



ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE SLOSHING EM TANQUE PRISMÁTICO

Liang-Yee Cheng

cheng.yee@poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo.

Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2 no. 83, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil.

Rubens Augusto Amaro Junior

Pedro Cardozo de Mello

rubens.amaro@usp.br

pedro.mello@tpn.usp.br

Tanque de Provas Numérico, Universidade de São Paulo.

Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508-030, São Paulo, SP, Brasil.

Cezar Augusto Bellezi

Kazuo Nishimoto

cbellezi@tpn.usp.br

knishimo@usp.br

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo.

Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508-030, São Paulo, SP, Brasil.

Resumo. No projeto de tanques de Gás Natural Liquefeito (GNL) o estudo do fenômeno de sloshing é extremamente importante. Isso porque os esforços cíclicos de impactos nas paredes internas do tanque podem causar danos nos revestimentos ou estruturas internas do tanque ou interferir na dinâmica da embarcação. Para o entendimento do fenômeno, procedimentos experimentais devem ser realizados, além de gerar dados para validação de métodos numéricos utilizados para estudo do fenômeno. Neste trabalho são apresentados os procedimentos experimentais para realização de ensaios de sloshing com modelo de tanque prismático, assim como a modelagem do fenômeno hidrodinâmico altamente não linear por meio de um método de simulação baseado em partículas denominado de Moving Particle Simulation (MPS). São realizadas comparações entre resultados experimentais e resultados obtidos por equações teóricas e modelo numérico, considerando dois níveis de preenchimento e movimento de roll. Valores experimentais, teóricos e numéricos de pressão dinâmica em

função das frequências aplicadas e pressão ao longo do tempo, são comparados para as diferentes situações.

Palavras-chave: *Sloshing, Experimental, Numérico, Moving Particle Simulation, Método de partículas*

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento do mercado mundial de energia tem exigido o transporte de grandes volumes de gás natural sob a forma de gás natural liquefeito (GNL). Isso tem levado a construção de transportadores de GNL enormes com capacidade de mais de 200.000 metros cúbicos. Por outro lado, processos de produção, descarga e regaseificação exigem a operação com pequenos volumes de GNL, resultando em preenchimentos parciais do tanque. Para condições de preenchimento parciais, o fluido dentro do tanque faz um movimento de vaivém, conhecido como fenômeno de *sloshing*. No projeto de navios de transporte de GNL, o estudo do *sloshing* é essencial devido ao risco de explosão e de fratura por fragilização dos membros estruturais em contato com a carga interna a temperatura criogênica, em caso de aparecimento de uma pequena fissura. Para a determinação das pressões nas paredes dos tanques e forças e momentos gerados nos navios e sistemas flutuantes, métodos experimentais ou numéricos são imprescindíveis para verificação e dimensionamento estrutural. Tendo em vista a sua importância, nas últimas três décadas, diversos estudos experimentais, assim como um desenvolvimento constante de modelagens computacionais do fenômeno foram realizados, Mikelis et al. (1984), Arai (1984), Arai et al. (1992), Arai et al. (2005), Kim et al. (2006), Diebold et al. (2011), Kim et al. (2013).

Neste trabalho são apresentados os procedimentos experimentais para realização de ensaios de *sloshing* com modelo de tanque prismático e são realizadas comparações entre resultados experimentais e resultados obtidos por equações teóricas e modelo numérico baseado no método *Moving Particle Simulation* (MPS), proposto por Koshizuka et al. (1995). O tanque prismático é submetido a movimento de *roll* para dois níveis de preenchimento. Valores experimentais, teóricos e numéricos de pressão dinâmica em função das frequências aplicadas e pressão ao longo do tempo, são comparados para as diferentes situações.

2 APARATO EXPERIMENTAL

Os principais equipamentos do aparato experimental são apresentados na Figura 1.

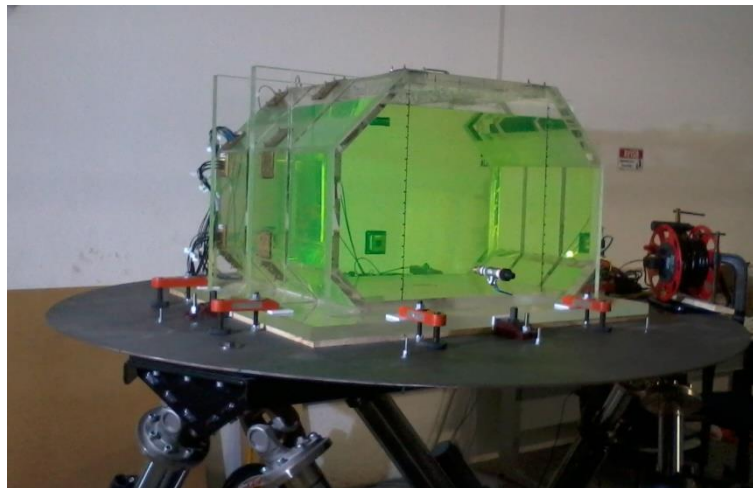


Figura 1. Aparato experimental.

