

ANÁLISE DE TENSÕES EM FLANGES EÓLICOS UTILIZANDO FERRAMANTAS CAE

TENSION ANALYSIS IN FLANGES OF WIND TURBINE TOWERS USING CAE TOOLS

Igor Guilherme Neri Inocencio¹
Erb Ferreira Lins²

RESUMO

O crescimento da demanda de energia e a utilização da tecnologia eólica para produzi-la é um fenômeno notável da atualidade a nível mundial. Buscando entender melhor o comportamento de um importante componente estrutural das turbinas eólicas, o presente estudo utiliza métodos de elementos finitos para examinar a distribuição de tensões em um flange eólico em condições de cargas operacionais sem a ação dos ventos e sob a ação de velocidades médias de ventos extremos determinadas pela IEC (International Electrotechnical Commission). Os resultados destacam áreas de concentração de tensões e identificam possível susceptibilidade a falhas de fadiga, também avaliando o impacto desses carregamentos na integridade da estrutura. A análise de elementos finitos revela distribuições de tensão em flanges eólicos e é avaliada a susceptibilidade às concentrações maiores em regiões externas. Os valores encontrados aplicados em uma análise de fadiga demonstram que a segurança do flange é elevada para as magnitudes de tensões encontradas.

Palavras-chave: torre eólica; flange Eólica; fadiga; elementos finitos.

ABSTRACT

The growth demand for energy power and the use of wind technology to generate it is a current trend on today worldwide. Seeking to better understand the behavior of a crucial structural component of wind turbines, the present study employs the finite element method to examine stress distribution in the wind tower flange under operational loads conditions without wind action and under extreme wind speeds as specified by the International Electrotechnical Commission (IEC). The results highlight stress concentration areas and identify potential susceptibility to fatigue failure, while also assessing the impact of these loads on the structure's integrity. Finite element analysis reveals stress distributions in the flange, with higher concentration susceptibility identified in external regions. The values obtained from this analysis, applied to a fatigue analysis, demonstrate that the flange's safety factors are high for the magnitudes of stresses encountered.

Keywords: wind turbine tower; flange; fatigue; finite element method.

¹ Bacharelado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2024.

² Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho.

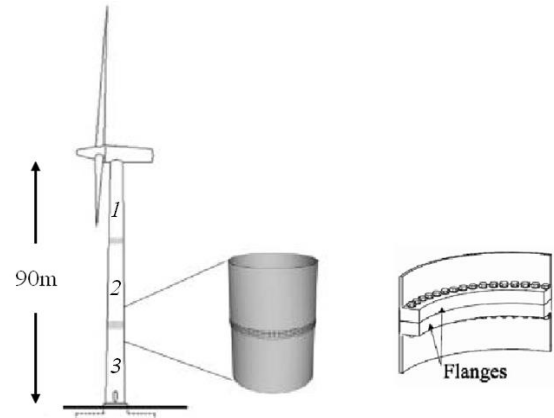
INTRODUÇÃO

A crescente demanda de energia é um efeito notável do crescimento populacional e desenvolvimento das tecnologias baseadas em energia elétrica, chegando a atingir 46407 GWh de consumo no mês de novembro de 2023 (EPE, 2023). As fontes renováveis de energia tornam-se alternativas cada vez mais interessantes para atender as necessidades domésticas, industriais e reduzir os impactos trazidos pelos combustíveis fósseis, sendo a energia eólica uma das mais promissoras.

Devido às condições climáticas favoráveis do Brasil, a energia eólica vem se tornando um destaque, alcançando em 2022 a terceira colocação a nível mundial em instalação de parques eólicos (ENERGIA, 2023). Essa forma de energia renovável não apenas pode ser utilizada diretamente, mas também tem potencial para ser “armazenada” na forma de hidrogênio verde, oferecendo uma solução promissora para o aproveitamento de energia excedente e a integração mais eficiente de fontes renováveis no sistema energético.

O modelo comumente utilizado para a produção da energia eólica são as turbinas eólicas de torres tubulares, sendo estas torres divididas em seções constituídas por tubos metálicos conectados através de anéis tubulares também metálicos nomeados de flanges eólicos. Toda a estrutura da torre é responsável por sustentar o rotor e as pás. Uma diferenciação comum entre as torres eólicas se dá pelo seu local de funcionamento: as localizadas em região marítima são nomeadas de turbinas *offshore* e possuem bases de fixação com características variáveis de acordo com a profundidade da região tendo como uma das principais vantagens a presença de um vento mais uniforme; já as localizadas em terra são chamadas de turbinas *onshore* e possuem uma base mais simples que utiliza concreto reforçado (Estrada et al., 2021). A descrição da estrutura de uma turbina eólica *onshore* está apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Representação das seções de uma turbina eólica e seus flanges de conexão.



Fonte: Autor (2024).

O processo de fabricação da estrutura de uma torre eólica começa na dobra de folhas de chapa metálica de 10-50mm de espessura formando segmentos cilíndricos, unidos posteriormente formando uma seção através da soldagem, posteriormente recebendo nas suas extremidades os flanges unidos a ela através também através do processo de soldagem (Dumby, 2014). O modelo dos flanges pode alterar de acordo com as necessidades do projeto, sendo o de parafusos internos o mais comum para seções intermediárias da torre. Já que a torre possui um diâmetro considerável, com exceção da base inferior, que possui um flange com parafusos internos e externos para proporcionar uma melhor fixação na fundação (Gantes, 2023).

Os flanges eólicos tem como principal função, além da conexão das seções da torre, atuar como reforço à estrutura, logo o possível surgimento de problemas devido aos esforços mecânicos os quais as torres eólicas estão sujeitas em toda sua extensão trazem à tona o interesse e importância da análise desses componentes. Trabalhos como o de Martinez (2019), que busca analisar o processo de colapso de uma turbina eólica devido à falha na região dos flanges, e o de Zou (2022), que busca analisar o impacto inicial causado por imperfeições na

avaliação de fadiga do flange da torre flutuante de turbinas eólicas, são alguns dos exemplos que tratam desse tema. A Figura 2 ilustra o colapso de uma torre eólica *onshore* e as falhas encontradas no flange devido à fadiga.

