



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DE FADIGA EM TURBINA EÓLICA OFFSHORE:
INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PERNAS NAS JAQUETAS**

Beatriz Hepp Hannes

Lajeado, 11 de dezembro de 2023

Beatriz Hepp Hannes

**ANÁLISE DE FADIGA EM TURBINA EÓLICA OFFSHORE:
INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PERNAS NAS JAQUETAS**

Artigo apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa Ma. Rebeca Jéssica Schmitz

Lajeado, 11 de dezembro de 2023

Beatriz Hepp Hannes

**ANÁLISE DE FADIGA EM TURBINA EÓLICA OFFSHORE:
INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PERNAS NAS JAQUETAS**

A Banca examinadora abaixo aprova o Artigo apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Profa. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz – orientadora
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Valmir Stani Fell Junior
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Dr. Matheus Carini

Lajeado, 11 de dezembro de 2023

Análise de fadiga em turbina eólica offshore: influência do número de pernas nas jaquetas

Beatriz Hepp Hannes¹ e Rebeca Jéssica Schimtz²

1 UNIVATES, beatriz.hannes@universo.univates.br

2 UNIVATES, rschmitz1@univates.br

Fatigue analysis in offshore wind turbine: Influence of the number of legs in the jackets

Resumo

A escolha da subestrutura adequada tem um papel crucial na viabilidade financeira de projetos de energia eólica offshore. Contudo, ao reduzir o número de elementos em uma estrutura metálica, pode-se alterar o dano por fadiga da estrutura. O presente estudo visa analisar a influência do número de pernas para o dano proveniente da fadiga, comparando uma subestrutura do tipo jaqueta com quatro pernas e uma com três pernas. Seguindo a normativa vigente, com modelagem no software SAP2000, que realiza análise estrutural por elementos finitos. Conclui-se que a redução do número de pernas afeta negativamente a estrutura, aumentando o dano por efeito de fadiga e reduzindo a vida útil da estrutura.

Palavras-chave: energia eólica, offshore, subestrutura fixa, jaqueta, fadiga.

Abstract

The choice of the appropriate substructure plays a crucial role in the financial feasibility of offshore wind energy projects. However, reducing the number of elements in a metal structure may alter the fatigue damage of the structure. This study aims to analyze the influence of the number of legs on fatigue-induced damage, comparing a four-legged jacket substructure with a three-legged one. Following current regulations, structural analysis was performed using SAP2000 software, which conducts finite element analysis. The study concludes that reducing the number of legs negatively affects the structure, increasing fatigue damage and reducing the overall lifespan of the structure

Keywords: wind energy, offshore, fixed substructure, jacket, fatigue.

1 Introdução

Tendo em vista o esgotamento iminente de fontes fósseis de energia, no atual cenário mundial, os países buscam cada vez mais ampliar e potencializar as suas fontes de energia renováveis e, dentre as inovações das últimas décadas, destaca-se a energia eólica offshore (no mar). As turbinas eólicas no mar ainda não foram implementadas no Brasil, entretanto, Cardial (2023) afirma que grandes empresas privadas do setor de energias renováveis e petróleo já apresentaram propostas e projetos para o governo e

outros órgãos responsáveis por autorizar essas instalações, como o Ibama (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), na busca de iniciar essa cultura no país.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que é responsável pelos estudos que auxiliam o planejamento energético do Brasil, indicou que o país possui potencial para gerar 700 GW se instalar turbinas offshore na costa brasileira, considerando uma profundidade marítima de até 50 metros. Nesse sentido, tal geração é equivalente a cinquenta vezes a capacidade de geração da usina hidrelétrica de Itaipu, que possui vinte unidades geradoras de 0,7 GW, totalizando 14 GW. (CARDIAL, 2023)

Porém, um dos impasses para iniciar essas instalações é o alto custo de investimento para a construção e manutenção do sistema, que equivale a aproximadamente ao dobro de turbinas onshore (em terra). Todavia, Malar (2022) destaca que os parques eólicos offshore têm um potencial de geração elétrica muito superior em comparação com os onshore. Conforme as turbinas aumentaram a capacidade de geração, surgiu a necessidade de encontrar locais com mais espaço, ventos mais intensos e facilidade de transporte dos componentes pois, quanto maior a potência, maior será a turbina. Malar (2022) ainda afirma que em terra uma turbina pode gerar até cerca de 5,6 MW (megawatts), porém, as turbinas em alto mar podem chegar até 12 ou 15 MW.

