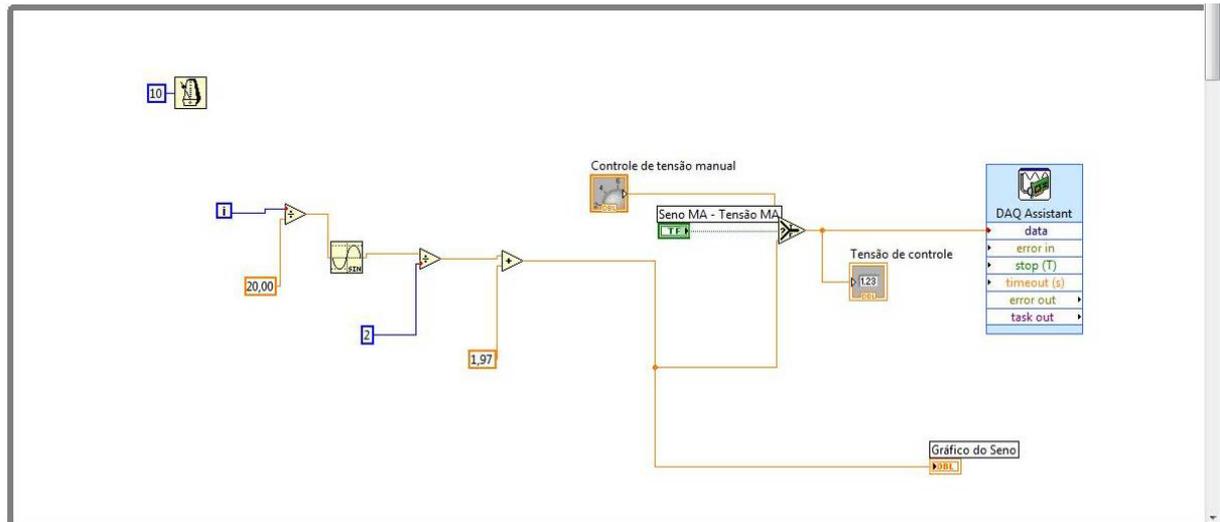


Figura 3. Diagrama de blocos do programa.

