

CONEM2022-0628

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM RISER MARÍTIMO VERTICAL ATRAVÉS DE EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO

Caio Cesar de Oliveira Trigo¹, ctrigo87@unicamp.br

Celso Kazuyuki Morooka², morooka@unicamp.br

¹Universidade Estadual de Campinas, Centro de Estudos de Petróleo, Laboratório de Sistemas Marítimos, Campinas-SP

²Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas-SP

Resumo Nos últimos anos, as descobertas de campos de petróleo em águas ultra profundas exigiram o desenvolvimento de métodos operacionais e equipamentos que superem os desafios tecnológicos inerentes. Neste cenário, tubos na configuração vertical são amplamente utilizados em operações como de reentrada em poços submarinos, em procedimentos de instalação de equipamentos submarinos, como risers para captação de água fria de grande profundidades para resfriamento de equipamentos na superfície, entre outros cenários. Através de observações em experimentos de laboratório, este trabalho apresenta como objetivo principal estudar o comportamento dinâmico de risers na configuração vertical com a extremidade inferior livre, considerando movimentos oscilatórios forçados em seu topo. Estes estudos foram realizados através da comparação dos resultados do experimento e das simulações. O experimento foi conduzido utilizando um modelo de riser em escala reduzida em tanque com águas calmas, simulando diferentes condições através da variação de amplitude e período dos movimentos forçados no topo do modelo e tipo de movimento. Os movimentos do modelo ao longo de seu comprimento foram medidos ao longo tempo, por meio de um sistema de medição ótico desenvolvido exclusivamente para este experimento. Verificou-se que os movimentos dependem de diversos parâmetros tais como comprimento total modelo, material utilizado, amplitude e período da própria oscilação, e fenômenos como da Vibração Induzida por Vórtices (VIV), entre outros. As simulações numéricas foram realizadas através de programa disponível para avaliação de dinâmica de risers rígidos verticais para auxiliar a compreensão dos resultados do experimento e fenômenos envolvidos.

Palavras-chave: riser marítimo, vibração induzida por vórtices, ondas do mar

1. INTRODUÇÃO

Nas operações *offshore* em sistemas oceânicos, estruturas compostas por tubos verticais esbeltos são largamente empregadas, podendo ser combinados com equipamentos submarinos e outros localizados na superfície. Estas estruturas são geralmente chamadas de *risers* marítimos. Em operações de perfuração *offshore*, o *riser* é o meio que conecta o navio sonda na superfície com o fundo do mar, é utilizado na construção de poços de conexão com o reservatório de petróleo, por exemplo. Os *risers* também podem ser usados na produção em poços submarinos como meio de elevação e escoamento do óleo e gás da cabeça de poço, no fundo do mar à plataforma de produção flutuante. Além disso, o *riser* pode ser usado como condutor para injetar água ou gás no reservatório a fim de melhorar a recuperação do petróleo.

No passado *risers* foram testados em usos não convencionais, onde tubos verticais suspensos de grande diâmetro foram utilizados para captação de água fria de grande profundidade para ser utilizada na conversão de energia pelo aproveitamento da diferença de temperatura da água e do ambiente na superfície (Pauling, 1979). Recentemente, uma estrutura vertical semelhante foi testada para coletar a água fria do mar do fundo do oceano com o objetivo de resfriar os equipamentos em plantas de processo a bordo de plataformas flutuantes de produção e navios (Franciss, 1999; Franciss e Custodio, 2015). Dentre outras aplicações com tubulação vertical suspensa, destacam-se operações na engenharia de poços e de mineração oceânica. Nas operações da engenharia de poços, em etapas de completção e intervenção, *risers* verticais podem ser utilizados em situações de desconexão de emergência da cabeça de poço e de navegação com *blowout preventer* (BOP) suspenso (Sevillano, 2013; Yamamoto, 2007). Em operações de mineração oceânica submarina, é utilizada uma configuração semelhante, sendo uma extremidade conectada na unidade flutuante e a outra é conectada a unidade coletora da mineração no leito marinho (Yamamoto, 2019).

Apesar da aparente simplicidade da configuração vertical com a extremidade livre, o projeto desse sistema é bastante complexo. Como uma unidade flutuante ou navio apresentam seis graus de liberdade para os movimentos, as ondas e correntezas marítimas afetam diretamente os equipamentos conectados a eles, essas condições ambientais também são responsáveis por cargas que agem diretamente nas estruturas submarinas. Além disso, as propriedades

mecânicas do *riser*, assim como a pressão hidrostática do fluido interno e externo afetam o seu comportamento dinâmico. Um fenômeno que ocorre normalmente em estruturas esbeltas sujeitas a correnteza é a vibração induzida por vórtices (VIV), fenômeno que pode amplificar os danos de fadiga gerados pelos movimentos da plataforma. Ele é caracterizado por forças oscilatórias geradas pelo desprendimento alternado de vórtices gerados pela interação da geometria circular do *riser* com o escoamento da correnteza marítima ao seu redor.

