

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS - CAMPUS SANTA LUZIA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Nelson Xavier Ribeiro Neto

**ANÁLISE DO EFEITO DE FADIGA EM USINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**

Santa Luzia  
2024

NELSON XAVIER RIBEIRO NETO

**ANÁLISE DO EFEITO DE FADIGA EM USINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Santa Luzia para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Messias Júnior Lopes Guerra

Santa Luzia

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R45a Ribeiro Neto, Nelson Xavier,  
Análise Do Efeito De Fadiga Em Usinas Eólicas De Eixo  
Horizontal / Nelson Xavier Ribeiro Neto. - 2024.  
34 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em  
Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Minas Gerais - Campus Santa Luzia, 2024.

Orientador: Doutor Messias Júnior Lopes Guerra

1. Fadiga. 2. Usinas eólicas. I. Guerra, Messias Júnior  
Lopes, orient. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de  
Minas Gerais – Campus Santa Luzia, MG. III. Título.

CDU: 621.3.04



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**  
**Campus Santa Luzia**  
**Diretoria de Ensino, Pesquisa e Extensão**  
**Docência Eixo Tecnologias- TEC 2 (Tecnologias, Estruturas)**  
Rua Érico Veríssimo, 317 - Bairro Londrina - CEP 33115-390 - Santa Luzia - MG  
3136343910 - www.ifmg.edu.br

## **ATA DE DEFESA DO TCC**

Aos dois dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e quatro, às 15:15 horas, se reuniu virtualmente a banca composta pelo Prof. Messias Júnio Lopes Guerra (orientador); Dário Lúcio Vale Theodoro (IFMG – Campus Congonhas) e Wanderson Gonçalves Machado (IFMG – Campus Ouro Preto) para avaliar o Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil intitulado **ANÁLISE DO EFEITO DE FADIGA EM USINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**, apresentado pelo discente **Nelson Xavier Ribeiro Neto**. Após apresentação e arguição, considera-se o estudante **APROVADO COM NOTA 74,5**. O estudante, terá o prazo de 30 dias para realizar as correções sugeridas pela banca e enviar a versão final ao orientador, para que possa ser anexada ao processo do SEI, sendo a verificação das modificações sugeridas de responsabilidade do orientador. O não envio da versão final corrigida implicará na impossibilidade de solicitação do diploma por parte do discente. Nada mais havendo a tratar, a defesa foi encerrada às 16:14 horas, e eu, Messias Júnio Lopes Guerra lavrei a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada por todos os membros da banca e pelo estudante.

Santa Luzia, 06 de fevereiro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Messias Júnio Lopes Guerra, Professor EBTT**, em 06/02/2024, às 08:48, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Nelson Xavier Ribeiro Neto, Usuário Externo**, em 07/02/2024, às 08:16, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Wanderson Gonçalves Machado, Professor**, em 07/02/2024, às 08:27, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Dario Lucio Vale Theodoro, Professor**, em 07/02/2024, às 09:54, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1821878** e o código CRC **3D6850A3**.

## RESUMO

O Brasil tem um grande potencial de geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, em especial a obtida através da força dos ventos. Muitos estudos têm sido realizados ao longo dos anos visando melhorar e viabilizar a construção de novas usinas eólicas. As torres de usinas eólicas estão sujeitas a inúmeras tensões variáveis, vinda das ações diretas dos ventos e das diferenças de rotação das turbinas. Tais esforços podem ocasionar danos mecânicos, como a falha por fadiga. A vida útil de uma torre de usina eólica é condicionada pelo sucesso nas tratativas ao fenômeno da fadiga em sua estrutura. Existem dois principais modelos de torres de usinas eólicas, o presente estudo tratará apenas da usina eólica de eixo horizontal. Este trabalho tem por objetivo estudar os esforços cíclicos e não cíclicos atuantes nas torres dos aerogeradores e suas implicações referentes ao fenômeno de fadiga em sua estrutura metálica, ligações e fundação. Foram examinadas tecnologias e soluções de engenharia já desenvolvidas, que visam minimizar os danos causados pela fadiga. Para alcançar tal objetivo, foi realizada uma revisão bibliográfica, explorando os dados acadêmicos e as práticas construtivas atuais.

## **ABSTRACT**

Brazil has a huge potential for generating electrical energy through renewable sources, especially that obtained through wind power. Many studies have been carried out over the years to improve and enable the construction of new wind farms. Wind farm towers are subject to numerous variable stresses, arising from the direct actions of the winds and differences in turbine rotation. Such efforts can cause mechanical damage, such as fatigue failure. The useful life of a wind farm tower is conditioned by the success in dealing with the phenomenon of fatigue in its structure. There are two main models of wind farm towers, this study will only deal with the horizontal axis wind farm. This work will seek to study the cyclical and non-cyclical efforts acting on wind turbine towers and their implications regarding the phenomenon of fatigue in their metallic structure, connections and foundation. Already developed technologies and engineering solutions will be examined, which aim to minimize damage caused by fatigue. To achieve this objective, a bibliographical review will be carried out, exploring academic data and current construction practices.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Turbina de eixo vertical	10
Figura 2 - Turbina de eixo horizontal	10
Figura 3 - Diferentes Ligações da Turbina Eólica	11
Figura 4 - Curva S-N	12
Figura 5 - Ilustração dos estágios de fadiga	13
Figura 6 - Máquina de ensaio de fadiga PLW-500	14
Figura 7 - Ilustração dos estágios de fadiga	15
Figura 8 – Fecho de fenda	16
Figura 9 - Roseta para análise de tensão residual	18
Figura 10 - Bloco de fundação com anel embutido	19
Figura 11 - Armadura de uma sapata circular para aerogerador	20
Figura 12 - Exemplo de espectro de cargas cíclicas	21
Figura 13 – Aerogerador com fundação Monopile	22
Figura 14 – Aerogerador com fundação Monopile	23
Figura 15 – Aerogerador com fundação Monopile	23
Figura 16 – Influência do número e espaçamento de conectores no dano do graute	24
Figura 17 – Influência do número de conectores na rigidez vertical efetiva	25
Figura 18 – Ligação Flanges Soldadas em Aerogeradores	25
Figura 19 – Ligação Flanges Soldadas em Aerogeradores	26
Figura 20 – Exemplo dos detalhes para verificação de fadiga	27
Figura 21 – DC 125 Ligação soldada vertical	28
Figura 22 – DC 90 Ligação soldada horizontal	28
Figura 23 – DC 90 Ligação aparafusada	28
Figura 24 – Exemplo de curvas S-N para intervalo de tensões normais	29

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Justificativa</b>	<b>8</b>
<b>1.2. Objetivos</b>	<b>8</b>
<i>1.2.1 Objetivos Geral</i>	<i>8</i>
<i>1.2.2 Objetivos Específicos</i>	<i>9</i>
<b>2. METODOLOGIA</b>	<b>9</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>9</b>
3.1. Tipos de Turbinas Eólicas	9
3.2. Tipos de união de uma turbina eólica de eixo horizontal	11
3.3. Aço Utilizado nas Usinas Eólicas	11
3.4. Efeito da Fadiga	12
3.4.1 Ensaio de Fadiga	14
3.4.2 Limite de Fadiga	15
3.4.3 Fenômeno do Fecho de Fenda	16
3.5. Fadiga em Soldas	17
3.6. ABNT NBR 8800 (2008)	19
3.7. Fadiga nas fundações	19
3.8 Fadiga nas Ligações	26
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>30</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>32</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o início da revolução industrial no século XVIII, houve uma demanda crescente por produtos siderúrgicos, especialmente pela laminação de trilhos de trem. No século XIX, o aço estrutural emergiu como um concorrente de destaque, e estruturas que anteriormente eram feitas de pedras, alvenarias e madeira passaram a ser substituídas por estruturas inteiramente metálicas, como pontes, torres e edifícios.

