



ESTUDO DE TÉCNICAS EXPERIMENTAIS PARA VIBRAÇÕES DE TUBO FLEXÍVEL VERTICAL DEVIDO A MOVIMENTO EM SEU TOPO E SIMULAÇÕES NO COMPUTADOR

Palavras-Chave: PETRÓLEO, RISER, VIBRAÇÕES

Autores(as):

JEFFERSON GABRIEL DA SILVA, CEPETRO-UNICAMP

JULIA ALESSANDRA JULIATTI DA SILVA, CEPETRO-UNICAMP

CELSO KAZUYUKI MOROOKA (orientador), FEM&CEPETRO-UNICAMP

CAIO CESAR DE OLIVEIRA TRIGO (colaborador), CEPETRO-UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O petróleo é um líquido natural, inflamável, oleoso composto por uma mistura de moléculas de carbonos e hidrogênio que tem origem na decomposição de matéria orgânica. A origem mais aceita é a sua formação através do processo de decomposição da matéria orgânica em bacias sedimentares, e que com o passar de milhões de anos sob condições de elevadas temperaturas e pressão esta matéria orgânica se transforma em petróleo, e após diversas migrações ele fica aprisionado em rochas porosas conhecidas como rochas-reservatórios. Atualmente, o petróleo é uma das principais matérias primas para seus subprodutos, e é uma importante fonte de energia no mundo. É, no entanto, um recurso natural que necessita de estudos complexos para sua exploração e apresenta altos custos para viabilizar sua produção racional.

O ciclo da engenharia do petróleo começa com a exploração, em que estudos geológicos e geofísicos buscam identificar áreas com potencial para petróleo, através de estudos sísmicos e análises de viabilidade econômica. Em seguida, são perfurados poços pioneiros para avaliar as propriedades do petróleo e potencial da reserva, e em caso das condições serem favoráveis, a exploração é ampliada com a perfuração de mais poços para produção do reservatório. Na etapa de produção, técnicas são aplicadas para otimizar a extração, e os poços produtores são avaliados continuamente durante toda sua vida produtiva do campo de petróleo. O petróleo ,após a sua extração, é processado e refinado para obter diversos subprodutos, os quais são armazenados e distribuídos para uso em diversas indústrias.

A exploração *offshore* é a exploração que ocorre no mar, nas bacias sedimentares oceânicas, onde no Brasil, em anos mais recentes foram descobertos vários campos com grandes acumulações de petróleo, denominados campos do Pré-sal, e que são explorados atualmente. Para que a exploração *offshore* seja possível são utilizadas embarcações e plataformas flutuantes, e nelas um amplo sistema

de produção é montado para que a extração do petróleo ocorra. Um equipamento componente importante deste sistema de exploração são os *risers*, que são tubulações interligando poços de petróleo no fundo do mar às plataformas ou navios na superfície, sendo o principal condutor de fluidos produzidos do reservatório. Na exploração *offshore* de petróleo, *risers* podem ser usados convencionalmente nas operações de perfuração e produção de poços, e não convencionalmente como um equipamento de captação de água fria, ou ainda, na mineração submarina no fundo do mar. Como são empregados em condições adversas do meio ambiente em alto mar, com correnteza e ventos, muitas vezes de alta intensidade, e grandes profundidades de mar, estudos devem ser feitos quanto à sua estrutura assegurando a sua integridade estrutural durante o seu uso. Em princípio, é necessário assegurar que *risers* tenham flexibilidade e resistência adequada, pois ficam submetidos a mudanças de temperatura e pressão no fundo do mar, além de vibrações causadas pelos movimentos das plataformas no topo e correnteza marítima.

Nesse projeto, o foco principal foi investigar o comportamento dinâmico de um *riser* vertical utilizado em uma plataforma flutuante *offshore*. Com esta finalidade, na pesquisa foi realizado um experimento em um tanque com água e com um modelo de *riser* em pequena escala. Empregou-se também, programas computacionais para estudar e compreender o comportamento dinâmico de um *riser* sob efeitos dos movimentos de uma plataforma flutuante em ondas. Com os resultados, foi possível simular computacionalmente como ocorre os movimentos do modelo no experimento e observar resultados através de gráficos de série temporal e de envoltória de máximas e mínimas amplitudes de movimentos do *riser*. Resultados do experimento e de simulação computacional são comparados para fins de entendimento e análise das oscilações/vibrações do *riser* para compreensão de resistência e integridade de sua estrutura.