Congruentemente, em outros continentes, como na Europa e Ásia, a energia eólica offshore já está em estágios elevados de implementação, tornando evidente a demanda crescente de melhorias nos projetos e métodos utilizados no meio offshore. Contudo, analisando as estruturas usuais de sustentação das turbinas eólicas offshore e os trabalhos existentes sobre esse tema, notou-se uma carência sobre o estudo do efeito de fadiga nas subestruturas metálicas utilizadas. Isto posto, Franz et al. (2016) afirmam que a fadiga de estruturas offshore fixas ainda está em investigação no meio acadêmico, esse assunto ainda possui pouco domínio principalmente por ser considerado um tema bastante complexo.

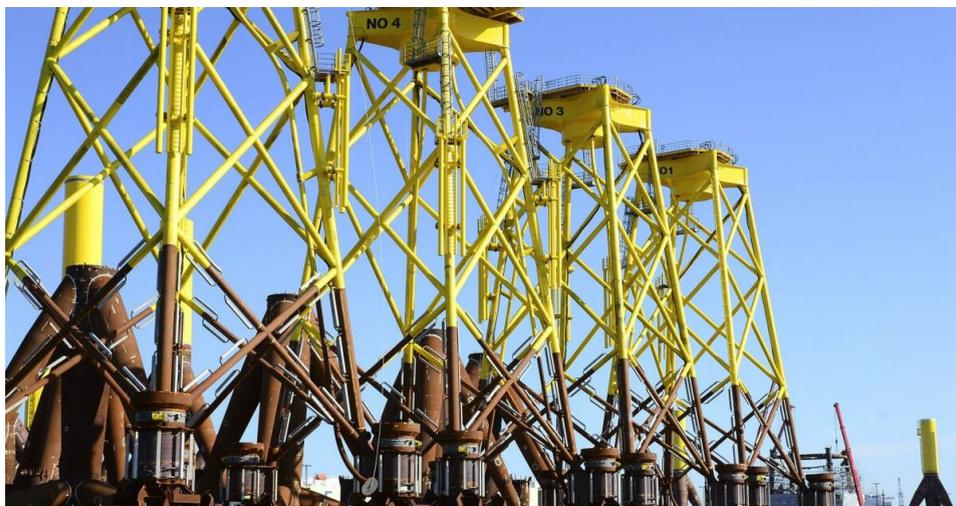
Estruturas offshore estão sujeitas a condições ambientais de natureza dinâmica e cíclica, o que pode resultar em grandes oscilações e concentrações elevadas de esforços e tensões. Franz (2016) destaca que uma estrutura submetida a cargas

variáveis no tempo, de natureza cíclica, apresenta uma redução da resistência e da ductilidade do material, criando incertezas quanto à eficiência e à vida útil da estrutura. Portanto, a compreensão desses efeitos é essencial para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas offshore.

Bhattacharya (2019) define que as subestruturas que suportam as turbinas podem ser classificadas em dois grupos: as flutuantes e as fixas. O sistema flutuante permite que a turbina eólica flutue no mar e é presa no leito marinho por cabos flexíveis conectados a uma fundação, que é bem enxuta, assim, causando pouco dano ao ecossistema. Já o sistema de estruturas fixas consiste na ancoragem da turbina diretamente no leito marinho por elementos estruturais metálicos ou de concreto, podendo ter fundações rasas ou profundas.

Nesse sentido, o presente estudo irá avaliar os danos por fadiga através de modelos matemáticos de um tipo de subestrutura fixa conhecido como jaqueta. Este modelo de subestrutura consiste em uma torre de elementos metálicos treliçados de seção tubular. Os elementos dessa estrutura chamados de pernas são os tubos verticais que as compõem, assim, uma jaqueta de três pernas terá as pernas arranjadas em um triângulo equilátero e uma de quatro pernas estará arranjada em formato de um quadrado. A Figura 1 apresenta uma foto de jaquetas de quatro pernas existentes antes de serem instaladas no leito marinho.

