

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DE FADIGA DE VÃOS LIVRES EM DUTOS SUBMARINOS

AUTORES:

**VALTERCIO DOS SANTOS BARROS, BIANCA DE CARVALHO PINHEIRO, ILSON
PARANHOS PASQUALINO**

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ANÁLISE DE FADIGA DE VÃOS LIVRES EM DUTOS SUBMARINOS

Resumo

A integridade estrutural de dutos submarinos, para transporte de óleo e gás, na condição de vão livre, deve ser avaliada considerando a interação com o leito marinho, a elevada pressão externa e a ação de ondas e correntes. Cargas ambientais extremas podem ainda resultar em vibração induzida por vórtice (VIV) pela ação de ondas e correntes nos vãos livres. Falhas por fadiga podem ocorrer em vãos livres de dutos submarinos, associadas ou não à VIV. O cenário estudado localiza-se em uma profundidade entre 20 m e 50 m, na Bacia de Campos, Brasil. Este estudo baseia-se na previsão do dano por fadiga de dutos submarinos em vão livre, contribuindo para a prevenção de falhas que podem resultar em severos danos socioambientais. Foi desenvolvido um modelo numérico, baseado no método dos elementos finitos, para reproduzir a interação com o solo marinho e as cargas ambientais de ondas e correntes em dutos de aço em vãos livres. O modelo permite estimar as variações de tensão resultantes para a avaliação do dano por fadiga segundo uma curva S-N adequada e considerando a regra de acúmulo linear do dano de Palmgren-Miner. A área náutica 74 foi considerada para estimar os parâmetros de distribuição de ondas a longo prazo para atingir estados do mar com alturas de onda significativas (H_s), correspondente ao período de onda de cruzamento zero (T_z), conforme a norma DNVGL-RP-C205. A rigidez do solo (areia) foi considerada de forma simplificada segundo a norma DNVGL-RP-F114, estimando os valores de rigidez dinâmica nas direções axial, vertical e lateral na interação duto-solo. Foi adotada a teoria não-linear de ondas de Stokes de 5ª ordem. O modelo numérico foi usado em um estudo paramétrico com a variação das dimensões do duto (razão entre diâmetro e espessura, D/t , e comprimento do vão), da profundidade da água e do estado de mar. A estabilidade dos casos analisados foi avaliada segundo a norma DNV-RP-F109 para a avaliação da possibilidade de ocorrência de VIV causadas pela ação das cargas de ondas e correntes, caracterizada pela norma DNVGL-RP-F105. Com base nas variações de tensão obtidas nas simulações numéricas, e utilizando a curva S-N "D" (água do mar com proteção catódica), proposta na norma DNV-GL-RP-C203, e a regra de Palmgren-Miner de acúmulo linear dos danos, foram estimadas as vidas em fadiga dos casos analisados.

Palavras-chave: dutos de transporte de óleo e gás, vãos livres, vibração induzida por vórtice, fadiga.

Abstract

The structural integrity of subsea oil and gas pipelines in free span conditions must be assessed considering the interaction with the seabed, the high external pressure and the action of waves and currents. Extreme environmental loads can also result in vortex-induced vibration (VIV) due to the action of waves and currents in the free spans. Fatigue failures can occur in free spans of subsea pipelines, whether or not associated with VIV. The studied scenario is located at a depth between 20 m and 50 m, in the Campos Basin, Brazil. This study is based on the prediction of fatigue damage in free-span subsea pipelines, contributing to the prevention of failures that can result in severe socio-environmental damage. A numerical model was developed, based on the finite element method, to reproduce the interaction with the seabed and the environmental loads of waves and currents on free span steel pipes. The model allows estimating the resulting stress variations for the assessment of fatigue damage according to an appropriate S-N curve and considering the Palmgren-Miner linear damage accumulation rule. Nautical area 74 was considered to estimate long-term wave distribution parameters to achieve sea states with significant wave heights (H_s), corresponding to the zero-crossing wave period (T_z), according to the DNVGL-RP-C205 standard. The stiffness of the soil (sand) was considered in a simplified way based on the DNVGL-RP-F114 standard, estimating the dynamic stiffness values in the

axial, vertical and lateral directions in the pipe-soil interaction. The non-linear 5th order Stokes wave theory was adopted. The numerical model was used in a parametric study with varying pipe dimensions (ratio between diameter to thickness, D/t , and span length), water depth and sea state. The stability of the analyzed cases was evaluated according to the DNV-RP-F109 standard to assess the possibility of VIV occurring due to the action of wave and current loads, characterized by the DNVGL-RP-F105 standard. Based on the stress variations obtained in the numerical simulations and using the S-N curve "D" (seawater with cathodic protection), proposed in the DNV-GL-RP-C203 standard, and the Palmgren-Miner rule for linear accumulation of damage, the fatigue lives of the analyzed cases were estimated.