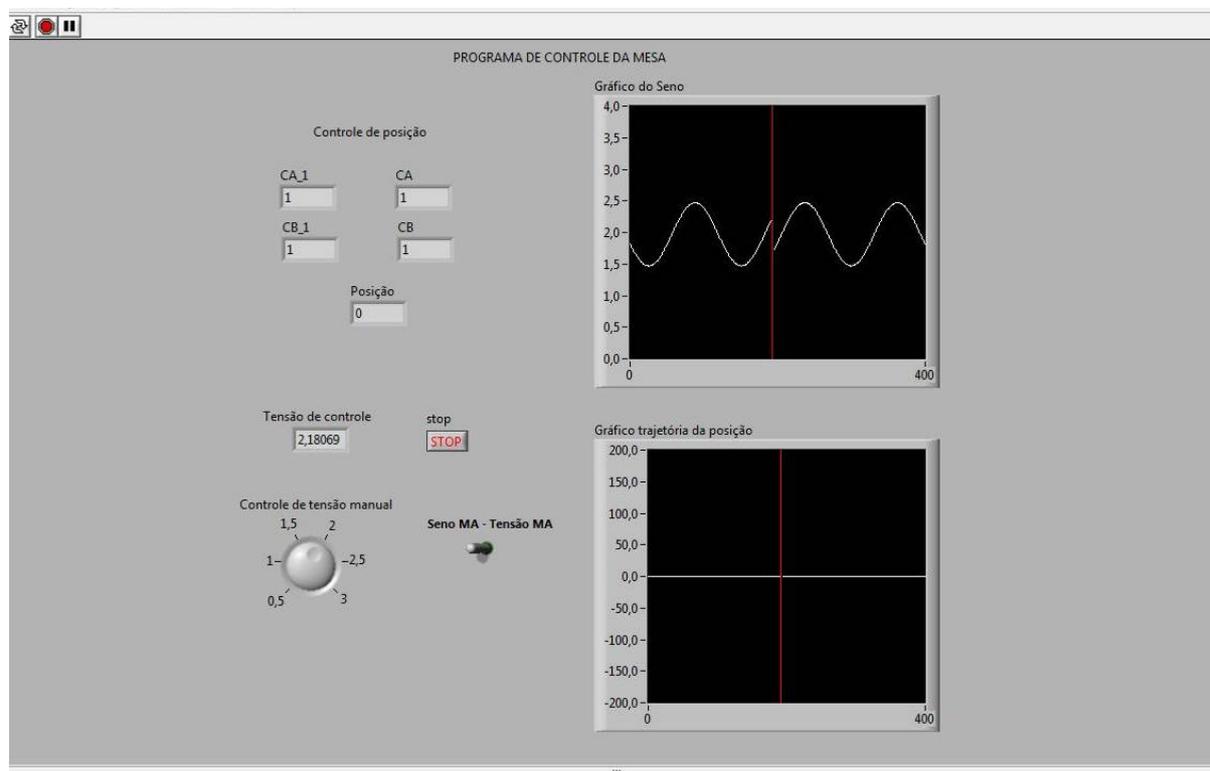


Figura 4. Interface gráfica do programa.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para o teste do movimento horizontal o reservatório foi preenchido com água até chegar a uma altura de 50 mm. Uma vez obtido o movimento descrito na Eq. (1) foi iniciada a captura de um vídeo, sendo que as imagens mostradas na Figura (5) correspondem aos instantes 2,55s, 2,85s e 3,03s. Claramente pode-se observar uma onda deslocando-se da esquerda para direita. Após o impacto da onda na parede do reservatório ocorre um jato vertical caracterizando o fenômeno “run up”. Em seguida, um movimento de queda livre é iniciado, formando uma depressão na superfície livre, que posteriormente se desloca da direita para a esquerda.

