

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PETERSON BERNONI GAGLIOTTO DA SILVA**

**ANÁLISE DE FADIGA EM TORRES DE AEROGERADORES DE EIXOS HORIZONTAIS DE  
PEQUENO PORTE**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2020**

PETERSON BERNONI GAGLIOTTO DA SILVA

**ANÁLISE DE FADIGA EM TORRES DE AEROGERADORES DE EIXOS  
HORIZONTAIS DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Robson Gonçalves Trentin

Coorientadora: Profa. Dra. Gabriela Wessling Oening Dicati

PATO BRANCO

2020

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### Análise de Fadiga em Torres de Aerogeradores de Eixos Horizontais de Pequeno Porte

Peterson Bernoni Gagliotto da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 13/05/2021 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Fabio Rodrigo Mandello Rodrigues  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Robson Gonçalves Trentin  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)  
Orientador

---

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

\*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais e irmãos que sempre me auxiliaram o máximo possível ao longo da minha jornada na universidade.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre ouvir minhas preces e me dar força para seguir em frente mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Dr. Robson Gonçalves Trentin e a minha coorientadora Dra. Gabriela Wessling Oening Dicati, pela cooperação e auxílio cedido sempre que necessário.

A toda minha família, por me ajudarem a ingressar na universidade e buscarem sempre meu bem-estar, mesmo nos momentos mais difíceis e estressantes. Em especial, agradeço a minha irmã Poliana Gagliotto da Silva, por me auxiliar e aturar durante grande parte da graduação.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Pato Branco.

A todos os colegas da UTFPR pela amizade, momentos de alegria e desespero passados ao longo dos anos e também pela ajuda que todos sempre se dispuseram a dar.

## EPÍGRAFE

Our biggest weakness is in giving up. The surest way to win is to try one more time (EDISON, Thomas).

Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez. (EDISON, Thomas).

## RESUMO

SILVA, Peterson Bernoni Gagliotto da. Compartilhamento da informação e do conhecimento em bibliotecas especializadas. 2021. 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Análise de Fadiga em Torres de Aerogeradores de Eixos Horizontais de Pequeno Porte) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

Este trabalho apresenta uma análise de fadiga da torre CGS3 utilizada em aerogeradores de eixos horizontais de pequeno porte, onde esta foi feita através da determinação de carregamentos sobre a estrutura, advindos do vento em uma região genérica urbana do sul do Brasil. O estudo tem como objetivo avaliar a aplicabilidade da estrutura e servir como incentivo para a exploração da energia eólica no país. A base para esse estudo após a modelagem da estrutura foi uma análise por meio de elementos finitos, onde as condições de carregamento foram ditadas pela ausência e presença das ações médias do vento, determinadas a partir da ABNT NBR 6123:1988. Esta análise foi feita com base na tensão equivalente de von Mises e o critério de falha por fadiga de Goodman Modificado aplicado para garantir uma vida mínima de vinte anos, este estudo possibilitou uma melhor compreensão das solicitações à que a estrutura estará sujeita e do comportamento desta sob tais condições. Sendo assim, através da realização das simulações e cálculos necessários, identificou-se que os pontos críticos da estrutura apresentaram coeficientes de segurança para a falha por fadiga e escoamento que garantem uma vida mínima requerida e até mesmo uma vida infinita, mesmo quando esta é exposta a condições de outros ambientes de elevada responsabilidade e baixa perda de carga, caracterizando assim, a aplicabilidade da estrutura na região pré-determinada.

**Palavras-chave:** Energia Eólica. Aerogeradores de Eixos Horizontais. Torres. Fadiga. Ponto Crítico. Coeficiente de Segurança.

## ABSTRACT

SILVA, Peterson Bernoni Gagliotto da. Sharing information and knowledge in specialized libraries. 2021. 117 f. Completion of course work (Fatigue Analysis in Small Horizontal Axis Wind Turbine Towers) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

This work presents a fatigue analysis of the CGS3 tower used in small horizontal axis wind turbines, where this was done through the determination of loads on the structure, coming from the wind in a generic urban region of southern Brazil. The study aims to assess the applicability of the structure and serve as an incentive for the exploitation of wind energy in the country. The basis for this study after modeling the structure was an analysis using finite elements, where the loading conditions were dictated by the absence and presence of the average wind actions, determined from ABNT NBR 6123: 1988. This analysis is made based on the equivalent von Mises tension and the criterion of Modified Goodman's fatigue failure applied to guarantee a minimum life of twenty years, this study enabled a better understanding of the requests to which the structure will be subject and its behavior under such conditions. Therefore, through the necessary simulations and calculations, it was identified that the critical points of the structure presented safety coefficients for the fatigue and flow failure that guarantee a minimum required life and even an infinite life, even when it is exposed to conditions in other environments with high responsibility and low pressure loss, thus characterizing the applicability of the structure in the predetermined region.

**Keywords:** Wind Energy. Horizontal Axis Wind Turbine. Towers. Fatigue. Critical Points. Safety Factor.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos principais de TEEV .....	23
Figura 2 – Aerogerador de eixo horizontal .....	24
Figura 3 - Classificação de acordo com a orientação do rotor .....	25
Figura 4 – Principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal.....	26
Figura 5 – Principais configurações de torres .....	27
Figura 6 – Distribuição da velocidade do vento sem perturbações .....	30
Figura 7 – Aspecto de uma falha por fadiga.....	34
Figura 8 – Diagrama S-N do aço UNS G41 300.....	35
Figura 9 – Critérios de falha por fadiga .....	40
Figura 10 – Exemplo de malha baseada em elementos de casca triangulares e quadrilaterais.....	42
Figura 11 – Exemplo da aplicação de elementos tetraédricos .....	43
Figura 12 – Exemplo de aplicação de elementos hexaédricos.....	44
Figura 13 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho .....	45
Figura 14 - Torre CGS3 modelada através do <i>software Solidworks</i> . a) Primeira seção e b) Torre montada.....	47
Figura 15 - Dimensões das pás e rotor do aerogerador Einar 70.....	48
Figura 16 - Componentes superiores da TEEH.....	48
Figura 17 - Montagem da TEEH.....	49
Figura 18 - Contatos de fixação (a) entre a parte superior do flange da base e a parte inferior dos cutelos e (b) conexão entre cutelo lateral da primeira seção da torre ....	50
Figura 19 – Contato entre a região interna da primeira seção da torre e a região externa da segunda seção .....	51
Figura 20 - Contato entre (a) torre e suporte e (b) suporte e nacele .....	51
Figura 21 - Contatos superiores entre (a) nacele e cauda e (b) nacele e rotor .....	52
Figura 22 - Malha gerada para os componentes superiores do aerogerador.....	54
Figura 23 - Malha gerada para os cutelos, flange da base e primeira seção da torre .....	54
Figura 24 - Variação da carga com a altitude da torre .....	55
Figura 25 - Condições de carregamento sobre a estrutura .....	57
Figura 26 - Condição de contorno cylindrical support .....	58

Figura 27 - Tensões equivalentes de von Mises (MPa) no principal ponto de concentração de tensão e na região de contato entre cutelo e primeira seção da torre.....	62
Figura 28 - Tensões equivalentes de von Mises (MPa) nas arestas laterais de contato entre seções da torre.....	63
Figura 29 - Critérios de falha por fadiga para a torre CGS3.....	67
Figura 30 - Carregamento distribuído para uma torre aplicada próxima a residências rurais .....	70
Figura 31 - Coeficiente de segurança de Goodman Modificado para uma vida infinita encontrado via Ansys .....	71
Figura A1 - Tensão média equivalente de von Mises para diferentes malhas .....	78
Figura A2 - Número total de elementos e nós para diferentes malhas.....	78
Figura A3 - Qualidade média dos elementos de malha.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões de cada segmento da torre de classe CGS3.....	46
Tabela 2 - Diâmetros equivalente para simplificação de nacele e cauda.....	47
Tabela 3 - Estatísticas relacionadas à malha.....	53
Tabela 4 - Carregamentos dos componentes do aerogerador.....	56
Tabela 5 - Propriedades dos materiais.....	59
Tabela 6 - Tensões médias e alternantes nos pontos críticos.....	64
Tabela 7 - Tensão limite de fadiga corrigida e seus fatores modificadores.....	65
Tabela 8 - Constantes do material para os pontos críticos da torre.....	65
Tabela 9 - Resistência à fadiga para os elementos críticos.....	66
Tabela 10 - Coeficiente de segurança por fadiga e escoamento para vida útil mínima.....	66
Tabela 11 - Coeficiente de segurança para vida infinita.....	67
Tabela 12 - Valores limites de $C_{\text{fatores}}$ para vida infinita nos elementos da torre.....	68
Tabela A1 - Variação do tamanho de elementos da malha.....	77
Tabela A2 - Tensão equivalente de von Mises para os quatro pontos críticos da estrutura sob condições de diferentes malhas.....	77

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$H_t$	Altura total da estrutura da respectiva seção da torre	mm
$h_e$	Altura de encaixe de uma seção da torre	mm
$\varnothing_{e.s}$	Diâmetro exterior superior de uma seção da torre	mm
$\varnothing_{e.i}$	Diâmetro exterior interior de uma seção da torre	mm
$t$	Espessura da torre	mm
$\bar{V}_p$	Velocidade de projeto do vento	m/s
$V_o$	Velocidade base do vento	m/s
$S_1$	Fator topográfico	-
$S_3$	Fator baseado em conceitos probabilísticos	-
$\bar{q}_o$	Pressão dinâmica média sobre a torre	N/m <sup>2</sup>
$b_{rug}$	Parâmetro de rugosidade do terreno	-
$z$	Cota acima do terreno	m
$z_r$	Altura de referência de medição da velocidade do vento	m
$p$	Expoente da lei potencial de variação de	-
$h$	Altura total de uma edificação acima do terreno	m
$\gamma$	Parâmetro dependente do tipo de estrutura	-
$\xi$	Coefficiente de amplificação mecânica	-
$\zeta$	Razão de amortecimento	-
$l$	Dimensão horizontal de uma edificação	m
$C_a$	Coefficiente de arrasto da estrutura	-
$Q$	Força por unidade de altura da estrutura	N/m
$N$	Número de ciclos estimado à que a estrutura está sujeita	Ciclos
$T$	Tempo de vida da estrutura	Anos
$N_f$	Número de ciclos até a falha	Ciclos
$a$	Constante do material	-
$b$	Constante do material	-
$f$	Fração da resistência $S_{ut}$	-
$S_{ut}$	Resistência à tração	MPa
$S_e$	Limite de fadiga corrigido	MPa
$S_f$	Resistência à fadiga	MPa
$\sigma_{max}$	Tensão máxima presente na estrutura	N/m <sup>2</sup>
$\sigma_{min}$	Tensão mínima presente na estrutura	N/m <sup>2</sup>
$S_a$	Tensão alternante em um ponto limitante	MPa

$S_m$	Tensão média em um ponto limitante	MPa
$n_f$	Coeficiente de segurança pelo critério de Goodman Modificado	-
$C_{superf}$	Fator de modificação de condição de superfície	-
$C_{tamanho}$	Fator de modificação de tamanho	-
$C_{carreg}$	Fator de modificação de carga	-
$C_{temp}$	Fator de modificação de temperatura	-
$C_{conf}$	Fator de confiabilidade	-
$C_{fatores}$	Fator de modificação por efeitos variados	-
$S_e'$	Limite de fadiga de um espécime de teste	MPa
A	Coeficiente de acabamento superficial	-
B	Coeficiente de acabamento superficial	-
$d_{eq}$	Diâmetro equivalente	mm
$A_{95}$	Área sujeita a tensões entre 95% e 100% da máxima tensão	-
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal	-
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical	-
MEF	Método dos Elementos Finitos	-
SI	Sistema Internacional de Unidades	-
CAD	<i>Computer Aided design</i>	-
IEA	<i>International Energy Agency</i>	-
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>	-

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.2 OBJETIVOS .....	17
1.2.1 Objetivo Principal .....	17
1.2.2 Objetivos Específicos .....	18
1.3 JUSTIFICATIVA .....	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS .....	21
2.2 AEROGERADORES .....	22
2.2.1 Aero geradores de Eixos Vericais .....	23
2.2.2 Aero geradores de Eixos Horizontais .....	24
2.3 PRINCIPAIS COMPONENTES .....	25
2.3.1 Pás .....	26
2.3.2 Nacele .....	26
2.3.3 Torre .....	27
2.3.3.1 Torres estaiadas .....	27
2.3.3.2 Torres treliçadas .....	28
2.3.3.3 Torres tubulares .....	28
2.3.3.4 Torre tubular CGS3 .....	29
2.5 AÇÕES DO VENTO SOBRE A ESTRUTURA DOS AEROGERADORES .....	29
2.5.1 Comportamento dos Ventos .....	30
2.5.2 Normativa .....	31
2.5.2.1 Norma brasileira .....	31
2.5.2.2 Norma europeia .....	32
2.6 FADIGA .....	33
2.6.1 Limite de Fadiga .....	35