Keywords: oil and gas pipes, free spans, vortex-induced vibration, fatigue.

Introdução

Para garantir a integridade de dutos submarinos, para o transporte de óleo e gás, em vãos livres durante todo o ciclo de vida, é crucial considerar vários fatores e realizar uma análise abrangente envolvendo cargas ambientais geradas por ondas e correntes, cargas permanentes, interação com o solo marinho e cargas em serviço. Considerando a vida útil de projeto para essas estruturas, normalmente entre 20 e 30 anos, e a ação dos carregamentos ao longo desse período, deve-se avaliar o dano por fadiga associado, visando evitar falhas capazes de resultar em graves danos socioambientais. Este trabalho tem como objetivo a previsão de danos por fadiga em dutos submarinos com vãos livres. O cenário estudado está localizado em profundidades intermediárias, na Bacia de Campos, Brasil, e a avaliação de fadiga é baseada na norma da DNV correspondente.

Um modelo numérico foi desenvolvido, baseado no método dos elementos finitos, para reproduzir as ações do leito marinho e as cargas ambientais de ondas e correntes em dutos de aço com vãos livres. O modelo permite estimar as variações de tensão resultantes para a avaliação de danos por fadiga de acordo com uma curva S-N apropriada e considerando a regra de acumulação de danos linear de Palmgren-Miner. O modelo numérico foi utilizado em um estudo paramétrico com variação das dimensões dos dutos, profundidade da água e estado do mar. Com base nas variações de tensão obtidas nas simulações numéricas, e utilizando uma curva S-N, as durações de vida por fadiga dos casos analisados foram estimadas.

Metodologia

A representação da interação com o leito marinho e a ação de ondas e correntes requerem o uso de modelos envolvendo as áreas de hidrodinâmica, mecânica dos solos e análise estrutural. Um modelo numérico foi desenvolvido, baseado no método dos elementos finitos, usado o programa de elementos finitos ABAQUS (versão 6.14) [1], para reproduzir o comportamento de dutos com vãos livres sob cargas estáticas e ambientais dinâmicas, de acordo com diferentes estados do mar. Considera-se um solo de leito marinho arenoso e a interação entre o duto e o solo é representada por elementos de interação duto-solo. Os fenômenos sofridos pelo solo do leito marinho, como erosão e liquefação, associados às ações de ondas e correntes, altera constantemente o cenário dos dutos com vãos livres. No entanto, o presente estudo assumirá o solo do leito marinho em uma configuração permanente, com o comprimento do vão livre do duto mantido constante. As normas DNVGL-RP-F105 [2] e DNVGP-F114 [3] foram consideradas para definir parâmetros de caracterização do solo do leito marinho, como coeficiente de atrito e rigidez, por exemplo. Os parâmetros considerados para caracterizar os carregamentos ambientais

(ondas e correntes) foram definidos segundo a norma DNV-RP-C205 [4]. Não foi considerado o fenômeno de corrosão marinha, assumindo a adoção de proteção catódica para o duto.

O modelo numérico foi utilizado em um estudo paramétrico para ampliar o estudo para diferentes dimensões de dutos, profundidades de água e estados do mar. A estabilidade dos casos analisados, quanto à possibilidade de ocorrência de vibrações induzidas por vórtices (*vortex-induced vibration*, VIV) causada pela ação de cargas ambientais de ondas e correntes, foi avaliada segundo a norma DNV-RP-F109 [5]. Com base nas variações de tensão obtidas nas simulações numéricas, e utilizando uma curva S-N recomendada na norma DNV-GL-RP-C203 [6] e a regra de acúmulo linear dos danos de Palmgren-Miner, as durações de vida por fadiga dos casos analisados foram estimadas. Os resultados foram ainda analisados pelo programa TheNavalArch [7], uma ferramenta computacional baseada nas mesmas normas da DNV mencionadas.