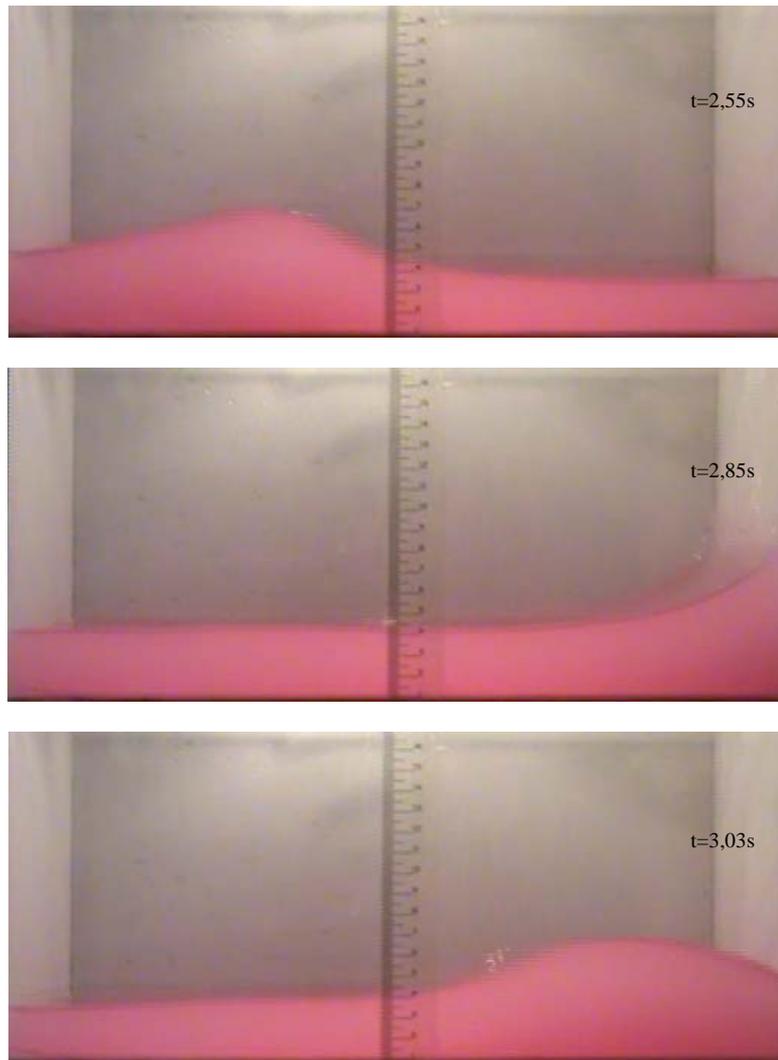


Figura 5. Três instantes em seqüência do movimento horizontal do reservatório.

4. MODELO NUMÉRICO

O movimento não-estacionário do escoamento com superfície livre é simulado numericamente através do código comercial de fluidodinâmica computacional ANSYS CFX. O problema de valor de contorno é resolvido via método de volumes finitos com um modelo homogêneo para a superfície livre. Neste modelo, as duas fases presentes dividem um campo comum de velocidades, além de outras variáveis relevantes como temperatura e turbulência, quando necessários. Isto permite algumas simplificações, resultando em um tempo computacional muito menor que outros modelos mais robustos. Para maiores detalhes sobre o modelo numérico, vide Moreira *et al.* (2006) e Nicolato & Moreira (2009).

Para descrever matematicamente o fenômeno, o domínio é escolhido tomando-se um plano vertical paralelo à direção de movimento do reservatório. O sistema de coordenadas é definido com o seu eixo sobre a superfície livre no estado inicial de repouso, de forma que o líquido ocupe a região $y \leq 0$. No modelo homogêneo, a fração volumétrica ϕ de cada fluido (água, ϕ_1 , e ar, ϕ_2) em cada volume de controle define as propriedades do fluido. O ar é considerado como um gás ideal e a água, incompressível. A equação completa de Navier-Stokes, que descreve o campo de velocidades do fluido, pode ser escrita da forma:

$$\frac{D(\rho\phi\vec{u})}{Dt} = \nabla \cdot (\phi\vec{T}) + \rho\phi\vec{f}, \quad (2)$$

onde \vec{T} é o tensor das tensões (representando a soma das tensões normais, viscosas e de expansão volumétrica), $\vec{u} = (u, v, w)$ representa o vetor velocidade, ρ é a massa específica do fluido e \vec{f} é a soma das forças externas atuantes, como, por exemplo, a força gravitacional $\vec{f} = (0, -g, 0)$. Para um fluido Newtoniano com viscosidade μ , viscosidade de expansão k e submetido a uma pressão dinâmica p_E , este tensor pode ser escrito como:

$$\vec{T} = -p_E \delta_{ij} + \left(k - \frac{2}{3}\mu\right) \nabla \cdot \vec{u} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (3)$$

Para o modelo homogêneo multifásico:

$$\rho = \sum_{l=1}^2 \phi_l \rho_l, \quad \mu = \sum_{l=1}^2 \phi_l \mu_l. \quad (4)$$

O balanço de massa é escrito da forma:

$$\frac{\partial(\phi\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi\rho\vec{u}) = 0 \quad (5)$$

A condição de contorno cinemática aplicada à superfície livre é baseada na ideia de que uma partícula da interface, descrita pelo vetor posição $\vec{r} = (x, y, t)$, permanece sobre o eixo x , de forma que:

$$\frac{D\vec{r}}{Dt} = \nabla\Phi, \quad (6)$$

em que Φ é o potencial de velocidades do fluido. A condição dinâmica da superfície livre é dada pela equação de Bernoulli:

$$\frac{D\Phi}{Dt} = \frac{1}{2} |\nabla\Phi|^2 - g y - \frac{p}{\rho}. \quad (7)$$