Neste trabalho, é apresentado um experimento em tanque com águas calmas, com modelo de *riser* vertical e mecanismo de movimento forçado no seu topo, sendo continuidade de trabalhos anteriores realizados no grupo de pesquisa (Saito e Morooka, 2010; Kubota, 2005; Morooka e al, 2003; Sakugawa e Morooka, 2017; Sales et al, 2020). O experimento foi conduzido com modelo de *riser* nas condições de tanque cheio com água e vazio com ar, respectivamente, foram medidos os movimentos do tubo ao longo de seu comprimento. Os resultados foram analisados e comparados com resultados de simulações numéricas visando melhorar o entendimento do comportamento dinâmico da tubulação vertical sob efeitos da hidrodinâmica do escoamento do fluido externo ao tubo. Modelos numéricos utilizados em ferramentas computacionais para o desenvolvimento de projetos ainda apresentam aspectos não totalmente esclarecidos, e experimentos em laboratório são fundamentais para auxiliar o entendimento dos fenômenos envolvidos como também o processo de validação das modelagens propostas.

2. EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

A equação do comportamento dinâmico do *riser*, considerado um tubo contínuo, pode ser representada através de um sistema discreto composto de segmentos de seu comprimento, conforme a seguir:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F_e\} \quad (1)$$

onde, $[M]$ é a matriz de massa, $[C]$ é a matriz de amortecimento, $[K]$ é a matriz de rigidez do segmento, $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$ é o deslocamento do tubo (velocidade, aceleração) e $\{F_e\}$ é força do fluido.

A força do fluido é modelada através da equação de Morison que foi originalmente formulada para cilindros verticais fixos expostos à corrente. Na Eq. (1), as forças são representadas por duas componentes: um relacionado à aceleração das partículas de água (forças de inércia) e outro relacionado à velocidade das partículas de água (forças de arrasto).

A forma estendida da equação de Morison é aplicada para o presente estudo, como segue:

$$F_c = 0,5\rho_w C_D Du_r |u_r| + \rho_w A [(C_M - 1)\dot{u}_r + \ddot{u}] \quad (2)$$

$$u_r = u - \dot{x} \quad (3)$$

onde, ρ_w é a densidade da água, C_D é o coeficiente de arrasto, C_M é o coeficiente de massa (inércia), A é a área da seção transversal do modelo, u ($\dot{u}$) é a velocidade da partícula de água (aceleração) e u_r ($\dot{u}_r$) é a velocidade relativa da partícula de água (aceleração) na direção perpendicular ao tubo.

Simulações numéricas foram realizadas por meio do software Orcaflex (Orcina, 2015) para subsidiar os resultados experimentais e análise. Assim sendo, o tubo é modelado dividido em segmentos de seu comprimento, e as propriedades de cada segmento são concentradas nos nós de cada segmento, respectivamente, e distribuídas ao longo do comprimento do tubo. Então, a massa total de cada segmento de tubo é dividida igualmente em duas partes e concentrada em cada uma das extremidades do segmento (nós). A ligação entre dois segmentos adjacentes é feita através de molas e amortecedores. Na direção longitudinal, amortecedores de mola axiais são colocados no centro de cada segmento e dão uma força de tração efetiva igual e oposta aos nós em cada extremidade do segmento. Além disso, as propriedades de flexão representadas por amortecedores de mola rotacionais são colocadas em ambos os lados do nó e fornecem os momentos de flexão reativos.

Nas simulações numéricas, o método de integração numérica de Euler semi-implícito com passo de tempo constante foi escolhido para solução da Eq. (1). Iterações são necessárias para este método pois a posição e a velocidade são desconhecidas no final de cada passo de tempo. Inicialmente, é realizada a análise estática e estes resultados são usados como passo inicial no esquema de integração temporal para análise dinâmica.

3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O modelo físico utilizado no experimento foi construído com borracha de silicone, moldado em um molde de acrílico e cortado seu comprimento de acordo com a especificação de projeto. As principais dimensões e propriedades do modelo de tubulação são mostradas na Tabela 1. Os dados do protótipo são mostrados como referência para guiar o experimento, o modelo de experimento ideal refere-se às principais características de um modelo em escala de modelo 1:225, e o modelo de experimento real refere-se às propriedades do modelo usado no experimento.