Um modelo de acrílico com espessura de 30 mm, e escala 1:50 de tanque prismático de LNG, foi utilizado em todos os ensaios experimentais. Bases de latão (*clusters* de sensores)

foram utilizadas para fixação de 1, 5 ou 9 sensores de pressão piezoelétricos em diferentes posições do modelo, permitindo o registro temporal de pressão nessas posições. A Figura 2 apresenta as dimensões do modelo assim como as informações sobre o posicionamento dos *clusters* de sensores analisados nesse trabalho, C9-1, C5-2 e C5-3, com a numeração utilizada para cada sensor. O *cluster* C9-1 tem 9 sensores e os *clusters* C5-2 e C5-3 têm 5 sensores, espaçados de 10 mm.

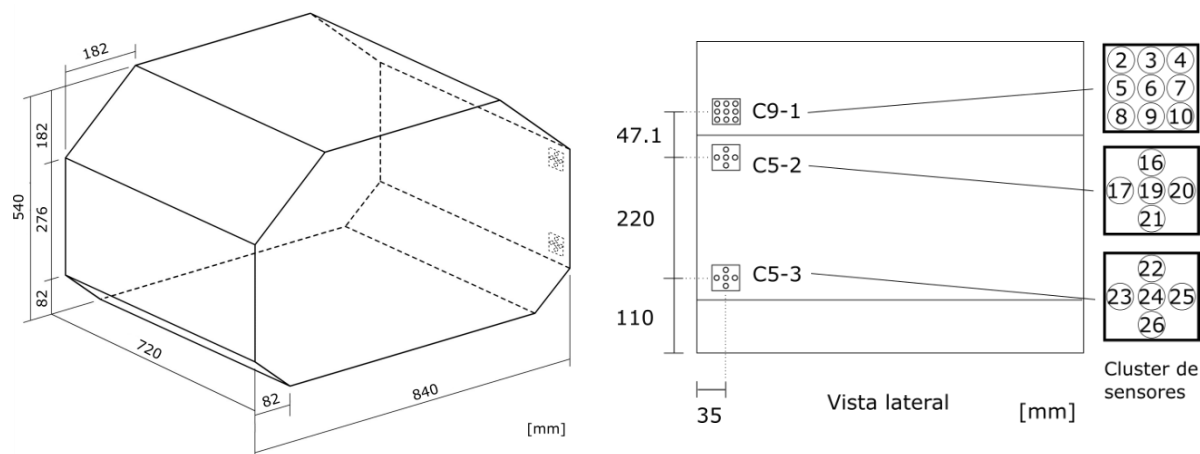


Figura 2: Dimensões e posições dos clusters de sensores.

Uma plataforma móvel (*hexapod*) foi utilizada para a movimentação forçada do modelo em 6 graus de liberdade. Um sistema de aquisição de dados foi utilizado para recepção e envio dos sinais para o software de registro e processamento de dados.

2.1 Sensores de pressão

Os sensores de pressão utilizados nos experimentos são do tipo Kistler 211B6 piezoelétricos de quartzo. A banda de resposta dos sensores é de 50 kHz com fundo de escala de 50 PSI. A face de medição tem 5 mm de diâmetro em aço inox. O sensor tem compensação de aceleração, frequência natural elevada de 250 kHz e saída em corrente amplificada de alta tensão e baixa impedância do tipo IEPE (*integral electronic piezo-electric*).

O tipo de montagem dos sensores é faceada com a superfície do tanque prismático (*flush mounting*) à se evitar a descontinuidade superficial com a consequente atenuação da pressão medida.

2.2 Sistema de aquisição de dados

Devido ao tipo de montagem do experimento foi utilizado um sistema de aquisição embarcado na mesa do *hexapod*, acompanhando o movimento do tanque. O sistema planejado é imune ao movimento e a quantidade e comprimento dos cabos foi bastante reduzida melhorando a questão de ruídos elétricos. Os 32 sensores de pressão tiveram os sinais medidos por 2 módulos HBM MX-1601 com entrada IEPE. O sistema foi configurado para adquirir os sinais à 19.2 kHz sincronamente em todos os canais com 24 bits de resolução. O ruído elétrico observado foi extremamente baixo o que permitiu que a filtragem por hardware na aquisição de dados não fosse utilizada. Dessa maneira, picos de pressão com tempo de subida pequeno são lidos sem mascaramento por filtros.

3 MÉTODO NUMÉRICO

As equações governantes para escoamentos incompressíveis são representadas pela lei da conservação de massa e do momento:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica, $\vec{v}$ o vetor velocidade, P a pressão, ν a viscosidade cinemática e $\vec{f}$ o vetor força externa.

No método MPS, todos os termos das equações governantes, representados por operadores diferenciais, são substituídos por operadores diferenciais discretos em uma distribuição de nós irregulares (Isshiki, 2011), derivados de um modelo de interação entre partículas. Para cada partícula i , a influência de uma partícula vizinha j é definida pela função peso ω_{ij} obtida por:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} \frac{r_e}{\|\vec{r}_{ij}\|} - 1 & \|\vec{r}_{ij}\| \leq r_e \\ 0 & \|\vec{r}_{ij}\| > r_e \end{cases} \quad (3)$$

onde r_e é o raio efetivo, que estabelece quais partículas j devem ser consideradas no cálculo das grandezas físicas de i , e r_{ij} é a distância entre as partículas i e j .