Figura 1 - Jaqueta de quatro pernas (FOXWELL, 2020)



Dessarte, considerando o alto custo de implementação de uma turbina offshore, Tran et al. (2022) realizaram uma análise sobre uma subestrutura de jaqueta de quatro pernas existente a fim de desenvolver uma com menos pernas, usando como referência um parque eólico offshore no mar sudoeste da Coreia do Sul. Então, desenvolveram uma jaqueta de três pernas para o mesmo tipo de turbina e no mesmo local de instalação. Neste contexto, o objetivo do presente estudo é comparar a suscetibilidade à fadiga gerados em uma jaqueta com quatro pernas e uma com três pernas, a fim de analisar a influência que o número de pernas pode causar na vida útil da subestrutura.

2 Procedimentos metodológicos

2.1 Delimitações

A comparação de danos por efeito de fadiga foi realizada entre duas subestruturas de turbinas eólicas em alto mar do tipo jaqueta, fixas no leito marinho, analisando uma versão com quatro pernas e uma com três pernas.

A fim de aproximar da realidade os resultados obtidos, foram adotados os dados fornecidos no trabalho de Tran et al. (2022), pois os mesmos desenvolveram uma jaqueta de três pernas a partir de uma com quatro pernas já existente, situada em uma região marítima de 14 metros de profundidade. Nesse sentido, entende-se que essas estruturas modeladas por eles já foram testadas quanto aos seus estados limites últimos, garantindo resistência aos esforços que serão aplicados para a análise de fadiga.

Isto posto, para as duas jaquetas foi adotado o mesmo aço: o S355 na nomenclatura no padrão europeu, correspondente ao aço A572Gr50 da American Society for Testing and Materials (ASTM). O S355 possui uma densidade de 7850 kg/m^3 , com tensão de escoamento de 355 MPa, módulo de elasticidade de 210 GPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,3. Além disso, foi considerada a mesma turbina eólica a ser suportada, possuindo uma potência de 3 MW cada.

2.2 Modelagem das jaquetas

O software utilizado para a modelagem das estruturas, e obtenção das tensões, foi o SAP2000, um software de análise estrutural desenvolvido pela Computers and Structures, Inc. (CSI), amplamente utilizado na engenharia civil para modelagem, análise e projeto de estruturas. Esse programa simula o comportamento estrutural de diferentes elementos pelo método de elementos finitos, permitindo a criação de modelos estruturais tridimensionais realistas.

Nesse sentido, para iniciar a modelagem das jaquetas, foram desenvolvidas representações das duas estruturas no software AutoCad, a fim de definir as dimensões de todos os elementos a serem modelados no SAP. Para compreender os elementos que compõem cada jaqueta é possível relacionar a Figura 2 e a Tabela 2 abaixo onde estão indicadas: a posição de cada elemento e sua respectiva seção transversal. O termo “4LJ-P” refere-se a jaqueta de quatro pernas e o termo “3LJ-P” se refere a jaqueta de três pernas.

