



Tipo de artigo: Artigo original

Procedimento de projeto à fadiga de tubulações instaladas no *topside* de FPSOs

Breno Mello^a <https://orcid.org/0009-0007-9843-1237>

Leonardo Matos^b <https://orcid.org/0009-0000-3549-2410>

Antonio Gama^b <https://orcid.org/0000-0002-3493-1159>

^a Universidade Federal Fluminense - UFF, Departamento de Engenharia Mecânica, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

^b Universidade Federal Fluminense - UFF, Programa de Pós-Graduação em Montagem Industrial, Niterói, RJ, Brasil

Resumo: O trabalho em questão tem como objetivo o estudo da vida em fadiga de tubulações instaladas em embarcações do tipo FPSO, utilizando o novo método desenvolvido pelos autores. O foco do trabalho é no dano causado pelos deslocamentos e acelerações impostas aos sistemas de tubulações devido a ação das ondas do mar. São apresentadas as normas e procedimentos atualmente utilizados para este tipo de projeto, bem como uma revisão dos conceitos básicos envolvidos no tema. O novo método é explicado em detalhes e, ao final, resultados de um estudo de caso são mostrados e comparados com os resultados obtidos por métodos existentes.

Palavras-chave: fadiga, tubulações, FPSO.

Abstract: This work aims to study the fatigue life of pipes installed on FPSOs using the new method developed by the authors. The work focuses on the damage caused by the displacements and accelerations imposed on the piping system due to the action of ocean waves. The standards and procedures currently used for this type of project are presented, and a review of the basic concepts involved in the topic is provided. The method is described in detail, and the results of a case study of a real pipeline are presented and compared with the results obtained by existing methods.

Keywords: fatigue, piping, FPSO.

Como citar: MELLO, BRENO C. L.; MATOS, LEONARDO M.; GAMA, ANTONIO L. **Procedimento de Projeto à Fadiga de Tubulações Instaladas no Topside de FPSOs.** *Engevista*, vol. 22, n.1, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, 2024.

Autor para contato: Breno Mello. E-mail: brenomello@id.uff.br

Financiamento da PETROBRAS através do Termo de Cooperação Técnica PETROBRAS, UFF e FEC 5850.0108939.18.9

Conflito de interesse: Nada a declarar.

1 INTRODUÇÃO

Por mais que o mundo esteja passando por uma transição energética, o setor de óleo e gás ainda é muito importante para o Brasil, seja na geração de empregos ou por conta da dependência do rodoviário, fomentada por Juscelino Kubitschek.

Nesse contexto, o país vem desenvolvendo e modernizando sua indústria com o objetivo de aumentar a autossuficiência e competitividade no âmbito internacional. O trabalho em questão é só mais uma peça nesse grande quebra-cabeças, que é a exploração de campos de petróleo em alto mar, com o foco no projeto de *FPSOs (Floating Production Storage and Offloading)*.

Nos *FPSOs*, o óleo cru é armazenado e o refino se inicia na própria embarcação, conceito extremamente interessante do ponto de vista econômico. Por esse motivo, essas embarcações são repletas de tubulações que precisam ser muito bem projetadas a fim de se evitar falhas e vazamentos, como se pode evidenciar na Figura 1.



Figura 1. *FPSO* em campo.

Fonte: Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2017-11/profissionais-offshore-contam-desafio-de-trabalhar-e-descansar-240-km-da-costa>>
Acesso:20/05/2024

Uma parte crucial do projeto de um *FPSO* é a avaliação da vida útil do equipamento quando sujeito a carregamentos cíclicos, em outras palavras, a sua vida em fadiga. O procedimento

convencional de análise de fadiga baseia-se no cálculo do acúmulo de dano devido a uma grande variedade de esforços cíclicos a que podem estar sujeitas as tubulações na embarcação.

2 CONCEITOS IMPORTANTES

Os esforços que atuam em tubulações instaladas em *FPSOs* podem ser classificados como de baixo ou alto ciclo, a depender do número de ocorrências experimentadas pela tubulação, por exemplo: tensões ditas de alto ciclo ocorrem devido a deslocamentos estruturais produzidos pela ação das ondas na embarcação, já tensões térmicas e deformações estruturais causadas pelas operações de carregamento e descarregamento do óleo no *FPSO* são classificadas como de baixo ciclo, uma vez que estas são menos frequentes que a incidência de ondas.