Resultados e Discussão

O modelo numérico foi desenvolvido com o auxílio do programa de elementos finitos ABAQUS (versão 6.14) [1], consistindo em um segmento de duto composto por elementos de viga e elementos de interação duto-solo representando a ação do leito marinho sobre o duto nos trechos apoiados (ombros) sobre o solo. O modelo contempla diferentes dimensões do tubo, com diâmetro (D) de 196,9 mm e espessuras (t) de 10,6 e 20,6 mm, representando razões D/t 19 e 10, respectivamente. Os seguintes comprimentos de vão (L) foram adotados: 20, 40, 60 e 80 m. O comprimento dos segmentos apoiados sobre o solo foi mantido constante, correspondendo a 7,5 m. O modelo é apresentado nas Figuras 1 e 2 nas configurações indeformada inicial e deformada em um dado instante da simulação, respectivamente, para um vão de 40 m. A superfície do mar representada (Figuras 1 e 2) foi modelada apenas para fins de visualização, indicando apenas a profundidade da água e a variação da superfície do mar sob movimento da onda.

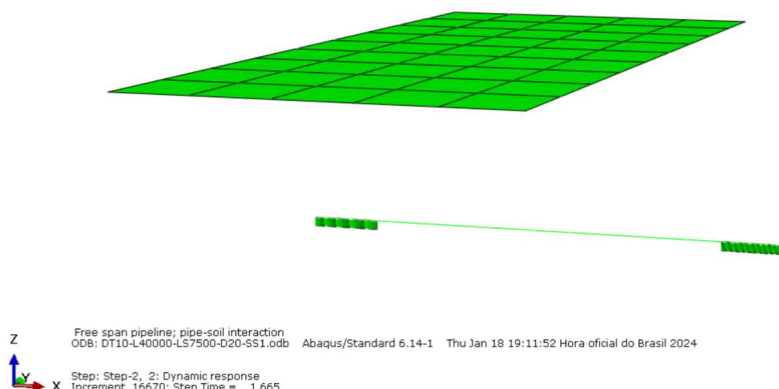


Figura 1. Modelo numérico composto pelo duto em vão livre (elementos de viga) de 40 m, elementos de interação duto-solo e a superfície do mar na configuração indeformada inicial.

O aço API 5L X60 foi adotado como material do duto, cujas propriedades mecânicas relevantes são apresentadas na Tabela 1 [8]. Foram considerados um coeficiente de Poisson (ν) de 0,3 e um módulo de Young (E) de 210 GPa. Os coeficientes de amortecimento de Rayleigh (α e β) do duto foram calculados em função da razão D/t e do comprimento do vão livre do duto. O solo foi considerado arenoso drenado, com ângulo de atrito (ϕ) de 30°.

Os elementos de viga do tipo PIPE31 foram utilizados para modelar o duto, com dois nós e seis graus de liberdade por nó e interpolação linear. Os segmentos do duto apoiados sobre o solo (ombros) foram modelados com 150 elementos, enquanto o trecho em vão livre foi modelado com 100 elementos. Elementos tridimensionais de interação duto-solo (“*pipe-soil interaction*”, PSI), do tipo PSI34, com quatro nós e três graus de liberdade por nó, foram adotados para representar a ação do solo do leito marinho nos ombros (apoios). Esses elementos possuem apenas graus de liberdade de deslocamento em seus nós, e um de seus lados compartilha nós com o elemento de tubo subjacente. Os nós do lado oposto representam uma superfície de solo remota e são usados para prescrever os movimentos do solo distante da interação por meio das condições de contorno. Os elementos PSI não discretizam o domínio real do solo circundante, mas representam a ação do solo através da prescrição das rigidezes dos elementos, calculadas conforme a norma DNVGL-RP-F114 [3]. As rigidezes da interação duto-solo nas direções vertical e lateral foram assumidas como lineares, com magnitudes de 22.597,5 N/mm e 16.993,8 N/mm, respectivamente. A rigidez axial foi definida por uma relação bi-linear, com uma rigidez de 236,6 N/mm até um deslocamento de 1,25 mm, a partir do qual o valor da rigidez permanece constante. Cada ombro do leito marinho foi modelado com 150 elementos. A superfície do mar foi modelada apenas para fins de referência e visualização, usando elementos do tipo SFM3D4 (elemento de superfície tridimensional de quatro nós). Nenhum resultado é fornecido nessa superfície. Como condições de contorno, foram restringidos os seis graus de liberdade dos bordos do duto e os lados inferiores dos elementos de interação duto-solo (PSI34) tiveram restringidos todos os três graus de liberdade de deslocamento.