Os experimentos foram conduzidos em um tanque de água calmas com dimensões externas de 2 x 2 x 0,6 metros. O tanque de água é uma estrutura de aço com janelas de vidro resistentes à pressão da água. Duas câmeras foram posicionadas perpendicularmente para capturar os movimentos das direções x e y do modelo do tubo. As imagens de vídeo foram gravadas com um intervalo de tempo de 1/60 imagens por segundo. Onze alvos foram posicionados ao longo do modelo para que fosse possível rastrear sua posição em cada imagem capturada e foram processados no módulo de visão computacional do *software* Labview, sendo responsável por extrair as informações das coordenadas de cada alvo através de um algoritmo com base da diferença de contraste entre o alvo e o restante da imagem. A Figura 1 apresenta um esboço da configuração do modelo para este experimento.

Tabela 1. Principais características do protótipo, modelo ideal e real no experimento.

Parâmetro	Protótipo	Modelo exp. Ideal	Modelo exp. Real
Comprimento total, L (m)	328,75	1,45	1,45
Diâmetro externo, D (m)	0,61	$2,69 \times 10^{-3}$	$7,50 \times 10^{-3}$
Massa linear (no ar), m_L (kg/m)	232,43	$4,55 \times 10^{-3}$	$6,46 \times 10^{-2}$
Rigidez Axial, EA (N)	$6,22 \times 10^8$	$5,40 \times 10^2$	$1,01 \times 10^2$
Rigidez a Flexão, EI (N.m ²)	$2,75 \times 10^8$	$4,66 \times 10^{-4}$	$3,55 \times 10^{-4}$

O dispositivo de movimento forçado no topo é composto por sistema de 3 eixos de movimentação, em que em cada eixo possui servo motores acoplados a fusos de esferas recirculantes e um sistema de guias lineares para mover o modelo do tubo no sentido longitudinal para cada direção de forma independente. O modelo de tubo é fixado em sua extremidade superior através um suporte metálico na ponta do sistema xyz. Para este experimento foram apenas realizados movimentos forçados horizontalmente.

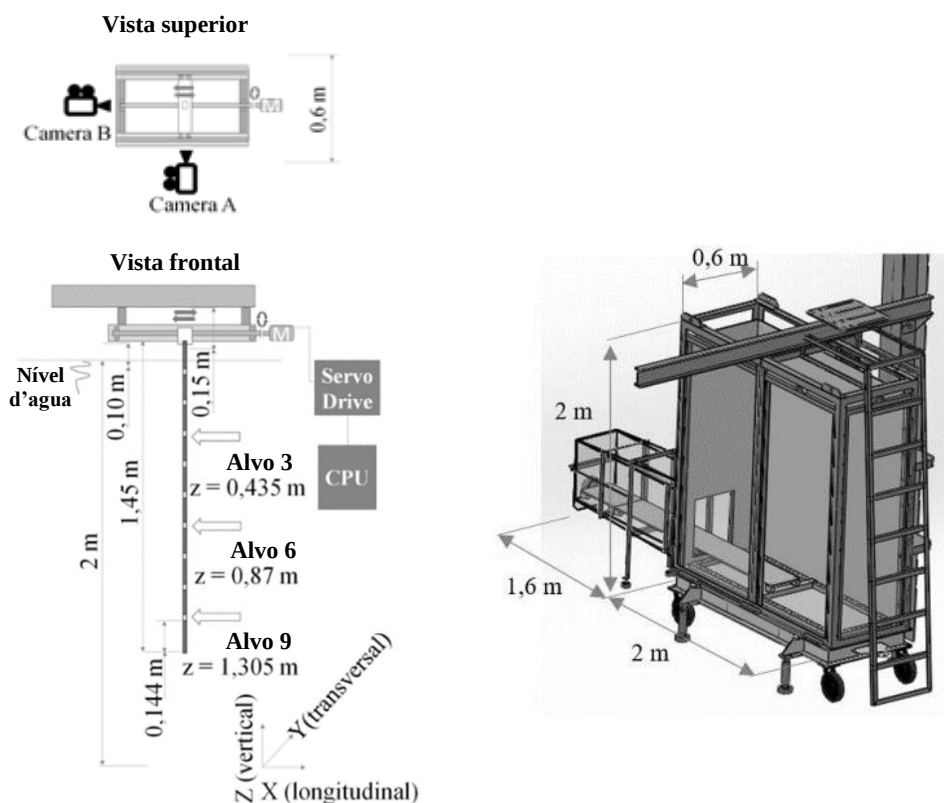


Figura 1. Dimensões principais do arranjo experimental e a numeração dos alvos ao longo do modelo.