Atualmente, o uso de aço estrutural em construções está em ascensão no Brasil. De acordo com Cortez *et al.* (2017) “a construção em aço cresceu ao ritmo de 11% ao ano, em média, no período entre 2002 e 2012, atingindo o consumo de 1,7 milhão de toneladas”. A construção de novas estruturas metálicas como de parques eólicos e torres de telecomunicações abrem espaço para novos estudos.

No Brasil, existem mais de 900 usinas eólicas, sendo 85% localizadas na região Nordeste. Dentre muitos fatores fundamentais no dimensionamento estrutural de turbinas eólicas, um extremamente importante é a fadiga em sua estrutura metálica. De acordo com Loza *et al.* (2019), a fadiga é o fator principal que irá determinar a vida útil de uma turbina eólica. Esse fenômeno se dá pela combinação do esforço naturalmente variável do vento e a rotação do rotor da turbina.

A fadiga é um modo de falha que pode ocorrer em uma estrutura ou componente quando sobre ele incide cargas cíclicas por um determinado tempo. A incidência de carregamentos cíclicos constantes pode gerar o enfraquecimento da estrutura de aço, mesmo que a carga seja de baixa tensão nominal, causando a fadiga (LAGE, 2008).

Muitos estudos dedicados à fadiga em metais foram realizados, sendo o primeiro datado de 1829, pelo engenheiro alemão W.A.J Albert. Porém, com a busca por fontes renováveis de energia, a criação de usinas eólicas abriu espaço para novos estudos a fim de aprimorar seus componentes possibilitando uma longa vida útil com baixas manutenções.

A realização de estudos acerca da fadiga se faz necessária para o dimensionamento e escolha de sistemas e componentes de torres de usinas eólicas, pois devido às condições climáticas de cada local, os esforços cíclicos irão variar conforme a incidência de ventos e rotação das hélices. A partir disso, o estudo busca abordar acerca das solicitações de esforço cíclicos em usinas eólicas, e analisar

métodos e soluções de engenharia adotadas para combater a fadiga, fenômeno tão pertinente no dimensionamento de torres de usinas eólicas.

## **1.1. Justificativa**

O Brasil é um país com uma vasta extensão territorial tendo, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), um potencial de geração de energia de 1500 GW. Essa é uma fonte de energia renovável e limpa, podendo atender os locais mais remotos do país.

A fadiga é um modo de falha muito pertinente quando se fala de turbinas eólicas, pois estas estão sujeitas constantemente a carregamentos cíclicos oriundo das várias velocidades de operação do rotor e das cargas variáveis de ventos. Os efeitos da fadiga em turbinas eólicas podem ser observados em várias partes de sua estrutura como, hélices, ligações, nacelle, corpo da torre e até em sua fundação.

Deste modo, este trabalho, que busca entender os mecanismos e as técnicas de engenharia envolvidas na geração de energia eólica, se faz muito importante para que novas tecnologias e métodos construtivos sejam criados, visando a eficiência e viabilidade da construção de sistemas limpos e sustentáveis de geração de energia.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos Geral**

Investigar e entender em profundidade as implicações do fenômeno da fadiga em estruturas de turbinas eólicas de eixo horizontal, analisando como as condições operacionais, as cargas de vento, o design das peças e os materiais da estrutura contribuem para o surgimento de fissuração por fadiga.

## 1.2.2 Objetivos Específicos

O presente estudo tem como objetivos específicos:

- Reunir informações sobre as solicitações de esforços atuantes nas partes da estrutura de uma turbina de energia eólica com eixo horizontal;
- Analisar as implicações relacionadas às solicitações de esforços na torre do aerogerador em relação ao fenômeno de fadiga em sua estrutura metálica e fundação;
- Apresentar métodos construtivos utilizados e soluções de engenharia adotadas para mitigar os efeitos da fadiga nas estruturas de turbina de energia eólica com eixo horizontal.

## 2. METODOLOGIA

O estudo é feito através de uma pesquisa bibliográfica, analisando as informações geradas no meio acadêmico e os conhecimentos utilizados na prática nas construções das turbinas eólicas com eixo horizontal.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Tipos de Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas são classificadas em dois tipos, as de eixo horizontal e eixo vertical. As turbinas com eixo vertical (Figura 1), possui a rotação de suas pás perpendiculares ao solo. Essas turbinas são bem empregadas em centros urbanos, e mesmo em ambientes turbulentos conseguem ter um bom desempenho de geração de energia (TEDESCO, 2015).

As turbinas de eixo vertical, como o nome indica, tem o eixo de rotação no sentido vertical, e com isso não é necessário mecanismos para variações da direção do vento, sendo uma vantagem sobre as turbinas tradicionais com eixo horizontal. Essa turbina de eixo vertical não será tratada neste estudo.

**Figura 1** - Turbina de eixo vertical



Fonte: TEDESCO, 2015

As turbinas de eixo horizontal (Figura 2), como o nome indica, tem o eixo de rotação em um sentido horizontal, ou seja, paralelo ao solo. Essa turbina, devido à rotação das pás serem perpendiculares ao fluxo de vento, é necessário o uso de mecanismos para variação de direção dos ventos, estes irão fazer com que a turbina se adapte à direção do fluxo de ar.

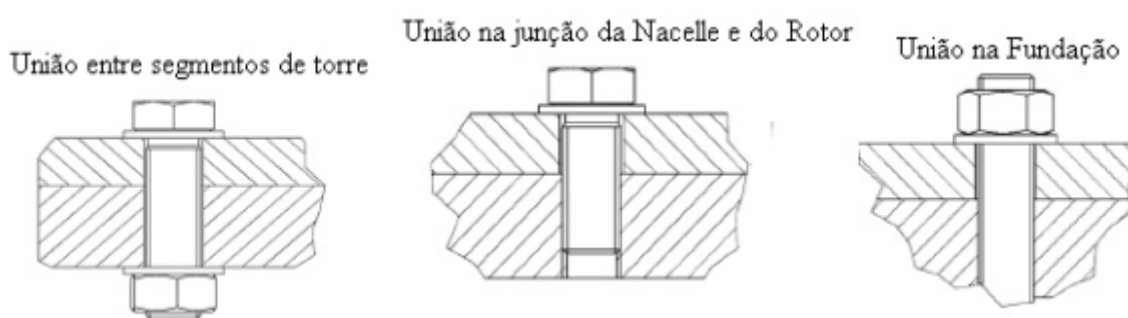
As turbinas de eixo horizontal são as mais difundidas e disponíveis no mercado brasileiro, elas são compostas por três hélices e uma torre de sustentação. O projetista da estrutura deve estudar e projetar somente a fundação, a partir das cargas já definidas pelo fornecedor e em função das condições geotécnicas locais (RIBEIRO, et al., 2014). Esse tipo de turbina é o objetivo de estudo desse trabalho.

**Figura 2 - Turbina de eixo horizontal**

Fonte: RIBEIRO et al., 2014

### 3.2. Tipos de união de uma turbina eólica de eixo horizontal

De acordo com Filho (2017), em uma turbina eólica de eixo horizontal existem comumente três tipos de ligações (Figura 3), quando utilizado um par parafuso-porca, quando utilizado somente o parafuso na ligação *Corpo da torre - Nacelle* e *Nacelle-Rotor*, e, por último a ligação que é feita na base da torre unindo-a ao bloco de fundação, que consiste em um parafuso sem cabeça.