Para cada partícula i , a somatória dos pesos de todas as partículas vizinhas j , é definido como a densidade do número de partículas n_i :

$$n_i = \sum_{j \neq i} \omega_{ij} \quad (4)$$

Desta forma, para uma função escalar ϕ , os operadores gradiente e laplaciano são definidos pelas Eqs. (5) e (6), respectivamente:

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n_{\max}^0} \sum_{j \neq i} \frac{(\phi_j - \phi_i)}{\|\vec{r}_{ij}\|^2} \vec{r}_{ij} \omega_{ij} \quad (5)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n_{\max}^0} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) \omega_{ij} \quad (6)$$

onde d é a dimensão espacial, $n_{\max}^0$ é o valor inicial máximo de n_i e λ é um parâmetro de correção, que representa o crescimento da variância, e pode ser calculado como:

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} \|\vec{r}_{ij}\|^2 \omega_{ij}}{\sum_{j \neq i} \omega_{ij}} \quad (7)$$

Para o escoamento incompressível, um algoritmo semi-implícito é utilizado no método MPS. Inicialmente, velocidade e posição são calculadas explicitamente, considerando os termos de viscosidade e força externa da equação de conservação do momento, Eq. (2). Após os cálculos da parte explícita, a pressão de todas as partículas é calculada pela equação de Poisson para a pressão:

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{t+\Delta t} - \alpha \frac{\rho}{\Delta t^2} P_i^{t+\Delta t} = -k \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n_i^* - n_{\max}^0}{n_{\max}^0} \quad (8)$$

onde n_i^* é a densidade do número de partículas calculada após os deslocamentos das partículas na fase explícita, α é o coeficiente de compressibilidade artificial e k é o coeficiente de relaxação. Os coeficientes α e k são utilizados para melhorar a estabilidade do método computacional. Além disso, o gradiente de pressão também é modificado para melhora da estabilidade do MPS (Koshizuka et al., 1996):

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n_{\max}^0} \sum_{j \neq i} \frac{(P_j - \hat{P}_i)}{\|\vec{r}_{ij}\|^2} \vec{r}_{ij} \omega_{ij} \quad (9)$$

onde $\hat{P}_i$ é a pressão mínima entre os vizinhos da partícula i , garantindo exclusivamente forças de repulsão, evitando sobreposição entre partículas.

Por fim, a velocidade das partículas é atualizada, considerando somente o termo do gradiente de pressão, e a nova posição das partículas é obtida.

A identificação das partículas de superfície livre é feita com base no número de densidade de partículas. Uma partícula é definida como partícula de superfície livre e sua pressão igualada a zero, quando seu número de densidade de partículas n_i é menor do que βn_i . O valor de β utilizado neste trabalho é de 0.85.

As paredes sólidas são representadas por três camadas de partículas fixas. As partículas em contato com fluido são denominadas partículas de parede, com suas pressões calculadas pela equação de Poisson para a pressão, Eq. (8), juntamente com as partículas de fluido. As partículas que formam as outras duas camadas são denominadas partículas *dummy*. As partículas *dummy* são utilizadas para garantir o cálculo correto do número de densidade de partículas nas partículas de parede, não sendo calculada a pressão destas partículas.

4 RESULTADOS

4.1.1 Drift térmico

Sensores piezoelétricos são vulneráveis ao problema de *drift* térmico, onde uma variação súbita de temperatura na face de medição ou no corpo do sensor interfere nos valores registrados por ele. Impactos de água em um sensor normalmente no ar podem causar tal variação térmica. O corpo do sensor não deve estar em contato direto com água e preferencialmente acoplado mecanicamente a algo de grande massa térmica para que não sofra variação térmica ao longo do experimento, no caso, as bases de latão tendem a minimizar tais variações térmicas no corpo do sensor durante o experimento.

A face de medição dos sensores também sofre com variações bruscas de temperatura. Uma alternativa para isolar termicamente a face de medição é colar fita adesiva sobre ela, desde que

a fita adesiva não interfira na pressão medida pelo sensor. Para verificação do problema na face de medição, foi analisado o registro temporal de pressão de sensores sujeitos a um impacto de onda. Três sensores foram posicionados em uma placa, com um sensor de referência sem proteção e dois sensores protegidos em suas faces, sendo um com fita DuPont™ Kapton® e outro com fita Vinil isolante elétrica na cor preta. A placa de sensores foi posicionada em um ângulo de 20° com a superfície da água, e sensores na mesma altura, como apresentado na Figura 3. Em repouso os sensores estavam fora da água, quando as ondas incidiam na placa os impactos eram então medidos.

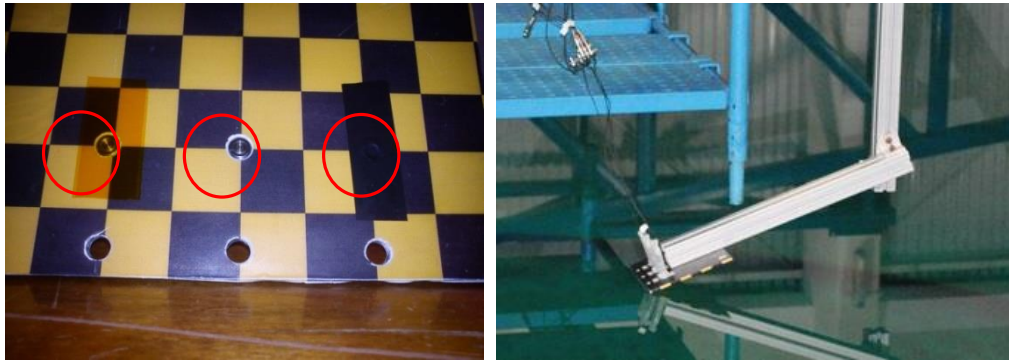


Figura 3. Placa com sensores protegido com fita DuPont™ Kapton®, sem proteção e fita Vinil (esquerda) e suporte com placa de sensores acima da superfície da água (direita).