2.6.2 Fadiga em Aerogeradores de Eixos Horizontais .....	37
2.6.3 Método de Análise de Fadiga .....	38
2.7 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS .....	40
2.7.1 Malha de Elementos de Malha .....	41
2.7.1.1 Elementos de casca .....	42
2.7.1.2 Elementos tetraédricos e hexaédricos.....	43
2.7.2 Aplicação de Cargas e Condições de Contorno .....	44
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>45</b>
3.1 MODELAGEM DO SÓLIDO .....	46
3.1.1 Dados Estruturais do Aerogerador .....	46
3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	49
3.2.1 Contatos .....	49
3.2.2 Malha.....	53
3.2.3 Condições de Contorno.....	55
3.2.4 Propriedades dos Materiais.....	58
3.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE FADIGA .....	59
<b>4 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>61</b>
4.1 TENSÕES TOTAIS .....	61
4.1.1 Tensões Máximas e Mínimas.....	63
4.2 FALHA POR FADIGA.....	64
4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	71
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE A – ANÁLISE DE MALHA.....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE B – DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO DISCRETO .....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE C – RESULTADOS PARA O MODELO DISCRETO.....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO A – COEFICIENTES PARA A EQUAÇÃO DO FATOR DE SUPERFÍCIE..</b>	<b>83</b>

<b>ANEXO B – FATOR MODIFICADOR DE TEMPERATURA.....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO C – FATOR MODIFICADOR DE CONFIABILIDADE.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO D – FRAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA .....</b>	<b>86</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A energia eólica vem ganhando cada vez mais força e enfoque, devido à busca por energias limpas e renováveis, a fim de diminuir a emissão de gases poluentes e, conseqüentemente, problemas como a poluição do ar e o aquecimento global (CASTRO, 2009). Quando se fala da indústria de energia eólica, percebe-se tanto a sua crescente utilização quanto um grande desenvolvimento, que é notável também no Brasil (BRETSCHNEIDER, 2018).

Segundo o Balanço Energético Nacional (2018 apud EPE, 2018), atualmente, no Brasil temos as usinas hidrelétricas como principal meio de geração de energia elétrica, as quais são responsáveis por cerca de 65% da produção de energia do país. Apesar de a matriz elétrica brasileira ser caracterizada em grande parte por fontes renováveis e limpas, quando há escassez hídrica o país também sofre com os efeitos da utilização de termelétricas para a geração de energia elétrica. Desta forma, o país fica vulnerável devido a utilização em larga escala de usinas hidrelétricas. Por conseguinte, o foco se volta à utilização de outras fontes de energias renováveis, como, por exemplo, a energia eólica. As regiões principais de grande potencial eólico à implantação de aerogeradores são o sul e o nordeste do Brasil (MORELLI, 2012).

Um passo importante para efetuar implantações de aerogeradores em regiões brasileiras é a realização de uma análise detalhada das solicitações a que a estrutura será exposta, pois os aerogeradores são expostos diretamente ao ambiente e sua variação de comportamento (PRACIANO; PARENTE, 2013).

Considerando os aspectos relatados acima, o objetivo deste estudo é analisar o comportamento da torre de um aerogerador de eixo horizontal de pequeno porte, quando exposto a tensões cíclicas, apresentando uma análise quanto à fadiga ocasionada pela ação do vento em torres implantadas na região sul do Brasil.

### 1.2 OBJETIVOS

#### 1.2.1 Objetivo Principal

Analisar o comportamento mecânico relacionado à fadiga da torre metálica de classe CGS3 utilizada em aerogeradores de eixo horizontal de pequeno

porte, quando exposta ao ambiente urbano sulista brasileiro, através do critério de falha por fadiga de Goodman Modificado e do Método de Elementos Finitos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar os esforços causados pelo vento sobre a torre baseando-se na ABNT NBR 6123:1988;
- Modelar o sólido em programa CAD;
- Realizar análise das tensões pelo Método dos Elementos Finitos via Ansys 18.2;
- Analisar a fadiga quanto à vida finita e infinita dos principais pontos de concentração de tensões presentes.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A área relacionada a aerogeradores vem crescendo no Brasil e no mundo, como já descrito. Tal estudo tem o intuito de agregar a este crescimento, possibilitando o entendimento da integridade estrutural (torre eólica), quando esta é submetida às condições médias do vento encontradas em regiões urbanas do sul, a repetitividade do trabalho também o torna base para estudo em diferentes regiões ao longo do país. Portanto, como principal benefício do estudo, encontra-se a segurança que será propiciada pela integridade estrutural.

Com o estudo da mecânica da fadiga relacionada às torres dos aerogeradores de eixos horizontais, é possível determinar a vida útil de seus elementos, possibilitando com melhor exatidão determinar quando será necessário realizar manutenções de seus componentes, quando estes forem dependentes das tensões cíclicas sofridas pela torre. Assim, com tais dados será possível realizar um melhor controle de gastos relacionados à manutenção, gerando assim um maior incentivo ao investimento neste meio de geração de energia.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este capítulo apresenta uma introdução à energia eólica e sua importância em um panorama nacional e internacional, os objetivos deste estudo e a justificativa para a realização do presente trabalho.

No capítulo dois tem-se a revisão bibliográfica, onde uma introdução histórica e conceitos importantes são abordados, como os tipos de aerogeradores existentes e suas classificações. Neste capítulo, também é tratado sobre a ABNT NBR 6123:1988 determinante para análise da ação do vento sobre estruturas, juntamente a uma breve abordagem dos Eurocódigos que possuem a mesma finalidade e são utilizados na Europa. Por fim, são abordados conceitos fundamentais de análises pelo Método dos Elementos Finitos e de fadiga, bem como os métodos de análise da mesma.

O capítulo três consiste na metodologia deste trabalho, onde as ferramentas e outros materiais para a obtenção dos dados são expostos, bem como as especificações dos métodos utilizados para o estudo da torre em questão. O modelo CAD da torre metálica é tratado e exposto juntamente a suas especificações dimensionais, além da determinação das especificações utilizadas para a análise por elementos finitos, como, por exemplo, tipo de malha, condições de contorno, contatos e propriedades do metal utilizado. Por último, a análise abordada para determinar o comportamento quanto à falha da estrutura será exposta com o auxílio das informações expostas no capítulo dois.

No capítulo quatro, resultados e discussões, os cálculos efetuados a partir das especificações e considerações do capítulo três são apurados e analisados para que o comportamento da torre exposta a tensões cíclicas possa ser compreendido e assim, determinados os principais pontos críticos desta. Após determinados tais pontos será feita a análise perante os critérios de falha de Goodman Modificado para fadiga e de Langer para escoamento, admitidos e expostos no capítulo três. A análise ainda contará com uma comparação entre dois locais diferentes de aplicação da estrutura da torre CGS3 na região sul do Brasil, gerando assim uma mudança nas condições impostas pelo ambiente e conseqüentemente sobre o carregamento. Por fim, será realizada uma comparação entre os dados obtidos analiticamente e numericamente.

No capítulo cinco, as conclusões finais do trabalho são expostas de forma breve, trazendo os principais pontos da análise.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

A utilização de energia eólica através de cata-ventos de eixos verticais vem sendo utilizada desde antes de Cristo. Os registros mais antigos encontrados foram datados de 200 a.C. na Pérsia, onde eram utilizados para a moagem de grãos e bombeamento de água. No entanto, acredita-se que a utilização de moinhos rústicos já havia começado bem antes na China e no Império Babilônico em até 2000 a.C., para realizar irrigações. Os moinhos de eixos verticais arcaicos permaneceram até o século XII, quando cata-ventos de eixos horizontais passaram a ser utilizados em países, como a Holanda e a Inglaterra, em que sua utilização era cada vez mais crescente e se encontrava, principalmente, na região rural dos países (DUTRA, 2008).

Com o passar dos tempos e o avanço da rede elétrica e de outras tecnologias, melhores componentes passaram a serem desenvolvidos para os moinhos de vento, como pás, sistemas de controle, eixos e, principalmente, o desenvolvimento dos aerogeradores no século XX, que possibilitaram a adaptação dos moinhos para a geração de energia elétrica. Quem deu o primeiro passo para a adaptação dos moinhos foi Charles F. Brush, que em 1888 ergueu na cidade de Cleveland o primeiro cata-vento voltado para a geração de energia elétrica. O cata-vento de Charles F. Brush, possuía uma roda principal com 144 pás, 17m de diâmetro e 18m de altura, gerando cerca de 12kW destinados ao fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes (DUTRA, 2008).

Em 1931, na Rússia, o aerogerador Balaclava, muito desenvolvido para a época, gerava 100kW e foi conectado em uma rede de transmissão a uma usina termelétrica de 20MW. O aerogerador Balaclava foi a primeira tentativa bem sucedida de conectar um aerogerador a uma usina termelétrica e foi tido como um dos primeiros passos para o desenvolvimento posterior das torres eólicas de grande porte. Pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de torres eólicas de grande porte não eram vantajosas na época, devido à forte concorrência das tecnologias relacionadas à geração de energia por combustíveis fósseis. Contudo, a chegada da Segunda Guerra Mundial fez com que os países buscassem diminuir o consumo

destes combustíveis e investissem mais no desenvolvimento de meios de geração de energia alternativos, o que abriu novamente portas para o desenvolvimento da energia eólica. Porém, a guerra finalmente acabou e a energia gerada por combustíveis fósseis, bem como a gerada em usinas hidrelétricas ganharam novamente força e enfoque (SHEPHERD, 1994).

A partir do século XX, uma grande preocupação passou a ser instaurada quanto ao impacto ambiental que as fontes de energias causam. Em busca do contínuo crescimento tecnológico e econômico, os países começaram a buscar novas fontes de energias limpas e renováveis. Diante de tal cenário, a energia eólica surge como uma fonte de energia com baixo impacto ambiental e com um preço de comercialização aceitável, que é obtida através dos chamados aerogeradores (CASTRO, 2009).

## 2.2 AEROGERADORES

Os aerogeradores, também conhecidos como turbinas eólicas, são geradores elétricos que têm como função transformar a energia cinética dos ventos em energia elétrica. O funcionamento das turbinas eólicas é baseado nos moinhos de vento, onde estes possuem hélices, que são movimentadas pela ação do vento, fazendo girar um rotor, transmitindo assim a rotação para um gerador, ou seja, a energia eólica é transformada em mecânica para posteriormente ser transformada em energia elétrica (MÜLLER, 2015).

Segundo Rivera (2013), os aerogeradores podem ser classificados quanto a sua potência nominal e a posição do eixo do rotor. A potência nominal dos aerogeradores está diretamente relacionada ao tamanho destes, que podem ser: (a) pequeno, até 50 kW de potência, como no caso de estudo, (b) médio, de 50 a 1000 kW de potência e (c) grande porte, acima de 1 MW de potência (WENZEL, 2007).

Wenzel (2007) classifica os aerogeradores quanto à posição do eixo do rotor da seguinte forma:

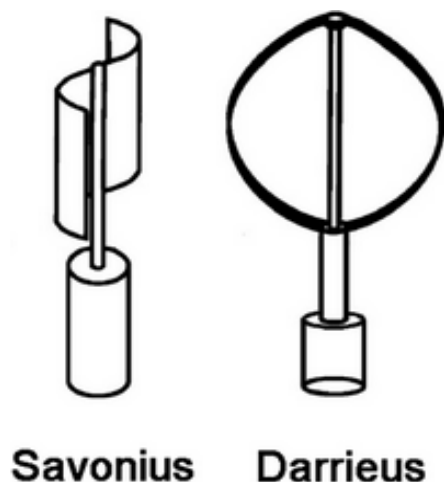
- Aerogeradores de eixo vertical ou turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV);
- Aerogeradores de eixo horizontal ou turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH).