O teste começa com o modelo de tubo em repouso. Em seguida, as câmeras iniciam a captura e um computador envia um sinal da trajetória para o controlador dos servomotores. Em seguida, o movimento rotacional do servomotor é convertido em movimento linear alternativo e o modelo do tubo sai do repouso e entra em movimento alternado retilíneo. Cada condição de teste foi registrada em um período total de 60 segundos e, em seguida, as câmeras e o sistema de movimentação forçada param.

Um total de cinco experimentos foi conduzido variando a frequência de oscilação forçada com amplitude fixa de 10 mm. As frequências de oscilação forçada foram 0,19, 0,30, 0,48, 0,70 e 0,82 Hz. Foram realizadas Simulações

numéricas para a frequência de oscilação forçada variando de 0,10 a 0,90 Hz com passos de 0,05 Hz. Para fins ilustrativos, serão mostrados aqui os resultados experimentais e de simulação numérica para frequências de oscilação forçada de 0,30 Hz e 0,82 Hz.

4. RESULTADOS

A faixa de frequências de movimentos forçados utilizada no experimento foi de 0,19 Hz a 0,82 Hz, com amplitude de 10 mm no sentido horizontal longitudinal em relação ao tanque. Resultados de medições apresentadas através de séries temporais, envoltórias de máximos e mínimos, e amplitudes máxima de resposta foram utilizados para caracterizar o comportamento do movimento do riser, tanto para experimentos quanto para simulações numéricas. Neste trabalho, serão apresentados os resultados para os testes com frequências de topo de 0,30 e 0,82 Hz, respectivamente, e amplitude fixa de 10 mm. No experimento, as trajetórias transitórias do sinal até que o modelo atinja a estabilidade foram removidos para melhor visualização dos resultados.

A Figura 2 (a) mostra as séries temporais do experimento com frequência de 0,19 Hz na direção longitudinal incluindo a simulação numérica para este caso. A amplitude dos deslocamentos é normalizada pelo diâmetro externo do modelo do tubo. Em geral, o resultado numérico é próximo ao resultado do experimento ao longo do tempo para a direção x.

Os movimentos do modelo na direção transversal são mostrados na Figura 2 (b). Na primeira metade da série temporal, a simulação numérica não acompanha o experimento, o que não acontece na segunda metade em que o movimento dos é similar aos resultados numéricos. Talvez ocorra devido às simplificações introduzidas para calcular a velocidade relativa para estimar as forças VIV pelo software.