Figura 2 - Elementos de cada jaqueta

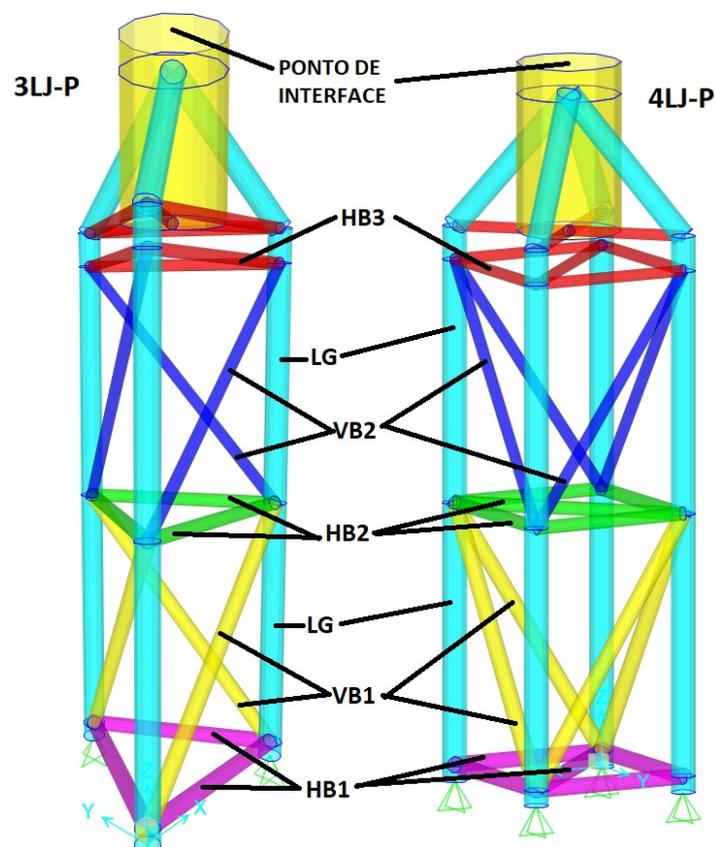


Tabela 1 - Propriedades das seções

Propriedades das seções (cm)					
Componentes	Sigla	4LJ-P		3LJ-P	
		Diâmetro	Espessura	Diâmetro	Espessura
Pernas	LG	104,7	1,6	104,7	1,6
Travamento Horizontal	HB1	71,1	2,5	71,1	2,5
	HB2	60,9	1,9	60,9	1,9
	HB3	50,8	1,9	50,8	1,9
Travamento Vertical	VB1	71,1	2,2	71,1	2,2
	VB2	50,8	2,2	50,8	2,2

Assim, o aço S355 foi indicado ao SAP e todas as seções tubulares foram cadastradas. Portanto, foi iniciada a modelagem das jaquetas no SAP. Nos apoios da estrutura, foram definidos como restritos os deslocamentos em todas as direções, representando o nó que será conectado com a fundação. Além disso, as outras conexões foram consideradas rotuladas, a fim de simular uma situação de treliça tridimensional.

Na Figura 2, também é possível visualizar os modelos desenvolvidos no SAP para cada jaqueta, sendo, na esquerda, a jaqueta de três pernas e na direita a de quatro pernas. Destaca-se, portanto, a ausência de representação das fundações e da turbina eólica, consoante com a condição de que os efeitos de fadiga serão analisados somente na subestrutura.

2.3 Definição e aplicação de cargas

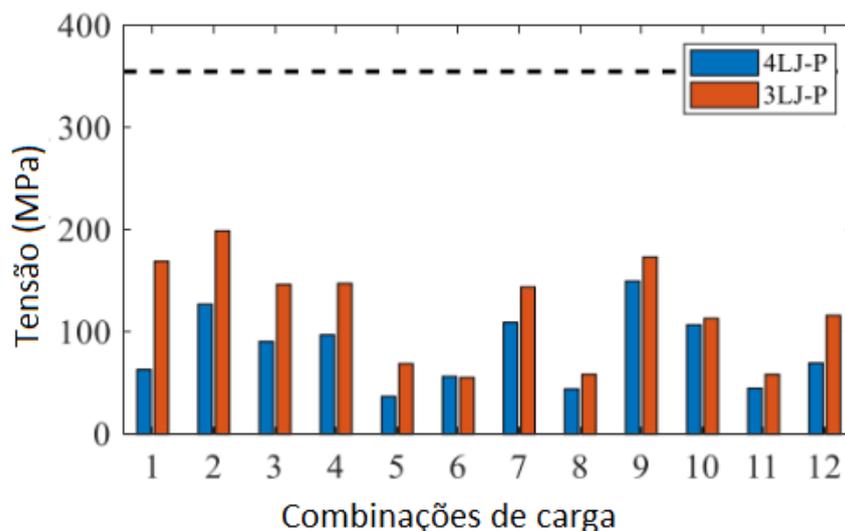
Conforme citado no item 2.1 deste trabalho, Tran et al. (2022) testaram as duas jaquetas em questão para seus estados limites últimos, garantindo que elas possuem resistência suficiente contra os esforços que serão aplicados a elas durante seu funcionamento normal. Ou seja, foram definidas 12 diferentes combinações de carga sobre as estruturas, considerando os carregamentos provenientes do vento, de correntes e das ondas características do local onde as turbinas serão instaladas. Essas

combinações são normatizadas pela Det Norske Veritas (DNV), especificamente pela DNV-RP-C203, que regulamenta o projeto de estruturas de aço offshore.