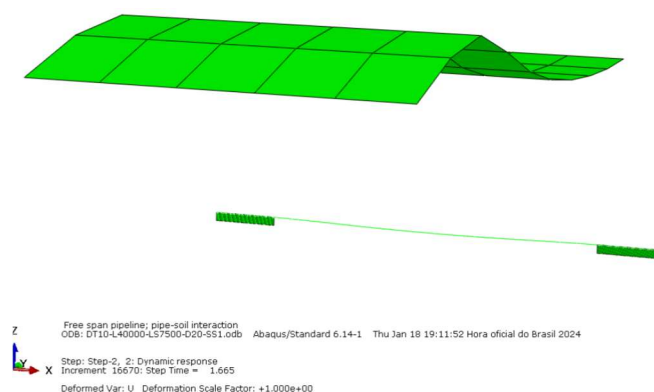


Figura 2. Modelo numérico composto pelo duto em vão livre (elementos de viga) de 40 m, elementos de interação duto-solo e a superfície do mar na configuração deformada em um dado instante da simulação.

Tabela 1: Propriedades mecânicas médias do aço API 5L X60 [8].

Young modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Y/T	Elongation (%)
182,576	520 ¹	521 ²	602	0.86
				18.5 ³

¹ 0.2% offset; ² 0.5% EUL, EUL = Extension-Under-Load; ³ 50 mm gage length

O modelo compreende dois passos de carga: estático e dinâmico. No primeiro passo de carga, estático, é aplicado o carregamento corresponde à ação do peso próprio (uniformemente distribuído). Além disso, são consideradas massas adicionais aplicadas ao longo do duto, de forma a considerar a presença de incrustações resultantes de vida marinha. O passo de carga dinâmico consiste na aplicação de três forças, distribuídas uniformemente, correspondente a: flutuabilidade, arrasto e inércia. As magnitudes dessas

forças são variáveis em função da evolução do estado de mar ao longo do passo de carga. O estado de mar é prescrito através dos parâmetros AQUA e WAVE do ABAQUS [1].

Tabela 2: Dados do histograma com cinco estados de mar.

Estado de mar	Altura máxima significativa da Onda, H_s (m)	Período de cruzamento zero, T_z (s)
SS1	9,403	9,9
SS2	8,280	13,873
SS3	7,349	15,221
SS4	6,222	16,267
SS5	5,398	16,715

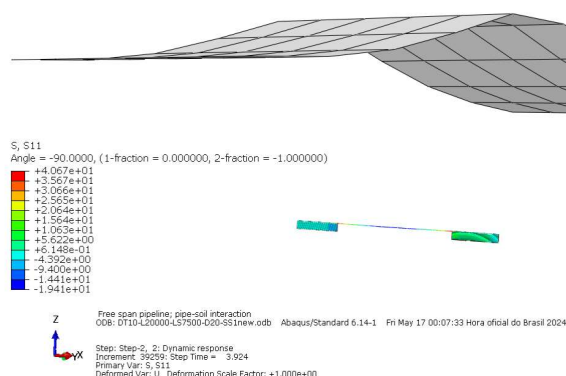


Figura 3: Distribuição da tensão longitudinal (S11) no duto em vão livre para: $D/t = 10$, profundidade de água de 20 m, vão de 20 m e estado de mar SS1 (MPa).

O cenário estudado está localizado em profundidades intermediárias, na área 74 do Oceano Atlântico Sul, na Bacia de Campos, Brasil. Condições severas no mar na região são observadas, com ondas de SW com altura significativa (H_s) entre 2 e 3 m e período de cruzamento zero (T_z) entre 10 e 14 s. Através dos parâmetros AQUA são prescritas a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), a densidade da água (1025 kg/m^3), a profundidade da água (20 e 50 m) e a velocidade da corrente, variando linearmente de 0 no leito marinho a 411,56 mm na superfície do mar. Os parâmetros WAVE indicam a formulação de onda considerada (teoria de ondas de STOKES de quinta ordem), e os dados de H_s e T_z . Cinco estados de mar foram considerados para representar o histograma (SS1, SS2, SS3, SS4 e SS5), cujos dados são apresentados na Tabela 2. Inicialmente, apenas o estado de mar mais severo (SS1) foi considerado, correspondendo a $H_s = 9,403 \text{ m}$ e $T_z = 9,9 \text{ s}$. Outros estados de mar do histograma serão considerados, posteriormente, para os casos em que a falha por fadiga não tiver sido atingida no estado de mar mais severo. Ambas as direções da onda e da corrente são perpendiculares ao duto. O modelo numérico foi usado em um estudo paramétrico com a variação das dimensões do duto (razões $D/t = 10$ e 19), profundidades de água (20 e 50 m) e comprimentos de vão (20, 40, 60 e 80).