Entre os esforços que atuam em um *FPSO*, considera-se neste trabalho que o momento fletor vertical (*VBM – Vertical Bending Moment*) seja o mais importante, pois ele é o principal responsável pelos deslocamentos estruturais devido aos movimentos de *sagging* e *hogging*, ilustrados na Figura 2, que são causados pela ação das ondas passando pela embarcação, e transferidos para a tubulação.

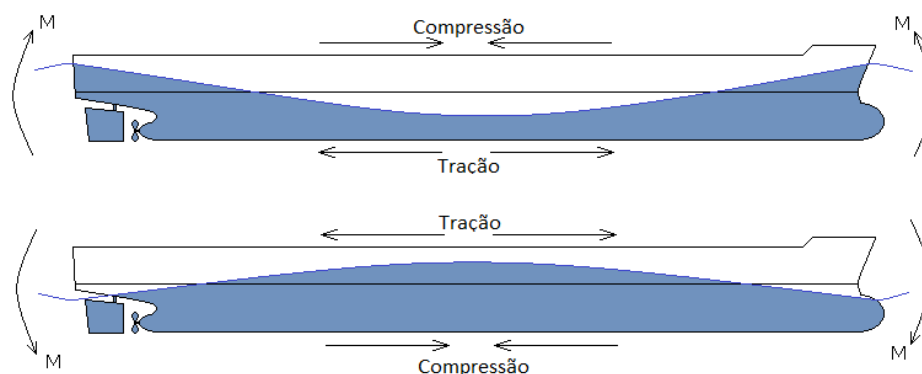


Figura 2. Momentos verticais gerados pela passagem de uma onda.

Fonte: Adaptada de Alves *et al.* (2015).

Há também uma classificação dos esforços a partir dos graus de liberdade do *FPSO*.

A Figura 3 a seguir ilustra os três movimentos de translação e as três rotações do navio, que serão responsáveis pelas acelerações sofridas pelos sistemas de tubulações da embarcação.

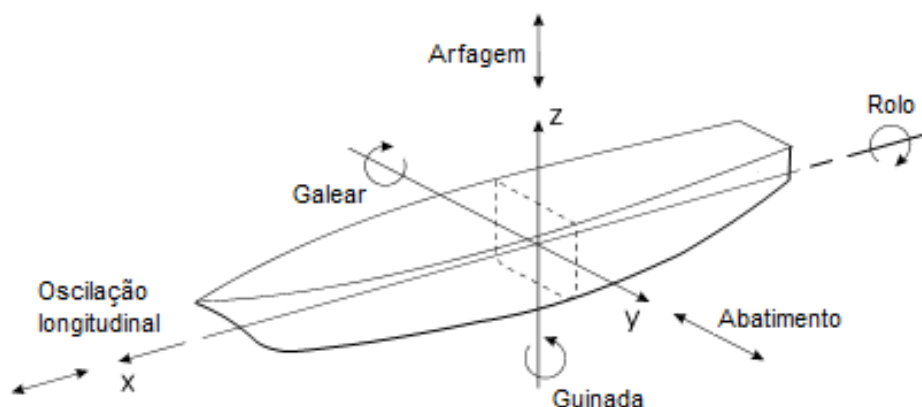


Figura 3. Graus de liberdade de uma embarcação sujeita ao movimento de ondas.

Fonte: Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Movimentos-do-navio-considerados-pelo-modelo-WAMIT-Os-movimentos-cujas_fig3_304777856>

Acesso:20/05/2024

3 MÉTODO EM VIGOR

Devido aos vários esforços cíclicos que podem atuar simultaneamente em uma tubulação instalada em unidades de produção de óleo e gás do tipo *FPSO*, procedimentos de projeto de tubulações baseados no acúmulo do dano por fadiga podem requerer a simulação de um grande número de casos de carregamento, gerando aumento de custos e prazos mais longos. Por outro lado, critérios baseados em tensão admissível simplificam bastante o projeto à fadiga de tubulações, pois necessitam da simulação de apenas alguns casos de carregamento específicos.