Tabela 1 – Propriedades do modelo

Propriedade	Símbolo	Modelo	Propriedade	Símbolo	Modelo
Mod de Young	E (Pa)	$1,1 \times 10^6$	Massa Linear	m' (kg/m)	10
Densidade	P (kg/m ³)	1300	Rigidez a flexão	EI (Nm ²)	0,207
Comprimento	L (m)	1,45	Rigidez Axial	EA (N)	$0,54 \times 10^{-3}$
Diâmetro ext.	d_e (mm)	10	Diâmetro int.	d_i (mm)	0

METODOLOGIA:

O experimento na pesquisa foi conduzido com o objetivo de observar a resposta de movimentos do modelo, em pequena escala, sob condições de movimento forçado no topo. Os testes foram conduzidos no Laboratório de Sistemas Marítimos e *Risers* (Lab*Riser*), localizado no Centro de Estudos de Energia e Petróleo (CEPETRO) da UNICAMP. Neste estudo, foi desenvolvido um modelo em pequena escala para um *riser* vertical, com 1,40 metros de comprimento e 10 mm de diâmetro. O modelo foi moldado em tubo de acrílico tendo como material a borracha de silicone. Para monitorar os movimentos de vibração do modelo no experimento, 15 pontos refletivos foram produzidos ao longo do comprimento do modelo de *riser*, tendo uma distância de 9 a 10 centímetros entre eles. Tais pontos

foram usados como alvos no processo de captura por meio de um sistema óptico de monitoração. A Tabela 1 apresenta as principais propriedades físicas do modelo.

O tanque de água utilizado no experimento possui dimensões de 4 metros de comprimento, 3 metros de largura e 1,6 metros de altura. Um dispositivo mecânico acoplado a um motor elétrico foi instalado na parte superior do tanque para gerar movimentos lineares oscilatórios na direção horizontal. O sistema óptico de captura de movimentos é composto por duas câmeras posicionadas em ângulos diferentes, juntamente com um ponto de iluminação, com objetivo obter imagens nos planos XZ e YZ, para posterior análise em computador e obter coordenadas para cada alvo. Os movimentos do modelo foram gravados em vídeos de 2 minutos para cada condição de experimento, com uma resolução de imagem de 1080p e taxa de 60FPS, e totalizando 7200 imagens por gravação. Após o tratamento das imagens em um computador, foram obtidas as coordenadas geométricas de cada ponto alvo para cada imagem ao longo do tempo. Essa análise permitiu a obtenção dos movimentos de vibração do modelo de *riser* e a posterior análise de seu comportamento dinâmico. A Figura 1, apresenta uma representação esquemática do experimento.