Figura 2 – Torre terrestre colapsada devido à fadiga.



Fonte: Autor(2024).

Tendo em vista a crescente importância e interesse no tema, este trabalho busca analisar os esforços mecânicos aos quais os flanges eólicos da seção inferior próximo a base da torre eólica do modelo VE150 (VESTAS, 2024) estão submetidos a fim de compreender suas magnitudes e detectar possíveis problemas através de análises computacionais utilizando o método de Elementos Finitos como principal ferramenta.

Tratando-se de uma técnica computacional para análise de estruturas e fenômenos físicos complexos. Na análise por elementos finitos é discretizado o domínio em segmentos conectados por nós, aproximando equações diferenciais parciais por equações algébricas, fornecendo posteriormente informações detalhadas sobre variáveis como tensões, deformações e deslocamentos. O método é amplamente utilizado na atualidade na engenharia para otimização de projetos e análise de sistemas diversos (Azevedo, 2003).

METODOLOGIA

Descrição do problema físico

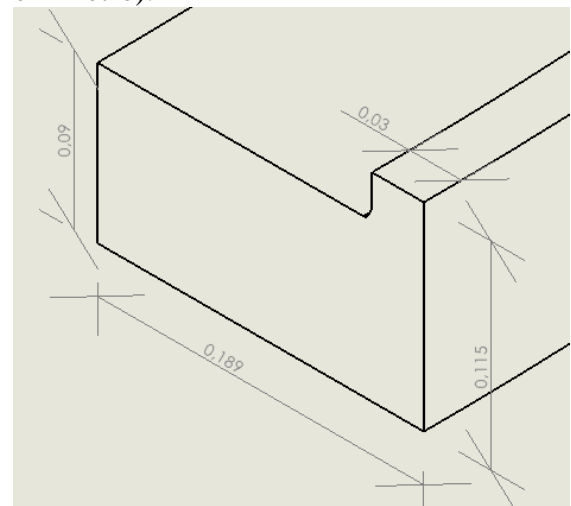
A etapa inicial para o processo de análise de esforços do flange eólico é a construção do modelo geométrico, o qual mais tarde será utilizado como base para o método de elementos finitos. Neste

trabalho, se utilizará como base o projeto VE150 da Vestas (VESTAS, 2024), que é uma turbina eólica que alcança 4,2MW de potência e já possui instalações em território nacional. A turbina chega a 105 metros de altura, onde a estrutura da turbina comporta pás que totalizam um diâmetro de 150m e um peso total de 105 toneladas, sustentados pela estrutura da torre eólica formada por três segmentos unidos através dos flanges, ambos constituídos por uma liga de aço 1050, totalizando uma altura de noventa metros.

O modelo geométrico utilizado aqui leva em consideração com bastante detalhe apenas o segmento dos flanges da torre entre as seções 2 e 3 da figura 1, comportando a penúltima junção de flanges, seção essa que está mais suscetível à falha. A torre tem diâmetro externo de 4172mm e as seções tubulares são compostas de chapas de espessura de 30mm.

A estrutura do flange utilizada como base para o modelo é representada na Figura 3, não considerando os furos e parafusos de conexão.

Figura 3 – Dimensões do flange (medidas em metro).



Fonte: Autor (2024).

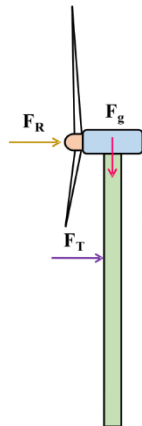
O modelo foi construído representando as seções acopladas, onde as seções de chapas simples da torre foram representadas através de elementos de

casca, enquanto o flange é composto por elementos sólidos. A análise de elementos finitos foi realizada no Ansys (ANSYS, 2024).

Definição dos carregamentos sobre a torre

Após a elaboração do modelo, é necessário representar todos os esforços relevantes para que a análise possa apresentar resultados fidedignos. Sabendo que existem diversas características que influenciam diretamente no comportamento estrutural de uma torre, os parâmetros considerados relevantes para este trabalho são a força exercida pelo vento na estrutura, ação do vento sobre as pás e a componente vertical de força causada pela ação do peso próprio da estrutura

Figura 4 – Representação dos esforços principais.



Fonte: Autor (2024).

Esses carregamentos estão representados na figura 5, onde F_R representa a força de arrasto provocada no rotor pela ação do vento, F_g é a força peso causada pela ação gravitacional e F_T representa a força de arrasto provocada na torre pela ação do vento.

Uma das principais variáveis para determinar os esforços na estrutura de uma torre eólica é a velocidade do vento. O encontro do fluxo de ar com as estruturas da turbina e da torre gera a reação de empuxo, sendo essa força a mais importante para fenômenos de carregamento estrutural.

Dado o que o modelo VE150 está classificado na categoria III da IEC, as velocidades consideradas para o projeto podem ser utilizadas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Velocidades de acordo com a classe da turbina eólica.

Classe	I	II	III
V_{ave} (m/s)	10	8,5	7,5
V_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5

Fonte: IEC 61400-1 (2005).

