

# 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



**9º CONGRESSO**  
Brasileiro de P&D em  
**PETRÓLEO E GÁS**

**Maceió, AL**  
de 09 a 11 de novembro  
**2017**

*Realização:*



**ABPG**  
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM  
PETRÓLEO E GÁS



## **TÍTULO DO TRABALHO:**

COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM RISER CAPTADOR DE ÁGUA SOB EFEITO DE CORRENTEZA MARÍTIMA

## **AUTORES:**

Patrícia Mika Sakugawa<sup>1</sup>, Celso Kazuyuki Morooka<sup>2</sup>

## **INSTITUIÇÃO:**

Bolsista PRH-15 ANP, sakugawa@dep.fem.unicamp.br, <sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, FEM, Universidade Estadual de Campinas, <sup>2</sup>Departamento de Energia, FEM & Cepetro, Universidade Estadual de Campinas

*Este Trabalho foi preparado para apresentação no 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.*

## COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM *RISER* CAPTADOR DE ÁGUA SOB EFEITO DE CORRENTEZA MARÍTIMA

### Abstract

Since recent attention to floating liquefied natural gas (FLNG) vessels studies regarding the risers in hang-off configuration to intake cold seawater, have been done in order to help the heat transfer during the liquefaction process. Thus, the present work intent to study the seawater intake riser dynamic behavior in presence of vortex induced vibration (VIV) phenomena. The study is done through the implementation of computational code developed in time domain, based on finite element method. The non-linearity problem is solved by Newton-Raphson method, and the time integration, using Newmark method. The VIV is approached through a semi-empirical model, in which the hydrodynamic coefficient values are obtained by experimental data. Trend study is done for different lengths and ocean current velocities through the study of the vibration amplitude, frequency and vibration dominant response in VIV obtained in the simulations. The results showed the influence of the riser length due to the natural frequency variation and the excited vibration mode.

### Introdução

As novas descobertas de campos de óleo e gás, localizados longe da costa, por vezes tornam inviável o uso de dutos submarinos para transporte de gás natural, gerando desafios para a engenharia *offshore*. Dentre os problemas encontrados em sua aplicação há a dificuldade de construção de dutos que consigam operar de forma eficiente em lugares de grandes profundidades, onde a influência da correnteza marítima é mais crítica. Portanto, existe a necessidade de estudos de esforços hidrodinâmicos sobre a estrutura, sem que haja o comprometimento da produção e do custo do projeto. A unidade flutuante de liquefação de gás natural (FLNG) é uma nova alternativa que pode tornar os campos comercialmente atrativos. Na Austrália, projetos recentes, como Prelude (Shell) e Scarborough (ExxonMobil), demonstram o desenvolvimento de campos com o uso da embarcação FLNG (CHAKKARAPANI; CHAUDHURY, 2014).

A FLNG é equipada com planta de processamento para extrair, liquefazer, armazenar e transferir o gás natural produzido de campos marítimos de óleo e gás. A vantagem da liquefação do gás durante a produção no campo é não necessitar de longos gasodutos instalados até a costa, o que pode significar, muitas vezes, em redução dos custos de investimento inicial, facilitando assim a exportação do gás produzido para regiões distantes do campo. No entanto, o processo de liquefação e armazenamento do gás natural, gera uma grande quantidade de calor, havendo necessidade de resfriamento contínuo dos equipamentos envolvidos no processo. Uma das alternativas de resfriamento em navios FLNG é a captação de água do mar, a grandes profundidades, através de dutos verticais (*risers*). O comprimento do captador está diretamente relacionado com a profundidade de captação da água gelada, que por sua vez está relacionada com a temperatura desejada. Para melhor eficiência no processo de resfriamento, procura-se bombear água do mar em temperaturas baixas de aproximadamente 5 °C (CAO et al., 2015). Assim, um *riser* captador de água fria pode possuir diferentes comprimentos, a depender do perfil de temperatura da água mar ao longo da profundidade. Quanto maior a diferença entre a temperatura do ambiente na superfície e a água captada no fundo do mar, melhor será a transferência de calor durante o resfriamento dos equipamentos.