**Figura 3 - Diferentes Ligações da Turbina Eólica**

Fonte: Filho, 2017

### 3.3. Aço Utilizado nas Usinas Eólicas

O aço estrutural tipicamente utilizado na construção de torres de usinas eólicas é o S355. Apesar dessa classe de aço ter um grande limite inferior

admissível para a tensão limite de elasticidade, um fator que condiciona a resistência estrutural da torre é comportamento à fadiga da ligação soldada dos anéis rígidos que constituem os flanges (MATOS *et al.*, 2010).

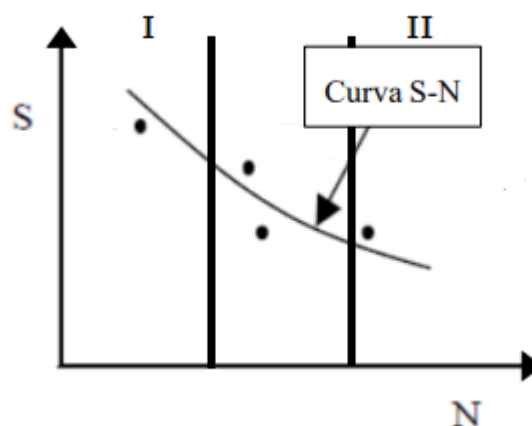
O Aço de Classe S355, para uma chapa de 16mm, pode alcançar uma tensão de escoamento mínima de 355 MPa e uma tensão de ruptura entre 470 e 630 MPa. São bastante resistentes, porém o seu uso dificulta a soldabilidade com resistências maiores do aço (FONTURA *et al.*, 2011).

### 3.4. Efeito da Fadiga

Fadiga é um modo de falha que é gerado por meio de cargas variáveis, cíclicas ou não, em um determinado tempo. Essas cargas irão gerar uma redução da capacidade de carga do elemento através de fissuras infinitesimais em seu interior (LIMA *et al.*, 2010).

Com o intuito de compreender o comportamento dos materiais a fadiga, o Engenheiro alemão Wohler criou as chamadas curvas S-N. Estas são geradas por meio de ensaios de fadiga e os resultados são distribuídos no gráfico, como demonstrado na Figura 4. O diagrama é formado por dois eixos (S) e (N), onde o eixo (S) é o registro da tensão aplicada e (N) é o número de ciclos para a ruptura do material. Na Figura 4 a seguir, tem-se um exemplo desse diagrama.

**Figura 4 - Curva S-N**



Fonte: Soares, 2019

De acordo com Castro (2007), a vida útil de um material está atrelada aos carregamentos cíclicos aplicados, e tende a aumentar quando são diminuídos os carregamentos variáveis aplicados. A principal utilidade para a curva S-N é a previsão do tempo de vida médio de um material ou estrutura.

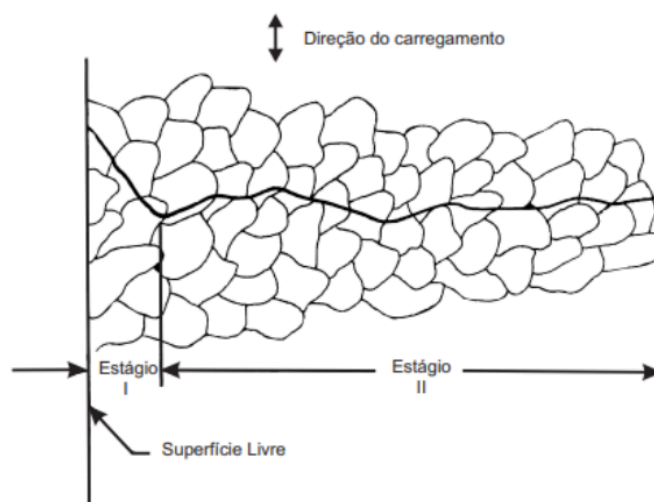
A curva S-N pode ser dividida em três partes, a região de baixos ciclos e elevadas tensões (I), uma região de altos ciclos, porém com tensões nominais baixas (II) e uma região intermediária entre elas.

De acordo com Pinheiros (2012), a fadiga do material inicia-se no princípio do ciclo de carregamento. Quando observado o material nessa etapa inicial, é percebido a formação de linhas de deslizamento, e posteriormente no decorrer do ciclo, as linhas vão se tornando mais largas devido às tensões cisalhantes cíclicas e gerando as bandas de deslizamentos. Depois de mais alguns ciclos começam a abrir microfissuras, fissuras e trincas respectivamente.

As etapas da falha por fadiga foram classificadas em estágios I, II e III (PINHEIROS, 2012). No estágio I, a propagação da trinca ainda é ditada pelas tensões cisalhantes e sua espessura é na ordem de grandeza dos grãos do material. No estágio II a trinca admite um tamanho maior, a ponto de se propagar perpendicularmente à máxima tensão normal atuante no material. Na Figura 5, é possível observar a propagação da trinca durante os dois estágios.

No estágio III, é atingido um tamanho crítico propagando-se de forma rápida até a ruptura do material.

**Figura 5** - Ilustração dos estágios de fadiga



### 3.4.1 Ensaio de Fadiga

O conhecimento da resistência à fadiga do aço utilizado na construção de um aerogerador é fundamental para a elaboração do seu projeto. Porém, nem sempre essas informações estarão dispostas nas bibliografias, por conta disso se faz necessário a realização de testes laboratoriais, os chamados ensaios de fadiga. Neste trabalho não será realizado o ensaio de fadiga.

O teste de fadiga em metais busca avaliar a resistência e durabilidade do material quando aplicado cargas cíclicas sobre ele. Para isso, corpos de prova são dispostos em uma máquina de fadiga e submetidos a variações de tensões ou deformações. No fim do processo, o número de ciclos até a falha é medido para determinar a resistência à fadiga.

O método mais comum utilizado para realizar ensaios de fadiga em um metal, busca estimar a curva S-N do material por meio de ensaios. De acordo com Tronco (2016), são necessários no mínimo 10 corpos de prova para atender as determinações da ISO 12107:2012. O resultado do ensaio é plotado em um gráfico Tensão x Número de Ciclos. A figura 6 abaixo mostra o maquinário utilizado para a realização do ensaio de fadiga:

**Figura 6** - Máquina de ensaio de fadiga PLW-500



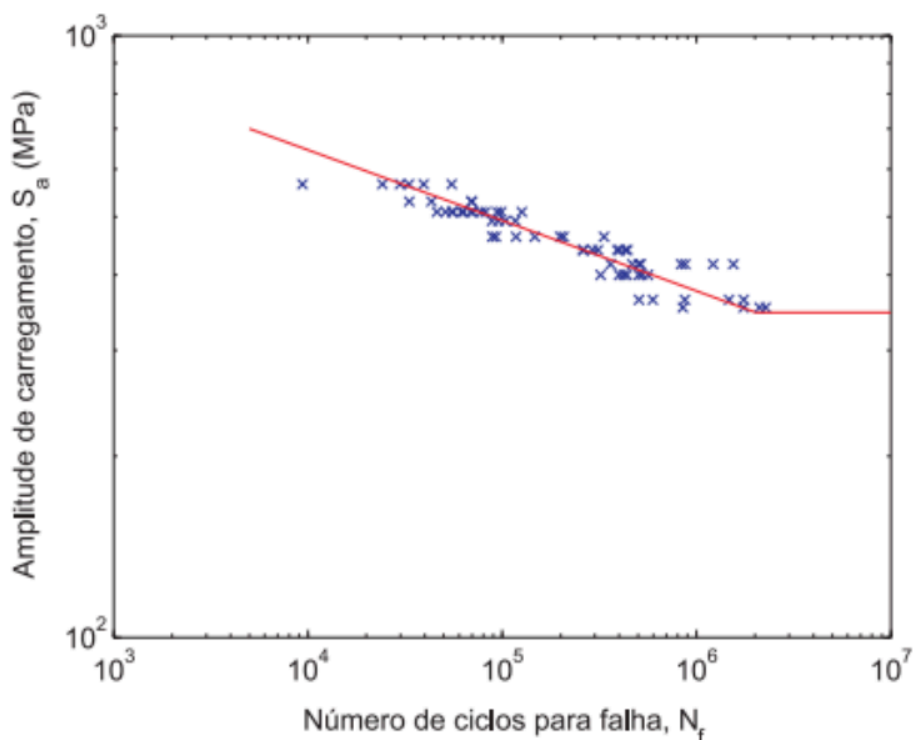
Fonte: Catálogo [www.directindustry.com](http://www.directindustry.com)