A diminuição desses casos se deve majoritariamente à utilização da distribuição de Weibull, uma distribuição probabilística muito usada para estimar a confiabilidade de equipamentos mecânicos. Esta metodologia tem sido empregada por empresas projetistas estrangeiras no projeto de tubulações instaladas no *topside* de *FPSOs*. Para tanto, o método simplificado da DNV RP C203 vem sendo utilizado para determinar a tensão admissível para fadiga de alto ciclo.

Uma vez em posse dessa tensão, é possível verificar através de simulações, como as feitas pelo software Caesar II e ilustrada na Figura 4 por exemplo, se a tensão máxima sofrida pela tubulação excederá esse valor. Caso isso se evidencie, medidas corretivas precisarão ser realizadas no sistema de tubulações. Modificações no âmbito do traçado e dos suportes da tubulação podem, por exemplo, ser realizados para este fim. A verificação final, quanto a resistência à fadiga de alto ciclo da tubulação é, portanto, realizada através de uma comparação da tensão máxima na tubulação, causada por uma onda com probabilidade de retorno de 100 anos (onda centenária), com a tensão admissível.

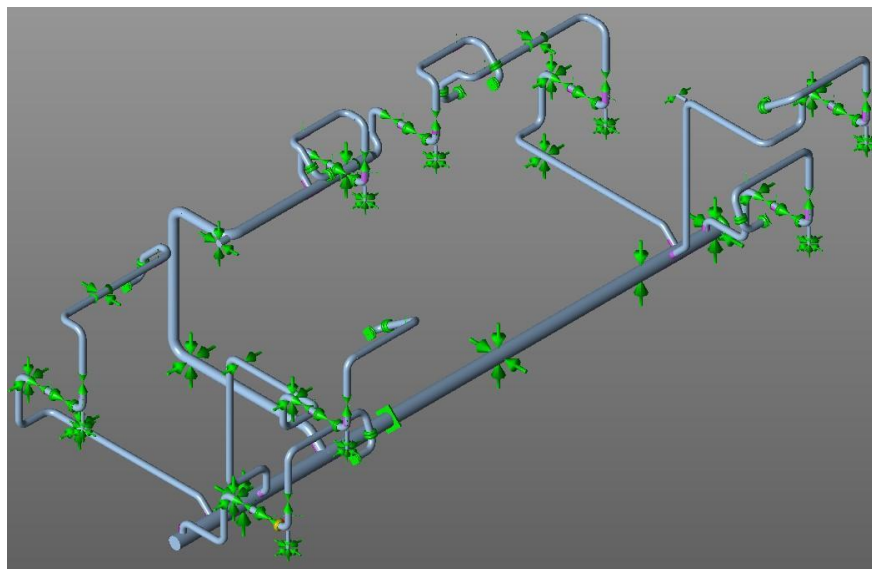


Figura 4. Exemplo de modelo numérico de sistema de tubulações no software Caesar II.

Fonte: o autor.

4 BASE DE DADOS

Independentemente do método utilizado, alguns dados são essenciais para o projeto, como as informações meteo-oceanográficas do local onde o *FPSO* irá operar, e a resposta estrutural da embarcação a esses fenômenos, chamada de *Response Amplitude Operator (RAO)*

Empresas de monitoramento se propõem a colocar boias em regiões onde há campos de petróleo a fim de coletar diversos dados meteorológicos e oceanográficos, como altura e frequência de ondas, vento, correntes marítimas, entre outros (Figura 5). Uma vez que a maior fonte de dano por fadiga em tubulações offshore não submersas costuma ser o movimento provocado pelas ondas do mar, não entraram no escopo deste trabalho outras

fontes. Vale ressaltar que os dados coletados contêm informações sobre altura, período (associado ao comprimento) e direção de incidências das ondas.