Logo, a força do vento, para a turbina em questão, corresponde à velocidade do vento de referência de 42,5 metros por segundo, durante um período de dez minutos. Contudo, para o carregamento das ondas e de corrente, foi considerado para ambas a condição mais extrema em um período de retorno de 50 anos. Assim, nessa condição, a onda extrema possui uma altura de 5,97 metros. Já a corrente é considerada como um perfil constante ao longo de toda a profundidade de água, com uma velocidade média de 1,04 metros por segundo e adicionando um crescimento marinho de 5 a 10 centímetros em toda a profundidade da estrutura, ou seja, conforme a vida marinha que se fixa na jaqueta aumenta, maior é a área de contato a ser considerada no atrito da corrente marinha com a estrutura.

Na Figura 4 estão graficados os níveis de tensão gerados nas jaquetas em cada combinação, é possível visualizar uma linha horizontal tracejada que indica tensão de escoamento do aço, a qual não foi ultrapassada.

Figura 4 - Tensão nas jaquetas de cada combinação de carga (TRAN, LEE E KIM, 2022)



Para a escolha das combinações a serem testadas, foi considerada a combinação que apresenta maior tensão para cada jaqueta. Sendo assim, para a jaqueta de três pernas, representada no gráfico da Figura 3 pela cor laranja e a sigla 3LJ-P, a combinação 2, caracterizada pela maximização do momento no eixo x, causou maior tensão. Já para a

jaqueta de quatro pernas, representada pela cor azul e a sigla 4LJ-P, foi na combinação 9 que obteve o maior tensão, nessa combinação a força aplicada no eixo y foi maximizada. Portanto, nas duas jaquetas serão aplicadas as combinações 2 e 9, separadamente, a fim de analisar o efeito de fadiga em condições extremas para as duas geometrias.

Na Tabela 3 abaixo estão descritos os momentos e forças de acordo com as duas combinações que foram aplicados no nó superior da jaqueta como cargas estáticas, chamado de ponto de interface, onde será fixada a torre da turbina eólica. Nesse sentido, esse nó foi adotado para receber os esforços a fim de respeitar os passos do trabalho de Tran et al. (2022).

Tabela 2 - Forças e momentos aplicados

Nº	Combinações de carga aplicadas					
	Momento (kN.m)			Força (kN)		
	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz
2	-47885	-4998,1	-1731,4	-113,7	923,4	-5197
9	-19975	-10358	-1071,9	-713,9	1384	-4721,7

2.4 Extração de tensões do SAP2000

Para determinar o dano por fadiga das estruturas, é necessário obter as tensões nominais em todas as conexões da estrutura e escolher a que obtiver maior tensão para ser analisada. Com isso, no software SAP2000 são indicadas as recomendações práticas da American Petroleum Institute (API), no presente trabalho foi adotada API RP 2A-WSD 2014, pois essa considera a tensão da estrutura durante o seu funcionamento.

Assim, foi possível processar a análise de tensões no SAP, obtendo diagramas de tensão e representações visuais das deformações. Contudo, de acordo com a necessidade do presente trabalho, foi gerada apenas uma relação de cada elemento e a tensão correspondente, destacando na Tabela 3 abaixo as conexões com tensões mais altas, a fim de estudar o dano por fadiga.

Tabela 3 - Tensões extraídas do SAP2000

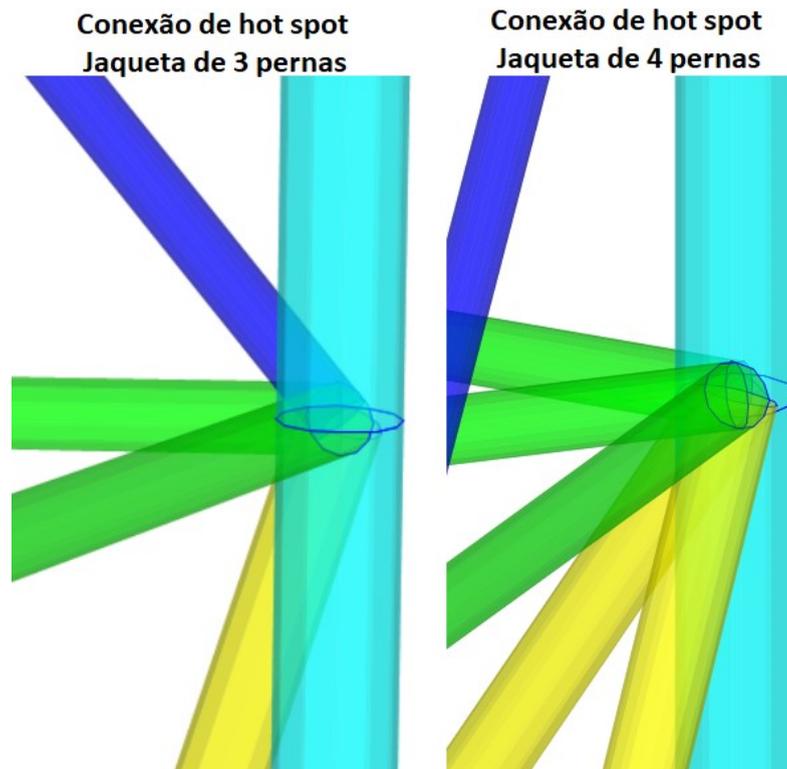
Maior tensão obtida em cada combinação de carga				
Jaqueta	4LJ		3LJ	
Combinação	2	9	2	9
Maior tensão (N/cm ²)	1604,08	2086,11	3098,14	3348,06