### 3.4.2 Limite de Fadiga

Quando analisada a curva S-N de um material, é percebido a existência de uma amplitude de tensão que qualquer valor abaixo não ocorre falha no material. De acordo com Pinheiros (2012), esse valor é por volta de  $10^6$  ciclos em alguns metais. Essa amplitude máxima de tensão é chamada de limite de fadiga, e é observável na curva de Wohler pela estabilização do número de ciclos até a falha, conforme mostrado na Figura 7 após de  $10^6$  ciclos.

Em geral, as tensões médias de tração são piores que as tensões médias de compressão para a diminuição do número de ciclos até a falha. Isso se dá por um fenômeno chamado de fecho de fenda.

**Figura 7** - Ilustração dos estágios de fadiga



Fonte: Pinheiros, 2012.

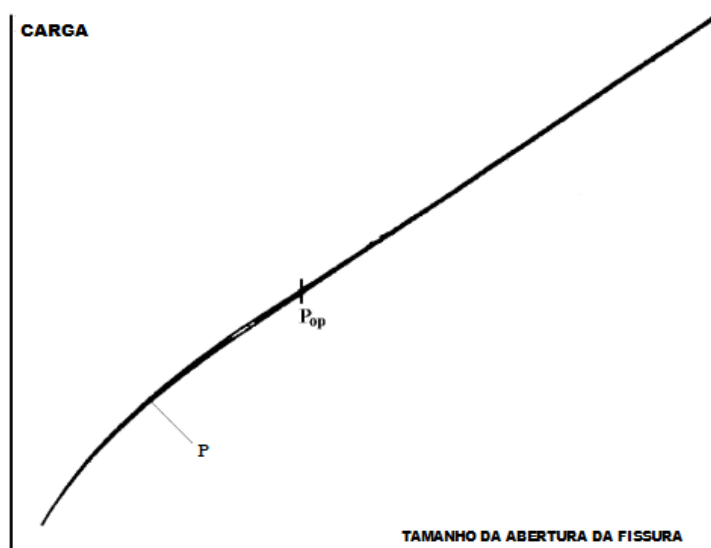
### 3.4.3 Fenômeno do Fecho de Fenda

Durante o processo de fadiga em metais, diferentemente de outros materiais, não ocorrem alterações nas propriedades do metal, como por exemplo, o módulo de elasticidade. Por conta disso, a relação entre tensão e deformação é constante durante parte do processo de fadiga, com exceção da primeira etapa devido ao Fenômeno do fecho de fenda.

De acordo com Perdigão (2015), o contato entre as faces da fenda durante uma parte do ciclo de carregamento desencadeia o que é chamado de Fenômeno de Fecho de Fenda. Esse fenômeno impacta os campos de tensão e deformação nas regiões próximas à fenda.

É possível observar o fenômeno de fecho de fenda por meio de um teste que acompanha o crescimento das aberturas das trincas em uma amostra de metal, enquanto esta é submetida a um carregamento progressivo. No Gráfico a seguir (Figura 8), é possível observar o fenômeno de fecho de fenda ocorrendo no ponto P.

**Figura 8 – Fecho de fenda**



Fonte: Nunes (adaptado), 2015.

No início do carregamento, a deformação da abertura da fissura em função da carga segue uma não linearidade, demonstrando uma concavidade

referente à plastificação do material. Após um valor de carga aplicada, a função assume uma linearidade, característica da lei de Hook (ponto  $P_{op}$ ).

A propagação de fendas por fadiga é grandemente influenciada pelo fenômeno de fecho de fenda. Durante a propagação da fenda, é criada uma zona plástica na sua extensão, essa plastificação influenciará no retardamento do avanço da fenda por meio das tensões residuais de compressão (NUNES, 2015).

### **3.5. Fadiga em Soldas**

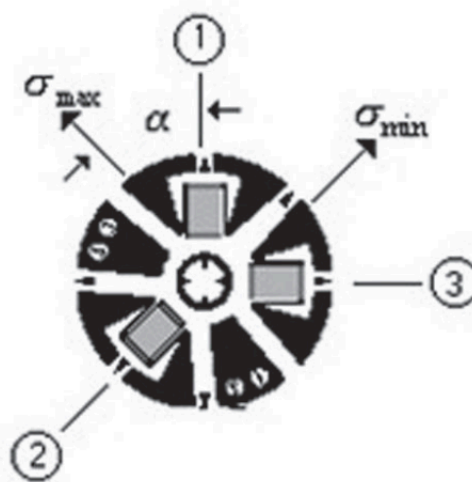
A solda é um tipo de ligação rígida que o seu processo gera tensões residuais e deformações na região de solda. As tensões residuais em geral são prejudiciais à estrutura fazendo-a sofrer falha por fadiga, e em muitos casos documentados, os pontos onde ocorreram falhas estruturais por fadiga foram nas regiões soldadas (MANSUR, 2011).

O estudo da degradação por fadiga se dá por meio de ensaios onde a amostra é submetida a tensões cíclicas simulando várias situações em que a estrutura estaria propensa a passar. Os ciclos podem ser regulares ou aleatórios, amplitude de tensões baixas ou altas. Todas essas configurações são possíveis nas máquinas de ensaio à fadiga.

O estudo da solda se torna muito importante, principalmente as soldas de materiais dissimilares, pois de acordo com Mansur (2011), a presença de tensão estática compressiva na superfície contribui para uma maior resistência à fadiga, ao atrasar a formação de trincas. Em contrapartida, a vida útil em cenários de fadiga é reduzida por tensões residuais de tração.

O estudo das tensões residuais presentes nas soldas é feito por meio de ensaios, que podem ser não-destrutivos, semi-destrutivos e destrutivos. “O Método do Furo Central” é o mais difundido atualmente, o qual é semi-destrutivo. Para a realização desse ensaio, primeiramente são colocados sensores formando uma roseta. A seguir, é feito um pequeno furo no centro dessa roseta (figura 9). As tensões residuais na região do furo irão ser liberadas e as superfícies em volta irão deformar com essa redução de tensão (MA et al., 2022).

**Figura 9** - Roseta para análise de tensão residual



Fonte: Mansur, 2011.

As deformações das superfícies em volta do furo são analisadas com extensômetros e as tensões residuais que ali existirem são determinadas.

### 3.6. ABNT NBR 8800 (2008)

A ABNT NBR 8800 (2008) - Projeto de estrutura de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, tem um capítulo e um anexo totalmente dedicado ao fenômeno da fadiga. A norma relata que para estruturas prediais convencionais, cálculos para o dimensionamento à fadiga são desnecessários, pois as flutuações de tensões são baixas no decorrer de sua vida útil, podendo desprezar os efeitos dos ventos e terremotos para a falha por fadiga.