### 2.2.1 Aerogeradores de Eixos Vericais

O TEEV possui o seu eixo de rotação perpendicular ao terreno em que se encontra, fazendo com que tenha um melhor comportamento quando exposto a ventos turbulentos e gere menos ruídos quando comparado às TEEH, possibilitando que este seja utilizado em ambientes urbanos ou semiurbanos (MÜLLER, 2015). Porém, as TEEV não permitem que suas pás tenham sua inclinação variada, impossibilitando o controle de forma fácil da saída de potência do aerogerador. De acordo com Rocha (2008), as TEEV podem ser divididas em dois tipos principais:

- Darrieus: O modelo Darrieus, que pode ser visto na Figura 1, é um aerogerador que apresenta perfil aerodinâmico semelhante à de asas de aviões, pois usa do mesmo princípio de movimento, a partir de forças de sustentação causadas pelo vento. Quando comparado as TEEV do tipo Savonius, por fazer uso das forças de sustentação, apresentam maior potência, rotação e rendimento;
- Savonius: O modelo Savonius, apresentado na Figura 1, faz uso de forças de arrasto para adquirir movimento, que demandam uma área maior em contato com o ar para que se tenha maior pressão de arraste e força suficiente para movimentar o eixo. Assim, o modelo adquire baixa eficiência na geração de energia elétrica. Porém, quando comparado as TEEV do tipo Darrieus as TEEV Savonius se sobressaem em relação ao nível de torque gerado.

**Figura 1 – Tipos principais de TEEV**



**Savonius      Darrieus**

Fonte: Adaptado de Perreira (2020)

### 2.2.2 Aerogeradores de Eixos Horizontais

O tipo mais comum de aerogerador encontrado atualmente é o aerogerador de eixo horizontal que é exposto na Figura 2, que possui um eixo de rotação posicionado horizontalmente em relação à superfície em que a torre se encontra. A TEEH faz uso de pás que são responsáveis pelo movimento do eixo, a quantidade de pás presentes pode variar entre uma, duas, três e múltiplas. Em sua maioria, as TEEH possuem três pás, tal fato ocorre devido à boa relação existente entre o coeficiente de potência, velocidade de rotação e custo de instalação destas torres em relação às demais (MÜLLER, 2015).

**Figura 2 – Aerogerador de eixo horizontal**



**Fonte: Adaptado de IMA (2009)**

Uma das principais características presentes nas TEEH é a necessidade de um mecanismo de reposicionamento para controle do rotor, pois este precisa estar posicionado na direção predominante do vento (WENZEL, 2007).

Marques (2004) classifica as TEEH em duas categorias de acordo com a orientação do rotor presente, sendo elas:

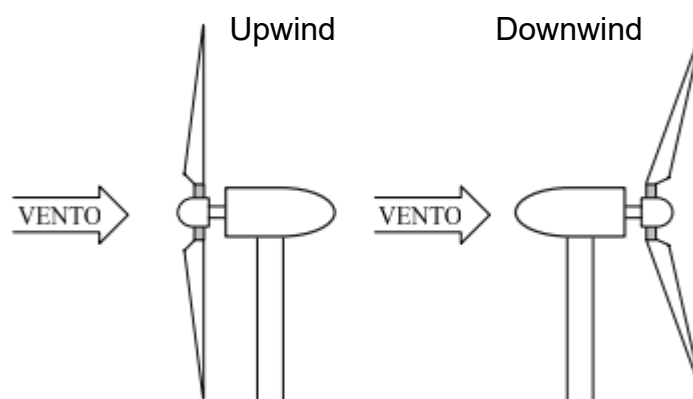
- Frontais ou *upwind*: São aerogeradores que possuem pás rígidas e um rotor movido na mesma direção que o vento, por um dispositivo motor.



Neste aerogerador o rotor é sempre orientado de forma que o vento sopra frontalmente às pás, como mostrado na Figura 3;

- Retaguarda ou *downwind*: São aerogeradores que possuem um rotor flexível e auto orientável, que faz com que este se posicione de forma que o vento sopra na retaguarda das pás, de acordo com a Figura 3.

**Figura 3 - Classificação de acordo com a orientação do rotor**



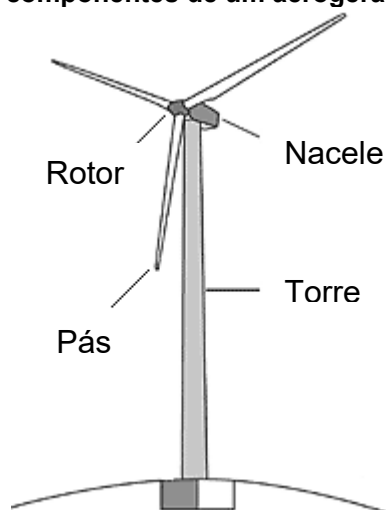
**Fonte: Adaptado de Marques (2004)**

Segundo Amaral (2016), o desenvolvimento de TEEV foi gravemente abalado, devido a problemas de vibração excessiva e ao melhor desempenho aerodinâmico presente nas TEEH, onde o avanço destas foi priorizado.

### 2.3 PRINCIPAIS COMPONENTES

Uma TEEH pode ser basicamente dividida em três partes principais: a torre, o rotor com as pás e o nacele ou nave, que são mostradas na Figura 4. Tais componentes estão diretamente expostos à ação do vento (WENZEL, 2007).

**Figura 4 – Principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal**



**Fonte: Adaptado de WMTC (2016)**

### 2.3.1 Pás

O conjunto formado pelo cubo e as pás presentes nas TEEH forma o rotor. O cubo é o componente responsável por unir e fixar as pás e são geralmente feitos em aços ou ligas metálicas (MAIOLINO, 2014). Ao passo que, as pás são fabricadas com fibras de vidro e resinas, por adquirirem assim melhor equilíbrio entre resistência mecânica, peso e custo. O formato dessas pode variar entre perfis aerodinâmicos únicos ou compostos, visando sempre uma maior eficiência na retirada de energia do vento (AREIAS; MELOTTI; SILVA, 2012).

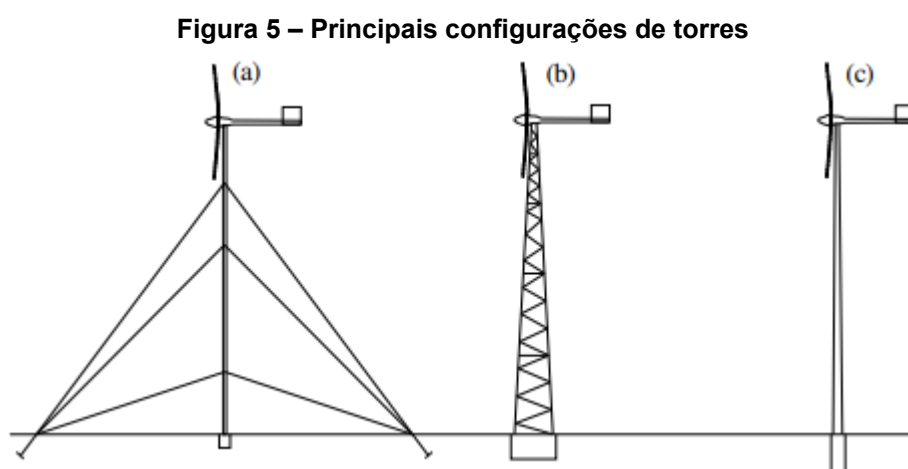
### 2.3.2 Nacele

A nave ou nacele é a carcaça presente sobre a torre de sustentação, nesta área das TEEH é onde se encontram os mecanismos que realizam a transformação de energia eólica em elétrica, como o eixo principal, gerador elétrico, freio de segurança, sistema de resfriamento, entre outros componentes. O nacele, assim como as pás é produzido fazendo-se uso de compósitos, sendo eles, geralmente, a fibra de vidro e resinas epóxi (RIVERA, 2013).

### 2.3.3 Torre

Conceitualmente, as torres são responsáveis pela sustentação da nave, dos rotores e pás, bem como pela elevação destes a alturas favoráveis à captação da energia eólica (BRETSCHEIDER, 2018). A grande importância da torre se deve ao fato de que quanto maior o tamanho deste componente, maior é a velocidade do vento que entra em contato com as pás, ou seja, maior a energia cinética fornecida e, conseqüentemente, maior a geração de energia elétrica. Entretanto, as solicitações estruturais também aumentam com o tamanho da torre, tornando necessárias torres maiores e mais robustas para suportarem tais solicitações (RIVERA, 2013).

As torres podem possuir diferentes formas, alturas e serem fabricadas a partir de diferentes materiais, dependendo do porte da TEEH. Entre as principais configurações estruturais de torres, encontram-se as torres estaiadas, treliçadas e tubulares, conforme expostas na Figura 5.



Fonte: Adaptado de Rivera (2013)

#### 2.3.3.1 Torres estaiadas

As torres estaiadas possuem uma estrutura de diâmetro pequeno que as tornam mais baratas quando comparadas as outras, porém, tal característica torna necessário o uso de cabos acoplados ao solo para sustentar a mesma (PESTANA, 2016). Devido à utilização de cabos, a região que cerca a torre se torna de difícil acesso e sua configuração estrutural faz com que seja utilizada em aerogeradores

de pequeno porte voltada para a utilização local de sua energia gerada (residências, empresas, áreas agrícolas) (PRACIANO; PARENTE, 2013). O modelo de torre estaiada pode ser observado na Figura 5 (a).

#### 2.3.3.2 Torres treliçadas

As torres treliçadas, são produzidas a partir de perfis de aço que são soldados e parafusados, um exemplo é apresentado na Figura 5 (b). Essa configuração permite um consumo menor de material, além de menor peso e custo, tanto de montagem quanto de transporte de equipamentos e materiais, porém como principal desvantagem está a poluição visual que as torres treliçadas trazem para o ambiente em que são implantadas (PESTANA, 2016).

#### 2.3.3.3 Torres tubulares

Os modelos de torres tubulares são os mais utilizados atualmente no mercado, por vantagens como, maior segurança contra elementos naturais (chuva, vento, aves, entre outros) para os componentes elétricos internos e para os técnicos que operam o aerogerador, devido à maior facilidade de implantação de elevadores ou escadas internas na torre, além de garantir uma maior beleza visual quando comparado a outros modelos de torres (PESTANA, 2016).

O modelo tubular pode ser visualizado na Figura 5 (c), como o nome sugere, possui um formato cônico e é formado por várias partes que geralmente são acopladas entre si através de flanges. As torres tubulares também possuem um aumento crescente em seu diâmetro, que ocorre do topo até a base da mesma, com o intuito de adquirir maior resistência na região de fixação da torre ao solo (PESTANA, 2016).

As torres com configuração tubular podem ser fabricadas a partir de diferentes dimensões de altura e diâmetro que são dependentes uma da outra e, geralmente, são feitas em aço laminado pelo melhor balanço entre preço e resistência mecânica (CHIAVERINI, 1986).

#### 2.3.3.4 Torre tubular CGS3

O modelo de torre CGS3 é uma estrutura metálica feita em aço estrutural S275JR pela empresa Metalgalva, tal estrutura possui um comprimento total de 20 m dividida em quatro seções com dimensões variantes, apresenta uma conexão entre seções feita inteiramente pela ação do peso e atrito gerado no encaixe entre estas. A torre é fixa ao solo através de uma fundação com oito chumbadores de 32 mm de diâmetro fixados a um flange presente em sua base com 30 mm de espessura e um diâmetro externo e interno de 880 mm e 626 mm, respectivamente. Além dos componentes citados, a torre ainda apresenta oito cutelos fixos ao flange e a primeira seção da torre para garantir uma maior resistência na região inferior (POLÍCIA, 2015).

A torre CGS3 será tida como foco de estudo no presente trabalho por apresentar grande utilização em países da Europa por suportar as solicitações feitas por aerogeradores de três pás e por disponibilizar um nível de detalhamento de informações muito grande (POLÍCIA, 2015).

### 2.5 AÇÕES DO VENTO SOBRE A ESTRUTURA DOS AEROGERADORES

Segundo o European Committee for Standardization (2009), é de grande importância no desenvolvimento de projetos, se dar a devida atenção às ações do ambiente sobre as estruturas, quando estas se mostram demasiadamente influenciáveis pelas condições do meio em que se encontram. Um dos principais aspectos que influenciam de forma direta a durabilidade e a vida útil é a fadiga, ou seja, o tempo que a estrutura suportará as solicitações a ela impostas de forma segura e íntegra está ligada intrinsecamente a fadiga.

Ainda, Pestana (2016) traz em seus estudos a ação sísmica e a vibração causada pelo trabalho do gerador presente no nacelle como influenciadores diretos no modo de comportamento da estrutura, devido às grandes diferenças de dimensionamento horizontal e vertical apresentadas pelas torres.

Pelo mundo, os fenômenos sísmicos e as ações do vento são predominantes quando se diz respeito a condições ambientais no projeto de estruturas (POLÍCIA, 2015). Porém, no sul do Brasil a incidência de fenômenos sísmicos é muito pequena e estes quando acontecem possuem baixa intensidade,

fazendo com que a ação dos ventos sobre a estrutura se torne de maior importância nesta região (PEREIRA; FERREIRA; BEZERRA, 2008).