A estrutura tubular do *riser*, geralmente de aço, encontra-se suspensa da embarcação através da sua extremidade superior, a qual sofre efeitos de seu peso próprio, do arrasto devido a ondas e corrente marítima, e dos movimentos da embarcação em ondas. O *riser* pode apresentar instabilidades dinâmicas, como também sofrer danos devido à fadiga. Contribui para a fadiga, além dos movimentos oscilatórios de *heave* e esforços diretos da onda, a ação da correnteza marítima e separação da camada limite ao redor do *riser*, pelo desprendimento alternado de vórtices e indução de forças oscilatórias no tubo, conhecidas como vibração induzida por vórtices (VIV). A VIV é um fenômeno complexo que vêm sendo amplamente estudado nas últimas décadas por diferentes métodos de abordagem numérica e experimental para o aprimoramento das ferramentas utilizadas em sua predição.

Desse modo, o presente trabalho apresenta como objetivo estudar o comportamento do *riser* de captação de água através do entendimento da modelagem hidro-elástica de um duto vertical, e da implementação de um código computacional no domínio do tempo, levando em conta o fenômeno de VIV. A estrutura do *riser* é discretizada utilizando o método de elementos finitos através de uma análise tridimensional desacoplada em que a não linearidade envolvida é resolvida pelo método de Newton-Raphson. A integração no tempo é realizada através do algoritmo implícito de Newmark e o fenômeno de VIV é descrito através de uma abordagem semi-empírica. Para a análise do comportamento do captador, resultados de simulações são obtidos para diferentes perfis de corrente marítima, bem como é feita também uma análise paramétrica para diferentes comprimentos e diâmetros do *riser*. As respostas da dinâmica lateral e axial do captador são apresentadas no estudo.

## Metodologia

O fenômeno de VIV ocorre devido às posições e movimentos nas três direções. Para efeitos de simplificação, o modelo de *riser* tridimensional é dividido em dois planos bidimensionais para o emprego do método de elementos finitos. Em cada plano considerou-se o mesmo tipo de elemento finito coluna-viga, com três graus de liberdade cada nó, duas translações e uma rotação. Os elementos são sujeitos a carregamentos axiais e laterais e a pressão hidrostática interna e externa. A **Figura 1** apresenta o esquema de um elemento do captador e os planos adotados para os cálculos.

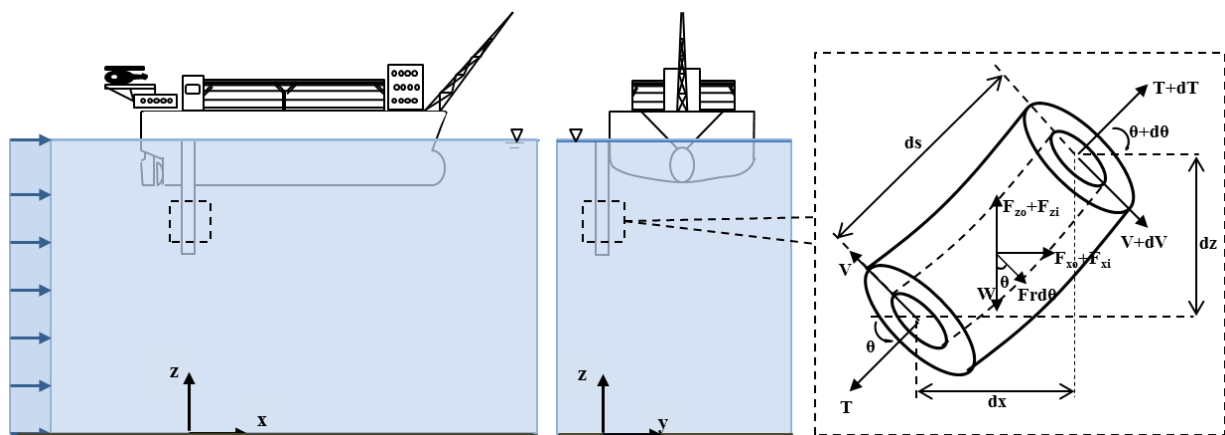


Figura 1 - Esquema do captador de água gelada e as forças presentes em um elemento de *riser*.