Por outro lado, essa norma, estabelece que para obras industriais onde envolvem maquinários, os efeitos de fadiga devem ser levados em consideração. As transições bruscas de direção podem gerar acúmulos de tensão, pois muitas vezes em entalhes e curvas geram tensões residuais excessivas na estrutura.

Na ABNT NBR 8800 (2008), o seu Anexo K é destinado aos mecanismos para dimensionamento à ruptura por fadiga, para a estrutura sujeita a grandes números de ciclos e tensões limitadas ao regime elástico da estrutura. Na Tabela K1 da ABNT NBR 8800 (2008), são apresentados os parâmetros de fadiga, e listadas

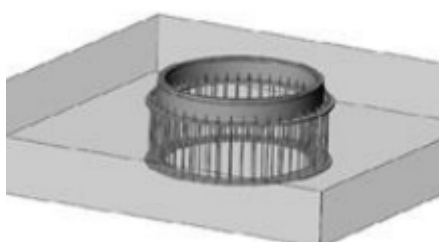
inúmeras situações e determinados os parâmetros que irão caracterizar os critérios de fadiga.

A ABNT NBR 8800 (2008) determina, ainda, que não é necessário verificar a resistência à fadiga se o número de ciclos for menor que 20.000 (vinte mil). No item K.4, são apresentadas equações para determinação das faixas admissíveis de variações de tensões em função do número de repetições e tipo de estrutura. Essas faixas admissíveis de variações de tensões de parafusos são dadas no item K.5, da ABNT NBR 8800 (2008).

### 3.7. Fadiga nas fundações

As estruturas de fundação, comumente utilizadas no mercado nacional, para transferir as cargas das usinas eólicas para o solo, são compostas basicamente por bloco sobre estaca ou em fundação direta. Para realizar a ligação da torre no elemento de fundação são utilizados anéis como apresentado na figura 10 (RIBEIRO, 2014).

**Figura 10** - Bloco de fundação com anel embutido



Fonte: Ribeiro, 2014.

**Figura 11** - Armadura de uma sapata circular para aerogerador



Fonte: Braz; Rosa; Amaral, 2021.

Os projetos estruturais de fundação de torres eólicas, ao contrário de outras estruturas, são realizados visando combater substancialmente os esforços horizontais (BRAZ et al, 2021). Tais esforços são essencialmente provenientes dos ventos e das diferentes rotações das hélices.

De acordo com Vieira (2017) os próprios fornecedores, deixam claro a importância de verificar a fadiga em todas as armaduras adotadas, e no concreto utilizado na fundação.

Segundo Faria e Noronha (2005), a escolha do tipo de fundação se dá pela determinação de parâmetros específicos do solo, por meio de ensaios geotécnicos de laboratório e in situ. Após a investigação do solo determina-se o tipo de fundação. As fundações rasas são escolhidas somente quando o perfil do terreno apresenta grande capacidade de suporte ou a existência de uma rocha em baixa profundidade. Caso contrário adotar-se fundações profundas.

Na fundação da torre, estão presentes a carga vertical, devido ao peso próprio da estrutura, cargas de momento fletor, momento torçor e a força cortante. As cargas de fadiga, como são dinâmicas, são dispostas em um gráfico S-N onde se espera uma vida útil de 20 anos.

Para a análise da fadiga na fundação, é comumente usados métodos para determinar o acúmulo de danos no decorrer dos ciclos, como a de Palmgren Miner. Para a realização deste método, é utilizado o espectro de cargas de fadiga (Figura 12). Os danos são analisados no concreto, nas barras de aço e nas soldas das barras de aço.

Os espectros de cargas de fadiga na fundação podem ser obtidos por meio de métodos computacionais, estimando usualmente para 20 anos de uso. Os espectros de cargas irão mostrar as variações de esforços através do tempo, em vários ciclos de repetições (FARIA et al, 2005).

No espectro de carga (figura 12), as colunas são os esforços cíclicos atuantes, que variam durante o tempo. Cada linha representa um esforço para determinada quantidade de ciclos (ex: 1E+03, 1E+04...).

**Figura 12** - Exemplo de espectro de cargas cíclicas

	$\Delta F_x$	$\Delta F_y$	$\Delta F_z$	$\Delta M_x$	$\Delta M_y$	$\Delta M_z$
1E+03	740	700	200	47000	50000	4700
1E+04	600	580	140	31000	42000	3750
1E+05	540	430	135	23000	35000	3200
1E+06	470	330	95	17000	27500	2300
1E+07	320	230	70	11500	17000	1400
1E+08	180	120	45	5000	8500	750
1E+09	30	20	5	1000	900	50
média	164	2	9300	801	11900	69

Fonte: Faria e Noronha, 2021.

O método integrado de análise da estrutura quanto a fadiga em que se combina a curva S-N dos materiais com a técnica de acúmulo de dano Palmgren Miner, tem sido muito utilizado na indústria e no meio acadêmico (Gomes, 2019). A regra de Palmgren Miner mostra que o dano acumulado por fadiga pode ser acrescido linearmente, e que os ciclos de carregamentos são independentes um do outro.

A regra de Palmgren Miner diz que o Dano (D), de acordo com a Equação (1), onde  $n_i$  é a faixa de tensão analisada, retirada do espectro de cargas (1E+03; 1E+04...), apresentado na (Figura 12), e  $N_i$  é o número de ciclos necessários para a ruptura da determinada faixa de tensão retirada da curva S-N.

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

De acordo com Ribeiro (2014), para a análise da estrutura de fundação quanto ao Estado Limite de Fadiga (ELF), é considerado que  $D_{total} < 1$ , ou seja  $\sum ni/Ni < 1$ . Essa análise deve ser repetida para o concreto, o aço e as soldas da estrutura de fundação

De acordo com Gomes (2019), quando analisadas estruturas de fundação de aerogeradores instalados offshore (no mar), os carregamentos provenientes das ondas são muito relevantes para o estudo da fadiga.

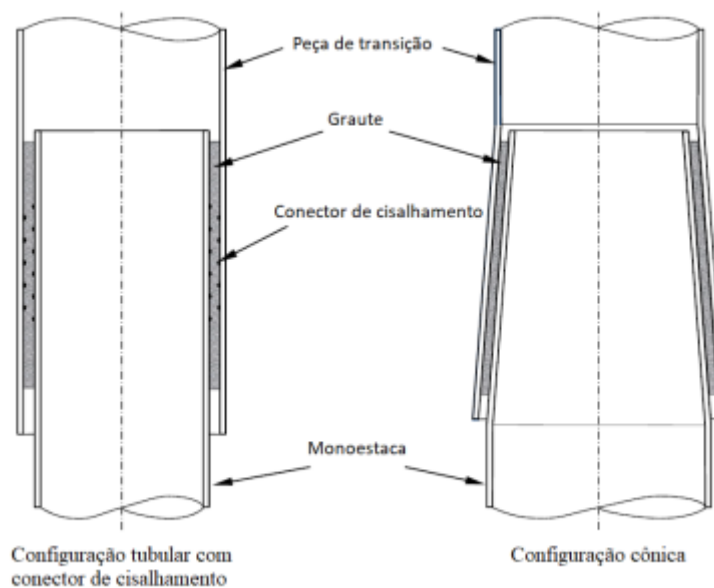
Nos casos de fundações *monopile* (Figura 13), são comumente utilizados dois tipos de conexão entre fundação-torre, configuração tubular com conector de cisalhamento e a configuração cônica (Figura 14). As duas conexões diferem em relação à resistência à fadiga.