As velocidades referenciadas na Tabela 1, V_{ave} e V_{ref} , são o valor anual mais recorrente e o valor extremo de velocidade do vento obtidos a um intervalo de medição de 10 min na altura do rotor da turbina eólica, respectivamente. Estes valores serão utilizados nas Eqs. 1 e 2 para obtermos, respectivamente, a velocidade extrema de vento que pode ocorrer ao longo de 50 anos e a velocidade nominal a qual o rotor tem sua operação otimizada (desconsiderando variação de bordo de ataque para turbinas de baixa potência) (Estrada et al., 2021).

$$V_{e50}(z) = 1,4 V_{ref} \left(\frac{z}{z_r} \right)^{0,11} \quad (1)$$

$$V_{Nom} = 2,5 V_{ave} \quad (2)$$

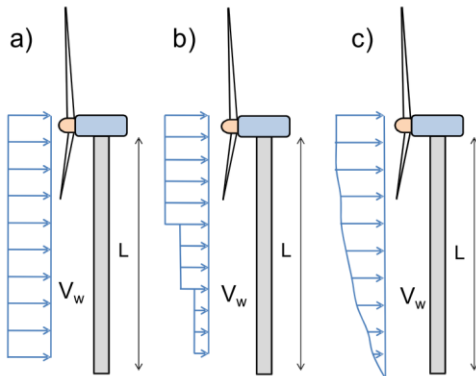
Onde z é altura em relação ao eixo z e z_r representa a altura de referência onde foi medida a velocidade. Definidas V_{e50} e V_{Nom} podemos definir os esforços sofridos no rotor e torre devido às ações do vento. O arrasto provocado no rotor em movimento pode ser determinado pela Eq. 3, recomendada pelo IEC 61400-1 (IEC, 2005).

$$F_R = \frac{1}{2} \rho_w A C_T V_{Nom}^2 \quad (3)$$

Onde ρ_w é a massa específica do ar, A é área de varredura das pás e $C_T = 0,85$ o coeficiente de arrasto da estrutura da turbina (Estrada et al., 2021). Para realizar os cálculos da força de arrasto na estrutura da

torre é necessário definir um modelo que descreva melhor a distribuição do carregamento na estrutura. Os modelos de cargas mais comumente adotados para a descrição da velocidade dos ventos em problemas de torres eólicas estão mostrados na Figura 5. (Estrada et al., 2021).

Figura 5 – Modelos de distribuição de vento sobre a turbina.



Fonte: Estrada et al. (2021).

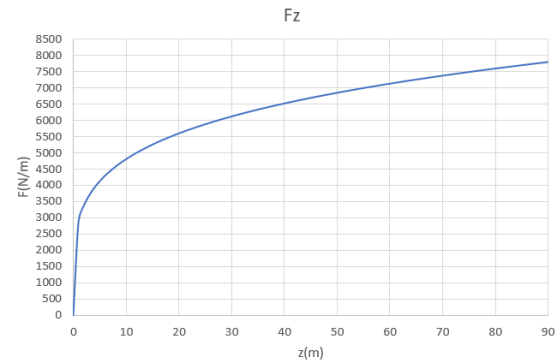
Para simplificar o cálculo desses esforços, vamos considerar a estrutura da torre como um cilindro contínuo e, para aproximar do comportamento real dos esforços, a **distribuição c)** da Fig. 5, com isso, as Eqs. 4 e 5 são utilizadas no modelo para definir a força de arrasto como visto em Estrada et al. (2021).

$$F_T(z) = \frac{1}{2} \rho_w A_{efe} V_{e50}^2(z) C_d \quad (4)$$

$$P_T(z) = \frac{1}{2} \rho_w V_{e50}^2(z) C_d \quad (5)$$

Onde, $F_T(z)$ e $P_T(z)$ descrevem o desenvolvimento da força e pressão, respectivamente, exercidos pelo vento na estrutura da torre de acordo com a altura, $C_d = 1,1$ (Fox et al., 2014) é o coeficiente de arrasto da torre e A_{efe} é a área efetiva impactada diretamente pelo vento. Compilando o desenvolvimento desses esforços graficamente utilizando a Eq. 4 no Excel, conseguimos observar o comportamento variável da força na Figura 6.

Figura 6 – Desenvolvimento da força em função da altura.



Fonte: Autor (2024).

A curva em azul representa o desenvolvimento da força em relação à altura (z) quando a incidência do vento é total sobre a estrutura da torre.

Após a definição das forças na torre e turbina, podemos definir a força gravitacional na seção que será analisada, definido através da Eq. 6 (Estrada et al., 2021).

$$F_g = (m_p + m_n + m_t)g \quad (6)$$

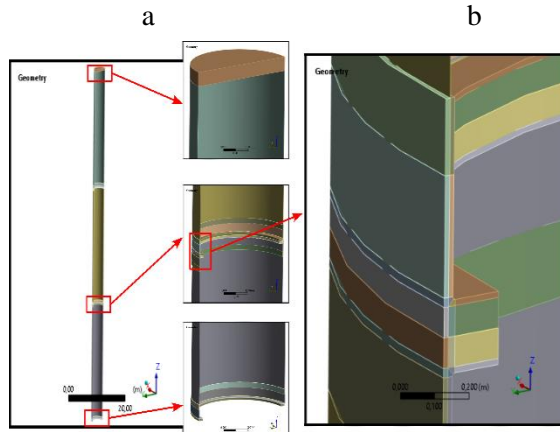
Onde F_g representa a força gravitacional na seção selecionada, onde m_p , m_n e m_t são as massas das pás, nacelle e da torre acima do ponto de referência, respectivamente.

Análise Estrutural utilizando Elementos Finitos

Para a realização da análise é necessário parametrizar o modelo de acordo com os esforços presentes na torre, utilizando as equações descritas anteriormente. Desta forma, foi dimensionado um cilindro vazado, com as seções do flange, conectando os segmentos, cada qual com 30m de comprimento no ANSYS. Para reduzir a complexidade computacional, foi explorada a simetria transversal, permitindo construir um modelo com apenas metade da estrutura. Nas faces contidas na seção mediana, a condição de contorno de simetria foi aplicada. O modelo geométrico está

mostrado na Figura 7. A direção do vento será na direção positiva do eixo y .

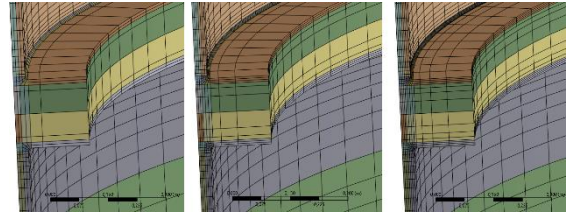
Figura 7 – Modelo geométrico (a) Visão geral (detalhes das seções de topo, base e flange (b) detalhe do flange.