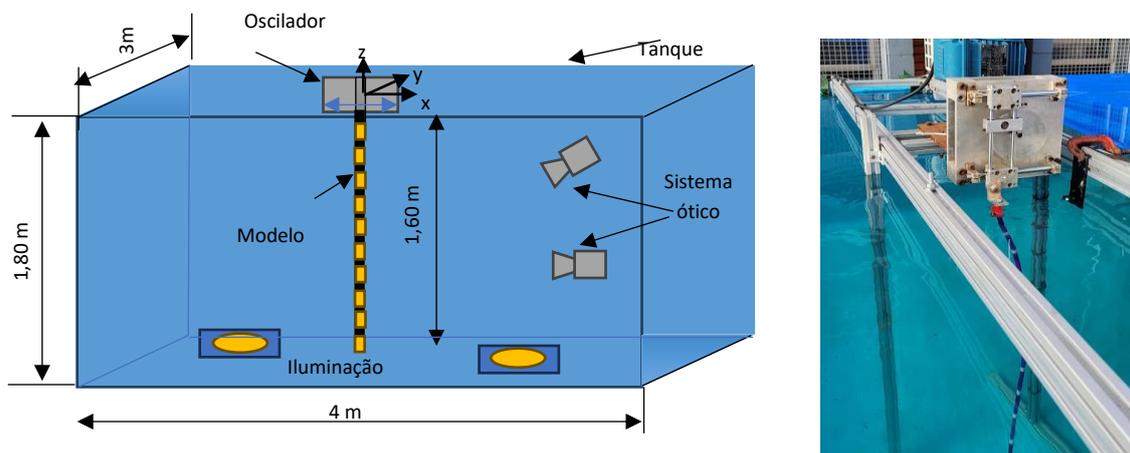


Figura 1: Experimento montado em tanque

A partir dos dados coletados no experimento físico, utilizamos o software *OrcaFlex* para o cálculo computacional de simulação. O *OrcaFlex* é uma ferramenta de simulação que permite a modelagem e análise de sistemas marítimos, como *risers* e linhas de ancoragem de plataformas flutuantes. Primeiramente, o software foi configurado com os dados do experimento, para garantir as mesmas condições aplicadas nos testes e representação adequada das dimensões físicas envolvidas (incluindo o modelo do *riser*). Definidas as condições, a simulação realiza cálculos avançados com base nos modelos de engenharia e matemática desenvolvidos e codificados no programa, produzindo resultados que possibilitam a análise da resposta dinâmica do sistema *riser*. As simulações computacionais consideram as características específicas das linhas, *risers* e outros componentes flexíveis envolvidos no sistema, e considerando o coeficiente de arrasto, massa e outros parâmetros relevantes para a simulação numérica do comportamento do sistema. Os resultados obtidos foram comparados com resultados do experimento, e organizados e analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Após a etapa de adequação dos dados obtidos durante o experimento, foram gerados gráficos do movimento do modelo para frequência estudada. Para esta pesquisa, uma matriz com 13 condições de teste foi planejada, com faixa de frequência de oscilação de topo variando de 0,3 Hz a 1,6 Hz, em incrementos de 0,1 Hz; Foi estabelecida uma amplitude de movimento oscilatório de 20 mm, que representa duas vezes a dimensão do diâmetro do modelo. Foram observados os movimentos no plano XZ e YZ, com o objetivo de verificar a resposta de movimentos na mesma direção do movimento forçado no topo do modelo de *riser* e na direção perpendicular ao movimento forçado, respectivamente. Os resultados foram comparados com simulações computacionais e apresentados a seguir. A Figura 2 mostra as series temporais de movimento de resposta do modelo sob movimentos forçados no topo com frequência de $f_0 = 0.5$ Hz e amplitude $X_0 = 20$ mm. A amplitude do movimento está normalizada pelo diâmetro externo do modelo (A_x/d e A_y/d).

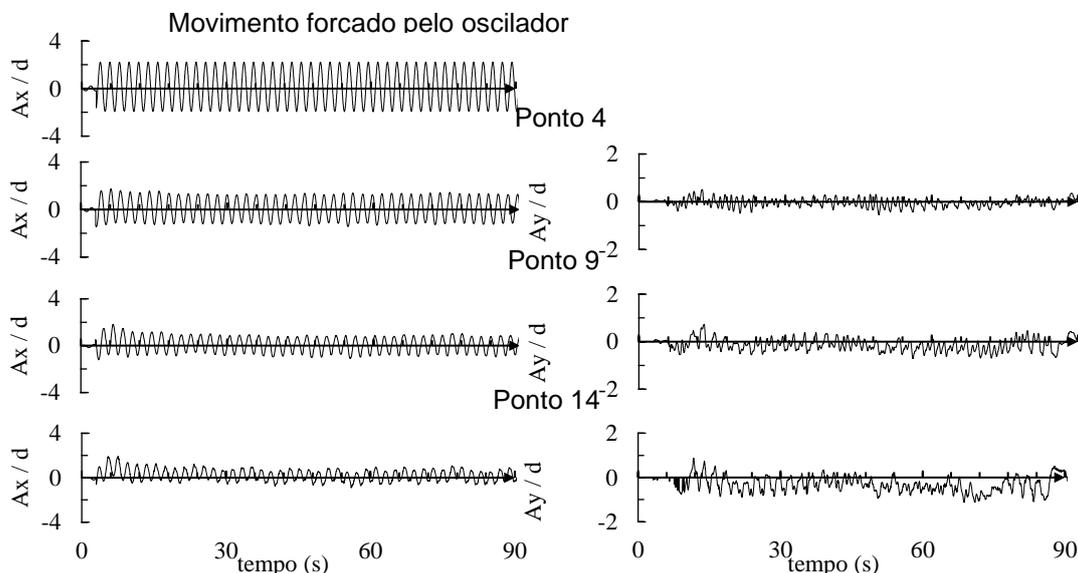


Figura 2: Serie temporal do moviemnto do modelo nos pontos 4, 9 and 14, sob efeitos do movimento forçado horizontal na direção transversal com $f_0 = 0.50$ Hz with $X_0 = 20$ mm

A Figura 3 apresenta a envoltória de máximos e de mínimos do movimento do modelo ao longo de seu comprimento na vertical, para o movimento forçado no topo, na direção do eixo x, sob frequência $f_0 = 0.50$ Hz e amplitude $X_0 = 20$ mm. As medições do experimento estão representadas por círculos e os resultados da simulação numerica interligadas por meio de linhas contínuas. A Figura 4 mostra as envoltória de amplitudes maximas e mínimas para resposta do movimento, nas frequências de movimentos forçado de topo, variando entre 0,3 Hz a 1,6 Hz Os resultados obtidos da simulação apresentam uma boa correlação com os resultados do experimento.