Uma onda foi induzida duas vezes em direção a placa de sensores, fornecendo os registros temporais de pressão para a proteção com fita DuPont™ Kapton® apresentado na Figura 4 e fita Vinil na Figura 5. Analisando os registros temporais de pressão, nota-se a supressão do *drift* térmico para as duas proteções utilizadas sem interferência no registro dos picos de pressão. Além disso, verificou-se uma melhor supressão do *drift* térmico para a proteção com fita Vinil. Dessa forma, todos os sensores utilizados nos ensaios experimentais foram protegidos com fita Vinil na sua face.

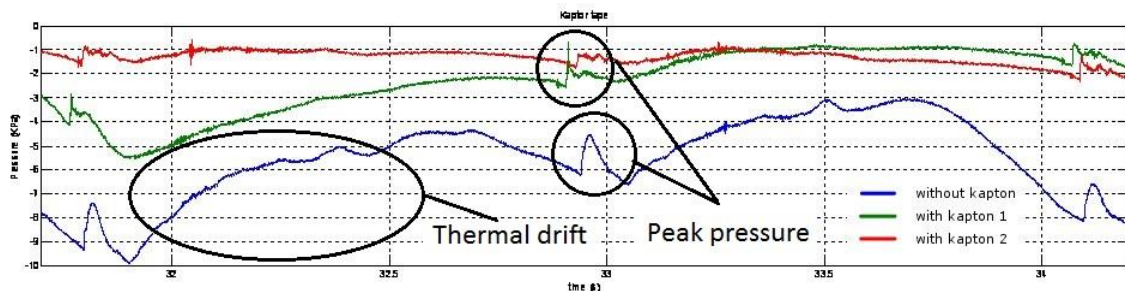


Figura 4. Teste com sensores sem proteção (azul) e com DuPont™ Kapton® (vermelha e verde).

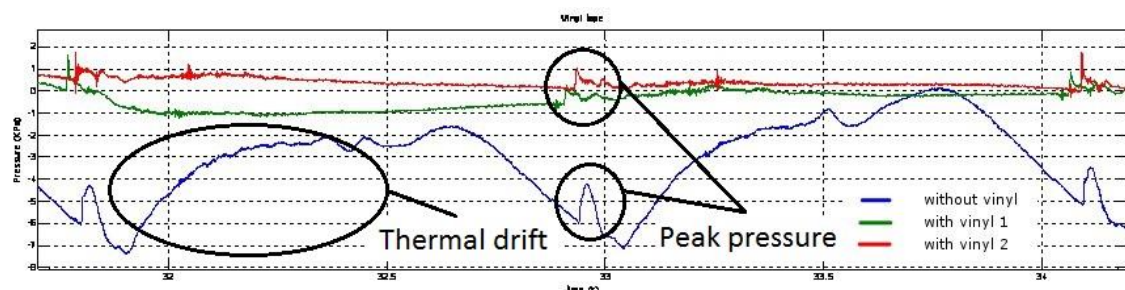


Figura 5. Teste com sensores sem proteção (azul) e com fita Vinil (vermelha e verde).

4.1.2 Resultados experimentais e numéricos

Ensaio experimentais realizados em longos intervalos de tempo geralmente fornecem dados mais confiáveis do que ensaios de curtos intervalos de tempo. No entanto, devido à alta taxa de aquisição (19.2 kHz), diferentes condições de ensaios e quantidade de sensores, os ensaios podem demandar um tempo demasiado e gerar uma enorme quantidade de dados. Dessa forma, para termos um trabalho mais eficiente, e garantia de resultados confiáveis, foi analisada a influência do tempo de ensaio, ou seja, número mínimo de ciclos, sobre o histograma dos picos de pressão dinâmica em alguns sensores, quando o modelo era submetido a movimentos senoidais regulares. As séries temporais foram divididas em intervalos menores com obtenção dos seus histogramas de pressão, considerando os mesmos valores extremos de pressão máxima e mínima, apresentado na série temporal com número máximo de ciclos. Para comparação dos histogramas, foram comparados os coeficientes de correlação entre o intervalo base (série temporal com número máximo de ciclos) e intervalos menores (série temporal com número menor de ciclos), para uma mesma condição de ensaio. Para o caso experimental, que sofre mais com fatores externos, foi considerado um valor de coeficiente de correlação acima de 0.95 para escolha do número mínimo de ciclos. Dessa forma, foi adotado o número mínimo de 300 ciclos nos ensaios experimentais. Para o caso numérico, foi considerado um valor de coeficiente de correlação acima de 0.80. Dessa forma, foi adotado o número mínimo de 20 ciclos nos ensaios experimentais.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de simulação utilizados em todos os casos simulados com o MPS.