As Figuras 3 e 4 apresentam a distribuição da tensão longitudinal (S11) no duto com razão $D/t = 10$ para uma profundidade de água de 20 m e comprimentos de vão de 20 e 80 m, respectivamente. As Figuras 5 e 6 apresentam a distribuição da tensão longitudinal (S11) no duto com razão $D/t = 19$ para uma profundidade de água de 20 m e comprimentos de vão de 20 e 80 m, respectivamente. Esses resultados correspondem ao estado de mar mais severo (SS1). Os resultados para profundidade de 50 m se mostraram praticamente inalterados e ligeiramente inferiores em relação àqueles para 20 m de profundidade. Dessa forma, a avaliação da vida em fadiga será feita apenas para profundidade de 20 m. Com base nos resultados numéricos obtidos, foram definidas as amplitudes de tensão longitudinal máximas, e tensões médias associadas, para cada caso analisado. As amplitudes de tensão longitudinal

máximas foram corrigidas para a condição de tensão média nula, segundo o critério de Goodman, e consideradas para o cálculo dos danos de fadiga correspondentes, referentes aos números de ciclos obtidos através da curva S-N “D” (água marinha com proteção catódica) da norma DNV-GL-RP-C203 [6]. As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores das tensões mínima e máxima, amplitude de tensão e tensão média, obtidos com o modelo numérico, para razões D/t 10 e 19, respectivamente. Finalmente, também nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os números de ciclos, os danos em fadiga (D) e as vidas em fadiga para cada caso, considerando uma vida útil de projeto de 30 anos e a ocorrência de falha para $D = 1$. Observa-se que a falha por fadiga é esperada em todos os casos, exceto para $L = 20$ m ($D/t = 10$ e 19).

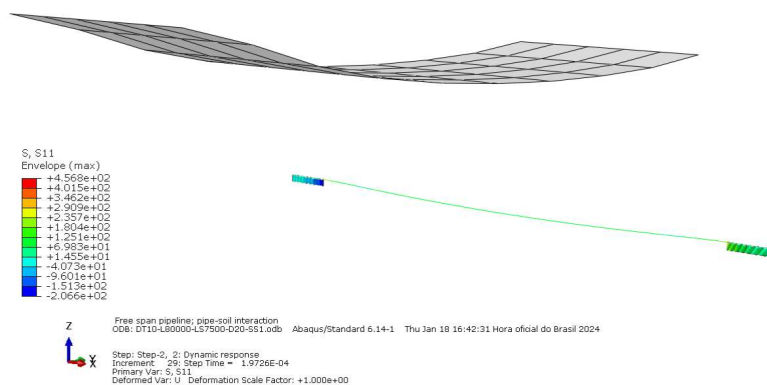


Figura 4: Distribuição da tensão longitudinal (S11) no duto em vão livre para: $D/t = 10$, profundidade de água de 20 m, vão de 80 m e estado de mar SS1 (MPa).

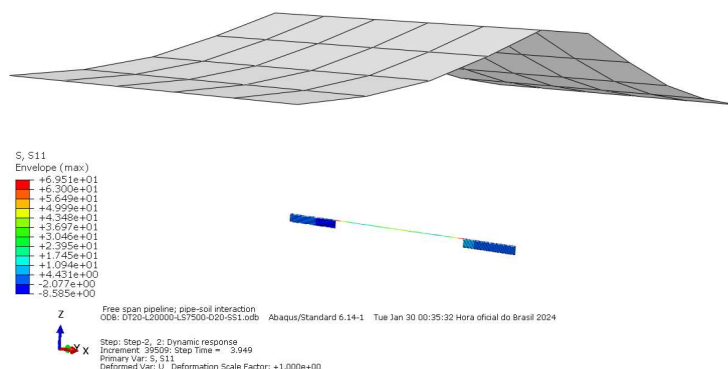


Figura 5: Distribuição da tensão longitudinal (S11) no duto em vão livre para: $D/t = 20$, profundidade de água de 20 m, vão de 20 m e estado de mar SS1 (MPa).