A equação diferencial que descreve o comportamento estático nos dois planos bidimensionais para pequenas deflexões – deslocamento angular menor do que  $10^\circ$  em relação a vertical – do *riser* é escrito como:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - T_s \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - (\gamma_s A_s + \gamma_i A_i - \gamma_o A_o) \frac{dv}{dx} = F \quad (1)$$

onde E é o módulo de Young do material do *riser*, I é o momento polar de inércia,  $\gamma_s$  é o peso específico do *riser*,  $A_s$  é a área da seção transversal do *riser*,  $\gamma_i$  é o peso específico do fluido interno,  $A_i$  é a área da seção transversal interna,  $\gamma_o$  é peso específico do fluido externo,  $A_o$  é a área da seção transversal externa, N é a força externa por unidade de comprimento, e  $T_e$  é a tensão efetiva definida por:

$$T_s = T_{tw} - P_i A_i + P_o A_o \quad (2)$$

onde  $T_{tw}$  é a tensão da parede do *riser* no ar,  $P_i$  é a pressão interna,  $P_o$  é a pressão externa.

A tensão efetiva é uma componente importante no cálculo da matriz de rigidez geométrica, por ser responsável pelo acoplamento da força axial com a rigidez lateral. A tensão efetiva é calculada através do Método de Newton-Raphson, a partir do cálculo da força axial de acordo com o deslocamento lateral a cada passo de tempo.

A consideração de dois planos na análise dinâmica é realizada através dos cálculos na direção *in-line*, no plano xz e na direção transversal, no plano yz. Para isso, consideram-se duas forças hidrodinâmicas distintas em cada plano analisado. No plano xz, a força considerada é a força hidrodinâmica resultante da correnteza marítima enquanto no plano yz, é a força decorrente do fenômeno de VIV. A equação diferencial global do movimento do sistema é apresentada na Equação (3).

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (3)$$

onde [M] é a matriz de massa da estrutura, que considera a massa do *riser* e do fluido interno; [C] é a matriz de amortecimento estrutural; [K] é a matriz de rigidez global, que leva em conta as contribuições elástica e geométrica; {F} é o vetor de forças hidrodinâmicas;  $\{\ddot{x}\}$ ,  $\{\dot{x}\}$  e  $\{x\}$  são a aceleração, velocidade e deslocamento do *riser*, respectivamente.

As matrizes de massa e de rigidez são obtidas aplicando o princípio de D'Alembert à Equação (1) e empregando a formulação fraca do método de Galerkin. Já a matriz de amortecimento estrutural é definida a partir do método de Rayleigh, proporcional à combinação linear das matrizes de massa e de rigidez.

A forma modificada da Equação de Morison (CHAKRABARTI, 1987) para descrever o carregamento referente à correnteza marítima, expressa pela velocidade relativa é empregada para definir a força hidrodinâmica *in-line*, no plano xz:

$$f = -\frac{\pi}{4} C_A D_o^2 \gamma_o \ddot{x} + \frac{1}{2} C_D D_o \gamma_o |U_C - \dot{x}| (U_C - \dot{x}) \quad (4)$$

em que  $C_A$  é o coeficiente de massa adicional,  $D_o$  é o diâmetro externo do *riser*,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto,  $U_C$  é a velocidade da corrente.

Com a aplicação da força *in-line* obtêm-se o ângulo de inclinação ao longo do *riser* no plano xz. Na presença de ângulo entre a direção de incidência do escoamento e o eixo do *riser*, a velocidade da correnteza pode ser decomposta em velocidade normal e tangencial, em relação ao eixo do *riser*. Discutido no trabalho de Tsukada e Morooka (2013), o princípio da independência determina que apenas a componente normal da velocidade possui influência no fenômeno de VIV. Assim, a partir de

agora, as análises de VIV que envolvam a velocidade de correnteza, levam em consideração apenas a componente normal ao eixo do *riser* ( $U_N$ ). O valor de  $U_N$  ao longo do comprimento do *riser* é então utilizado como dado de entrada na força de VIV.

Para descrever o fenômeno de VIV, o presente trabalho se baseia no modelo semi-empírico, no qual os coeficientes hidrodinâmicos atribuídos durante os cálculos são provenientes de dados experimentais. Este modelo foi adotado por apresentar melhores aproximações quando comparados a resultados experimentais (CHAPLIN, 2005a), sendo geralmente os mais empregados pela indústria do petróleo para projetos de *riser*. A força de VIV por unidade de comprimento é calculada através da Equação (5):

$$f_{VIV} = \frac{1}{2} \rho_w U_N^2 D_o C_L \sin(2\pi f_s t + \varphi) \quad (5)$$

em que  $\rho_w$  é a densidade da água,  $U_N$  é a velocidade da correnteza normal ao eixo do *riser*,  $C_L$  é coeficiente de sustentação,  $f_s$  é a frequência de desprendimento de vórtices, e  $\varphi$  é o ângulo de fase entre a força hidrodinâmica de sustentação e o deslocamento do cilindro.