2.5 Análise de fadiga

Franz (2016) afirma que a DNV-RP-C203 é utilizada, também, em projetos brasileiros e aborda o dimensionamento à fadiga pelo método determinístico, empregando as curvas de Wölher, ou conhecidas como curvas S-N. Congruentemente, as curvas S-N determinam que um número de ciclos aplicados a um determinado nível de tensão é proporcional à redução da vida útil da estrutura. Além disso, para cada configuração geométrica de conexão existe uma curva S-N diferente. Contudo, o método mais indicado é definir a faixa de tensão no hot spot, que seria a variação na conexão mais tensa, e vincular essa variação com as curvas S-N. A tensão no ponto quente (hot spot stress) é considerada para controlar a vida útil completa de fadiga de uma junta soldada tubular, representa a tensão na raiz da solda.

No presente trabalho, o método de elementos finitos, que o SAP2000 aplica em sua análise, irá indicar a conexão de maior tensão para cada jaqueta, que será considerado como ponto quente. Na Figura 5, estão indicadas as conexões onde foram obtidas as tensões máximas da combinação 9 da Tabela 3.

Figura 5 - Conexões de hot spot



Para determinar o dano por fadiga das conexões, foram seguidas as formulações e os passos da norma DNV-RP-C203, especificamente da seção 5: Análise simplificada de fadiga. Esse item da norma indica como determinar o dano por fadiga por ano na conexão, seguindo pelos parâmetros Weibull. Primeiramente é definida a curva S-N a ser adotada, seguindo a seção 2 da norma, para juntas tubulares em alto mar com proteção à corrosão, no método simplificado é utilizada a curva apresentada na figura 2-10 da mesma norma, com parâmetros a serem aplicados nas fórmulas seguintes informados na tabela 2-3.

Para continuação do cálculo, deve ser definido o parâmetro de distribuição da escala de tensão Weibull “ q ” através da Equação 1 apresentada abaixo, onde são relacionados o número de ciclos considerados n_0 , a maior tensão aplicada dentro desse número de ciclos $\Delta\sigma_0$ e o parâmetro de formato de Weibull h .

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{1/h}} \quad (1)$$

Com os parâmetro de Weibull definidos, foi possível determinar o dano por ano de fadiga através da Equação 2 abaixo, que não deve ultrapassar uma relação de 1

dividido pelo fator de projeto de fadiga, esse fator é encontrado na norma DNV-OS-C101 e para o presente trabalho é igual a 2.

$$D = \frac{v_0 T_d}{\bar{a}} q^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right) \leq \eta \quad (2) \text{Dano}$$

onde, v_0 é a frequência média, T_d é vida útil de projeto, \bar{a} é o parâmetro de acordo com o número de ciclos que serão aplicados durante a vida útil e $\Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right)$ é a função gama com os resultados tabelados em norma de acordo com o parâmetro de Weibull "h".

Dessarte, todos os coeficientes necessários para o cálculo foram definidos de acordo com a norma, seguindo uma série de tabelas e equações. Porém, vale ressaltar que o range de tensões foi considerado para ondas incidentes regulares, de característica cíclica, adotado como o dobro da tensão do hot spot.

3 Resultados e Discussão

Após a coleta das tensões nas duas estruturas para as combinações 2 e 9, observou-se que para as duas estruturas a combinação 9 apresentou as tensões mais altas nos pontos de hot spot. Com isso, as tensões obtidas por esse esforço foram aplicadas no cálculo de dano de fadiga.