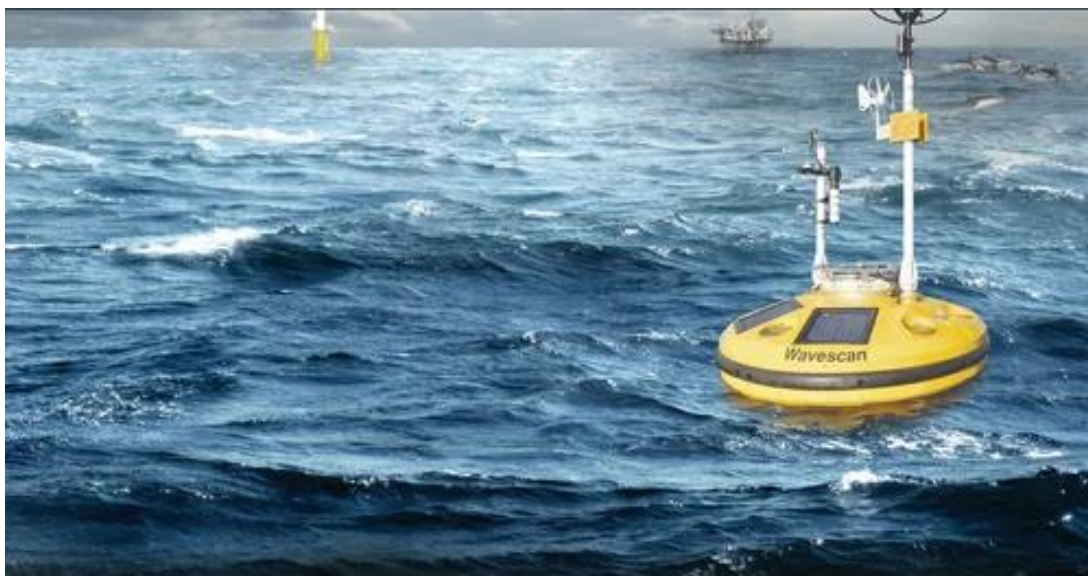


Figura 5. Ilustração de uma boia para medição de condições meteo-oceanográficas.

Fonte: Disponível em: < <https://metocean.com/> > Acesso:20/05/2024

As *RAOs* mencionadas anteriormente, podem ser descritas como funções de transferência que relacionam o espectro de onda incidindo sobre a embarcação e os deslocamentos e esforços experimentados por esta, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 6. Essas funções são determinadas através de simulações numéricas como demonstrado na Figura 7, ou experimentalmente, com modelos físicos em escala reduzida

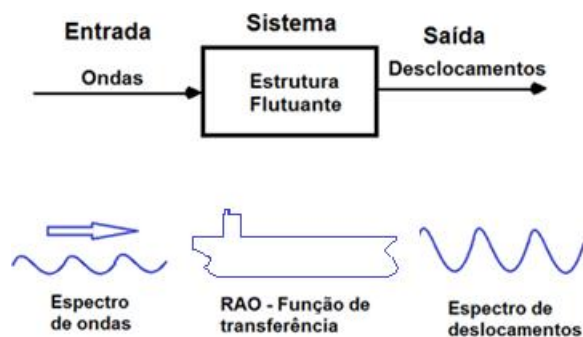


Figura 6. Esquema de RAO.

Fonte: Adaptada de Gama *et al* (2022)

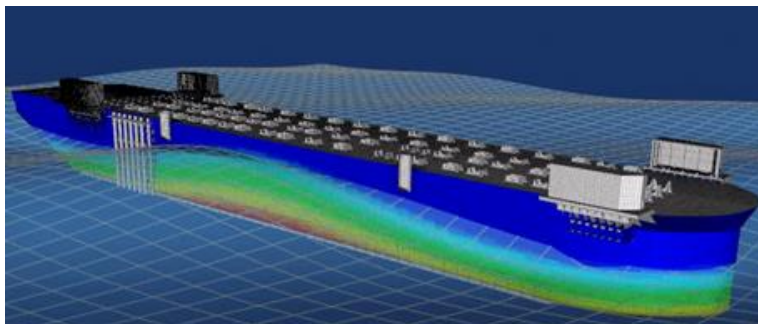


Figura 7. Modelo de *FPSO* numérico.