**Figura 13 – Aerogerador com fundação Monopile**



Fonte: Faria e Noronha (adaptado), 2021

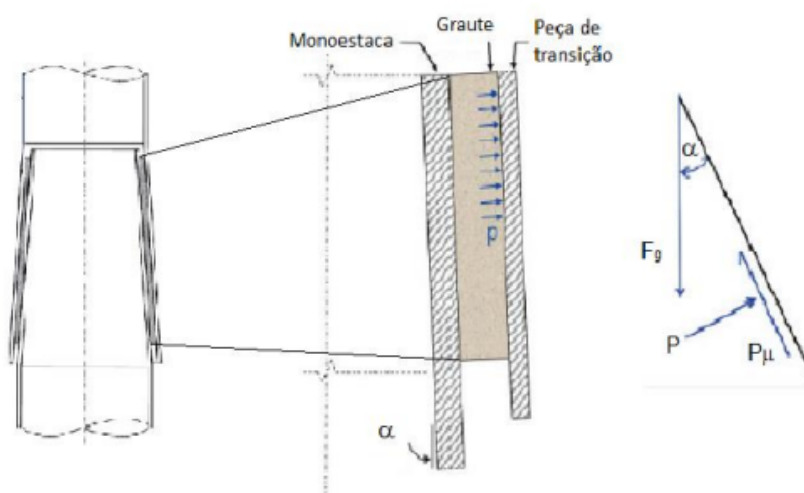
**Figura 14 – Aerogerador com fundação Monopile**



Fonte: Faria e Noronha, 2021.

A configuração cônica dispensa o uso de conectores de cisalhamento apenas com *graute* entre a mono estaca e a peça de transição que ligará no corpo da torre (Figura 15). Segundo Faria e Noronha (2021), a determinação da alta resistência do graute utilizado na ligação fundação-torre se dá pelo efeito de fadiga, pois o graute é submetido a grandes tensões de compressão.

**Figura 15 – Aerogerador com fundação Monopile**

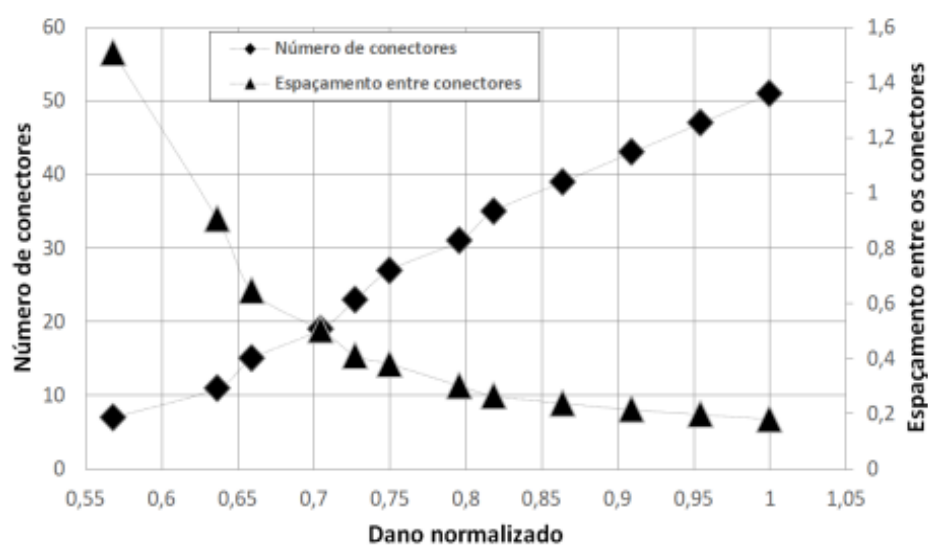


Fonte: Faria e Noronha, 2021.

De acordo com os estudos de Faria e Noronha (2021), analisando o dano a fadiga no decorrer da vida útil do *graute* das estruturas de fundação *Monopile*, observa-se que o dano é maior para a configuração cônica do que para a configuração tubular com conectores a cisalhamento. Isso se dá devido o *graute* ser o único elemento estrutural que absorve o dano na configuração cônica, devido à falta de conectores.

A quantidade de conectores e os espaçamentos entre eles influenciarão na resistência à fadiga do *graute*. Essa relação pode ser observada na Figura 16.

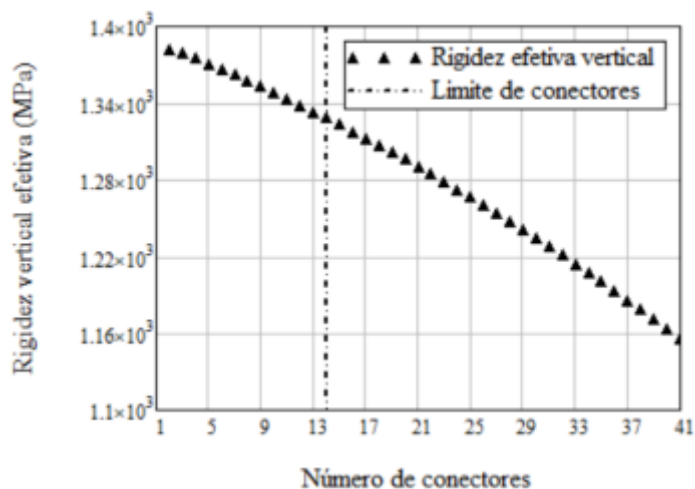
**Figura 16** – Influência do número e espaçamento de conectores no dano do graute



Fonte: Faria e Noronha, 2021.

Analisando o gráfico anterior, é possível observar que quanto maior a quantidade de conectores e menor o espaçamento entre eles, o dano no graute será maior. Faria e Noronha (2021) explicam que a diminuição do espaçamento entre os conectores reduz a rigidez efetiva vertical entre os conectores, assim não dissipando bem a energia e gerando danos no graute (Figura 17).

**Figura 17** – Influência do número de conectores na rigidez vertical efetiva



Fonte: Faria e Noronha, 2021

### 3.8 Fadiga nas Ligações

De acordo com Matos et al (2010), as torres dos aerogeradores são geralmente compostas por estrutura tubular com 80 a 100 metros de altura, e as suas ligações são flanges soldadas nas extremidades onde são montadas nos locais por meio de ligações aparafusadas (Figura 18). Essa forma de ligação tem como principal vantagem o transporte das peças e seções da torre.

**Figura 18** – Ligação Flanges Soldadas em Aerogeradores



Fonte: Windpowerengineering, 2023.

Na ligação de flanges soldadas nas extremidades, e aparafusadas, a resistência, em grande parte, é influenciada pelo comportamento à fadiga da ligação soldada dos anéis rígidos que compõem as flanges (MATOS, et al, 2010).

**Figura 19** – Ligação Flanges Soldadas em Aerogeradores


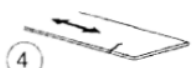




Fonte: Matos *et al.*, 2010.

Os estudos de fadiga nas ligações são importantes, pois, segundo Branco (2019), a mudança de geometria causa descontinuidade e acúmulo de tensões nas regiões da ligação entre as seções da torre.

Para a determinação do limite de fadiga nas ligações, são utilizados os detalhes presentes no Eurocode EN 1993-1-9 (Figura 20). Os detalhes são divididos em classe (DC 160, DC 140, DC 125...) e as numerações representam a resistência à fadiga para um ciclo de falha de 2 milhões.