Fonte: Autor (2024).

Os flanges e os elementos mais próximos a sua estrutura são discretizados como elementos sólidos do tipo SOLID186 que apresenta comportamento de deformação quadrática representando melhor o comportamento da região. Já a parte das paredes mais distantes do flange, que apresentam um comportamento similar a uma membrana, foram tratadas com elemento SHELL281 (ANSYS, 2024). Realizou-se um teste de convergência para as malhas com definição de elementos lineares foram utilizados os elementos SOLID185/SHELL181 para verificar a adequação do refinamento para representar o campo de tensões. Para tanto, foram construídas quatro malhas diferentes, duas com elementos do tipo quadráticos e três com elementos do tipo linear. O detalhamento das malhas é mostrado na Tabela 2. Foi parametrizado o número de elementos na direção transversal da chapa na região tubular, assim o modelo nomeado L6 corresponde a uma malha composta por elementos lineares, com 6 elementos na seção transversal. Uma visualização detalhada da malha é mostrada na figura 8.

Figura 8 – Vista da malha do flange localizados entre as seções 2 e 3.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 2 – Descrição das malhas utilizadas no teste de convergência.

Malha	Tipos de elementos	Número de nós	Número de elementos
L6	SOLID185/SHELL181	32072	36855
L8	SOLID185/SHELL181	41507	45555
L10	SOLID185/SHELL181	52778	56055
Q4	SOLID186/SHELL281	93491	29955
Q6	SOLID186/SHELL281	123177	36855

Fonte: Autor(2024).

Para verificar a variação da tensão em cada malha, foram obtidas as tensões normais na direção z ao longo de uma linha que passa na região com maior tensão, representados pela figura 9.

Figura 9 – segmento de análise das tensões em z .

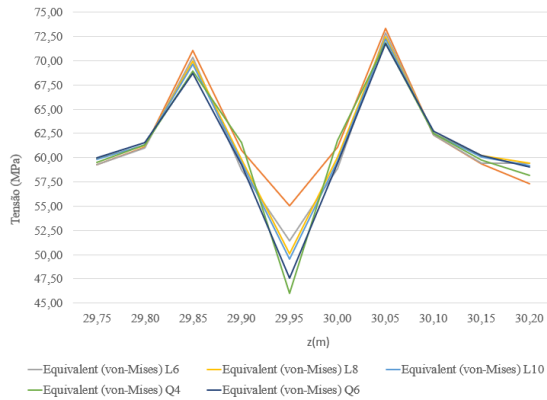


Fonte: Autor (2024).

As tensões coletadas para cada malha ao longo desse trecho foram comparadas através do Excel afim de

verificar e comparar o comportamento das tensões obtidas para cada um dos tipos de malha, como podemos ver na Figura 10.

Figura 10 – Tensões normais em z ao longo do path.



Fonte: Autor(2024).

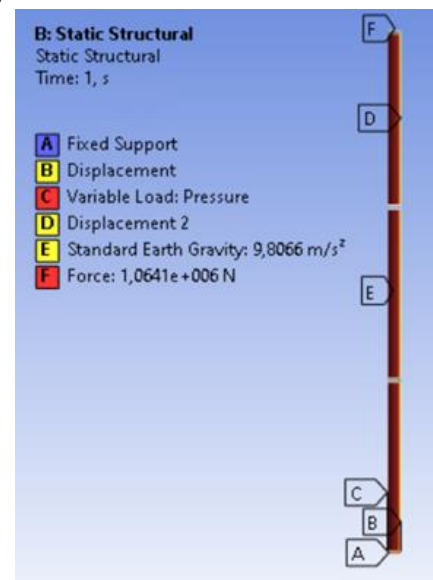
Após a análise de convergência, a malha escolhida para a coleta de resultados foi a malha Q6 que possui o melhor nível de refino, apresentando uma curva de tensão mais suave e resultados coesos de baixa e alta tensão, mesmo os valores de tensão máxima apresentarem uma baixa variação em todas as malhas.

Com o modelo selecionado, foram aplicados os carregamentos obtidos através das equações citadas anteriormente, tendo assim que os valores para o modelo são $\rho = 7850\text{kg/m}^3$ (massa específica), $E = 200\text{GPa}$ (módulo de Young), $\nu = 0,3$ (coeficiente de Poisson), $F_{gR} = 1050$

kN (força gravitacional considerando apenas a estrutura do rotor), $P(1) = 690,06\text{ N/m}^2$, $P(90) = 1857,02\text{ N/m}^2$ e $F_R = 172,50\text{ kN}$. Onde F_{gR} e F_R são os carregamentos localizados no topo do modelo e $P(1)$ a $P(90)$ os valores de mínimo e máximo das pressões distribuídas ao longo da estrutura, representados pela Figura 5.