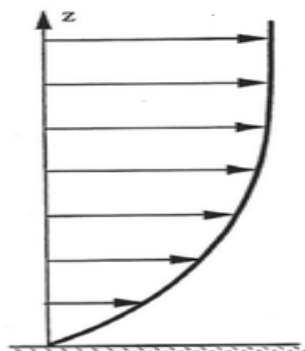
Segundo Burton (2001), a frequência de excitação das torres e dos rotores dos aerogeradores, gerado pela movimentação das pás, pode gerar problemas de concentração de tensões e deflexão causadas pela ressonância, impactando assim diretamente na vida em fadiga da torre.

### 2.5.1 Comportamento dos Ventos

Os aerogeradores utilizam a energia cinética dos ventos para gerar energia mecânica e posteriormente elétrica, porém estes são variáveis por natureza. A intensidade e direção das rajadas de vento estão em constante mudança, o que acaba influenciando de forma direta no carregamento presente ao longo da torre e, conseqüentemente, nas tensões geradas nesta (RIVERA, 2013).

O escoamento do vento é menor quando próximo a superfícies, devido à ação de forças como pressão e atrito sofridas pelas partículas do fluido. Tais forças ocorrem pela ação de outras partículas e pela ação do espaço sólido em contato. O escoamento do ar é em grande parte influenciado pela tensão de cisalhamento gerada que vai diminuindo conforme se afasta da superfície em contato. Portanto, a velocidade do vento tende a aumentar conforme a altitude, fazendo com que o carregamento presente na torre tenha este mesmo comportamento (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010). A Figura 6 demonstra a distribuição de velocidade característica sem interferência.

**Figura 6 – Distribuição da velocidade do vento sem perturbações**



**Fonte: Adaptado de Polícia (2015)**

## 2.5.2 Normativa

O carregamento variável distribuído ao longo do comprimento da torre, causado pelo vento, que age perpendicularmente ao plano central da mesma e a força resultante, causada também pelo vento no rotor e pás, gera esforços internos, mais precisamente forças de cisalhamento, também conhecidas como forças cortantes, bem como um momento fletor, que variam de acordo com a região. Além dos esforços laterais suportados pela torre, esta também sofre por solicitações axiais causadas, principalmente, pelo peso do rotor, pás e nacelle, assim como da própria torre (PRACIANO; PARENTE, 2013).

### 2.5.2.1 Norma brasileira

No Brasil, a regulamentação de normas adere a ABNT NBR 6123:1988 para a determinação das forças causadas em edificações pela ação do vento. Para o cálculo dos efeitos dinâmicos atuantes em uma estrutura, a ABNT NBR 6123:1988 segue dois modelos distintos dependentes das características estruturais, sendo eles: o modelo contínuo simplificado e o modelo discreto.

O modelo contínuo simplificado trazido na ABNT NBR 6123:1988 aborda como característica inicial mais importante a velocidade do vento natural no local da edificação, chamada de velocidade base ( $V_o$ ) em m/s. A partir de  $V_o$  e de alguns fatores, torna-se possível, a determinação de uma velocidade média mais próxima a que a edificação estará sujeita, conhecida como velocidade de projeto ( $\bar{V}_p$ ) que é calculada através do produto exposto na Equação 1:

$$\bar{V}_p = 0,69 \cdot V_o \cdot S_1 \cdot S_3 \quad (1)$$

onde,  $S_1$  e  $S_3$  são fatores topográficos e estatísticos, respectivamente.

A velocidade de projeto serve como base para o cálculo da pressão dinâmica média ( $\bar{q}_o$ ) exercida na estrutura, dada em Pa pela Equação 2.

$$\bar{q}_o = 0,613 \cdot \bar{V}_p^2 \quad (2)$$

Para a determinação da distribuição de pressão dinâmica ao longo da altura em metros da torre ( $z$ ) são consideradas duas parcelas da resposta, onde a primeira representa a resposta média e a segunda a amplitude máxima da resposta flutuante através dos dois termos multiplicadores trazidos na Equação 3.

$$q(z) = \bar{q}_o \cdot b^2 \cdot \left[ \left( \frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left( \frac{h}{z_r} \right)^p \cdot \left( \frac{z}{h} \right)^\gamma \cdot \left( \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \right) \cdot \xi \right] \quad (3)$$

onde,  $b$  e  $p$  são variáveis dependentes da rugosidade do terreno e  $\gamma$  do tipo de estrutura,  $z_r$  é a altura de referência em metros, onde foram efetuadas as medições da velocidade do vento,  $h$  a altura total a partir do solo da estrutura e  $\xi$  o coeficiente de amplificação mecânica.

Com a ação do vento definida através da pressão dinâmica e com o coeficiente de arrasto ( $C_a$ ) da estrutura e de sua largura ( $I$ ) a distribuição de carga pode ser calculada através da Equação 4:

$$Q = q(z) \cdot I \cdot C_a \quad (4)$$

Vale salientar que todas as unidades utilizadas para as variáveis citadas são dadas pelo Sistema Internacional de Unidades (SI).

#### 2.5.2.2 Norma europeia

O European Committee for Standardization (2006) trás diversas normas relacionadas a projetos de estruturas de aço, uma destas é o Eurocódigo 3 parte 3-1 que aborda tópicos importantes relacionados a segurança em projetos de estruturas de aço que vão desde o material utilizado para projeto até as análises estruturais que devem ser levadas em consideração.

Segundo o European Committee for Standardization (2006), estruturas de aço, como, por exemplo, torres e mastros podem ter uma aproximação do número de ciclos a que estão expostos devido à ação do vento pela Equação 5.

$$N = \frac{10^5 \cdot T}{50} \quad (5)$$



onde,  $T$  é o tempo estimado de vida útil da estrutura em anos.

## 2.6 FADIGA

As falhas que surgem em máquinas são decorrentes das ações de cargas, que podem ser estáticas ou dinâmicas. Quando se fala de carregamentos estáticos, se tem como ponto principal uma carga que possui magnitude, direção e local de aplicação invariável, ou seja, a força é mantida constante ao longo do tempo, esta força também é conhecida como força estacionária (BUDYNAS; NISBETT, 2016). Tal carregamento pode gerar falhas, como, por exemplo, distorções, rompimentos e deformações permanentes na máquina que ocorrem pelo elevado nível de tensões e magnitude destas, que excedem a resistência do material de alguma forma.

Geralmente, as falhas em equipamentos são ocasionadas por carregamentos variáveis, que ao contrário do estático abordam tensões que variam com o tempo (NORTON, 2013). Frequentemente, os lapsos causados por estas cargas são gerados por tensões aplicadas de forma repetitiva, que possuem níveis bem inferiores às máximas admissíveis pelos materiais, tais lapsos recebem o nome de falha por fadiga, que é responsável por grande parte das falhas individuais que ocorrem nos metais (CALLISTER, 2002).

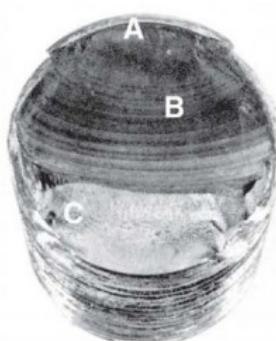
A falha por fadiga geralmente se inicia em regiões que possuem descontinuidades macroscópicas ou, até mesmo, microscópicas, estas descontinuidades são adquiridas, muitas vezes, na própria fabricação e montagem de peças e máquinas ou no tratamento do material utilizado para produzi-las (NORTON, 2013). Segundo Budynas e Nisbett (2016), a falha por fadiga está mais propensa a ocorrer em regiões de descontinuidades, pelo aumento de tensão local que estas regiões apresentam.

As falhas geradas pelas tensões cíclicas acarretam uma ruptura rápida e sem aviso aparente, sendo regida por três estágios principais, que são conhecidos como: início da trinca, propagação da trinca e fratura (NORTON, 2013).

O início da trinca ocorre em regiões de concentração de tensões. Nestes locais ocorrem escoamentos e como consequência deformações plásticas microscópicas, que acabam formando uma região de intensa deformação, tais regiões se acumulam e unem-se gerando trincas microscópicas, que caracterizam o

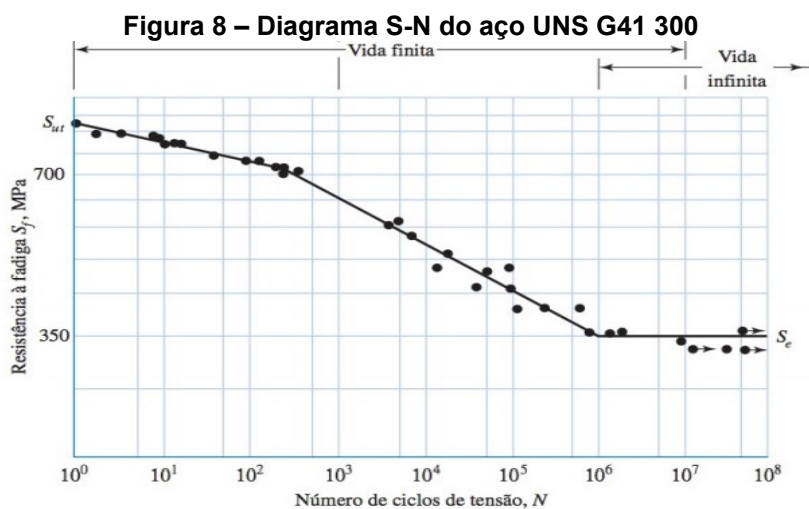
primeiro estágio. Sob tensões cíclicas as trincas microscópicas se fecham e abrem constantemente, fazendo com que a trinca cresça e se propague, formando as marcas conhecidas como marcas de praia. Quando o crescimento da trinca atinge um tamanho máximo, onde a carga solicitada não possa ser mais suportada, a fratura acontece. O resultado final ocasionado pelos três estágios: início da trinca (A), propagação da trinca (B) e fratura (C), pode ser visto na Figura 7 (ROSA, 2002).

**Figura 7 – Aspecto de uma falha por fadiga**



**Fonte: Adaptado de Norton (2013)**

A teoria de fadiga é muito complexa e depende de diversas variáveis para que ocorra ou não em um material, fazendo com que seja frequentemente baseada em resultados estatísticos (BUDYNAS; NISBETT, 2016). Para determinar a resistência do material quando exposto a tensões cíclicas, este passa por inúmeros testes com tensões variáveis, onde o número de ciclos suportados pelo material é catalogado e um diagrama é formado, conhecido como curva de Wöhler ou diagrama S-N. O diagrama S-N é mostrado na Figura 8 e apresenta o desempenho do material em fadiga através de uma resistência à fadiga  $S_f$ , no eixo das ordenadas, para um determinado número de ciclos  $N$ , presente no eixo das abscissas. Através dos diagramas S-N de cada material, o tempo de vida do material quando está sob fadiga pode ser obtido, também conhecido como vida em fadiga (ROSA, 2002).



Para os aços e ferro, o diagrama S-N sofre uma alteração em sua curva que ocorre geralmente entre  $10^6$  e  $10^7$  ciclos. Tal ponto exibe uma resistência à fadiga  $S_e'$  que é conhecida como limite de fadiga. A propriedade  $S_e'$  representa o valor limite de tensão para vida infinita, ou seja, se o valor de tensão a que o material está submetido for inferior a  $S_e'$ , o material poderá ser submetido a infinitos ciclos (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

### 2.6.1 Limite de Fadiga

De acordo com Norton (2013), o limite de fadiga, assim como a resistência à fadiga do material são obtidos através de ensaios de corpos de provas padronizados. Porém, os corpos de prova não se encontram nas mesmas condições a que o material real estará submetido e, portanto, faz-se necessário a utilização de fatores modificadores, que têm como intuito aproximar o valor de ensaio do limite de fadiga  $S_e'$  ao valor real, obtendo-se assim,  $S_e$ , conhecido como limite de fadiga corrigido ou limite de fadiga completamente corrigido através da Equação 6.

$$S_e = C_{sup} \cdot C_{tamanho} \cdot C_{carreg} \cdot C_{temp} \cdot C_{conf} \cdot C_{fatores} \cdot S_e' \quad (6)$$

Onde o limite de fadiga pode ser simplificado e aproximado pela metade da resistência a tração do material para aços com  $S_{ut}$  inferior a 1400 MPa.