Fonte: Disponível em: <https://www.krs.co.kr/eng/Content/CF_View.aspx?MRID=548>

Acesso:20/05/2024

5 METODOLOGIA

Feita essa breve introdução, o leitor com alguma experiência na área de cálculo de vida em fadiga estará apto a compreender o novo método proposto pelos autores deste artigo. Ele consiste em um processo iterativo (Figura 8), com o objetivo de encontrar o valor da tensão admissível para o projeto à fadiga de tubulações instaladas em *FPSOs*. Para isso são utilizadas funções de transferências que relacionam o período ou comprimento de onda, e sua direção de incidência na embarcação, com o momento fletor vertical no *FPSO* causado pela ação das ondas. São utilizados parâmetros de ondas coletados no local de instalação do *FPSO*, como na Bacia de Santos por exemplo. Outra questão fundamental é a curva de fadiga utilizada para o cálculo do dano por fadiga. A curva de fadiga F3 da DNV RP C203 tem sido a mais adotada para este fim. Esta curva corresponde a curva de fadiga de juntas de topo de tubulações, conforme descrito na referida prática recomendada (*RP – Recommended Practice*) da DNV.

Na metodologia proposta a relação entre as alturas das ondas e esforços estruturais foi assumida como proporcional e linear. Já a relação entre os períodos e direções de incidência das ondas e o *VBM* adveio de *RAOs* obtidos através de simulações computacionais conduzidas pela Petrobras. A Figura 9 mostra resultados normalizados de *VBM* para diferentes direções de incidência de ondas no *FPSO*, conforme indicado na Figura 10.

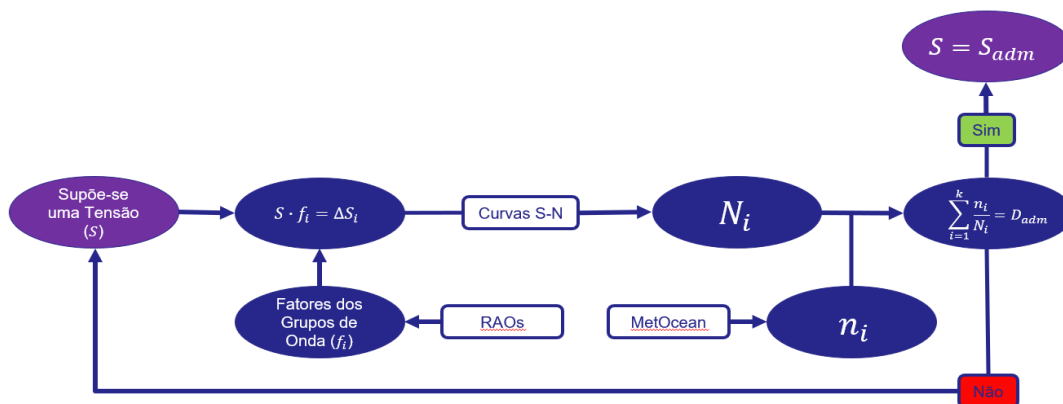


Figura 8. Fluxograma do novo método para se obter a tensão admissível à fadiga.

Fonte: o autor.

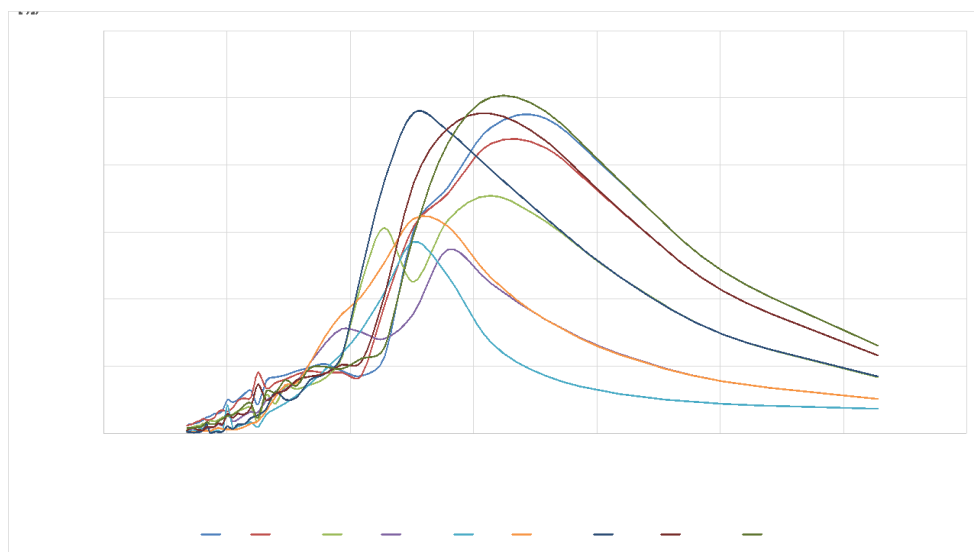


Figura 9. Operadores de Resposta de Amplitude (RAO) normalizados de VBM para diferentes períodos (T) e direções de incidência de ondas na embarcação.