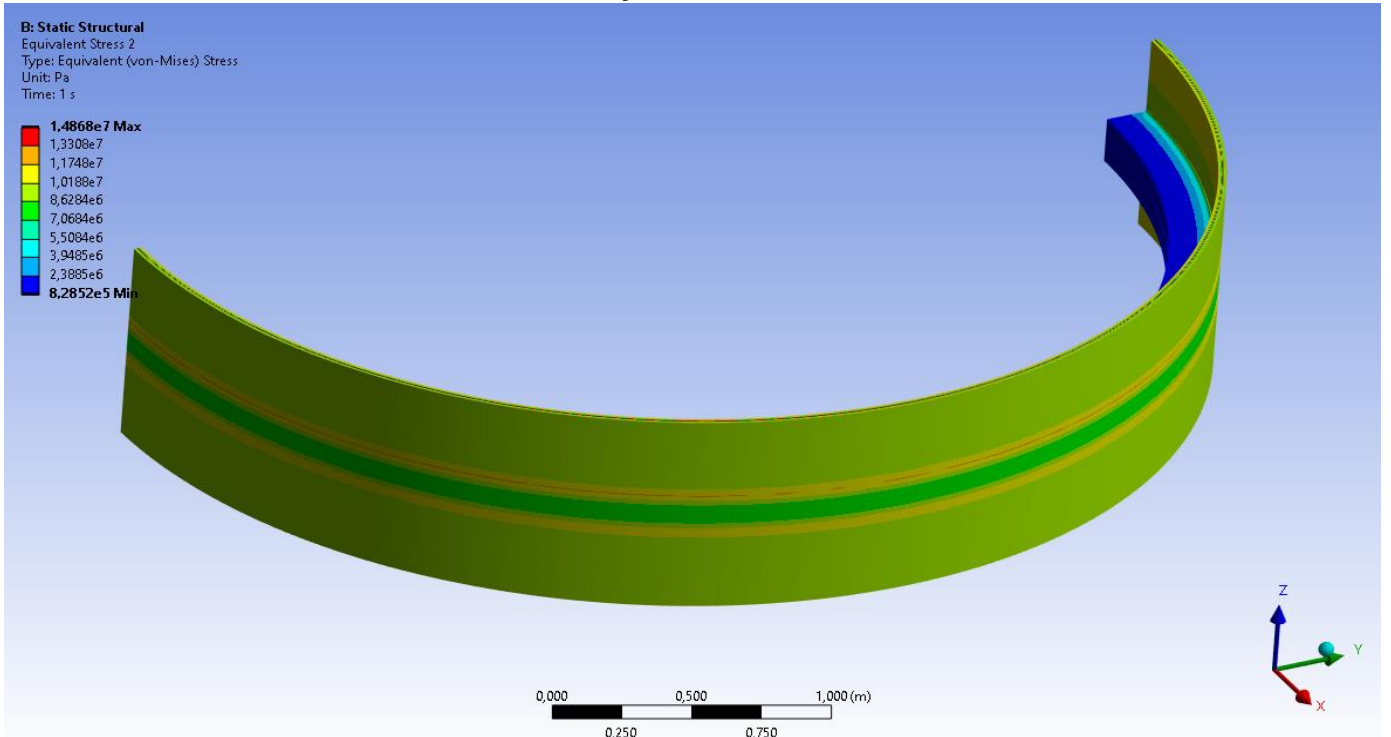
Após a representação das forças no modelo dentro do ANSYS, como representados na Figura 11, podemos obter os resultados dos comportamentos das tensões na região de estudo, representados pelas Figuras 12, 13, 14 e 15.

Figura 11 – Representação dos carregamentos no modelo.



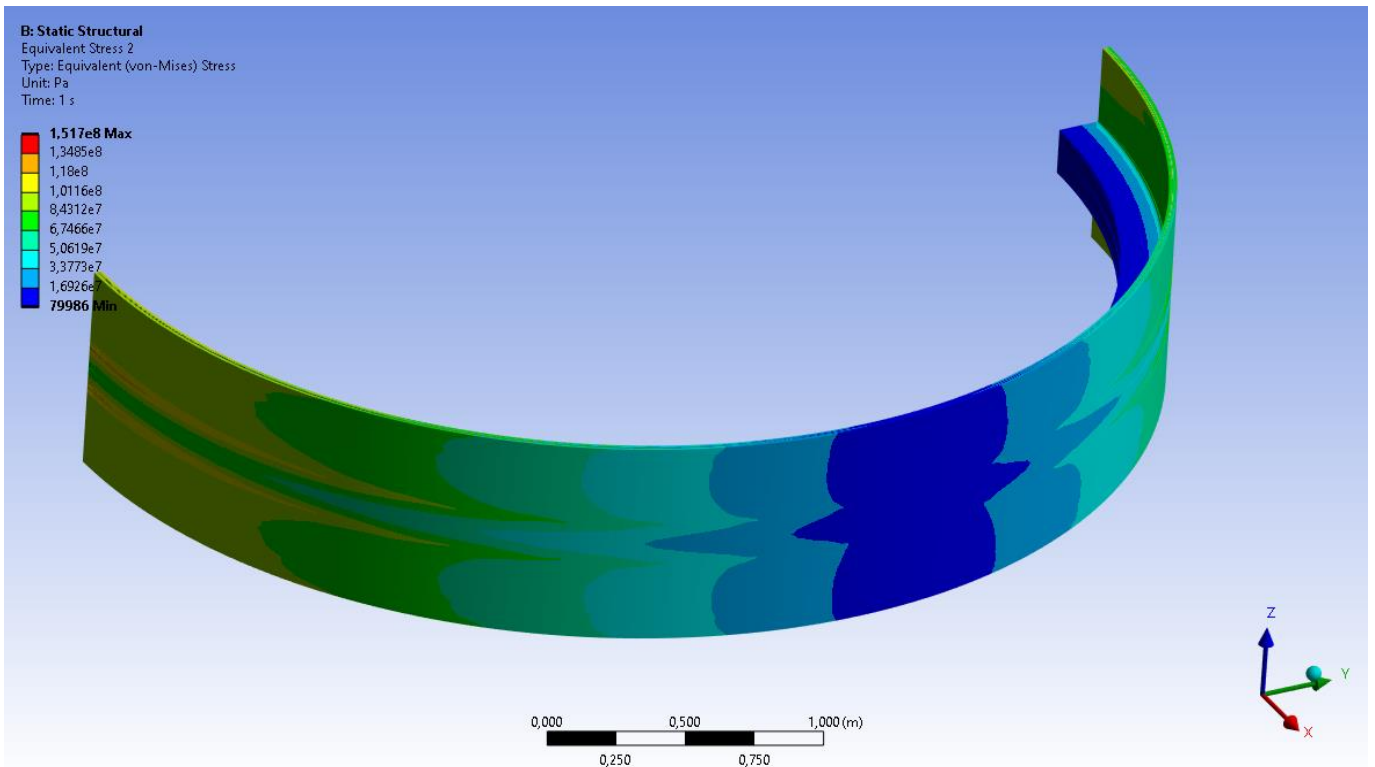
Fonte: Autor (2024).