Tabela 1. Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Passo de tempo (Δt)	0.00025 s
Distância entre partículas (Δx)	0.005 m
Raio efetivo (r_e)	2.1 Δx
Superfície livre (β)	0.85
Coeficiente de relaxação (k)	0.01
Coeficiente de compressibilidade (α)	10^{-8} ms ² /kg
Densidade do fluido (ρ)	1000 kg/m ³
Viscosidade cinemática (ν)	10^{-6} m ² /s

Para a comparação entre os resultados experimentais e numéricos, foram considerados movimentos forçados de *roll*, com rotação ao redor do eixo longitudinal passando pelo centro de rotação CR, localizado na metade das dimensões da largura e altura do modelo. A Figura 6 apresenta a posição do centro de rotação CR.

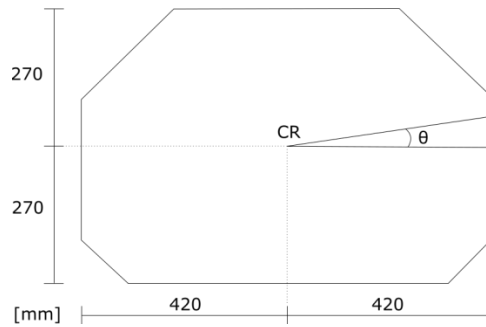


Figura 6: Posição do centro de rotação CR.

A Tabela 2 apresenta os casos comparados, com amplitude de rotação θ de 4 graus e níveis de preenchimento de 50% e 75% da altura do modelo $H = 540$ mm.

Tabela 2. Condições dos casos comparados.

Preenchimento [%H]	Amplitude ($^{\circ}$)
50	4
75	4

Primeiramente foi analisada a curva Pressão x Frequencia, para comparação da distribuição dos valores experimentais e numéricos. Além disso, observaram-se as frequências de ressonância de *sloshing* obtidas pelos valores experimentais e numéricos em relação ao valor teórico da frequência de ressonância de *roll*, definido para geometrias retangulares. Para essa comparação, foi utilizada a média dos picos de pressão dinâmica dos 5 sensores do cluster C5-3.

A Figura 7 apresenta um exemplo de serie temporal e picos de pressão dinâmica obtidos pelos resultados experimentais e numéricos.

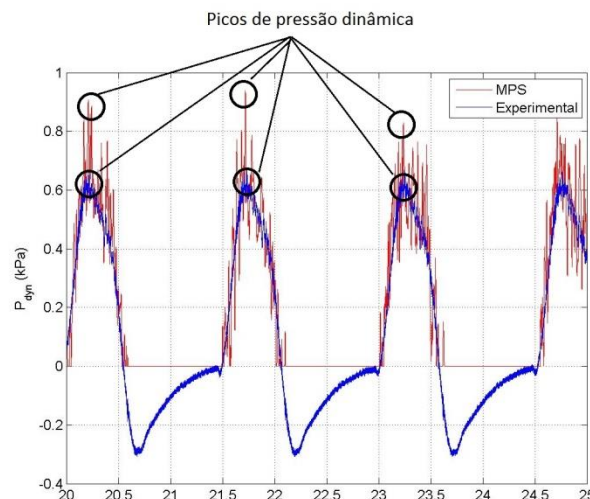


Figura 7. Exemplo de uma série temporal e picos de pressão dinâmica.

Graficamente são apresentados os valores das médias dos picos de pressão dinâmica adimensionalizadas pelo deslocamento hidrodinâmico de rotação $\rho g 0.5L\theta$, onde $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ é a densidade da água, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ é a aceleração da gravidade, $L = 840$ mm

é a largura do modelo e $\theta = 0.0698 \text{ rad}$ (4 graus) é a amplitude de rotação. As frequências foram adimensionalizadas pela frequência de ressonância de *roll* ω_o , para cada preenchimento h , obtida pela equação:

$$\omega_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g\pi}{L} \tanh \frac{\pi h}{L}} \quad (10)$$

Os resultados da média dos 5 sensores do *cluster* C5-3 para os preenchimentos de 50%H e *cluster* C5-2 para o preenchimento de 75%H, e amplitude de rotação de 4 graus são apresentados na Figura 8. Os valores médios dos picos de pressão dinâmica e desvio padrão dos resultados experimentais são apresentados juntamente com resultados numéricos do MPS.