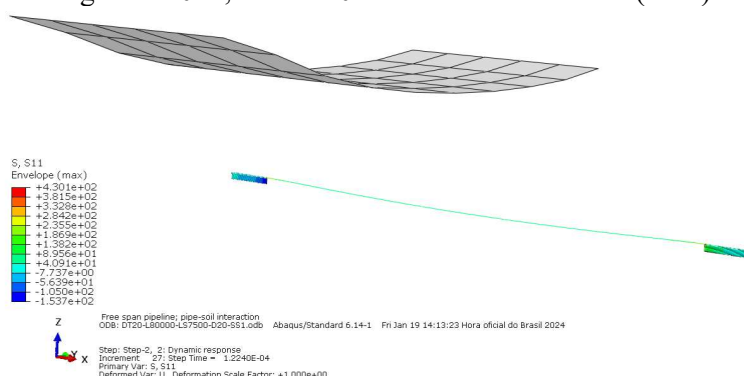


Figura 6: Distribuição da tensão longitudinal (S11) no duto em vão livre para: $D/t = 20$, profundidade de água de 20 m, vão de 80 m e estado de mar SS1 (MPa).

Tabela 3: Resultados da avaliação de fadiga para $D/t = 10$, profundidade de 20 m e SS1.

L (m)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	σ_a (MPa)	σ_m (MPa)	Número de ciclos	D (%)	Vida em fadiga (anos)	Falha (S/N)
20	-23,44	40,67	32,05	8,62	3,5 E+6	< 1	> 30	N
40	129,11	319,17	95,03	224,14	8,0 E+5	1,6	19	S
60	183,13	403,10	109,99	293,11	5,0 E+4	2,3	13	S
80	253,53	456,77	101,62	355,15	7,0 E+4	5,0	6	S

Tabela 4: Resultados da avaliação de fadiga para $D/t = 19$, profundidade de 20 m e SS1.

L (m)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	σ_a (MPa)	σ_m (MPa)	Número de ciclos	D (%)	Vida em fadiga (anos)	Falha (S/N)
20	-39,19	69,52	54,35	15,16	5,0 E+5	< 1	> 30	N
40	119,35	283,18	81,91	201,26	1,7 E+5	2,5	13	S
60	172,56	368,45	97,95	270,50	8,2E + 4	2,3	13	S
80	248,14	430,12	90,99	339,13	1,2 E+5	7,5	4	S

Conclusões

O modelo numérico desenvolvido, baseado no método dos elementos finitos, visa reproduzir a interação com o solo marinho e as cargas ambientais de ondas e correntes em dutos de aço em vãos livres. O modelo permitiu estimar as variações de tensão resultantes para a avaliação do dano por fadiga segundo a curva S-N “D” da norma DNVGL-RP-C205 e a regra de acúmulo linear do dano de Palmgren-Miner. O modelo numérico foi usado em um estudo paramétrico que permitiu estimar as variações de tensão experimentadas pelos dutos em vãos livres e avaliar as vidas em fadiga relacionadas a diferentes dimensões de dutos, profundidades de água e estados de mar. Em análises futuras, serão considerados outros parâmetros, como outros tipos de solo e materiais do duto, e diferentes cenários.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro), por meio do Processo E-26/201.284/2022.

Referências Bibliográficas

- [1] ABAQUS USER MANUAL. Dassault Systèmes Simulia Corporation, 2014.
- [2] FREE SPANNING PIPELINES. Recommended Practice. DNVGL-RP-F105. Edition June 2017.
- [3] PIPE-SOIL INTERACTION FOR SUBMARINE PIPELINES. Recommended Practice. DNVGL-RP-F114. Edition May 2017.
- [4] ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL LOADS. Recommended Practice. DNV-RP-C205. Edition. April.
- [5] RECOMMENDED PRACTICE DNVGL-RP-F109 Edition May 2017 On-bottom stability design of submarine pipelines.
- [6] FATIGUE DESIGN OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES. Recommended Practice. DNV-GL-RP-C203. Ed. April 2016.
- [7] TheNavalArch Program. Available at: <https://thenavalarch.com/software/oil-gas/subsea-engineering/dnv-rp-f105-pipeline-free-span-analysis-tool/>. Accessed on 1st oct 23.
- [8] PINHEIRO, Bianca de Carvalho; PASQUALINO, I. P.; LESAGE, J.; BENSEDDIQ, N.: Mesures et modélisation de l'amorçage de l'endommagement par fatigue des tubes d'acier pour le forage et l'exploitation pétrolière. In: Livre des Résumés du 15ème Colloque National de la Recherche dans les IUT, 2009, Villeneuve d'Ascq, França. Institut Universitaire de Technologie A de Lille, 2009.