Fonte: o autor.

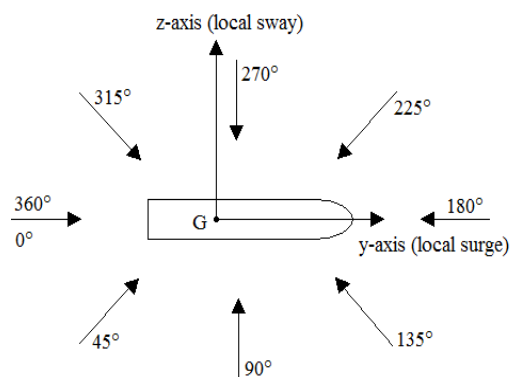


Figura 10. Convenção dos ângulos de incidência de onda na embarcação.

Fonte: Disponível em: <https://flexcom.fea.solutions/theory_coupled_moored_vessel.html>

Acesso:20/05/2024

Sobre o método em si, para que o processo iterativo descrito na Figura 8 se inicie, arbitra-se a tensão máxima, proveniente da onda de maior altura, período crítico para a embarcação e ângulo de incidência de 180°. Essa tensão serve como base para se determinar as tensões produzidas pelas demais ondas, com diferentes estados de mar, isto é, altura, período e direção das ondas. Paralelamente, tabelas com fatores (f_i) para cada tipo de onda diferente podem ser geradas por meio das respectivas *RAOs*. Estes fatores, variando entre zero e um (Figura 11), quando multiplicados pela tensão máxima geram uma tabela equivalente de tensões ΔS_i , conforme indicado no fluxograma da Figura 8.

Hs(m)		SW(22,5°)															
		Tp(s)															
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
0,00	0,50	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	
0,50	1,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10		
1,00	1,50	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15		
1,50	2,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,09	0,14	0,15	0,17	0,19	0,19		
2,00	2,50	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,11	0,17	0,19	0,22	0,24	0,24		
2,50	3,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,14	0,20	0,23	0,26	0,29	0,29		
3,00	3,50	0,01	0,02	0,04	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,16	0,24	0,27	0,30	0,33	0,34		
3,50	4,00	0,01	0,02	0,04	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,18	0,27	0,31	0,34	0,38	0,39		
4,00	4,50	0,01	0,02	0,05	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,20	0,31	0,35	0,39	0,43	0,44		
4,50	5,00	0,01	0,03	0,06	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,23	0,34	0,39	0,43	0,48	0,49		
5,00	5,50	0,02	0,03	0,06	0,09	0,10	0,11	0,11	0,11	0,25	0,37	0,42	0,47	0,53	0,53		
5,50	6,00	0,02	0,03	0,07	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,27	0,41	0,46	0,52	0,57	0,58		
6,00	6,50	0,02	0,04	0,07	0,11	0,12	0,14	0,13	0,13	0,29	0,44	0,50	0,56	0,62	0,63		
6,50	7,00	0,02	0,04	0,08	0,12	0,13	0,15	0,14	0,14	0,32	0,48	0,54	0,60	0,67	0,68		
7,00	7,50	0,02	0,04	0,08	0,13	0,14	0,16	0,15	0,15	0,34	0,51	0,58	0,65	0,72	0,73		
7,50	8,00	0,02	0,04	0,09	0,13	0,15	0,17	0,16	0,16	0,36	0,55	0,62	0,69	0,76	0,78		
8,00	8,50	0,02	0,05	0,09	0,14	0,16	0,18	0,17	0,17	0,38	0,58	0,66	0,73	0,81	0,83		
8,50	9,00	0,02	0,05	0,10	0,15	0,17	0,19	0,18	0,18	0,41	0,61	0,69	0,77	0,86	0,87		
9,00	9,50	0,03	0,05	0,11	0,16	0,18	0,20	0,19	0,19	0,43	0,65	0,73	0,82	0,91	0,92		

Figura 11. Exemplo de fatores de tensão em função da altura significativa de onda (H_s) e período de onda (T_p) para ondas incidindo em uma direção (SW) à 22,5° em relação ao eixo do *FPSO*.