A frequência de VIV é obtida com base no fenômeno de ressonância conhecido como *lock-in*, no qual o processo de desprendimento de vórtices é controlado pela vibração do cilindro. Ele se caracteriza pela modificação tanto da frequência natural de vibração, devido à variação da massa adicionada, quanto pela modificação da frequência de Strouhal que, por sua vez, é influenciada pela vibração do cilindro. Neste trabalho, para determinar a frequência de desprendimento de vórtices, considerou-se a relação entre a velocidade reduzida e o coeficiente de massa adicional obtida experimentalmente por Vikestad (1998).

Os valores de  $C_L$  e  $\varphi$  são estimados através da metodologia apresentada por Tsukada e Morooka (2013), no qual são utilizados os valores das componentes em fase ( $C_{dv}$ ) e fora de fase ( $C_{mv}$ ) com o movimento da estrutura. Tais dados são retirados do experimento de Blevins (2009), onde um cilindro rígido é forçado a oscilar.

$$C_L = \sqrt{C_{mv}^2 + C_{dv}^2} \quad (6)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{C_{dv}}{C_{mv}} \right) \quad (7)$$

## Resultados e Discussão

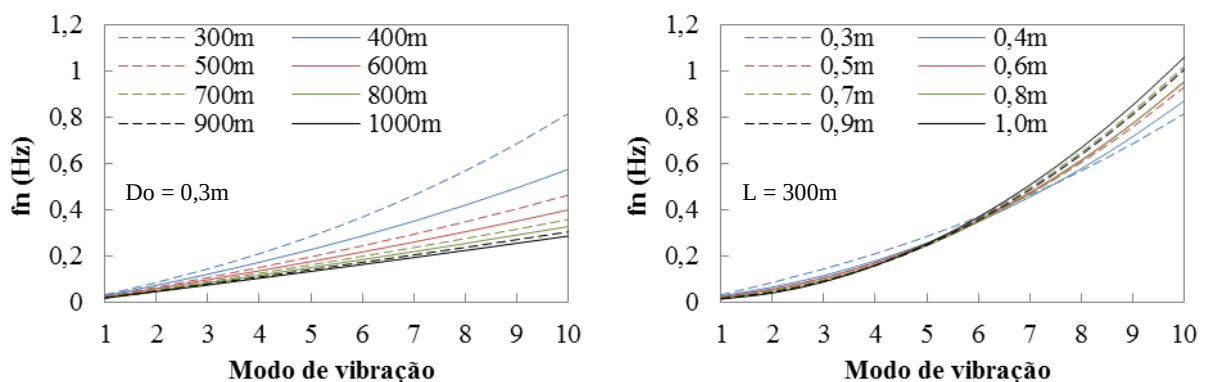
Neste trabalho um estudo paramétrico é realizado para analisar a influência das dimensões e da velocidade da correnteza marítima na resposta do *riser*, com relação à frequência natural e amplitude de vibração na presença do fenômeno de VIV.

As simulações para o estudo do comportamento do captador de água do mar foram realizadas variando-se o comprimento e os diâmetros interno e externo do *riser*, e também a velocidade de correnteza incidente. Os comprimentos utilizados variam de 300m a 1000m, com o intuito de abranger a extensão do captador atualmente em operação no Brasil (FRANCISS; CUSTÓDIO, 2015), e também por ser o tamanho necessário para atingir a temperatura de 5°C na Bacia de Santos e na Bacia de Campos, de acordo com os respectivos perfis de temperatura vertical (DIRETORIA DE

HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO, 1975). Os valores dos diâmetros considerados foram obtidos fixando-se a área da seção transversal e variando-se o diâmetro externo de 0,3m a 1m. Para a velocidade de correnteza marítima, adotaram-se os valores de 0,1m/s a 0,5m/s. As demais propriedades do *riser* consideradas para o presente estudo são módulo de elasticidade de 210GPa, densidade do *riser* de 7850kg/m<sup>3</sup>, densidade do fluido interno e externo de 1024kg/m<sup>3</sup> e coeficiente de arrasto de 1.