Os fatores modificadores levam em consideração características específicas do material, da sua manufatura, de projeto e de seu ambiente de aplicação. Os agentes modificadores apresentados na Equação 6 são respectivamente, o fator de modificação de superfície, tamanho, carga, temperatura, confiabilidade e efeitos variados (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

O fator de modificação de superfície leva em consideração o tipo de tratamento realizado sobre a superfície do material metálico e pode ser obtido através da Equação 7 e dos coeficientes A e B expostos na Tabela do Anexo A (NORTON, 2013).

$$C_{superf} = A \cdot S_{ut}^B \quad (7)$$

Norton (2013) cita que o fator de tamanho pode ser obtido levando em consideração o diâmetro do corpo de estudo, porém as geometrias das estruturas são geralmente adversas. Sendo assim, torna-se necessária a determinação de um diâmetro equivalente conforme a Equação 8, fazendo-se uso de uma área  $A_{95}$ , sendo esta a área transversal sujeita a tensões entre 95% e 100% da máxima tensão atuante.

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{A_{95}}{0,0766}} \quad (8)$$

Onde, para diâmetros entre 8 e 250 mm o fator modificador de tamanho é calculado pela Equação 9 e para diâmetros maiores que os mencionados o fator adotado deve ser de 0,6 (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

$$C_{tamanho} = 1,189 \cdot d^{-0,95} \quad (9)$$

O fator de carregamento ou de carga é totalmente dependente do tipo de carregamento atuante sobre o corpo de estudo, sendo estes: (a) 1 para carregamento de flexão, (b) 0,85 para carregamento axial e (c) 0,59 para carregamento de torção pura (NORTON, 2013). Os demais fatores de temperatura e

confiabilidade são adquiridos com o auxílio das tabelas apresentadas nos Anexos B e C, respectivamente.

Além dos fatores citados, outro fator que deve ser levado em consideração por influenciar de forma significativa o limite de fadiga é o fator de efeitos diversos, onde são levadas em consideração outras variáveis como tensões residuais, corrosão, entalhes locais e outras (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

## 2.6.2 Fadiga em Aerogeradores de Eixos Horizontais

A partir dos anos 80, visando um desenvolvimento seguro da indústria eólica, a *International Energy Agency* (IEA) desenvolveu várias recomendações técnicas que serviram como base para as normas posteriormente estabelecidas. Entre as principais recomendações estavam os carregamentos de fadiga (CTGÁS-ER, 2012).

Para se avaliar os carregamentos de fadiga em aerogeradores, diferentes métodos podem ser utilizados, sendo estes analíticos, empíricos ou, até mesmo, uma mistura dos dois. Filho (2011) fez uso de cálculos e ensaios para posterior experimento com protótipo, a fim de avaliar a fadiga em pás de aerogeradores através da deformação sofrida das pás, quando expostas a diferentes velocidades de ventos.

O fenômeno desenvolvido pelas tensões cíclicas pode vir a ocorrer através de diferentes formas, que dependem de diversas variáveis, como, por exemplo, a natureza das tensões cíclicas presentes na estrutura (POLÍCIA, 2015). Em torres de aerogeradores horizontais a fadiga é influenciada drasticamente pelo ambiente em que se encontram, já que estes são bem rígidos e exigem muito da estrutura (RIVERA, 2013). Devido às vibrações causadas por fenômenos do ambiente, as cargas a que a estrutura está exposta variam de forma significativa. Por tal variação de tensão presente nas torres, percebe-se que a forma de fadiga mais relevante é a fadiga mecânica (POLÍCIA, 2015).

Segundo Polícia (2015), toda avaliação de fadiga deve partir da identificação dos principais pontos que tendem a gerar falhas, conhecidos como pontos críticos. Em seus estudos, Polícia (2015) faz uso do método de dano acumulado para o estudo da fadiga em torres de aerogeradores de pequenos portes, que consiste em determinar os intervalos de tensões presentes em cada ponto

crítico e seus correspondentes números de ciclos, para posterior análise de falha pelo diagrama S-N do aço estrutural.

Como a fadiga desenvolve-se a partir de descontinuidades ou regiões de concentração de tensões, os locais das torres de turbinas eólicas que estão mais dispostas a desenvolverem a falha por fadiga são as áreas de acoplamento e mudanças de geometria, como, por exemplo, regiões parafusadas e soldadas (LAGE, 2008).

De acordo com a *International Electrotechnical Commission* (IEC), em projetos de aerogeradores de eixos horizontais a estrutura deve resistir as solicitações impostas sobre a mesma por um período mínimo de 20 anos, ou seja, para projetos deve-se adotar uma vida útil de no mínimo 20 anos.

### 2.6.3 Método de Análise de Fadiga

A fadiga em estruturas metálicas pode ser analisada através de dois métodos de avaliação, sendo eles: o método de dano tolerante e o método de vida segura. Onde, o método de dano tolerante deve fornecer, além de um desempenho confiável no tempo determinado de vida útil, um regime de inspeções, enquanto o método de vida segura deve fornecer uma vida segura sem que ocorram inspeções, pois é voltado para estruturas onde falhas locais podem levar ao comprometimento total da estrutura de forma rápida, tornando as inspeções irrelevantes (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2009).

Segundo Budynas e Nisbett (2016), uma estimativa da resistência à fadiga em Pa de um elemento metálico para um determinado número de ciclos, pode ser obtida a partir da análise do diagrama S-N e relações entre tensão e deformação do material, que é dada pela Equação 10.

$$S_f = a \cdot N^b \quad (10)$$

sendo,  $a$  e  $b$  constantes obtidas pelos pontos do diagrama S-N equivalentes de  $10^3$  e  $10^6$  ciclos, respectivamente. As constantes  $a$  e  $b$  são definidas através das Equações 11 e 12.

$$a = \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{S_e} \quad (11)$$

e

$$b = -\frac{1}{3} \cdot \log\left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e}\right) \quad (12)$$

As variáveis  $S_{ut}$  e  $f$  são, respectivamente, a resistência à tração e a fração de  $S_{ut}$  a  $10^3$  ciclos.

De acordo com Norton (2013), elementos expostos a tensões variáveis podem ser analisados a partir de suas tensões máximas ( $\sigma_{max}$ ) e mínimas ( $\sigma_{min}$ ) dadas em Pa, sem que a variação da forma de onda em que as tensões são aplicadas interfira, fazendo-se uso das tensões médias ( $\sigma_{méd}$ ) e alternantes ( $\sigma_{alt}$ ) adquiridas pelas Equações 13 e 14.

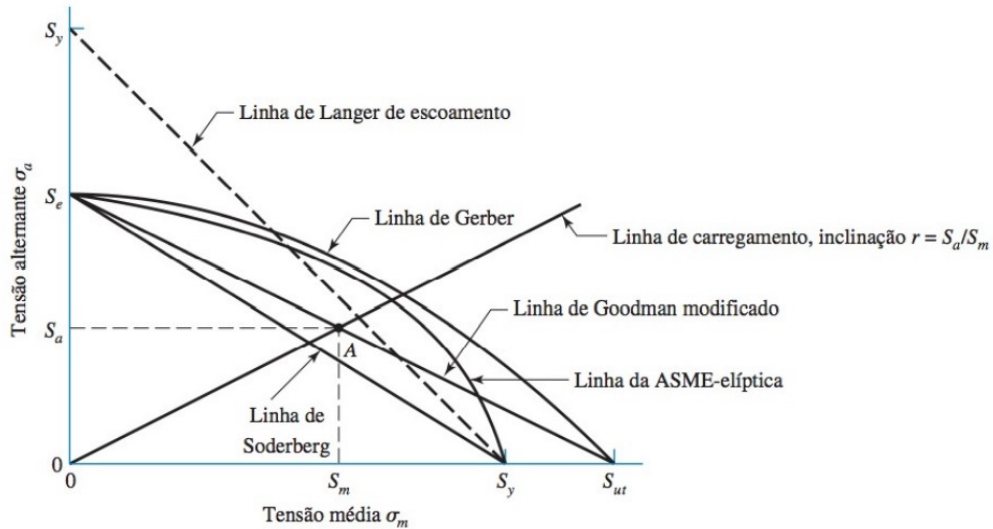
$$\sigma_{méd} = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{min}}{2} \quad (13)$$

$$\sigma_{alt} = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{min}}{2} \quad (14)$$

Para garantir a segurança e o controle das tensões flutuantes, vários critérios de falha baseados na probabilidade de falha podem ser utilizados, sendo eles, o critério de Gerber, ASME-elíptica, escoamento de Langer, Soderberg e Goodman modificado. As curvas desenvolvidas para cada critério são apresentadas na Figura 9, onde sob suas linhas encontram-se os níveis de tensões admissíveis (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

Os critérios de falha de Gerber e a ASME-Elíptica são caracterizados por admitirem níveis de tensões maiores e por curvas em forma de parábola e elipse, respectivamente. O critério do escoamento de Langer leva em consideração apenas a tensão de escoamento como condição para falha, enquanto, o critério de falha de Goodman modificado e de Soderberg são considerados mais conservadores e podem ser caracterizados por retas, onde o critério de Soderberg leva em consideração a tensão de escoamento do material, portanto, resguarda da probabilidade de falha por fadiga e por escoamento (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

**Figura 9 – Critérios de falha por fadiga**



**Fonte: Adaptado de Budynas e Nisbett (2016)**

Para o critério de Goodman modificado, a equação característica e o coeficiente de segurança para uma vida infinita são dados pelas Equações 13 e 14. Enquanto a Equação 15 trás a expressão para determinação do coeficiente de segurança de Langer de escoamento.

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1 \quad (15)$$

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (16)$$

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (17)$$

onde  $S_a$  e  $S_m$  são definidas como a tensão alternante e média em Pa para um ponto limitante do critério.

## 2.7 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Diante de uma infinidade de problemas de diferentes complexidades o engenheiro deve sempre buscar a solução mais satisfatória, seja na área estrutural, térmica, de materiais, fluxo de fluidos ou outros. A solução deve ser gerada a fim de



garantir o melhor desempenho e a segurança do projeto, sem que ocorram falhas e contratempos indesejados. Para resolver tais problemas, um método muito utilizado é o analítico, que faz uso de um grande número de fórmulas e tabelas, exigindo cálculos manuais para chegar aos resultados desejados (FILHO, 2000).

O método analítico traz soluções precisas, por vezes exatas, mas muitas vezes é demasiadamente cansativo e trabalhoso, além de ser aplicado apenas a problemas relativamente simples, fazendo com que se torne necessária outra forma de solução para problemas mais complexos. Uma ferramenta muito utilizada para solucionar esse problema é o Método dos Elementos Finitos (MEF). O desenvolvimento das soluções pelo MEF de forma matemática é de alta complexidade, porém a utilização dos softwares que fazem uso deste conceito é relativamente simples, muitas vezes até possibilitando a modelagem de sólidos em *computer aided design* (CAD) (FILHO, 2000).

O MEF tem como principal objetivo resolver problemas complexos de estruturas contínuas de forma aproximada, através do desenvolvimento de uma malha de elementos finitos que são conectados entre si a partir de nós. A análise por elementos finitos ocorre através da aproximação, onde uma determinada função de aproximação é formada a partir da conexão de diversas funções simples de aproximação que estão presentes em cada elemento finito da malha, tais funções simples são formadas através de interpolações de valores nodais de suas fronteiras. As funções podem representar qualquer quantidade física, sendo deformação, tensão, transferência de calor ou massa, entre outras (COOK; MALKUS; PLESHA, 1989).

### 2.7.1 Malha de Elementos de Malha

Uma malha é formada por uma quantidade finita de elementos, onde quanto maior o número de elementos presentes, maior se torna a precisão dos resultados obtidos, porém, tal precisão se torna inviável a partir de determinado ponto, devido ao tempo de cálculo elevado exigido pelos softwares e a insignificante diferença de resultados gerados, vendo que estes acabam convergindo para determinado valor (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

Conforme Norton (2013), os elementos são divididos em três tipos, sendo eles, elementos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, onde estes

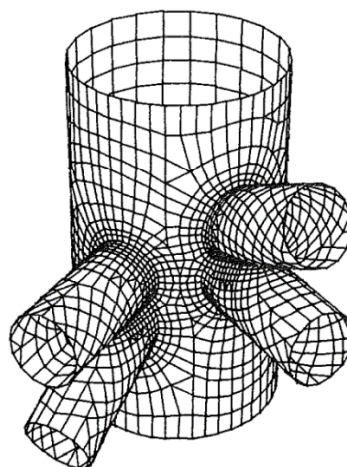
possuem diferentes formas, graus de liberdade e podem ser de ordem linear ou quadrática, dependendo da ordem da função de interpolação do elemento. Entre os elementos presentes hoje em dia em softwares comerciais, estão, os elementos de casca, tetraédricos e hexaédricos.