A condição de não-deslizamento foi aplicada em todas as paredes do reservatório. O fundo e as paredes verticais são considerados rígidos e impermeáveis:

$$\vec{u}|_{walls} = 0. \quad (8)$$

A Figura (6) exibe a malha utilizada no problema atual. Foi utilizado um maior refinamento na região próxima à superfície livre, com uma malha hexaédrica com 18480 nós e 9047 elementos. Por se tratar de uma malha 2D (apenas um elemento ao longo do eixo z), foram ajustadas condições de simetria nas regiões da malha normais a esse eixo. O topo foi considerado aberto, pois deste modo mescla as condições de entrada e saída. O movimento horizontal foi imposto em todo o domínio fluido. A simulação foi realizada em regime transiente, com passo de tempo de 0,005 s para um tempo total de 12 s.

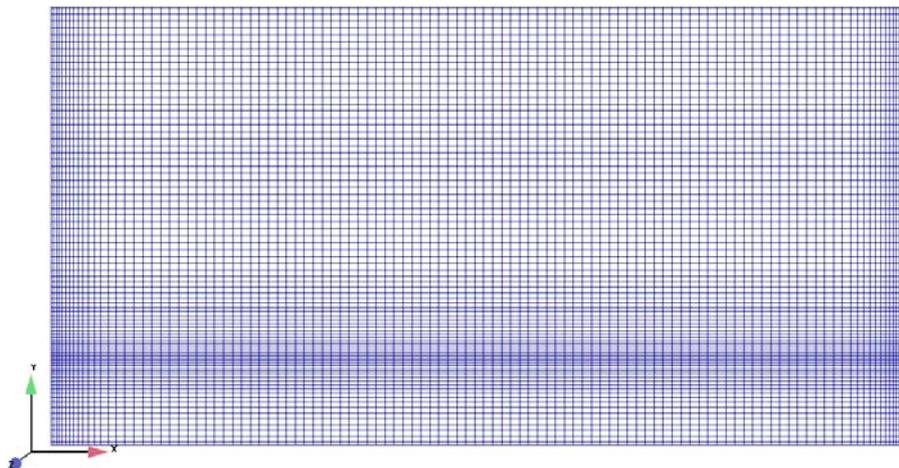


Figura 6. Malha hexaédrica utilizada nas simulações.

5. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

A Figura (7) compara cinco instantes de tempo extraídos do experimento (coluna à direita) com os resultados numéricos correspondentes obtidos utilizando-se o software ANSYS CFX (coluna à esquerda). Como pode ser observado, uma boa concordância entre os resultados é encontrada. Pode-se notar a formação de uma onda de baixa amplitude decorridos 0,51 s, que se choca contra a parede esquerda do reservatório após 1,20 s sem causar, no entanto, um jato vertical. No tempo 2,10 s a onda já se encontra com maior amplitude, agregando características não-lineares ao escoamento, atingindo a formação de “run up” em $t = 2,80$ s. Com a queda da coluna d’água ($t = 3,00$ s), há a formação de uma depressão próxima à parede vertical, evidenciada tanto no experimento quanto na simulação numérica. No entanto, uma maior investigação merece ser realizada considerando intervalos de tempo menores, principalmente quando da formação do jato vertical na parede.