A Figura 2 apresenta a frequência natural do captador em vibração livre na condição de águas calmas ( $C_A = 1$ ). As curvas à esquerda apresentam a frequência natural dos dez primeiros modos de vibração para os diferentes comprimentos, considerando-se o mesmo diâmetro externo de 0,3m. Já à direita, os valores dos diâmetros variam e o comprimento do *riser* de 300m permanece constante. A partir das curvas do gráfico à esquerda, observa-se que devido ao aumento da massa do sistema, a frequência natural tende a reduzir com o aumento do comprimento.

Ainda na Figura 2, diferentemente do observado anteriormente, o gráfico à direita ilustra, a partir do sexto modo de vibração, a inversão da tendência de decrescimento da frequência natural com o aumento do diâmetro para os diferentes modos de vibração. Neste caso, para comprimentos menores que 400m, quando os diâmetros interno e externo variam para um *riser* de mesma extensão, a rigidez do sistema é alterada devido a modificação do segundo momento de inércia, o que resulta em aumento da rigidez frente à massa do sistema. Embora este comportamento não afete a resposta do sistema no presente trabalho, em consequência das baixas velocidades de correnteza incidente, há a necessidade do estudo de casos adicional que excitem modos de vibração mais altos com o intuito de investigar a influência da transição observada entre os modos 5 e 7.



**Figura 2 – Frequência natural do *riser* para os dez primeiros modos de vibração, na condição de águas calmas. À esquerda para diferentes comprimentos e a direita, para diferentes diâmetros.**

A Figura 3 ilustra a relação entre a amplitude de vibração na direção y do nó presente na extremidade inferior do captador e a variação do comprimento do *riser* para diferentes velocidades de correnteza incidente. Cada gráfico representa a resposta para quatro diâmetros distintos: 0,3m, 0,5m, 0,7m e 0,9m. Os gráficos presentes na Figura 3, de maneira geral, ilustram o aumento da amplitude de vibração com o aumento da velocidade de correnteza, por estarem diretamente relacionadas à força aplicada no *riser*. Além disso, é possível também observar uma tendência com relação ao aumento do diâmetro. As curvas tendem a apresentar picos de maior amplitude de vibração quando o captador possui 500m e 700m de comprimento, independente da velocidade de correnteza marítima. Tal fato torna-se mais evidente com o aumento do diâmetro.

Os resultados temporais da força axial ao longo do captador, com relação à variação de seus parâmetros e da velocidade de correnteza marítima, não apresentam modificações significativas na

resposta do sistema por estar suspenso da embarcação e não haver movimentos de *heave* no topo. Desse modo, problemas de compressão não são encontrados no ponto de contato entre a embarcação e o *riser*. Observa-se também, em virtude do peso estrutural, a influência do comprimento do *riser* no aumento da força axial, visto que o peso linear da estrutura é constante para todos os diâmetros nas simulações do presente trabalho.