Figura 12 – Representação das tensões equivalentes nos flanges entre as seções 2 e 3 sem a ação de ventos.



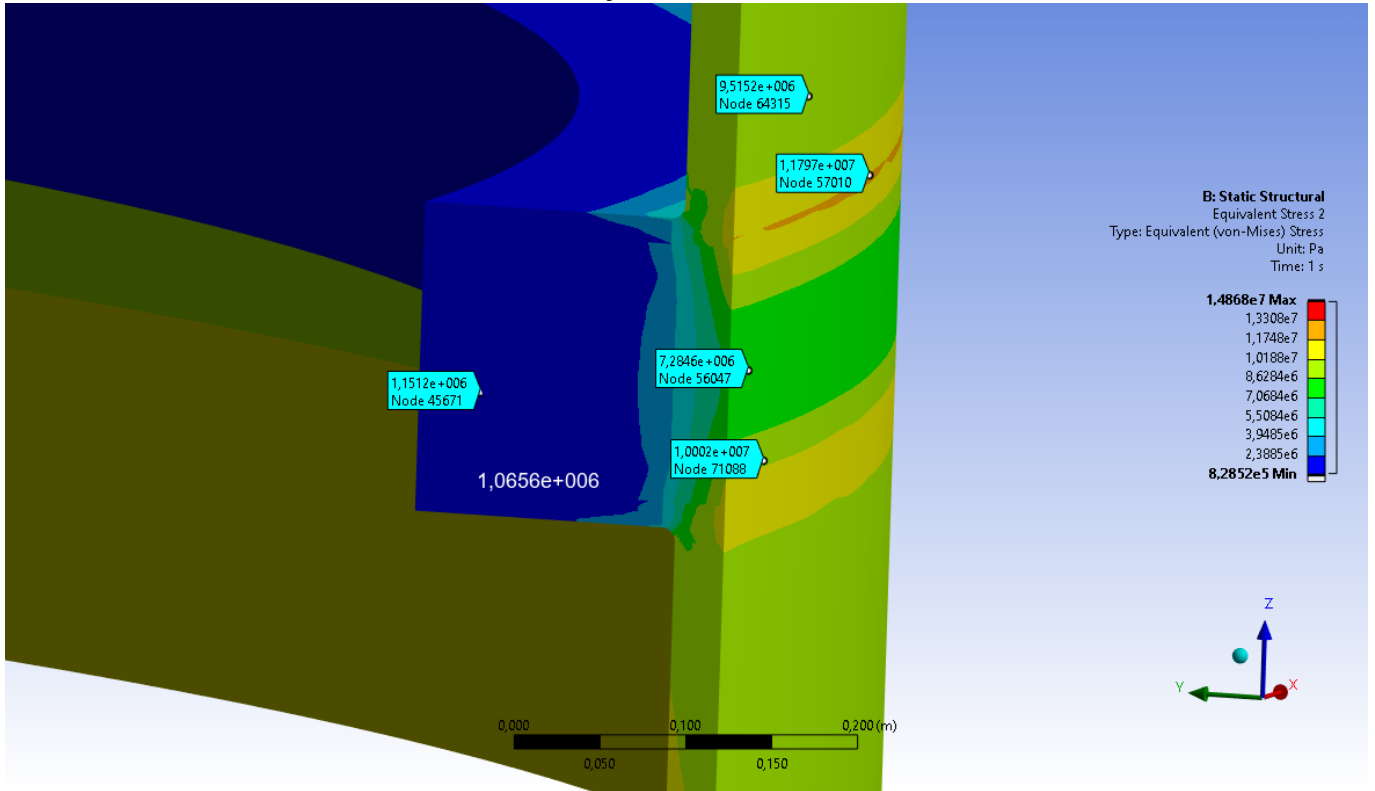
Fonte: Autor (2024).

Figura 13 – Representação das tensões dos flanges entre as seções 2 e 3 com a ação direta do vento.



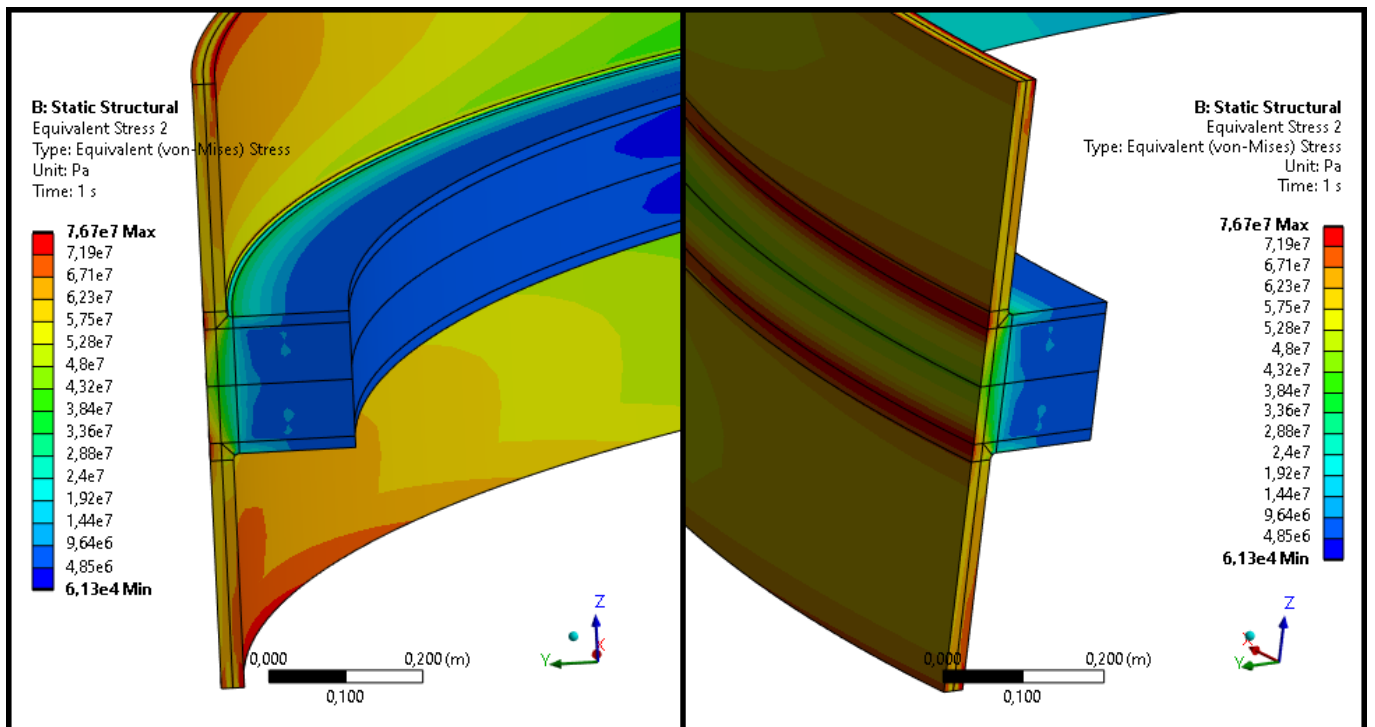
Fonte: Autor (2024)