**Figura 20 – Exemplo dos detalhes para verificação de fadiga**

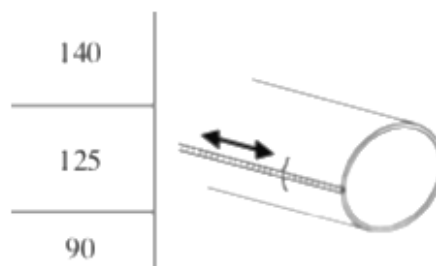
Categoria de detalhe	Detalhe construtivo	Descrição	Requisitos
160	<p>NOTA A curva de resistência à fadiga associada à categoria 160 é a mais alta. Nenhum detalhe pode atingir melhor resistência à fadiga em qualquer número de ciclos.</p> 	<p>AC2 Produtos laminados ou extrudados:</p> <p>1) Placas e flats com bordas laminadas;            2) Seções laminadas com bordas laminadas; AC2              3) Seções ocas sem costura, retangulares ou circulares.</p>	<p>Detalhes 1) a 3):</p> <p>Bordas afiadas, falhas superficiais e de rolamento devem ser melhoradas por retificação até serem removidas e uma transição suave alcançada.</p>
140		<p>Placas cisalhadas ou cortadas a gás:</p> <p>4) Material cortado ou cisalhado com gás de máquina com posterior curativo.</p> <p>5) Material com bordas cortadas a gás de máquina com linhas de arrasto rasas e regulares ou material cortado a gás manual, posteriormente preparado para remover todas as descontinuidades nas bordas.</p> <p>Corte a gás de máquina com qualidade de corte de acordo com EN 1090.</p>	<p>4) Todos os sinais visíveis de borda descontinuidades a serem removidas. As áreas cortadas devem ser usinadas ou retificadas e todas as rebarbas removidas.</p> <p>Quaisquer arranhões de máquinas, por exemplo, decorrentes de operações de retificação, só podem ser paralelos às tensões.</p> <p>Detalhes 4) e 5):</p> <p>- Cantos reentrantes a serem melhorados por retificação (inclinação <math>\leq 14^\circ</math>) ou avaliados usando os fatores de concentração de tensão apropriados.</p> <p>- Sem reparo por recarga de solda.</p>
125		<p>5) Material com bordas cortadas a gás de máquina com linhas de arrasto rasas e regulares ou material cortado a gás manual, posteriormente preparado para remover todas as descontinuidades nas bordas.</p> <p>Corte a gás de máquina com qualidade de corte de acordo com EN 1090.</p>	<p>Detalhes 4) e 5):</p> <p>- Cantos reentrantes a serem melhorados por retificação (inclinação <math>\leq 14^\circ</math>) ou avaliados usando os fatores de concentração de tensão apropriados.</p> <p>- Sem reparo por recarga de solda.</p>
100 m=5		<p>AC2 6) e 7)            Produtos laminados ou extrudados conforme detalhes 1), 2), 3) (AC2  </p>	<p>Detalhes 6) e 7):</p> <p>Calculado a partir de: <math>\sigma_{\text{red}} = \frac{V S(1)}{\text{Isto}}</math></p>

Fonte: Adaptado de Eurocode EN 1993-1-9, 2004.

De acordo com Branco (2019), o método para a determinação do limite de fadiga das ligações faz o uso das curvas S-N. Para escolher a curva que representa a ligação desejada, deve-se escolher o detalhe que mais se encaixa com a ligação utilizada.

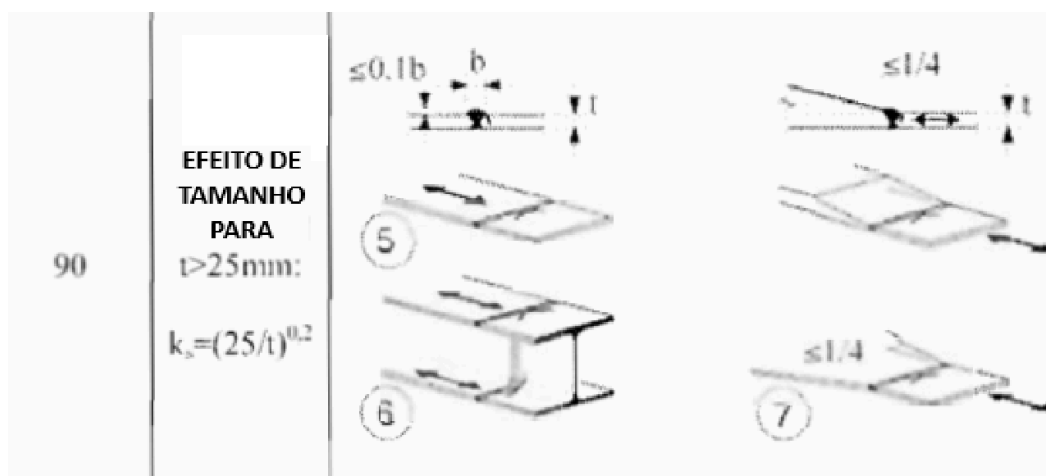
Como as ligações são flanges soldadas nas extremidades e conectadas por meio de parafusos, escolhe-se o detalhe DC 125 (Figura 21) da tabela 8.2 (Ligações soldadas verticais) e DC 90 (Figura 22) (ligações soldadas horizontais do Eurocode 3. Para as ligações parafusadas, escolhe o DC 50 (Figura 23).

**Figura 21 – DC 125 Ligação soldada vertical**



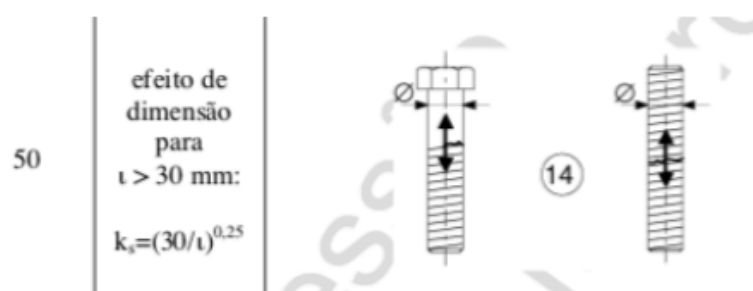
Fonte: Eurocode EN 1993-1-9, 2004.

**Figura 22 – DC 90 Ligação soldada horizontal**



Fonte :Adaptado de Eurocode EN 1993-1-9, 2004.

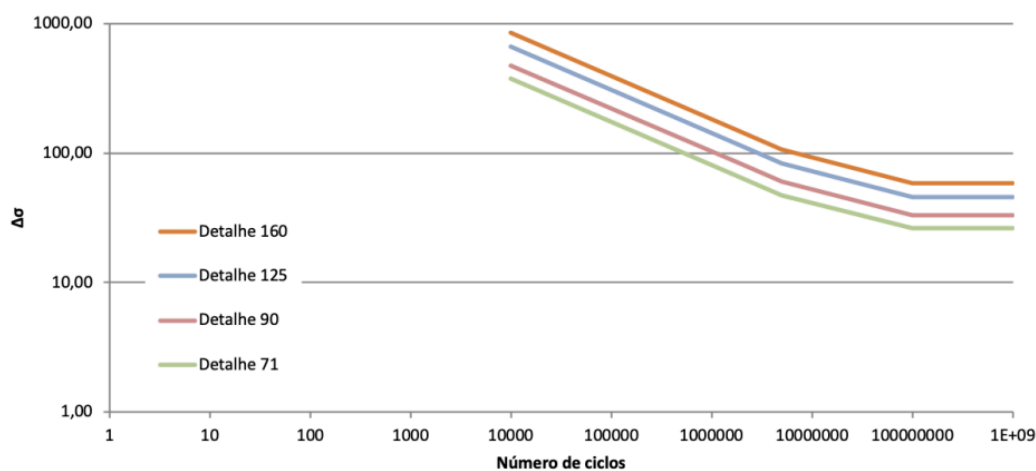
**Figura 23 – DC 90 Ligação aparafusada**



Fonte: Branco, 2010.