### 2.7.1.1 Elementos de casca

Dentre diferentes tipos de elementos, os elementos de casca são normalmente utilizados para definir a malha de elementos finitos, em sólidos que possuem espessura muito inferior a seu comprimento, como, por exemplo, chapas e tubos, como pode ser visto na Figura 10. Por consequência, os sólidos com características retratadas acima podem ser descritos através de sua espessura ( $t$ ) e sua superfície média, que se encontra entre a face interna e externa do material (COOK; MALKUS; PLESHA, 1989).

Geralmente, as tensões que estão presentes em elementos de casca são tensões de flexão e axiais que atuam de forma simultânea e independente, quando o deslocamento sofrido pela casca é pequeno, pois tais tensões que agem sobre o plano médio da casca dependem apenas deste deslocamento. As tensões de flexão são responsáveis pelos momentos de flexão e torção, enquanto as forças axiais geram forças por unidade de comprimento, que são tangentes ao plano médio (FILHO, 2000).

**Figura 10 – Exemplo de malha baseada em elementos de casca triangulares e quadrilaterais**

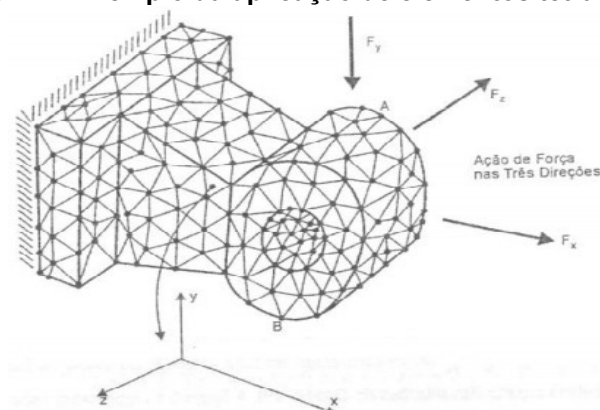


Fonte: Adaptado de Cook et al. (1989)

### 2.7.1.2 Elementos tetraédricos e hexaédricos

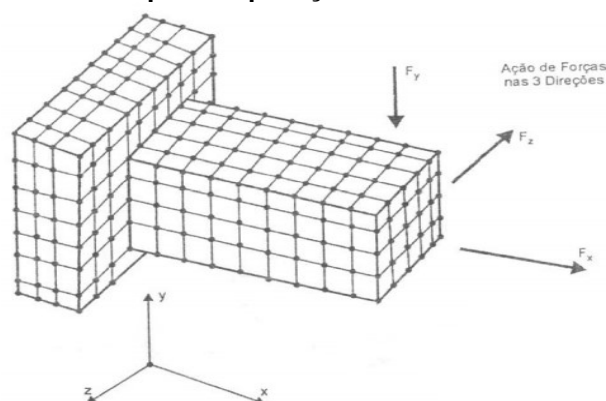
De acordo com Filho (2000), devido à versatilidade geométrica dos tetraedros, qualquer corpo sólido que esteja em um estado triaxial de tensões pode fazer uso destes para discretizar uma malha como mostrada na Figura 11. Os elementos tetraédricos podem ser de ordem linear ou quadrática. Quanto ao linear, cada elemento presente na malha dispõe de 4 nós, onde o deslocamento gerado sobre cada um deles pode ser descrito através de três componentes, sendo elas  $u$ ,  $v$  e  $w$ , indicando assim, três graus de liberdade por nó e, conseqüentemente, 12 graus de liberdade no elemento.

**Figura 11 – Exemplo da aplicação de elementos tetraédricos**



**Fonte: Adaptado de Filho (2000)**

Assim como os elementos tetraédricos, os elementos hexaédricos podem ser utilizados para a subdivisão de um corpo sólido que esteja sujeito a um estado triaxial de tensões em um número finito de elementos. O elemento sólido hexaédrico linear possui a forma de paralelepípedos, possuindo, portanto, 8 nós e um total de 24 graus de liberdade em cada elemento (FILHO, 2000). Um sólido utilizando malha formada por elementos finitos hexaédricos pode ser visualizado na Figura 12.

**Figura 12 – Exemplo de aplicação de elementos hexaédricos**

Fonte: Adaptado de Filho (2000)

### 2.7.2 Aplicação de Cargas e Condições de Contorno

Segundo Budynas e Nisbett (2016), o carregamento em uma estrutura analisada pelo método MEF pode ser caracterizado, como sendo, nodal e de elementos. Onde, os esforços sobre os elementos são transformados em cargas equivalentes aplicadas diretamente aos nós, tornando indispensável a utilização de nós com graus de liberdade condizentes ao esforço submetido. Entre as cargas de elementos, encontram-se, cargas devido à gravidade e cargas superficiais de caráter estático e dinâmico.

Para realizar simulações em softwares comerciais que utilizam o método MEF, é necessário dar elevada atenção às condições de contorno que serão aplicadas sobre a estrutura estudada, pois estas são uma das principais características responsáveis pela imprecisão deste método. As condições de contorno têm por finalidade representar no software de forma simplificada e objetiva as restrições à que a estrutura em questão está sujeita em uma situação de uso real, como, por exemplo, restrições de movimentos nulos e movimentos específicos. Portanto, devem ser aplicadas restrições que no mínimo garantam um equilíbrio estático do componente (Norton, 2013).

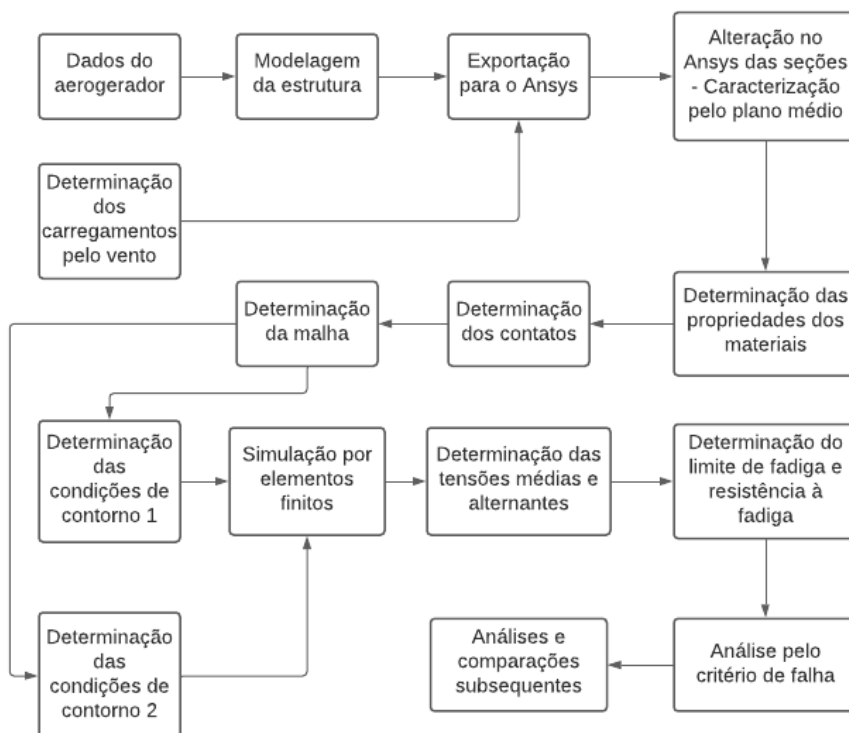
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados as ferramentas e os métodos utilizados para a realização da análise de fadiga da torre metálica de modelo CGS3 de TEEH de pequeno porte, quando esta é exposta ao ambiente sulista brasileiro. Onde, o componente é submetido a condições semelhantes às encontradas quando em campo, para posterior avaliação perante um critério de falha de fadiga.

Para a execução do trabalho proposto dois *softwares* foram utilizados, sendo estes: (a) o *software* SolidWorks, responsável pela modelagem do sólido de estudo e (b) o *software* comercial Ansys para a análise do sólido utilizando Método dos Elementos Finitos.

Além dos *softwares* citados, duas normas serão utilizadas, sendo estas, a ABNT NBR 6123:1988 e o Eurocode 3, parte 3-1, que se fazem necessárias para a obtenção de dados cruciais para a realização da avaliação comportamental da torre quanto à fadiga. O fluxograma da Figura 13 mostra de forma mais clara as etapas para a análise do trabalho em questão.

**Figura 13 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho**



Fonte: Autoria própria (2021)

### 3.1 MODELAGEM DO SÓLIDO

No presente trabalho a modelagem da torre, principal foco de estudo, bem como do nacelle, cauda, rotor e pás foi feita através do *software* CAD Solidworks 2015. A modelagem de tais componentes teve como base o espécime de TEEH, abordado por Polícia (2015) em sua tese, por tal trabalho dispor de maiores detalhes relacionados à construção, instalação e dimensionamento da estrutura em si, sendo tal detalhamento de suma importância para garantir uma maior precisão nos dados analisados. As dimensões utilizadas pelo autor foram baseadas em medições realizadas diretamente nos componentes, sendo a torre de estudo um modelo da classe CGS3 de vinte metros de altura e um aerogerador do tipo Einar 70, com capacidade de aproximadamente 70 KW/h.

#### 3.1.1 Dados Estruturais do Aerogerador

O modelo de torre para suporte utilizado no trabalho em questão possui uma altura de 20 m, da classe CGS3, fabricada pela empresa Metalgalva. A torre citada é feita a partir de chapa de aço com qualidade S275JR, EN 10025-2, possui configuração tubular e é formada por quatro partes menores que são acopladas umas as outras pelo método de encaixe (*slip joints*), que usa o próprio peso das partes da torre e o atrito entre estas para garantir um bom acoplamento. Este modelo de torre também faz uso de oito cutelos posicionados na base de fixação entre o solo e a torre para garantir maior resistência a esta (POLÍCIA, 2015).

A configuração dimensional presente em cada uma das quatro partes da torre de suporte da classe CGS3 é mostrada na Tabela 1, tendo como a primeira parte a base fixa ao solo e a quarta parte a divisão da torre a qual o Nacelle é acoplado.

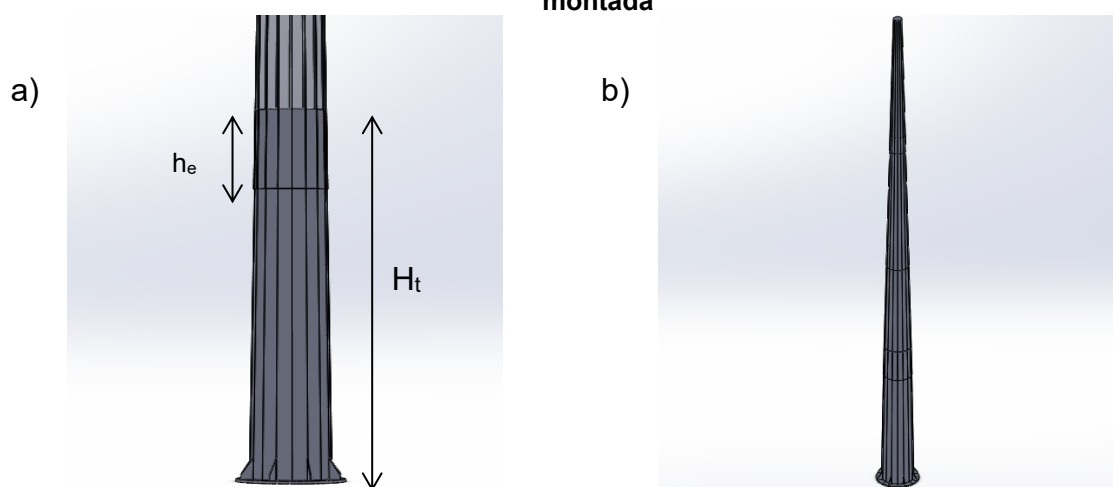
**Tabela 1 - Dimensões de cada segmento da torre de classe CGS3**

Partes/Medidas	H <sub>t</sub> [mm]	h <sub>e</sub> [mm]	Ø <sub>e.s</sub> [mm]	Ø <sub>e.i</sub> [mm]	t [mm]
1 <sup>a</sup>	4050	870	548	650	4
2 <sup>a</sup>	6000	690	428	580	4
3 <sup>a</sup>	6000	490	304	456	4
4 <sup>a</sup>	6000	-	175	327	4

Fonte: Adaptado de Polícia (2015)

Visto as dimensões atribuídas na Tabela 1, percebe-se que todas as partes da torre possuem quatro milímetros de espessura ( $t$ ) e têm um tamanho decrescente de sua base até o fim de seu comprimento ( $H_i$ ). Também é possível notar que parte da altura de cada seção é “perdida” na altura total da torre ( $h_e$ ), pois serve como acoplamento para a próxima seção. Na Figura 14 é possível observar o acoplamento entre a primeira e segunda seção da torre, juntamente a torre montada.