Fonte: o autor

Para dar continuidade ao processo iterativo da Figura 8, através das curvas de fadiga S-N presentes na norma da DNV RP-C203, a quantidade de ciclos para falha (N_i) é extraída, para cada configuração de onda, novamente. Importante mencionar que a curva S-N adotada deve estar de acordo com o tipo de material da tubulação e geometria da junta soldada. Já o número de ciclos que efetivamente a tubulação irá experimentar (n_i), devido a uma onda com altura e período específicos advém dos dados oceanográficos, já discutidas anteriormente. Considera-se importante lembrar que esses dados, que são extrapolados para o futuro, supostamente não se alteram muito ao longo das séries históricas, o que talvez não se evidencie futuramente em função das mudanças climáticas.

Por fim, a Regra de Palmgren-Miner (Equação 1) é aplicada para se determinar as frações de dano oriundos de cada estado de mar, compostas pelas frequências de incidência dessas ondas dentro da vida útil desejada. O somatório dessas frações resulta no dano experimentado pela tubulação, caso este não coincida com os requisitos do projeto (dano por fadiga admissível), uma nova tensão máxima é escolhida, até que a convergência seja alcançada.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = D_{adm} \quad (1)$$

onde: k = número de configurações de ondas; n_i = número de ciclos experimentado; N_i = número de ciclos para a falha e D_{adm} = dano admissível.

A tensão admissível é então determinada através de um algoritmo recursivo simples baseado no fluxograma da Figura 8, que considera todas as premissas anteriormente mencionadas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados resultados de tensões admissíveis obtidos através da metodologia aqui proposta, e resultados utilizando o método simplificado da DNV RP C203. O caso de estudo utiliza funções de *RAO* de um *FPSO* com comprimento de 345,3m, dados oceanográficos reais, e a curva de fadiga F3 da DNV RP C203. Inicialmente, somente a influência da altura de onda foi considerada, o que gerou resultados muito conservadores para a tensão admissível, conforme mostra a Tabela 2. Entretanto, a medida em que

informações mais completas sobre o estado de mar foram incluídas nas análises, como os períodos e direções de incidência das ondas no *FPSO*, os valores de tensão admissível se aproximaram mais dos obtidos pelos métodos vigentes, também presentes na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados de tensão admissível para diferentes métodos.

Metodologia	Tensão Admissível [MPa]
Alturas das Ondas	78,0
Alturas e Períodos das Ondas	151,5
Alturas, Períodos e Direções das Ondas	179,9
Método da DNV RP-C203	212,1

7 CONCLUSÃO

A princípio, a vantagem da metodologia proposta neste trabalho consiste em obter uma tensão admissível mais realista para o projeto à fadiga de tubulações, uma vez que o método utiliza a *RAO* do próprio *FPSO* no qual a tubulação será instalada, bem como as condições de mar do local de instalação do navio.

Resultados preliminares mostraram que a tensão admissível se aproxima consideravelmente das obtidas por outros métodos, o que motiva a continuação do trabalho nessa linha. Ainda que em fase de aprimoramento, este projeto vem se mostrando bastante promissor, sobretudo quando comparado com as alternativas vigentes, que configuram-se como mais trabalhosas e dispendiosas para os projetistas.

8. TRABALHOS FUTUROS

A fim de facilitar o projeto e eliminar possíveis erros de cálculo, foi desenvolvido um programa na linguagem Python que realiza todos os cálculos e que possui uma interface intuitiva criada com a biblioteca *TKInter* (Figura 12), na qual o usuário deve selecionar a localidade onde o *FPSO* irá atuar, a curva de fadiga, assim como o dano máximo desejável que ela poderá suportar devido a ação das ondas, entre outros parâmetros. A tensão inicial para começar o processo iterativo já está pré-programada. Por enquanto o programa só leva

em conta as alturas de onda, logo é um programa relativamente simples. O detalhamento do mesmo, com a adição das informações sobre os períodos e direções das ondas ainda está em fase de implementação. Até então, considerou-se de forma conservadora que todas as ondas incidiram em um ângulo de 180° a contar da proa da embarcação.