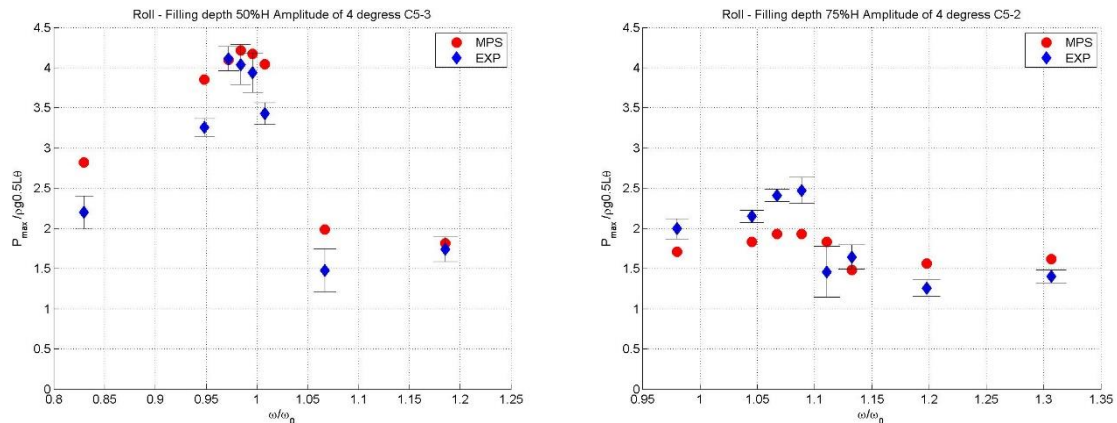


Figura 8. Média dos picos de pressão dinâmica x frequência (adimensionais). Amplitude de 4 graus. Cluster C5-3 para o preenchimento de 50%H (esquerda) e cluster C5-2 para 75%H (direita).

Para o preenchimento de 50%H e amplitude de 4 graus, resultados experimentais e numéricos, do *cluster* C5-3, indicam ressonância próximo de $\omega/\omega_o = 0.97$, ou seja, próximo do valor teórico de ressonância de *sloshing* para um tanque retangular. No preenchimento de 50%H, a superfície do fluido encosta nas paredes laterais do modelo, sem presença dos chanfros, ou seja, o modelo se comporta como um tanque de seção retangular. Para valores afastados da ressonância, $\omega/\omega_o = 0.83$ e $\omega/\omega_o = 1.06$, foram observados valores médios dos picos de pressão dinâmica maiores para os resultados numéricos obtidos pelo MPS. Essa diferença pode ter ocorrido pela oscilação numérica dos resultados do MPS, inerente aos métodos numéricos.

Para o preenchimento de 75%H, foi observada uma concordância razoável entre os resultados experimentais e numéricos para o *cluster* C5-2. Os resultados, numéricos e experimentais, parecem indicar ressonância de *roll* próximo de $\omega/\omega_o = 1.10$. Como a superfície do fluido encosta na região chanfrada da parede, o modelo tem uma largura menor do que um modelo de seção retangular, e as frequências naturais experimentais e numéricas acabam sendo um pouco maiores do que o valor teórico esperado para um modelo retangular. Para os valores na faixa de frequências de $1.00 < \omega/\omega_o < 1.10$, os resultados obtidos pelo MPS mostraram valores mais baixos do que os valores experimentais, ou seja, um possível amortecimento numérico do MPS nessa região.

Intervalos das séries temporais de pressão dinâmica P_{dyn} , obtidos pelos ensaios experimentais e resultados numéricos do MPS, foram comparados para verificar o padrão da curva de pressão e picos de pressão dinâmica em diferentes condições de *sloshing*.

A Figura 9 apresenta as séries temporais de pressão dinâmica, obtidas de forma experimental e numérica, para o preenchimento de 50%H, frequência de 0.84 Hz e amplitude de 4 graus, para o sensor 24, submerso durante todo o ensaio, e sensor 19, inicialmente fora d'água. As curvas de pressão experimentais e numéricas apresentaram boa concordância em relação ao formato da curva e picos de pressão para o sensor 24. Para o sensor 19, uma boa concordância entre valores experimentais e numéricos foram observados em relação aos picos de pressão e formato da curva, com exceção de alguns valores negativos de pressão registrados nos ensaios experimentais. Devido a limitação do MPS no cálculo de pressão total (estática + dinâmica) negativa, esses valores experimentais não foram observados nos resultados do MPS.

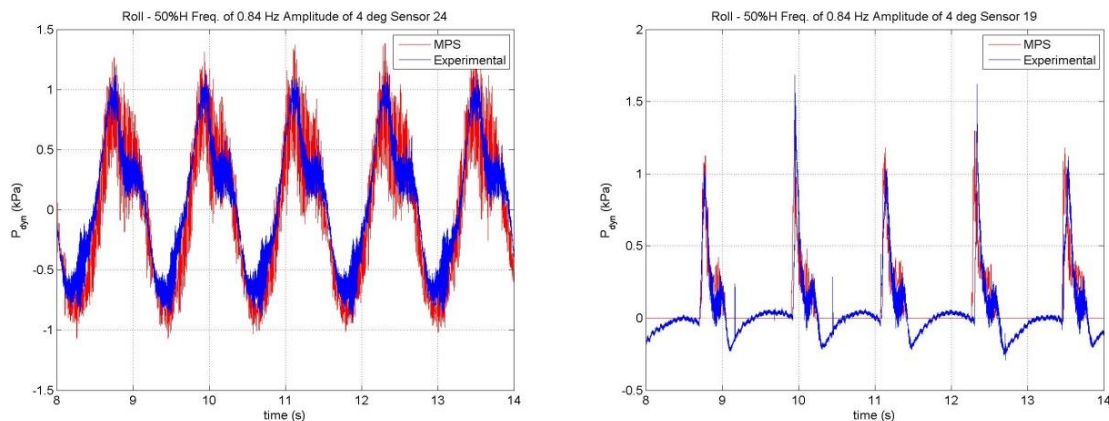


Figura 9. Série temporal de pressão dinâmica para preenchimento de 50%H, frequência de 0.84 Hz e amplitude de 4 graus. Sensor 24, submerso, (esquerda) e sensor 19, fora d'água, (direita).