**Figura 14 - Torre CGS3 modelada através do software Solidworks. a) Primeira seção e b) Torre montada**



Fonte: Autoria própria (2020)

Tendo como principal foco de estudo a torre do aerogerador, os demais componentes são modelados de forma mais simplificada, porém tendo suas ações sobre a estrutura principal de estudo consideradas, como, por exemplo, o próprio peso, a fim de simular através do método de elementos finitos o comportamento mais próximo ao real possível.

Segundo Polícia (2015), é possível realizar uma simplificação quanto à modelagem do nacele e da cauda presente no aerogerador através de cilindros, como pode ser visto na montagem dos componentes superiores na Figura 16. Para tal simplificação, o autor fez uso das massas específicas reais de tais componentes, determinando através destas os diâmetros equivalentes para cada cilindro, que são apresentados na Tabela 2.

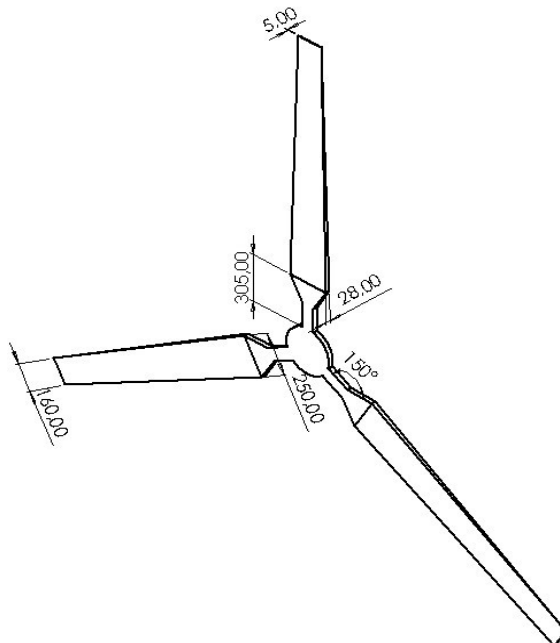
**Tabela 2 - Diâmetros equivalente para simplificação de nacele e cauda**

Componente	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]	Diâmetro equivalente [mm]
Nacele	3074,14	300
Cauda	1767,96	100

Fonte: Adaptado de Polícia (2015)

A partir dos diâmetros equivalentes, expostos anteriormente, e das medições realizadas por Polícia (2015) frente ao modelo de aerogerador Einar 70, as dimensões para as pás e rotor são as mostradas na Figura 15.

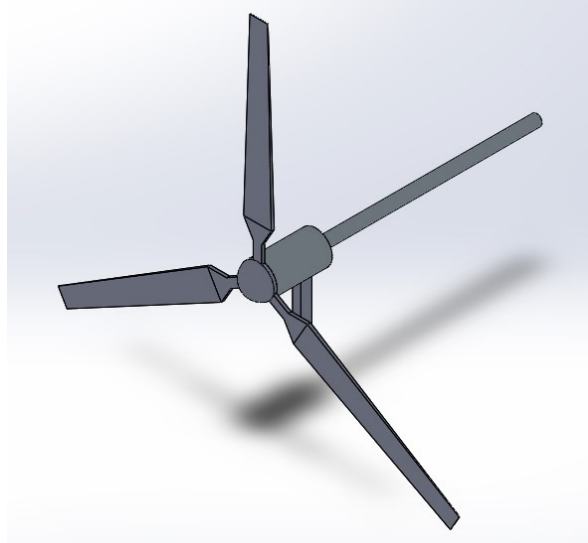
**Figura 15 - Dimensões das pás e rotor do aerogerador Einar 70**



**Fonte: Adaptado de Polícia (2015)**

A partir dos diâmetros equivalentes e das dimensões de pás e rotor, já expostos, é possível se obter a modelagem do aerogerador Einar 70, como mostrado abaixo na Figura 16.

**Figura 16 - Componentes superiores da TEEH**



**Fonte: A autoria própria (2020)**



Por fim, com base nos componentes modelados e mostrados anteriormente, a montagem do aerogerador pode ser executada, onde o resultado desta é exposto na Figura 17.

**Figura 17 - Montagem da TEEH**



**Fonte: Aatoria própria (2020)**

## 3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

No presente trabalho, para se obter os pontos de concentração de tensões presentes na torre, utilizou-se o *software* Ansys Workbench 18.2, que realiza a simulação do aerogerador apresentado na seção anterior, através do Método dos Elementos Finitos. Portanto, nesta seção são apresentadas as fases fundamentais da etapa de pré-processamento que são necessárias para a execução da simulação pelo método MEF, sendo estas fases, a determinação dos contatos, a designação da malha, as condições de contorno aplicadas e as propriedades do material de cada região da estrutura.

### 3.2.1 Contatos

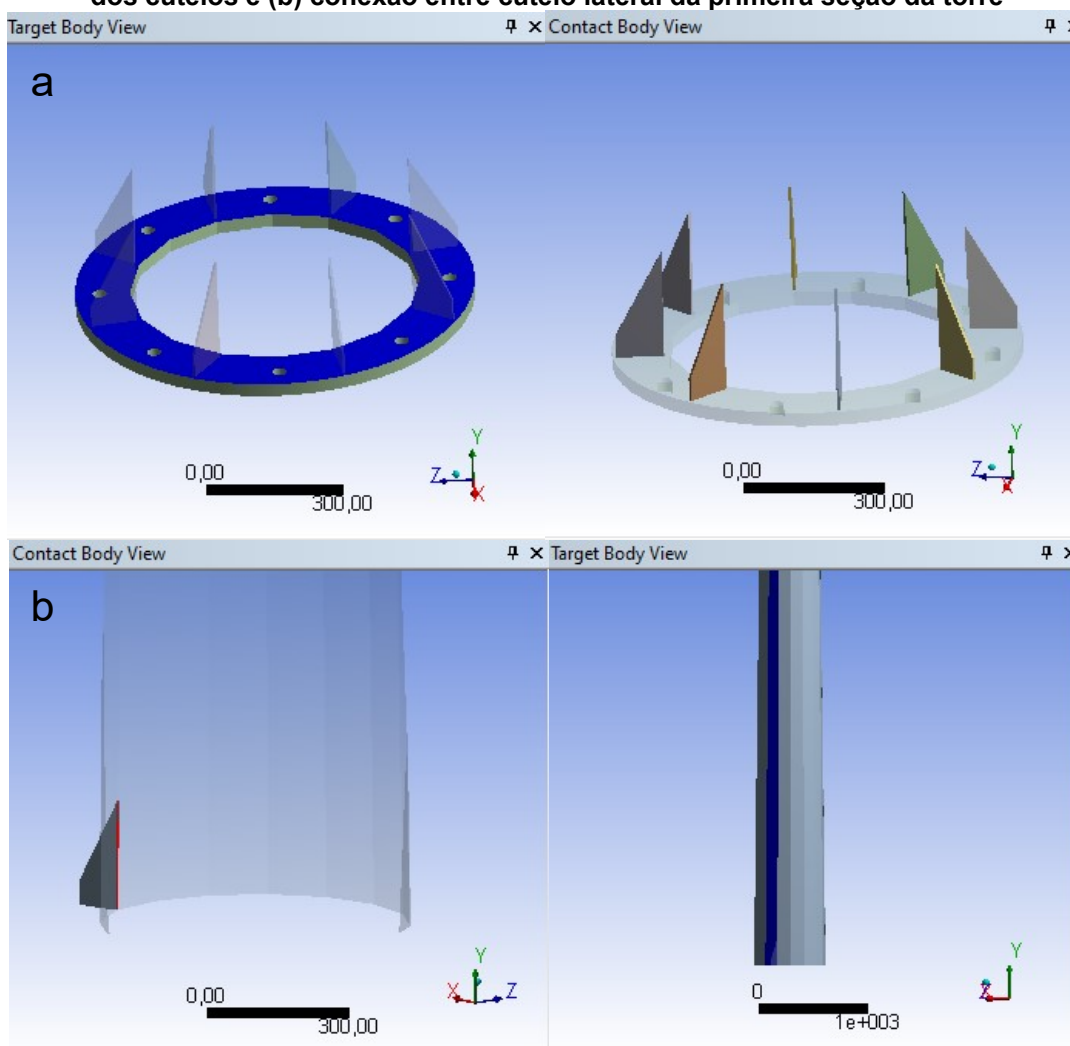
A definição dos contatos em uma simulação pelo método MEF é de grande importância, visto que estes são responsáveis por ater os deslocamentos

dos componentes da estrutura. A partir da montagem realizada no *software* CAD Solidworks, os elementos são submetidos a contatos do tipo *bonded*, ou seja, os corpos em contato estarão ligados sem que haja separação e deslizamento tangencial entre eles em nenhuma das direções.

É importante salientar que as vibrações causadas pelo gerador, pás e o próprio solo não estão sendo consideradas no presente trabalho, devido ao foco no carregamento envolvendo tais componentes. Portanto, os contatos existentes entre as partes superiores serão também do tipo *bonded*.

Os contatos admitidos serão divididos em três partes, sendo estes, os contatos de fixação, contatos entre seções da torre e contatos entre componentes superiores. Onde, os contatos de fixação são mostrados na Figura 18.

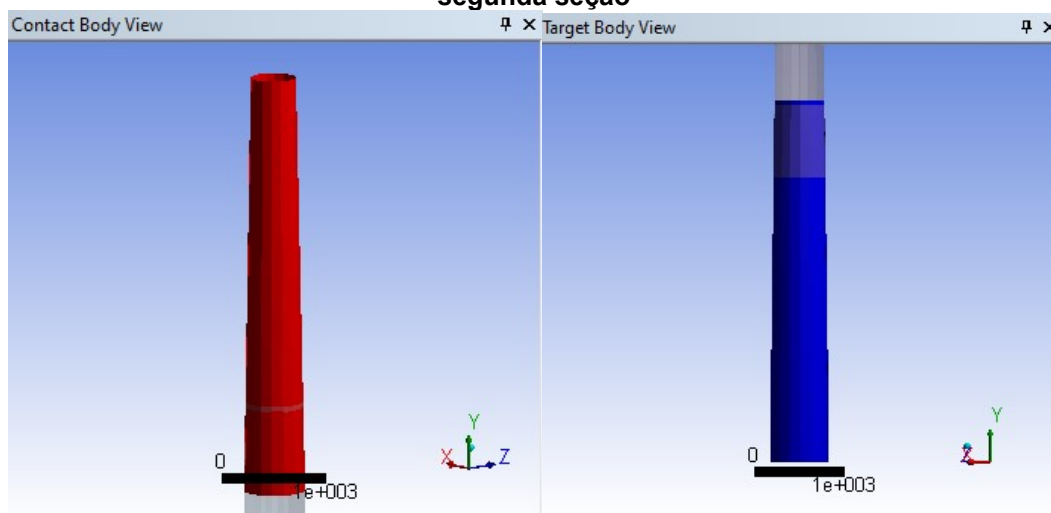
**Figura 18 - Contatos de fixação (a) entre a parte superior do flange da base e a parte inferior dos cutelos e (b) conexão entre cutelo lateral da primeira seção da torre**



Fonte: Autoria própria (2020)

Para a fixação por *slip joint* entre as quatro seções da torre, são realizadas conexões entre as regiões internas e externas destas, exceto na região superior da última seção, pois esta é ligada ao aerogerador. O primeiro contato entre a primeira e a segunda parte da torre pode ser visualizado abaixo, na Figura 19.