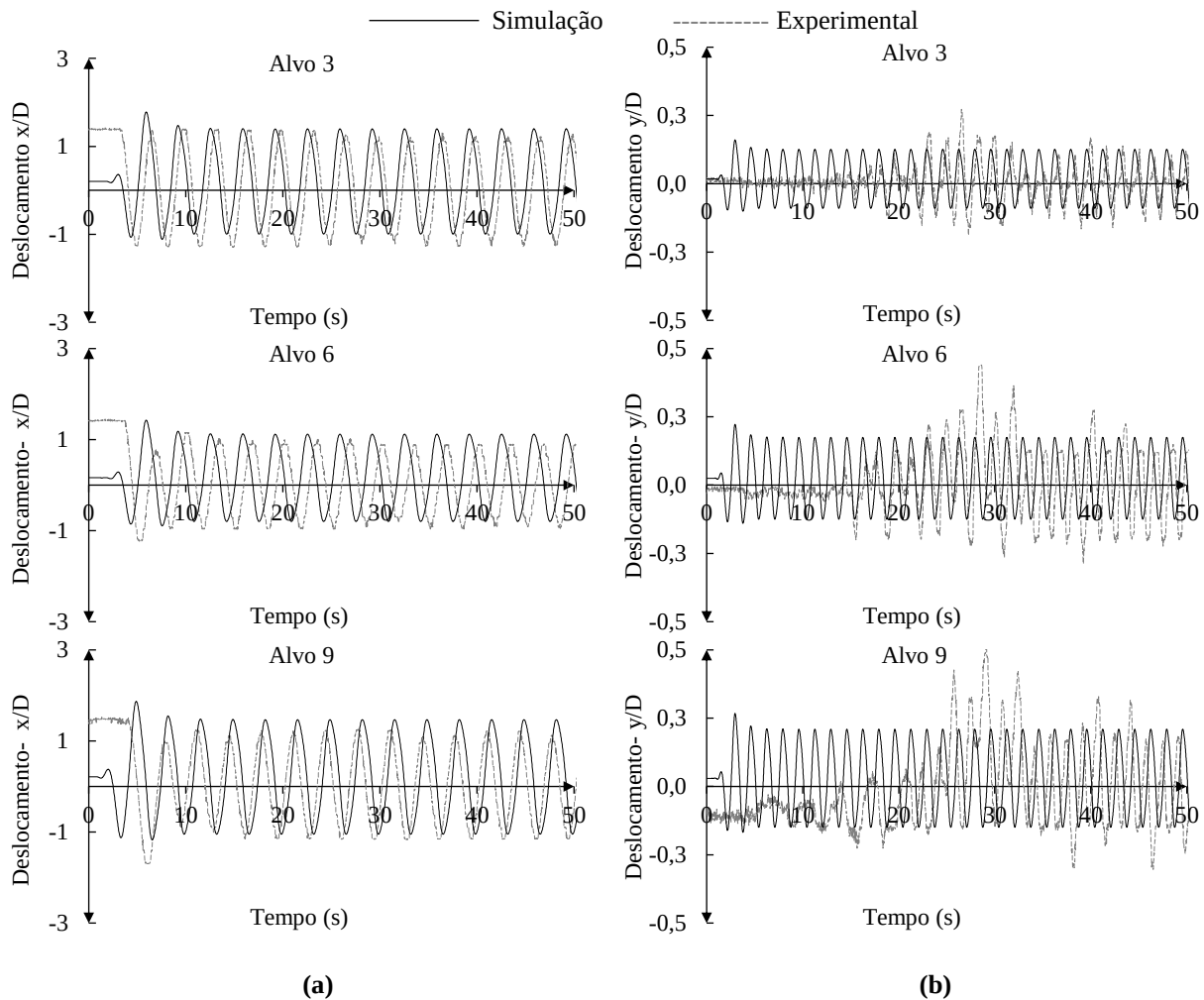


Figura 2. **Serie temporal da resposta do modelo nos alvos 3, 6 e 9 ao longo do comprimento do modelo com movimento horizontal forçado de topo $f=0,30$ Hz e $A= 10$ mm; (a) direção longitudinal; (b) direção transversal.**

As Figuras 3 (a) e 3 (b) mostram os resultados experimentais e numéricos dos movimentos longitudinais e transversais, respectivamente, para a frequência de 0,82 Hz, apresentando um mesmo padrão observado no caso anterior.