A Figura 10 apresenta as séries temporais de pressão dinâmica, obtidas de forma experimental e numérica, para o preenchimento de 75%H, frequência de 1.00 Hz e amplitude de 4 graus, para o sensor 19, submerso durante todo o ensaio, e sensor 6, inicialmente submerso, mas variando seu estado de contato e não contato com a água durante o movimento de *roll*. As curvas de pressão experimentais e numéricas apresentaram boa concordância em relação ao formato da curva para o sensor 19 e sensor 6. Valores um pouco mais baixos de picos de pressão positiva foram observados para os resultados obtidos pelo MPS. Assim como observado no preenchimento de 50%H para o sensor 19, valores de pressão dinâmica negativa para o sensor 6, não foram observados nos resultados do MPS, devido a limitação do MPS no cálculo de pressão total (estática + dinâmica) negativa.

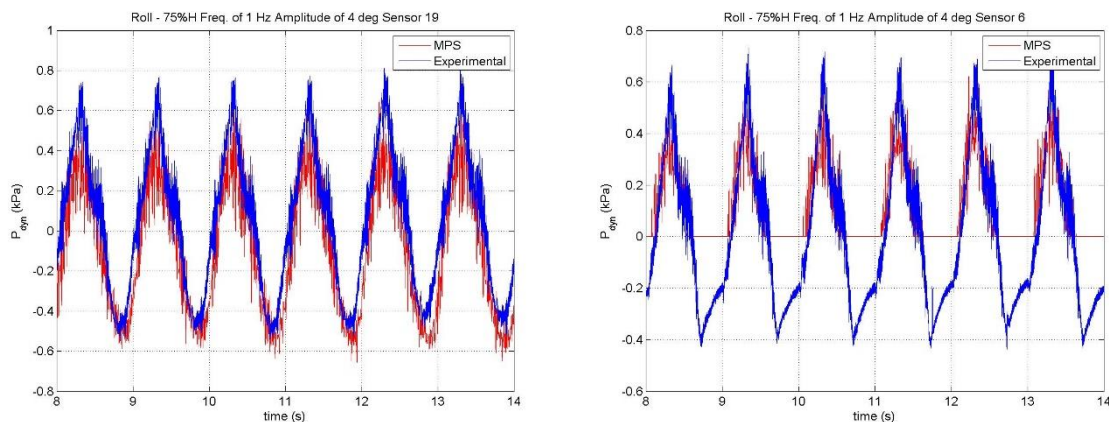


Figura 10. Série temporal de pressão dinâmica para preenchimento de 75%H, frequência de 1.00 Hz e amplitude de 4 graus. Sensor 19, submerso, (esquerda) e sensor 6, submerso e fora d'água, (direita).

A Figura 11 apresenta uma sequência de imagens obtidas pelo ensaio experimental e MPS para o preenchimento de 50%H, frequência de 0.82 Hz e amplitude de 4 graus. Visualmente, o ensaio experimental e simulação numérica apresentaram um comportamento semelhante do fluido, em relação a sua fase, altura da superfície e maiores impactos a partir do instante $t = 9.15$ s, com presença de grandes deformações e separação da superfície livre.