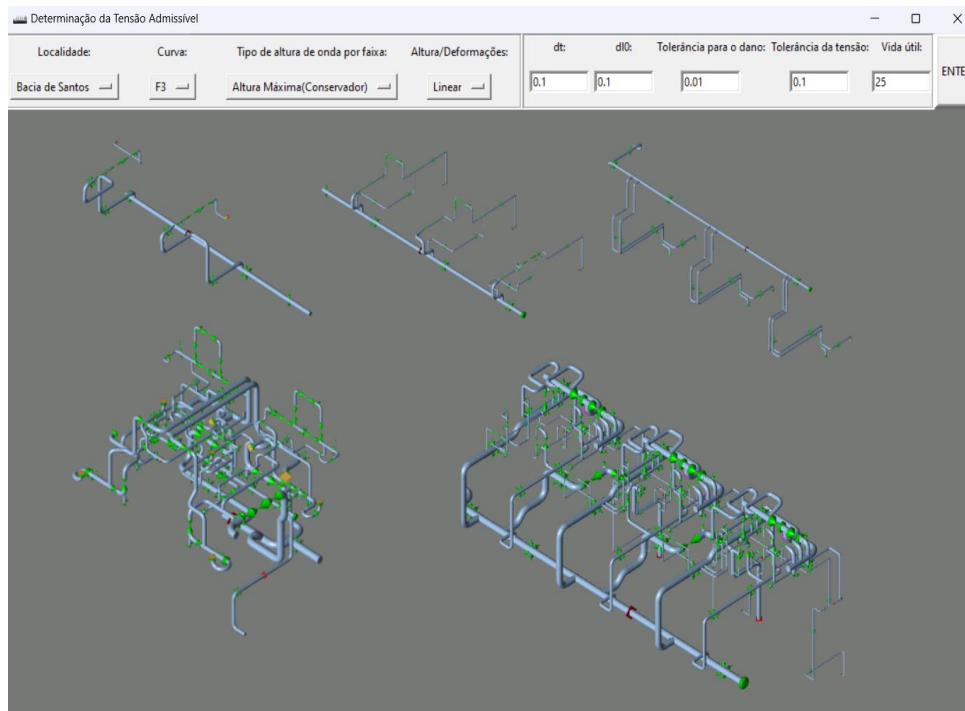


Figura 12. Interface do programa FadTub.

Fonte: o autor.

Além disso, seria interessante aplicar a metodologia aqui presente para outras embarcações com *RAOs* diferentes, a fim de validar o método proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caio de Oliveira Alves, FLAMBAGEM TÉRMICA DE CHAPAS RETANGULARES COM DEGRAUS DE ESPESSURA UNIFORMEMENTE AQUECIDAS, Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, UFRJ, 2015
- DNV RP-D101 Structural Analysis of Piping Systems, 2017
- Pipe Stress Engineering, L.C. Peng and T. L. Peng, ASME Press, 2009
- DNV RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures, 2019

Leonardo Machado Matos. Projeto à Fadiga de Tubulações Instaladas em Unidades de Produção de Óleo e Gás do tipo FPSO. Dissertação (Mestrado em Mestrado Profissional em Montagem Industrial) - Universidade Federal Fluminense, 2020.

Gama, A. L.; de Mello, B. C. L.; Matos, L. M. FadTub - Fadiga de Tubulações. 2022. Patente: Programa de Computador. Número do registro no INPI: BR512022002670-8, 2022.

Editores: Bruno Campos Pedroza, Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro.

AGRADECIMENTOS

À Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) pelo apoio técnico e financeiro através do Termo de Cooperação Técnica PETROBRAS, UFF e FEC 5850.0108939.18.9

Contribuição dos autores:

Breno Mello: Implementação do método proposto, redação e tratamento de dados;

Leonardo Matos: Verificação da metodologia e análise de tensões;

Antonio Gama: Aquisição de financiamento, supervisão, curadoria de dados e metodologia.