Os resultados, mostrados pelas linhas contínuas na Figura 3 e na Figura 4, apresentam-se promissores, no entanto, a modelagem computacional disponível no momento parece estar um pouco limitado ao lidar com altas frequências de vibração/oscilação. De fato, é comum que altas frequências imponham um difícil desafio para os métodos computacionais.

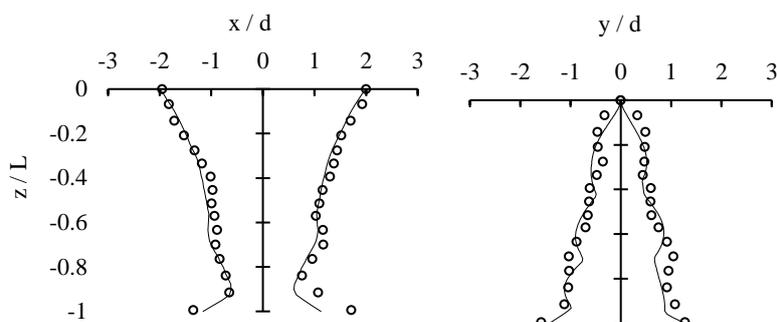


Figura 3: Envolvória de máximos movimentos do modelo ao longo do comprimento nos planos XZ e YZ; Movimento forçado no topo com: $f_o = 0.50$ Hz, $X_o = 20$ mm; $L/d = 145$

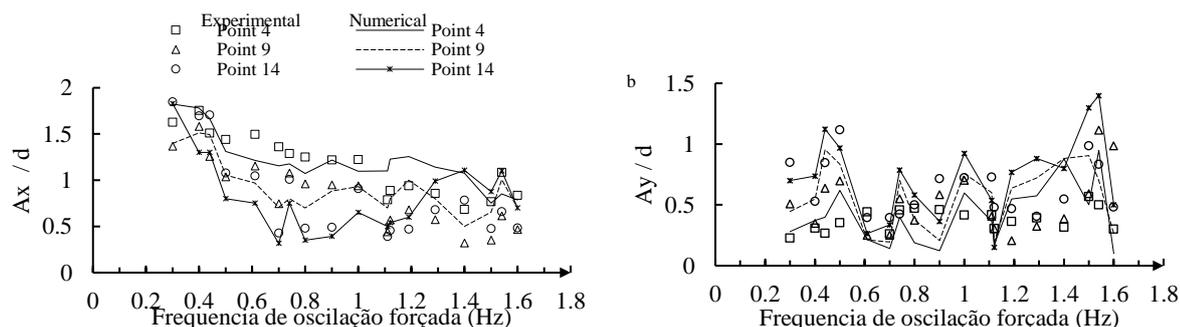


Figura 4: Amplitude máxima da resposta do movimento para frequências entre 0,3 Hz a 1,6 Hz

CONCLUSÕES:

A análise comparativa entre os dados de simulações numéricas e de experimento físico no laboratório, proporcionaram a verificação da validade do modelo computacional e da compreensão de seus resultados para condições mais reais de operação com *riser*. Identificamos pontos de convergência entre as duas abordagens, o que nos permitiu ter maior confiança nos resultados da simulação computacional desenvolvida. Em conclusão, as comparações com resultados de nosso experimento demonstram resultados promissores, e permitiram identificar áreas para aprimoramentos que poderão potencializar ainda mais a eficácia e realismo das simulações numéricas para fins de um projeto real. No experimento, um dos principais pontos para melhorias é a iluminação adequada do tanque durante o experimento, pois isso poderá influenciar positivamente na qualidade e precisão dos resultados de monitoração ótica obtida. Espera-se com estes ajustes propostos, alcançar um desempenho mais consistente e representativo, tornando a nossa pesquisa ainda mais relevante em futuros estudos e nas aplicações práticas dos resultados.

BIBLIOGRAFIA

- TRIGO, C.C.O., BORDALO, S.N., MOROOKA, C.K.: “A Dynamic Experiment with Submerged and Suspended Vertical Riser Pipe Small Scale Model Undergoing Forced Motions at the Top”, 40th OMAE, ASME, Melbourne, Australia, 2023.
- SALES, L.P.A., TRIGO, C.C.O., SEVILLIANO, L.C., MOROOKA, C.K.: “Dynamic Behavior of a Free Hanging Vertical Pipe Forced to Oscillate at the Top”, 39th OMAE, ASME, Virtual, Online, 2020.
- THOMAS, J.E. “Fundamentos da Engenharia de Petróleo”, Editora Interciência, Petrobras, 2001.