O dano calculado para a jaqueta de quatro pernas ficou em, aproximadamente, 0,000715 de dano por ano, já para a de três pernas ficou em 0,002956. Representando que a jaqueta de três pernas apresenta mais dano por fadiga.

De acordo com a Equação 2, o dano não pode ultrapassar a relação de 1 dividido pelo fator de design de fadiga, sendo essa relação igual a 0,5. Isso representa que ambas as estruturas estão aptas para funcionamento e não terão falha por fadiga.

4 Conclusão

Conforme os estudos de Tran et al. (2022), já em testes de estado limite último, a jaqueta de três pernas apresentou maior nível de tensão em todas as combinações de carga aplicadas. Apenas com essa informação, já se espera que essa estrutura com menos pernas teria mais influência de fadiga, pois as tensões nas conexões são maiores e possui menos membros para dividir os carregamentos. Contudo, é determinado que a redução do número de pernas em uma jaqueta de turbina offshore aumenta o dano por fadiga, reduzindo mais a vida útil do que em uma jaqueta de quatro pernas.

Além disso, fica evidente que a determinação da tensão de hot spot é de extrema influência no resultado do cálculo de dano por fadiga. No presente trabalho, essa determinação foi simplificada a fim de viabilizar a análise simplificada da influência do número de pernas nas estruturas em questão, dentro das habilidades adquiridas sobre o software utilizado. Para futuros trabalhos e análises mais precisas, é indicado seguir os passos de cálculo do hot spot stress das normas da DNV rigorosamente.

5 Referências bibliográficas

BARROS, Mariana Rezende Caire de. **Análise de fadiga em estruturas offshore tipo unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (FPSO)**. 2013. 116 folhas. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro. Rio de Janeiro.

BHATTACHARYA, Subhamoy e JALBI, Saleh. **Concept design of jacket foundations for offshore wind turbines in 10 steps (Soil Dynamics and Earthquake Engineering) Vol. 139, 2020, nº 106357**. Dezembro, 2020.

CARDIAL, Ilana. **Faz sentido investir em eólica offshore no Brasil?** (Capital Reset, 22 de Março de 2023) Disponível em: <https://www.capitalreset.com/faz-sentido-investir-em-eolica-offshore-no-brasil/#:~:text=A%20Empresa%20de%20Pesquisa%20Energ%C3%A9tica,a%2050%20usinas%20de%20Itaipu> Acesso em: 02 de junho de 2023.

FOXWELL, David. **Jackets wrapping up a growing share of European turbine market**. Riviera Maritime Media, News Content Hub, <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/jackets-wrapping-up-a-growing-share-of-european-turbine-market-57991>. Acesso em: 22 de novembro de 2023.

FRANZ, Alexandra Silva. **Verificação à fadiga por análise estática e dinâmica de uma estrutura offshore**. 2016. 221 folhas. Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

FRANZ, Alexandra Silva; GONÇALVES, Paulo Batista; ROEHL, Deane. **Verificação à fadiga por análise estática e dinâmica de uma estrutura offshore**. In: CILAMCE, 2016, Brasília, DF.

LOPES, Adriana Torres. **O efeito da fundação no comportamento dinâmico de uma jacket quando sujeita à colisão**. 2018. 90 folhas. Dissertação de Mestrado Integrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

MALAR, João Pedro. **Entenda como funciona a energia eólica offshore, que é gerada no mar**. CNN Brasil, São Paulo, 9 de fevereiro de 2022. Disponível em <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/entenda-como-funciona-a-energia-eolica-offshore-que-e-gerada-no-mar/>. Acesso em: 4 de junho de 2023.

RIVA, Ikaro dos Reis. **ANÁLISE DE FADIGA DE ESTRUTURAS METÁLICAS COM ÊNFASE EM OFFSHORE** 2004. 160 folhas. Projeto de graduação apresentado ao corpo docente do Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da

Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil. Rio de Janeiro.

TRAN, Thanh-Tuan; KIM, Eungsoo; LEE, Daeyong. **Development of a 3-legged jacket substructure for installation in the southwest offshore wind farm in South Korea. (Ocean Engeneering)** Vol 246, Fevereiro de 2022, 110643. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801822001081>. Acesso em 10 de Agosto de 2023.