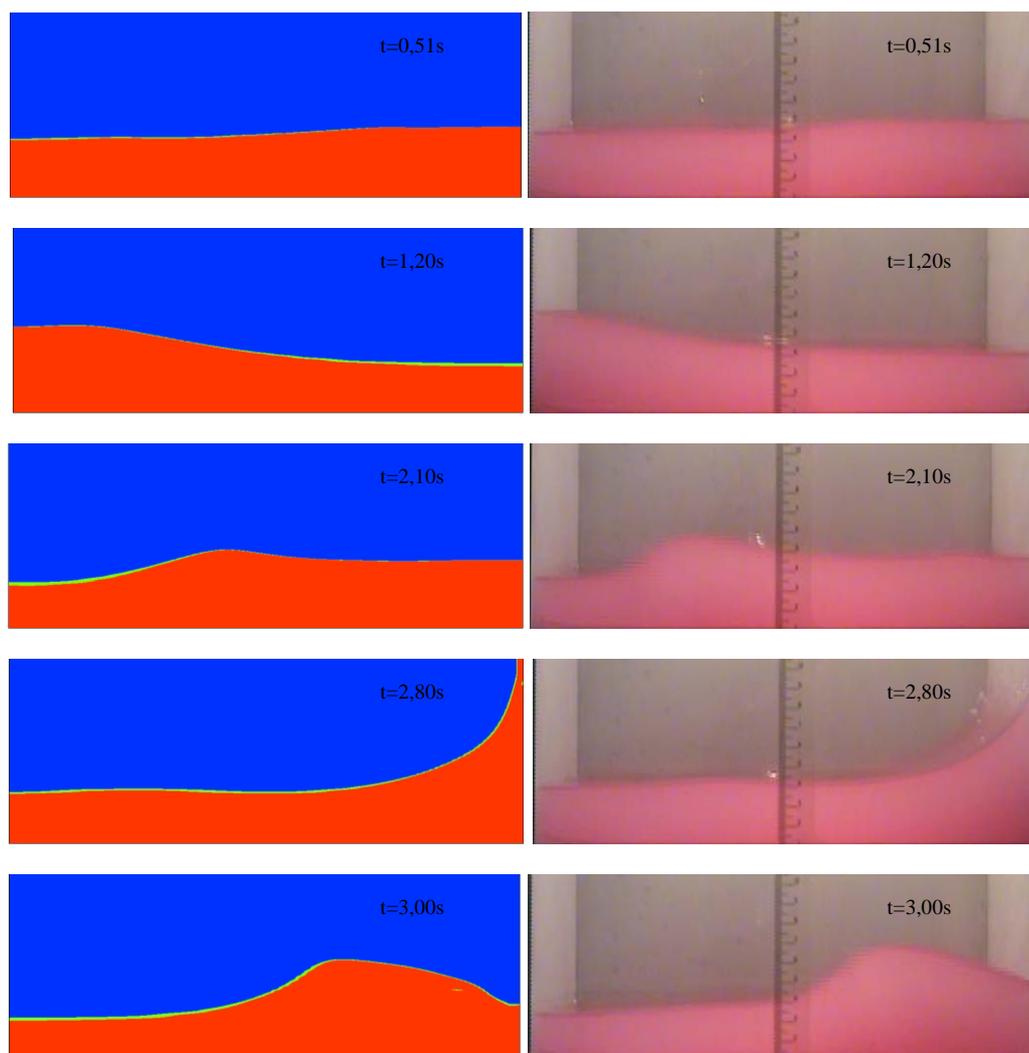


Figura 6. À esquerda, resultados numéricos obtidos com o ANSYS CFX. À direita, sequência de fotos extraída do experimento.

6. CONCLUSÕES

Os resultados numéricos para o movimento horizontal mostram uma boa concordância com os experimentos. Em particular, o modelo numérico utilizado no presente trabalho fornece uma boa descrição da evolução da superfície livre durante o “run up” na parede. Em um próximo passo, pretende-se simular o experimento H10 sugerido por Bredmose *et al.* (2003), que considera o *sloshing* horizontal. Este problema é relacionado completamente com o caráter não-linear do fenômeno e pretende-se registrar, através de sensores de pressão instalados no reservatório, o duplo pico de pressão característico dos fenômenos de *sloshing*. Esta bancada também pode ser utilizada como ferramenta didática no ensino de sistemas mecatrônicos, onde se combinam conhecimentos da engenharia mecânica, da engenharia elétrica e da informática.

7. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, à FAPERJ e à PETROBRAS pelo suporte financeiro para esta pesquisa. Os autores agradecem aos alunos Marcelo e Peter do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Fluminense. O primeiro autor dedica este trabalho ao Lucas Saucedo Ferreira e à Tatiana Pocuve Saucedo.

8. REFERÊNCIAS

- Bredmose, H., Brocchini, M., Peregrine, D.H. and Thais, L., 2003, "Experimental investigation and numerical modelling of steep forced water waves." J. Fluid Mech., vol. 490, pp.217-249.
- Faltinsen, O.M. and Timokha, A.N., 2009, "Sloshing." Cambridge University Press.
- Ibrahim, R.A., 2005, "Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications." Cambridge University Press. 948p.
- Kim, Y., 2007, "Experimental and numerical analyses of sloshing flows." J. Eng. Math., v.58, pp.191-210.
- LABVIEW 7 Express, 2003, National Instruments. USA.
- Lamb, H., 1932, "Hydrodynamics." Cambridge University Press.
- Moreira, R.M., Mendes, A.A.O. and Bacchi, R.D.A., 2006, "The generation and propagation of nonlinear waves in a reservoir." Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Curitiba. pp.1-8.
- Nicolato, P.C. and Moreira, R.M., 2009, "Numerical Modeling of Water Wave Impact on Reservoirs." Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering. Gramado. pp.1-9.
- Ogata, K., 2003, "Engenharia de Controle Moderno." Editora Prentice Hall do Brasil.
- Peregrine, D.H., 2004, "Water Wave Impact on Walls." Ann. Rev. Fluid Mech., v.35, pp.1-22.
- Philips, C.L., 1997, "Sistemas de Controle e Realimentação." Makron Books.
- Queiroz, M.T., 2007, "Automação de Mesa Coordenada Destinada a Máquina Fresadora CNC." Dissertação de Mestrado. UFF. Niterói.
- Rashid, M.H., 1993, "Power Eletronics Circuits, Devices, and Applications." Prentice-Hall, Inc.
- Tocci, R.J., 2003, "Sistemas Digitais." Ed. Pearson Prentice Hall.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

DEVELOPMENT OF A SHAKING TABLE FACILITY FOR A NUMERICAL WAVE TANK VALIDATION

Leonardo Rangel Dias Ferreira ¹, leonardordf@hotmail.com

José Andrés Santisteban Larrea ^{1,2}, jasatisteban@vm.uff.br

Roger Matsumoto Moreira ^{1,3}, roger@vm.uff.br

Paolo Contim Nicolato ⁴, paolopen@hotmail.com

Domingos de Farias Brito David ⁵, domingos@vm.uff.br

Fluminense Federal University / School of Engineering

¹ PGMEC / ² TEE / ³ TDT / ⁴ TEQ / ⁵ TEM

Rua Passo da Pátria 156, bl.D, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil, CEP 24210-240.

Abstract: Energetic waves may be formed when liquid storage tanks are shaken under certain frequencies. These waves may cause structural damage or loss of maneuverability in vehicles. In particular wave sloshing occurs when an energetic wave hits the walls of a tank. This phenomenon has been studied numerically by some authors via the finite volume method (Moreira et al. 2006, Nicolato & Moreira 2009) though its validation still relies on experiments. The present work aims to develop a shaking table facility for wave sloshing analysis and validation of the numerical simulations. The shaking table consists of a horizontal platform connected to an electrical engine, which is controlled by a computer, leading to certain displacements and generating the desired free surface waves at the reservoir. Electronical interfaces are used for digital control of the table and implemented under the Labview environment. Free surface profiles are registered in the form of photos and films for comparison with the simulated waves. Preliminary results show a good agreement between the free surface profiles.

Keywords: Computational fluid dynamics, free surface flow, digital control.