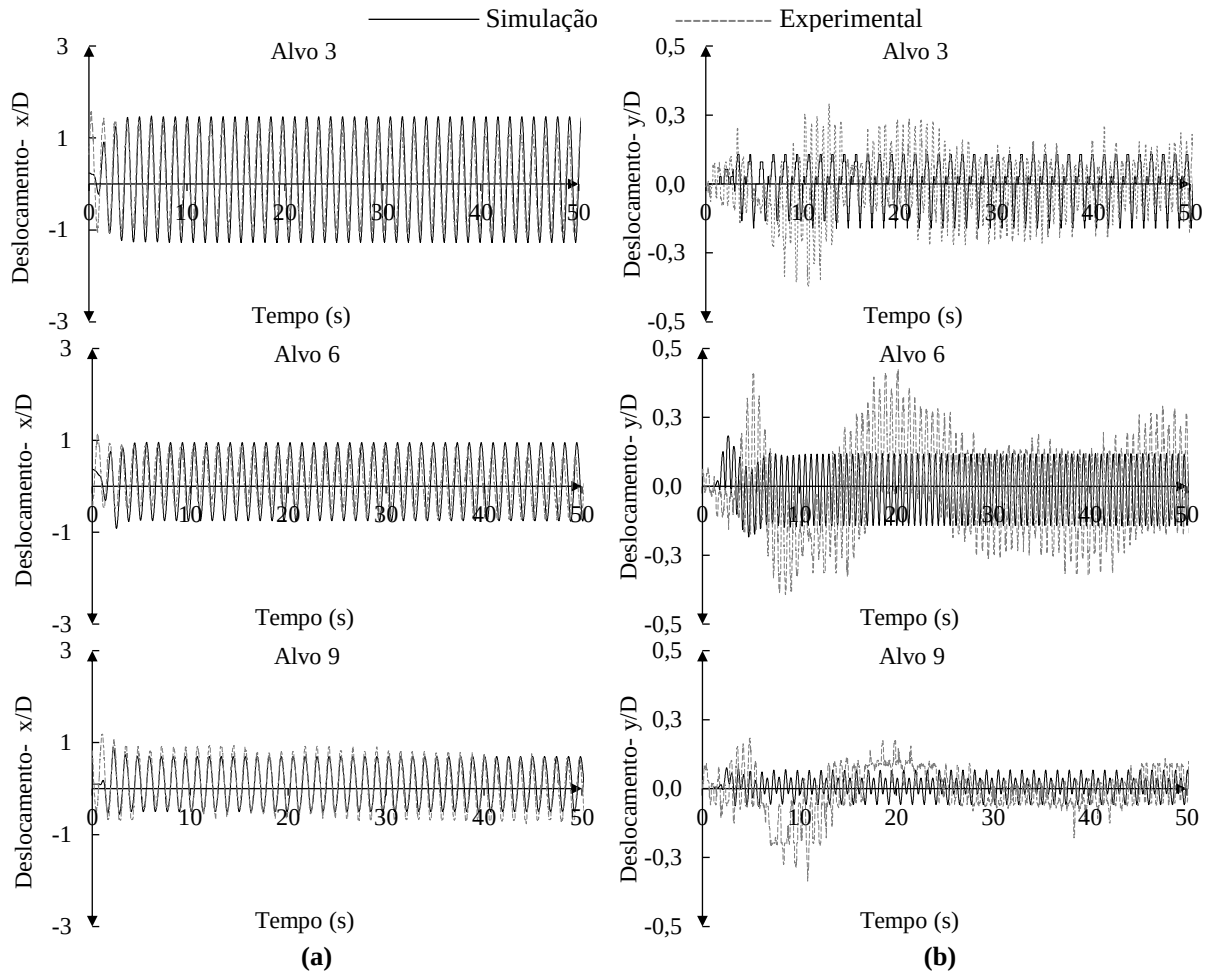


Figura 3. Serie temporal da resposta do modelo nos alvos 3, 6 e 9 ao longo do comprimento do modelo om movimento horizontal forçado de topo $f=0,82$ Hz e $A= 10$ mm; (a) direção longitudinal; (b) direção transversal.

A Figura 4 mostra as envoltórias de máximos e mínimos para o modelo ao longo de seu comprimento, tanto para experimento quanto para simulação com movimentação forçada de topo com frequência de 0,30 Hz e amplitude de 10 mm. A Figura 5 apresenta os resultados para o caso de frequência de 0,82 Hz com a mesma amplitude de 10 mm. Em geral, os resultados numéricos seguiram o experimento. Na figura 2 e 3, as séries temporais do experimento e da simulação numérica estão mostradas em um mesmo gráfico, com a finalidade de facilitar a observação e comparações de amplitude e de frequência. Neste trabalho, não foi considerado a análise de fases da resposta entre experimento e simulação numérica o que será objetivo de verificação em trabalho futuro, para ambas as direções x e y.

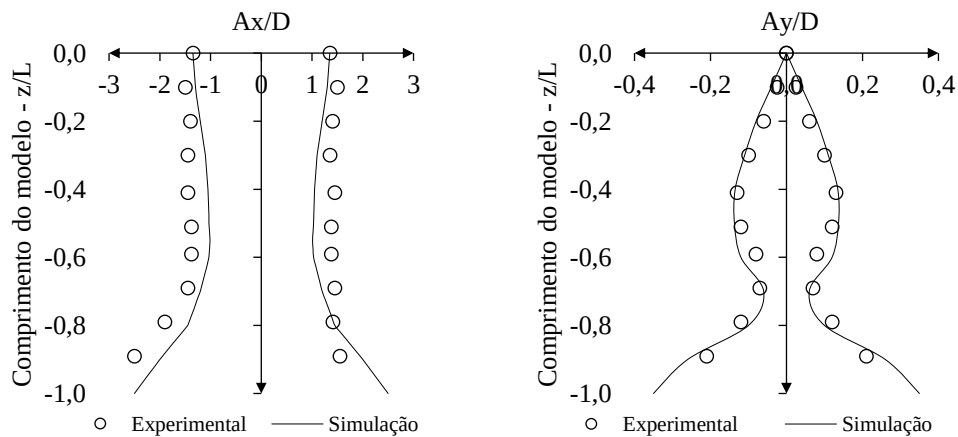


Figura 4. Envoltórias de máximos e mínimos da vibração do modelo ao longo do comprimento, para as direções longitudinal e transversal. Com movimento horizontal forçado de topo $f=0,30$ Hz e $A= 10$ mm.