Figura 14 – Representação das tensões equivalentes nos flanges entre as seções 2 e 3 sem a ação de ventos.



Fonte: Autor (2024).

Figura 15 – Representação stress dos flanges entre as seções 2 e 3 com a ação direta do vento.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 3 – Tensões encontradas nos flanges representados na figura 8.

Tensões	sem vento	com vento
σ'_{max} (MPa)	11,8	76,7
σ'_{min} (MPa)	1,15	4,85

Fonte: Autor (2024).

As figuras ilustram os resultados obtidos através das análises de elementos finitos na região dos flanges. Podemos observar a diferença gerada pela variação dos esforços devido a diminuição de ação dos ventos como visto nas figuras 12 e 13, podendo também observar como se dá especificamente o desenvolvimento de tensões em alguns pontos e a diferença geral desse desenvolvimento dada a variação das forças na estrutura, como visto nas figuras 14 e 15. Os resultados obtidos podem ser utilizados como um parâmetro de comparação com outros trabalhos e também para entender o desenvolvimento de fenômenos como o da fadiga.

Análise de Fadiga

Para a realização da análise de fadiga vamos utilizar as tensões de von Mises obtidas através do método de elementos de finitos para obtenção do fator de segurança utilizando a equação de critério para a linha Soderberg representada pela Eq. 7 (Budynas e Nisbett, 2016).

$$\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_y} = \frac{1}{n_f} \quad (7)$$

Onde n_f é o fator de segurança a fadiga, S_y é a resistência ao escoamento, S_e limite de endurance no local crítico, σ'_a é a componente de amplitude e σ'_m é a tensão média de von Mises.

Novamente utilizando os dados das tensões entre as seções 2 e 3 obtidos anteriormente, podemos determinar o número de ciclos através da Eq.8 (Budynas e Nisbett, 2016).

$$S_f = aN^b \quad (8)$$

Onde a e b são coeficientes dependentes das resistências de ruptura à tração e a escoamento, S_f é o coeficiente de resistência a fadiga e N o número de ciclos até a falha. Como na análise os valores de tensão encontrados não ultrapassam os limites de escoamento, podemos considerar S_f como uma tensão dentro do regime elástico do material afim de obter o número de ciclos necessário para que aconteça a falha por fadiga no flange eólico.

Tabela 4 – Coeficientes, tensões e fatores de fadiga.

Variáveis	Valor encontrado
σ'_a (MPa)	32,45
σ'_m (MPa)	44,25
a	1452,77
b	-0,132
S_e (MPa)	234
S_y (MPa)	580
k_a	0,798
k_c	0,85
n_f	4,65
S_f (MPa)	76,7
N	$4,76 \times 10^9$

Fonte: Autor (2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de elementos finitos apresenta resultados interessantes nas tensões equivalente de von Mises, mostrando que a maior concentração de tensões ocorre nas regiões de externas dos flanges com uma magnitude de cerca de 76,7 MPa entre as seções 2 e 3, como podemos ver na figura 15, sofrendo com níveis de tensões bem abaixo aos vistos no trabalho de Martinez (2019). Além disso o comportamento do desenvolvimento e variação dessas tensões apresenta grandes mudanças com o aumento da ação do vento, logo, torna-se necessário uma avaliação dessa variação para parâmetros de velocidade maiores afim de verificar em que ponto essa alteração pode trazer grandes impactos ao

perfil e desenvolvimento das tensões nessa região, além dos comportamentos resultantes desses aumentos na estrutura.

As tensões obtidas através dos elementos finitos também podem ser utilizadas em critérios simples para análise de fadiga afim de verificar o impacto dessas tensões. Logo, aplicando os valores máximos encontrado na região do flange análise de tensões equivalentes em conjunto com as propriedades do material nas Eqs. 7 e 8, encontrando $n_f = 4,65$ e $N = 4,76 \times 10^9$ ciclos, esses valores demonstram que a segurança do flange é elevada quando consideramos apenas as tensões encontradas através da análises de elementos finitos e que falha por fadiga causada por essas tensões só iria ocorrer em ciclos na ordem de 10^9 logo podemos considerar o caso de vida infinita para os flanges quando submetidos aos esforços que foram analisados durante o trabalho.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados é possível concluir que a análise de elementos finitos fornece informações valiosas sobre as distribuições de tensão nos flanges eólicos, possibilitando a visualização das regiões de concentração de tensões nas regiões externas da peça, com uma magnitude significativa de cerca de 76,7 MPa entre as seções 2 e 3. Embora essas tensões sejam menores em comparação com estudos anteriores, como o de Martinez (2019), elas ainda exigem atenção, especialmente em relação à variação das condições ambientais, como a variação da ação do vento ou adição de novos esforços a estrutura.