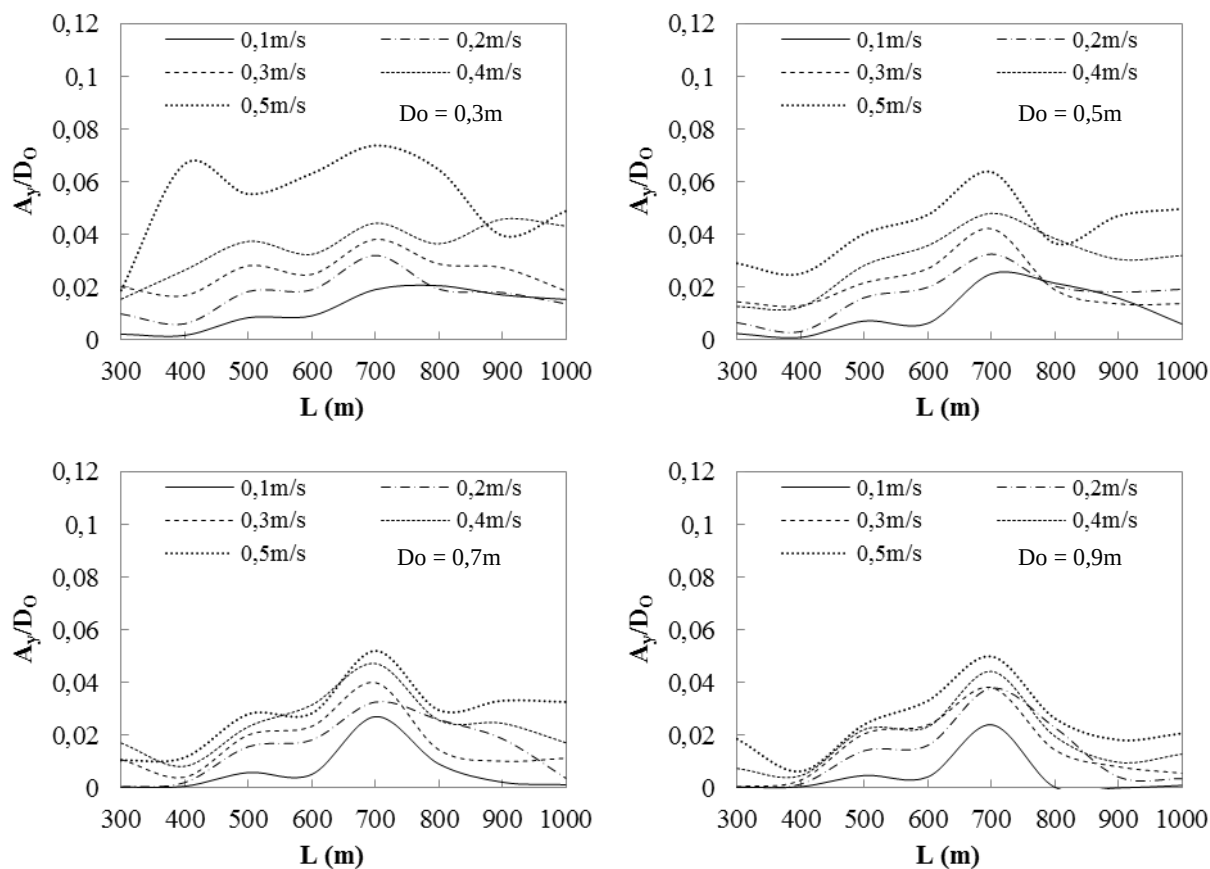


Figura 3 – Amplitude de vibração do captador de água do mar na direção y pela variação de seu comprimento, para quatro diâmetros externo distintos: 0,3m, 0,5m, 0,7m e 0,9m.

## Conclusões

O estudo do comportamento dinâmico de um *riser* captador de água gelada através da análise paramétrica na presença do fenômeno de VIV é essencial para avaliar a resposta do sistema.

Através dos resultados das simulações observou-se que o comprimento apresenta maior influência na resposta da amplitude de vibração na direção y e uma tendência na resposta foi observada com o aumento do diâmetro. Apenas na presença de correnteza marítima, não foi encontrada variação significativa da força axial para a ocorrência de possíveis problemas de compressão local. Assim, o entendimento da contribuição do diâmetro e do comprimento torna-se fundamental para avaliar corretamente o dimensionamento do captador de água do mar.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao programa ANP PRH-15 pelo apoio a presente pesquisa.

## **Referências Bibliográficas**

BLEVINS, R. D. Models for Vortex-Induced Vibration of Cylinders Based on Measured Forces. *Journal of Fluids Engineering*, v. 131, n. 10, p. 1-9, 2009.

CAO, P.; XIANG, S.; HE, J.; KIBBEE, S.; BIAN, S. Advancing Cold Water Intake Riser Design through Model Test. In: *Annual Offshore Technology Conference*, Houston. *Offshore Technology Conference*. p. 4–7, 2015.

CHAKKARAPANI, V.; CHAUDHURY, G. Concept to Design: A Novel Seawater Intake Riser System. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING*, 33., 2014, San Francisco. ASME. p. 1–8 2014.

CHAKRABARTI, S. K. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Dorchester: Henry Ling Limited, 1987. 464 p.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO, Marinha do Brasil, *Atlas Oceanográfico*, Niterói, 1975.

FRANCISS, R.; CUSTÓDIO, A. B. Uptake Riser for P-25 Platform in Albacora Field in Campos Basin. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING*, 34., 2015, St. John's. *Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. p. 1–7, 2015.

TSUKADA, R. I; MOROOKA, C. K. A Numerical Simulation Procedure for Vortex-Induced Vibration of Pipelines with Free Span. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING*, 2013, Nantes. ASME 2013.

VIKESTAD, K. Multi-Frequency Response of a Cylinder Subjected to Vortex Shedding and Support Motions. 1998. 169 p. PhD Thesis – Faculty of Marine Structures, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1998.