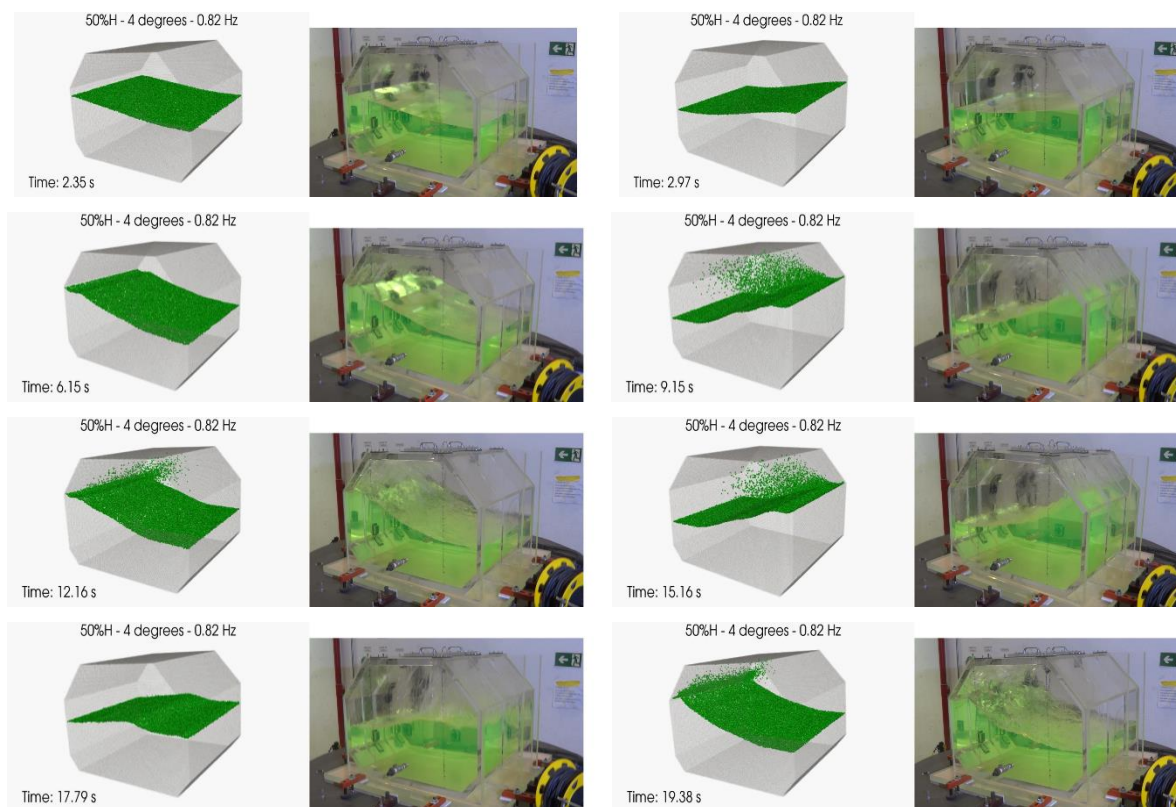


Figura 11. Comparação entre experimento e simulação numérica para preenchimento de 50%H, frequência de 0.82 Hz e amplitude de 4 graus.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de analisar e entender o fenômeno de *sloshing*, o trabalho apresentou alguns procedimentos experimentais e comparações entre resultados experimentais e modelo numérico, baseado no método *Moving Particle Simulation* (MPS), considerando um modelo de tanque prismático. Foram analisados preenchimentos de 50% e 75% da altura do modelo para o movimento de *roll* com amplitude de rotação de 4 graus. Para o preenchimento de 50% da altura do modelo, os resultados numéricos de picos de pressão dinâmica em função da frequência de excitação e séries temporais de pressão dinâmica, para sensores submersos e inicialmente fora d'água, mostraram boa concordância com os resultados experimentais. Para o preenchimento de 75% da altura do modelo, os resultados numéricos de picos de pressão dinâmica em função da frequência de excitação mostraram uma concordância razoável com os resultados experimentais. Próximo da ressonância, valores mais baixos do que os valores experimentais, foram obtidos numericamente, ou seja, um possível amortecimento numérico do MPS nessa região. Séries temporais de pressão dinâmica mostraram uma concordância razoável com os resultados experimentais. Devido a limitação do MPS no cálculo de pressão

total (estática + dinâmica) negativa, para ambos os preenchimentos analisados alguns valores experimentais de sensores, variando seu estado de contato e não contato com a água durante o movimento de *roll*, não foram observados nos resultados do MPS. A movimentação do fluido para o preenchimento de 50% da altura do modelo foi comparada visualmente, demonstrando uma boa coerência do método MPS com o ensaio experimental, com presença de grandes deformações e separação da superfície livre. De forma geral, os resultados experimentais serviram para validar algumas situações numéricas, mostrando as vantagens e limitações do método MPS e o fenômeno de *sloshing* pode ser investigado com mais riqueza de detalhes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Frade Japão Petróleo Ltda. pelo suporte financeiro aos ensaios experimentais e a Petrobras S.A. pelo suporte financeiro no desenvolvimento do simulador de hidrodinâmica não linear baseado no método MPS.

REFERÊNCIAS

- Arai, M., 1984. Experimental and numerical studies of sloshing pressure in liquid cargo tanks. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, vol. 155, pp. 121-127.
- Arai, M., Cheng, L. Y., & Inoue, Y., 1992. 3D Numerical simulation of impact load due to liquid cargo sloshing. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, vol. 171, pp. 177-184.
- Arai, M., & Cheng, L. Y., 2005. A 3D numerical method for assessment of impact loads due to sloshing in liquid cargo tanks. *Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 214-221.
- Diebold, L., Moirod, N., Baudin, E., & Gazzola, T., 2011. Experimental and numerical investigations of internal global forces for violent irregular excitations in LNGC prismatic tanks. *Proceedings of the 21th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 137-143.
- Kim, J. W., Sim, I. H., Lee, J. M., Lee, Y. B., & Bai, K. J., 2006. A finite element computation for three dimensional problems of sloshing in LNG tank. *Proceedings of the 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, pp. 561-568.
- Kim, Y., Kim, S. Y., Kim, J., & Lee, J. H., 2013. Comparison of sloshing pressures in 2D and 3D tanks. *International Journal of Ocean System Engineering*, vol. 3, n. 4, pp. 225-230.
- Koshizuka, S., Tamako, H., & Oka, Y., 1995. A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation. *Computational Fluid Dynamics Journal*, vol. 4, n. 1, pp. 29-46.
- Koshizuka, S., & Oka, Y., 1996. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear Science and Engineering*, vol. 123, n. 3, pp. 421-434.
- Isshiki, H.; 2011. Discrete differential operators on irregular nodes (DDIN). *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 88, n. 12, pp. 1323-1343.
- Mikelis, N. E., & Journée, J. M. J., 1984. Experimental and numerical simulations of sloshing behaviour in liquid cargo tanks and its effect on ship motions. *National Conference on Numerical Methods for Transient and Coupled Problems*, pp. 1-12.