No gráfico da Figura 24 tem-se um exemplo de um gráfico S-N para quatro curvas de detalhes DC, presentes no Eurocode 3. Devido o material das curvas serem o mesmo, a inclinação de cada uma será também igual.

**Figura 24** – Exemplo de curvas S-N para intervalo de tensões normais



Fonte: Branco, 2010.

De acordo com Branco (2010), o limite de trincadura é em  $1 \times 10^8$  ciclos, onde as curvas ficam na horizontal. Qualquer valor de tensão superior ao limite de trincadura, apresentado no gráfico, fará com que a estrutura resista por um determinado número de ciclos. Porém, quando for aplicada uma tensão com amplitude inferior ao limite, a estrutura irá resistir por um número infinito de ciclos.

## 5. CONCLUSÃO

O estudo sobre o impacto da fadiga em torres de usinas eólicas é fundamental, uma vez que essas estruturas enfrentam condições ambientais adversas e são constantemente submetidas a cargas cíclicas devido às forças do vento e rotação das hélices. A fadiga é um fenômeno mecânico que ocorre quando uma estrutura suporta repetidas cargas ou variações de carga ao longo do tempo, resultando em falhas graduais que podem levar à ruptura da estrutura.

No contexto das torres de usinas eólicas, a fadiga pode ter um impacto significativo na integridade estrutural e na vida útil da torre, tornando crucial compreender e reduzir esse fenômeno.

Dentre os métodos para análise de fadiga na estrutura e componentes da torre dos aerogeradores um que muito vem sendo usado é a elaboração das curvas S-N, do engenheiro alemão Wohler. A partir desta, é possível determinar a vida útil da estrutura.

Um exemplo relevante sobre os carregamentos variáveis que incidem sobre a estrutura de um aerogerador é a influência das diferentes rotações das hélices sobre os momentos. Pois a rotação das hélices irá variar conforme as diferentes velocidades do vento. De acordo com Branco (2010), cada velocidade de rotação influenciará nos momentos oriundos da excentricidade presente no nacelle e nas pás em relação ao eixo médio da torre.

A distribuição de carga no eixo médio da torre tem uma grande excentricidade devido à disposição do nacelle e das pás. As diferentes rotações das hélices irão influenciar nos momentos em relação ao eixo médio da torre. Essa variação dos momentos pode gerar fadiga na estrutura.

Foi observado a importância da escolha dos métodos construtivos corretos. Os materiais de todos os componentes estruturais devem ser estudados e analisados a resistência à fadiga. A escolha da geometria deve ser assertiva, pois determinada configuração pode gerar acúmulo de tensões, causando falha estrutural.

Foi verificado que o uso de soldas nas estruturas da torre deve ser feita com estudo prévio, pois por observação, foi notado que nas regiões soldadas são os locais onde mais ocorreram falhas estruturais por fadiga.

A engenharia desempenha um papel crucial na construção de aerogeradores, desenvolvendo métodos que ampliem a durabilidade da estrutura, levando em consideração aspectos como custos, manutenção e eficiência do processo construtivo. Assim, a análise das condições dinâmicas de carga em cada componente de uma torre de usina eólica torna-se de extrema importância para o avanço contínuo das tecnologias de geração de energia.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BRANCO, Carla Margarida Martins Durão. Desenvolvimento e validação experimental de modelo numérico de Aerogerador para avaliação de Fadiga. 2019.

BRAZ, Evandro Medeiros; ROSA, Joatan; AMARAL, Mariana Bamberg. A Engenharia de Fundações de Aerogeradores de Grande Porte. Anais [...] In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 12., On-line. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pontes e Estruturas, 2021.

CASTRO, Carlos Alberto Carvalho. Estudo do comportamento à fadiga de metais dentro e fora da água na presença de pressão hidrostática. 2007. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

CORTEZ, Lucas Azevedo da Rocha; MACIEL, Carlos Alberto dos Santos; SANTOS, Poliane Borges; LIMA, Rodrigo Teixeira; SANTOS, Thaynara Maria Ferreira dos; NASCIMENTO, Monica Melo Gomes do. USO DAS ESTRUTURAS DE AÇO NO BRASIL. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 217, 2018.

DE LIMA, Alex Gutierrez et al. Fadiga em componentes mecânicos: estudo para redução de perdas econômicas e de vidas. In: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 15., 2010, Rio de Janeiro. Artigos [...]. Rio de Janeiro: Associação Educacional Dom Bosco, 2010.

European Committee for Standardization (CEN), "EN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-9: Fatigue", June 2004.

FARIA, P. O.; NORONHA, M. Fundações de torres eólicas-estudo de caso. IX Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul (GeoSul), p. 13, 2013.

FONTOURA, Bruno FC et al. Comparação da resistência à fadiga entre o aço S355 e o aço de alta resistência S690.

GOMES, Fellipe Araujo. Análise de fadiga de turbinas eólicas offshore tipo monopile com conexão grauteada. 2019.

LAGE, Carmem Miranda. Fadiga em estruturas metálicas tubulares soldadas. 2008.

LOZA, Brian et al. Comparative fatigue life assessment of wind turbine blades operating with different regulation schemes. Applied Sciences, v. 9, n. 21, p. 4632, 2019.

MA, Wenbo et al. Research on Improving the Accuracy of Welding Residual Stress of Deep-Sea Pipeline Steel by Blind Hole Method. Journal of Marine Science and Engineering, v. 10, n. 6, p. 791, 2022.

MANSUR, Tanius Rodrigues et al. Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base. Soldagem & Inspeção, v. 16, p. 274-284, 2011.

MATOS, Rui et al. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE LIGAÇÕES METÁLICAS RECORRENDO AOS MODELOS DE APROXIMAÇÃO LOCAL.

NUNES, Tiago Pedro Alves Serra. Análise da Influência do Fenómeno do Fecho de Fenda na Propagação de Fendas por Fadiga na Liga de Alumínio AA7050-T6. 2015.

PERDIGÃO, Sandra Maria Gonçalves. Extensão da vida à fadiga utilizando sobrecargas. 2015. Tese de Doutorado.

PINHEIRO, Paulo Arthur Batista. Análise crítica de modelos de fadiga de plano crítico e proposta de uma nova medida de amplitude da tensão cisalhante. 2012.

RIBEIRO, Marco Antônio Amancio; LIMA, S. de S.; SANTOS, Sergio Hampshire de C. Análise de fadiga em estrutura de fundação de torre de turbina eólica. An. VII Cong. Bras. Pontes e Estrut, 2014.

SOARES FILHO, Dário Conceição. Análise de projetos de montagem de turbinas eólicas. 2017.

Technical Committee ISO/TC 164/SC 4. ISO 12107: Materiais Metálicos - Ensaio de Fadiga - Planejamento Estatístico e Análise de Dados, 2ª edição; Organização Internacional para Padronização: Genebra, Suíça, 2012.

TEDESCO, Henrique Tasca. Estudo de diferentes direcionadores de escoamento na otimização da potência convertida de uma turbina eólica de eixo vertical. 2015.

TRONCO, Luiz Fernando. Desenvolvimento de procedimento para a realização de ensaio de fadiga por flexão-rotativa e obtenção da vida em fadiga da liga AA6063-T6. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.