Observou-se que o comportamento e a variação das tensões apresentam mudanças substanciais com a redução da influência do vento para os casos de V_{e50} (velocidade extrema de vento que pode ocorrer ao longo de 50

anos) utilizando a velocidade de referência fornecida pelo IEC. No entanto, é destacada a necessidade de avaliar essa variação para parâmetros de velocidade maiores, a fim de compreender melhor os potenciais impactos no desenvolvimento das tensões da região.

Além disso, as tensões obtidas por meio da análise de elementos finitos podem ser utilizadas em critérios simplificados para análise de fadiga. Os resultados demonstram que a segurança dos flanges é elevada quando apenas as tensões obtidas na análise de elementos finitos são consideradas. A análise de fadiga revela que a falha por fadiga só ocorreria em ciclos extremamente altos, na ordem de 10^9 , indicando efetivamente uma vida útil infinita para os flanges sob os esforços analisados.

Portanto, conclui-se que a análise de elementos finitos oferece uma abordagem robusta para avaliar o comportamento das tensões nas estruturas de torres e flanges eólicos e fornecendo dados para análise de resistência à fadiga dos flanges avaliados, destacando a importância de considerar também as variações nas forças do vento e a aplicação de métodos de análise de fadiga para garantir a integridade estrutural a longo prazo.

REFERÊNCIAS

ANSYS Academic Research Mechanical, Release 18.1. Versão 2023 R2 2024. [S. l.]: Ansys Inc, 2024. Programa de computador. Disponível em: <https://www.ansys.com/academic>. Acesso em: 01dez. 2023.

AZEVEDO, Álvaro F. M.. **Método Dos Elementos Finitos**. 1. ed. Portugal, 2003. E-book. Disponível em: http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/livro_mef_aa_1ed/doc/livro_mef_aa.pdf. Acesso em: 03 jan. 2024.

BUCK, James A. et al. Analysis of Force-Capping for Large Wind Turbine Rotors. **Wind Engineering**, v. 39, ed. 2, p. 213–228, 2015. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/90007064>.

Acesso em: 01 jan. 2024.

BUDYNAS, Richard G. NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

DUMBY, Herman Jedião Mendes. **Aspetos de dimensionamento de torres eólicas tubulares em aço**. Coimbra: 2014. E-book . Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/38538/1/Aspectos%20de%20dimensionamento%20de%20torres%20eolicas%20tubulares%20em%20aco.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topicos/publicacao-153/topico-668/Resenha%20Mensal%20-%20Novembro%202023%20\(base%20Outubro\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topicos/publicacao-153/topico-668/Resenha%20Mensal%20-%20Novembro%202023%20(base%20Outubro).pdf). Acesso em: 04 dez. 2023.

ESTRADA, Edwin Hernandez et al. Considerations for the structural analysis and design of wind turbine towers: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120307346?via%3Dihub>. Acesso em: 28 dez. 2023.

FOX, Robert et al. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

GANTES, Charis J. et al. Alternative ring flange models for buckling verification of tubular steel wind turbine towers via advanced numerical analyses and comparison to code provisions. **Structures**, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/>

[article/abs/pii/S2352012422011304?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012422011304?via%3Dihub). Acesso em: 30 dez. 2023.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Wind turbines – part 1: Design requirements - IEC 61400-1**. Geneva: IEC, 2005. Disponível em: <https://dlbargh.ir/mbayat/46.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2024.

ENERGIA eólica no Brasil é relevante e tem potencial de crescimento, diz especialista. **Jornal da USP**. 2. ed. São Paulo, 2023. Jornal eletrônico. Disponível em: <https://jornal.usp.br/?p=645043>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LEET, Kenneth M et al. **Fundamentos da análise estrutural**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010.

MARTHA, Luiz Fernando. **F TOOL** - Interactive-Graphics Program for Structural Analysis. Versão 4.00. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2018. Programa de computador. Disponível em: <https://www.ftool.com.br/Ftool/>. Acesso em: 12 jan. 2024.

MARTINEZ, Mar Alonso et al. Wind turbine tower collapse due to flange failure: FEM and DOE analyses. **Engineering Failure Analysis**, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630718313360?via%3Dihub>. Acesso em: 04 jan. 2024.

NENAD, F. et al. Wind towers: Design of friction connections for assembling sections of tubular steel towers. **Journal of Applied Engineering Science**, Sérvia, v. 10, n. 1, p. 49–52, Jan. 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276228513_Wind_towers_Design_of_friction_connections_for_assembling_sections_of_tubular_steel_towers. Acesso em: 02 jan. 2024.

VESTAS. **V150-4.2 MW™**. 2024. Website. Disponível em: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw->

platform/V150-4-2-MW. Acesso em: 12 jan. 2024.

ZHAO, Zhi et al. Wind Turbine Tower Failure Modes under Seismic and Wind Loads. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 33, 2019. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0001279>. Acesso em: 01 jan. 2024.

ZOU, Tao et al. The impact of initial imperfections on the fatigue assessment of tower flange connections in floating wind turbines: A review. **Frontiers**, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.1063120/full>. Acesso em: 01 jan. 2024.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- I58a Inocencio, Igor Guilherme Neri
ANÁLISE DE TENSÕES EM FLANGES EÓLICOS UTILIZANDO FERRAMANTAS CAE / Igor Guilherme Neri
Inocencio. - 2024.
10 f.
- Orientador: Erb Lins.
Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Cabo de Santo Agostinho, 2024.
1. Torre eólica. 2. Flange Eólica. 3. Fadiga. 4. Elementos Finitos. I. Lins, Erb, orient. II. Título

CDD 620.1