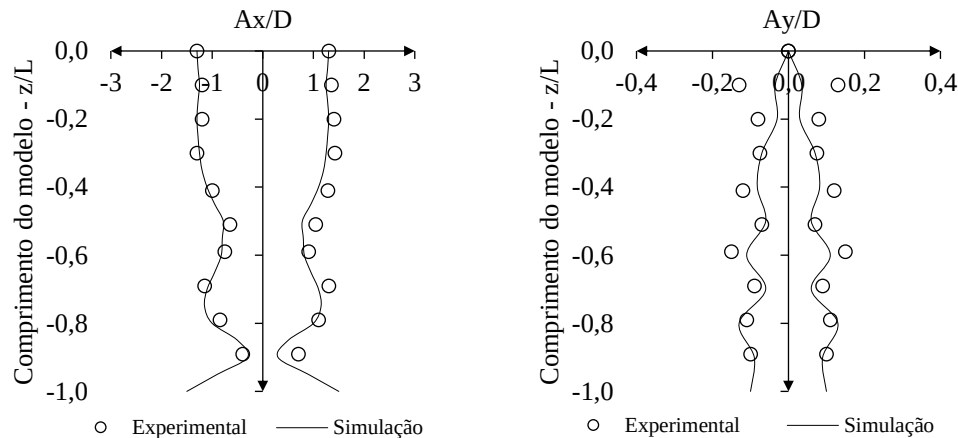


Figura 5. Envoltórias de máximos e mínimos da vibração do modelo ao longo do comprimento, para as direções longitudinal e transversal. Com movimento horizontal forçado de topo $f=0,82$ Hz e $A=10$ mm.

A Figura 6 (a) mostra a amplitude máxima de resposta para várias frequências de oscilação forçada na direção x, enquanto a Figura 6 (b) mostra o mesmo para a direção y. Em geral, o modelo numérico gera resultados que seguem o experimento para uma ampla faixa de frequências de oscilação forçada.

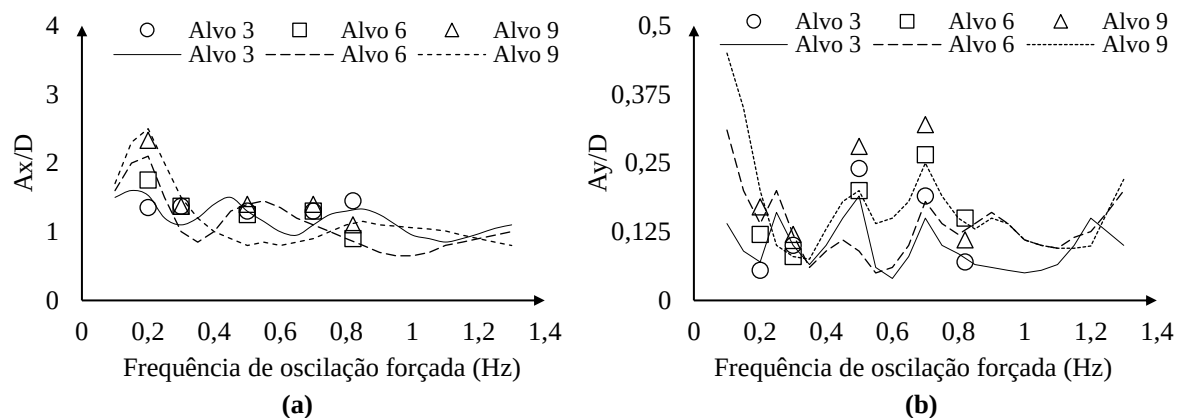


Figura 6. Amplitude máxima de resposta para frequências entre 0,1 Hz e 1,3Hz; (a) para direção longitudinal; (b) para direção transversal.

Embora tenham sido adotadas aproximações como a velocidade relativa entre a tubulação e a água nas simulações numéricas, outros problemas no experimento como irregularidades na geometria e homogeneidade do material do modelo da tubulação podem induzir desvios nos cálculos. Uma investigação mais aprofundada ainda é desejável neste assunto para melhoria contínua nos resultados.

5. CONCLUSÕES

Experimentos com um tubo vertical com movimento forçado horizontalmente no seu topo foram realizados em um tanque de água. O comportamento do modelo *riser* nas direções longitudinal e transversal foi medido através de um sistema de medição ótica e analisado com sucesso.

Simulações numéricas foram executadas no software Orcaflex para estimar resultados de deslocamentos para as direções longitudinal e transversal, respectivamente, o que serviu de apoio à análise dos resultados experimentais. Resultados foram observados na forma de séries temporais de resposta de vibração e envoltórias das amplitudes máximas e mínimas da vibração do modelo. Estes resultados visam o aprimoramento da modelagem e a compreensão da vibração induzida por vórtices em *risers* marítimos verticais contribuindo em seu projeto e em sua operação.

Como passos futuros na pesquisa, espera-se melhorar os resultados incorporando as experiências obtidas na realização do experimento em escala reduzida e os procedimentos de simulação numérica e de análise. Outras abordagens para a direção transversal dos deslocamentos de tubos no simulador numérico pretende-se também serem investigadas.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) pelo apoio continuado ao fomento da pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- Franciss, R., 1999, “Vibrações Induzidas por Vórtices em Membros Esbeltos de Estruturas Offshore Flutuantes”, Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Franciss, R. and Custódio, A.B., “*Uptake Riser for P-25 Platform in Albacora Field in Campos Basin*”, 34th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), ASME, St. John's, Canada, May 31 - June 5, 2015.
- Kubota, H. Y., “Comportamento Dinâmico de um *Riser* Rígido de Produção”, Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- Morooka, C.K.; Martins, F.P.; Kubota, H.Y.; Ferrari Jr., J.A.; Ribeiro, E.J.B (2003): “*A Study on Inline and Transverse Dynamic Behavior of a Vertical Riser in Time Domain*”, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), 2003, SP, Brasil.
- Orcina Ltd. “OrcaFlex Manual Version 10”, 2015, UK.
- Paulling, J.R., “Frequency-Domain Analysis of OTEC CW Pipe and Platform Dynamics”, OTC-3543-MS, Offshore Technology Conference, 30 April-3 May, Houston, Texas, 1979.
- Saito, J. e Morooka, C.K. (2010), “Simulação Computacional do Escoamento em Torno de Uma Seção de um Duto Marítimo”, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), ABCM, Campina Grande, PB.
- Sakugawa, P.M. and Morooka, C.K. (2017), “*Dynamic Behavior of a Seawater Intake Riser*”, 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), ASME, Trondheim, Norway.
- Sales, L.P.A., Trigo, C.C.O., Sevillano, L.C., Morooka, C. K., “*Dynamic Behavior of a Free Hanging Vertical Pipe Forced to Oscillate at the Top*”, 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), ASME, Virtual.
- Sevillano, L.C; Morooka, C.K.; Mendes, J.R.P.; Miura, K., “*Drilling Riser Analysis During Installation of a Wellhead Equipment*”, OMAE2013-10554, 32nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), ASME, Nantes, France, June 9-14, 2013.
- Yamamoto, M., Fujiwara, T., Kanada, S., Ono, M., Takano, S., Takano, S., Yamamoto, J., “*Experimental Analysis of Reduced-Scale Jumper for Deep-Sea Mining*”, 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), 2019, ASME, Glasgow, UK.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CONEM2022-0628

STUDY OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A VERTICAL MARITIME RISER THROUGH LABORATORY EXPERIMENT

Caio Cesar de Oliveira Trigo¹, ctrigo87@unicamp.br
Celso Kazuyuki Morooka², morooka@unicamp.br

¹University of Campinas, Center for Petroleum Studies, Offshore Systems Laboratory, Campinas-SP

²University of Campinas, Faculty of Mechanical Engineering & Center for Petroleum Studies, Campinas-SP

Abstract *In recent years, oil fields discoveries in ultra-deep water have required development of methods and equipment to overcome new technological challenges. In this scenario, pipes in vertical configuration have been widely used in operations, such as in re-entry operation into subsea wells, to flow and produce oil and gas, in procedures to instal subsea equipment at the seabed, and risers to elevate cold water from deep water for cooling purposes of process equipment at the surface, among others.. Through observations of laboratory experiments, the present work has the main objective to study the dynamic behavior of a vertical riser with lower end free to move, considering forced oscillatory movements at its top. This study considers comparisons of results of the experiment with the numerical simulations. The experiment was conducted with a reduced scale riser model in a calm water tank, simulating different conditions by varying the amplitude and period of forced movements. The motion response of the model along its length was measured in time, by an optical measuring system developed exclusively for this experiment. It was verified that the oscillation response of the model depends on several parameters such as the total model length, material made, amplitude and period of the oscillation itself, and the phenomena such as Vortex Induced Vibration (VIV), among others. Numerical simulations were performed using a commercial program for evaluations of oscillations of the vertical tube to help understanding of the experiment results and phenomena involved.*

Keywords: riser, vortex induced vibration, ocean waves