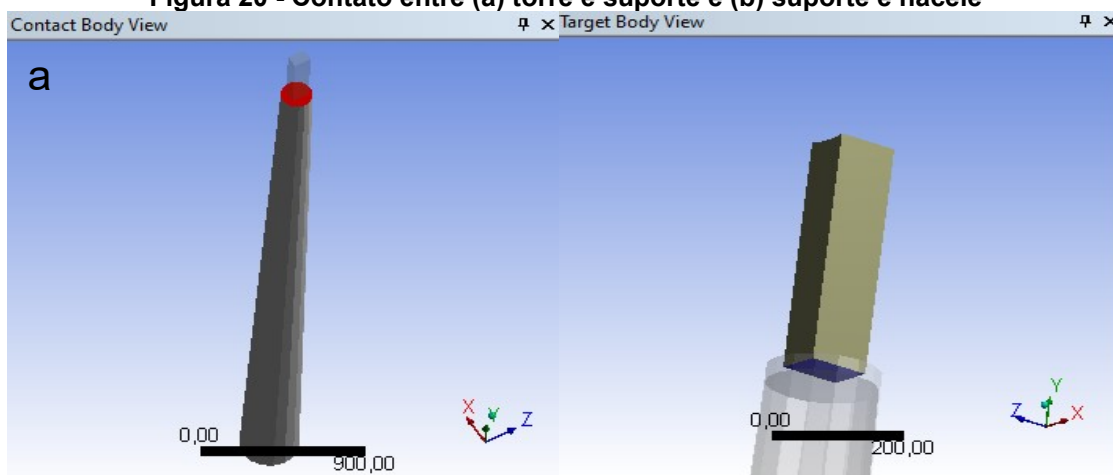
**Figura 19 – Contato entre a região interna da primeira seção da torre e a região externa da segunda seção**

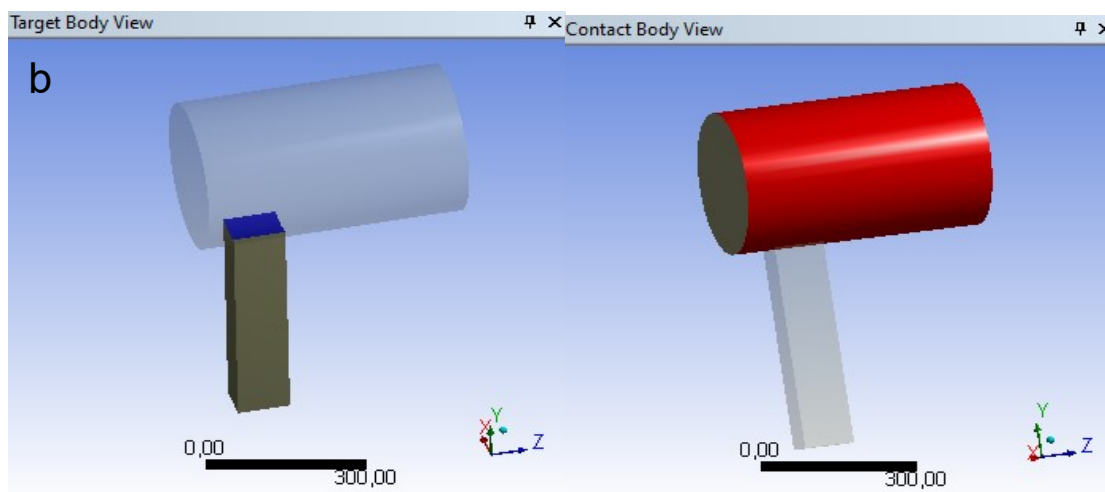


Fonte: Autoria própria (2020)

Os contatos apresentados na Figura 20 expõem as conexões do suporte, que conecta a torre ao nacelle.

**Figura 20 - Contato entre (a) torre e suporte e (b) suporte e nacelle**

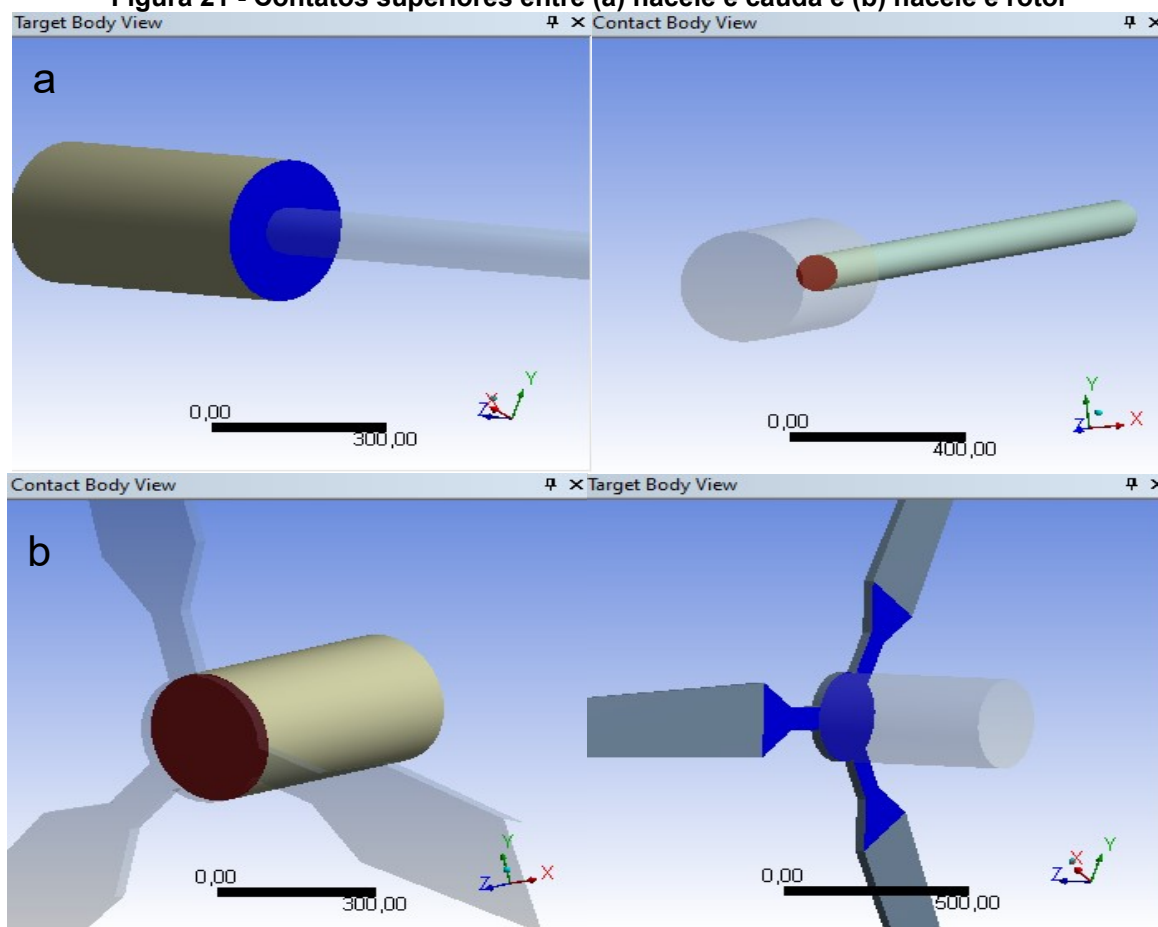




Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 21 ilustra os contatos dos componentes superiores constituintes do aerogerador.

Figura 21 - Contatos superiores entre (a) nacele e cauda e (b) nacele e rotor



Fonte: Autoria própria (2020)

### 3.2.2 Malha

A malha gerada para simulação através do método MEF é constituída por elementos de casca, hexaédricos e tetraédricos lineares, devido a maior facilidade de tais elementos modelarem a estrutura de estudo e a simplificação da simulação com a utilização do plano médio presente nas seções da torre. Vale salientar que foi utilizado o método de convergência para determinar a melhor malha para as seções da torre CGS3, onde tal análise pode ser vista no Apêndice A.

Após modeladas as seções da torre no *software* SolidWorks, estas foram exportadas ao Ansys, onde um plano médio entre a região externa e interna das seções foi criado afim de simplificar o modelo, visto que a estrutura apresenta uma espessura de apenas 4 mm. Para realizar tal simplificação dentro do *software* de design do Ansys a ferramenta *Mid-Surface* foi utilizada, onde nesta foram delimitados o máximo e mínimo de espessura dos elementos que seriam englobados na simplificação. Portanto, para a elaboração do plano médio nas seções da torre a delimitação estipulada foi entre 0,002 e 0,005 m. Sendo assim, foram desenvolvidos planos médios para 64 superfícies, ou seja, 16 faces de cada uma das quatro seções da torre.

As seções da torre foram modeladas através de elementos de casca já que esta apresenta uma espessura de apenas quatro milímetros, sendo assim, constituída por elementos em maior parte quadrilaterais e em algumas regiões triangulares, sendo estes de no máximo 12 mm.

O flange da base, bem como os cutelos são constituídos de elementos hexaédricos, sendo estes, de 10 e 5 mm, respectivamente, enquanto, os componentes superiores como o suporte, nacele e a cauda são modelados em hexaédricos e o rotor e pás em tetraédricos. Na Tabela 3 é possível visualizar as estatísticas relacionadas à malha gerada.

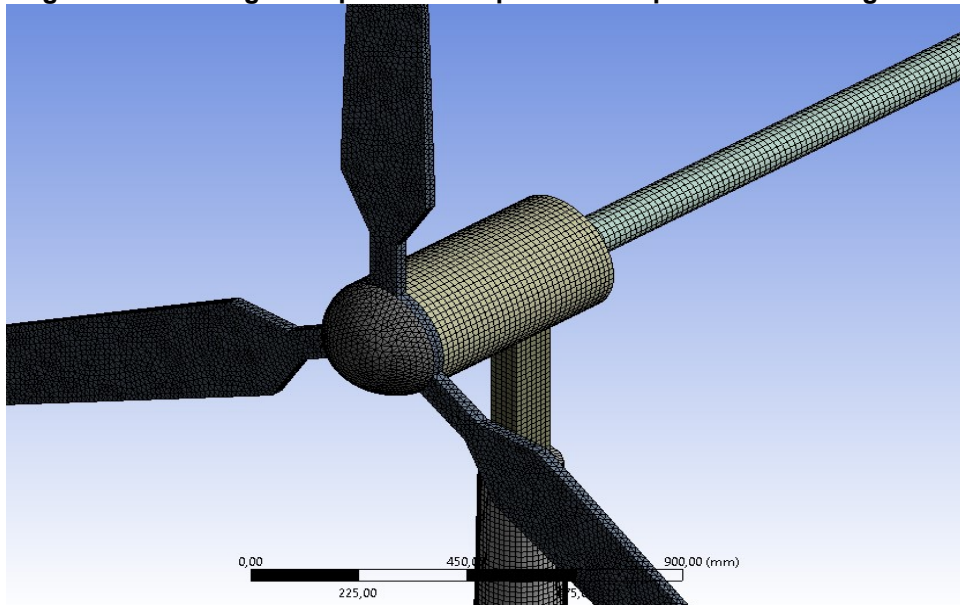
**Tabela 3 - Estatísticas relacionadas à malha**

Componentes	Tamanho máximo dos elementos [mm]	Número total de elementos	Número total de nós
Cutelos	5	320.649	552.958
Flange da base	10		
Seções da torre	12		
Suporte, nacele, cauda, pás e rotor	15		

**Fonte: Autoria própria (2020)**

As malhas geradas para os componentes superiores da estrutura da TEEH podem ser observados na Figura 22.

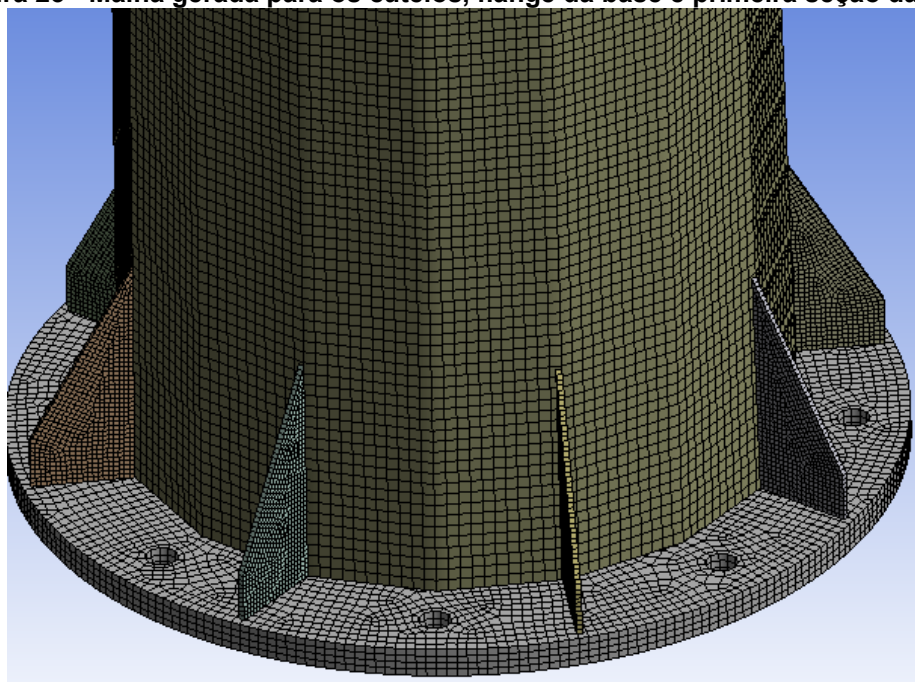
**Figura 22 - Malha gerada para os componentes superiores do aerogerador**



**Fonte: Autoria própria (2020)**

A malha desenvolvida para os cutelos, flange da base e para a primeira seção da torre através do *software* ANSYS Workbench 18.2 pode ser visualizado na Figura 23.

**Figura 23 - Malha gerada para os cutelos, flange da base e primeira seção da torre**

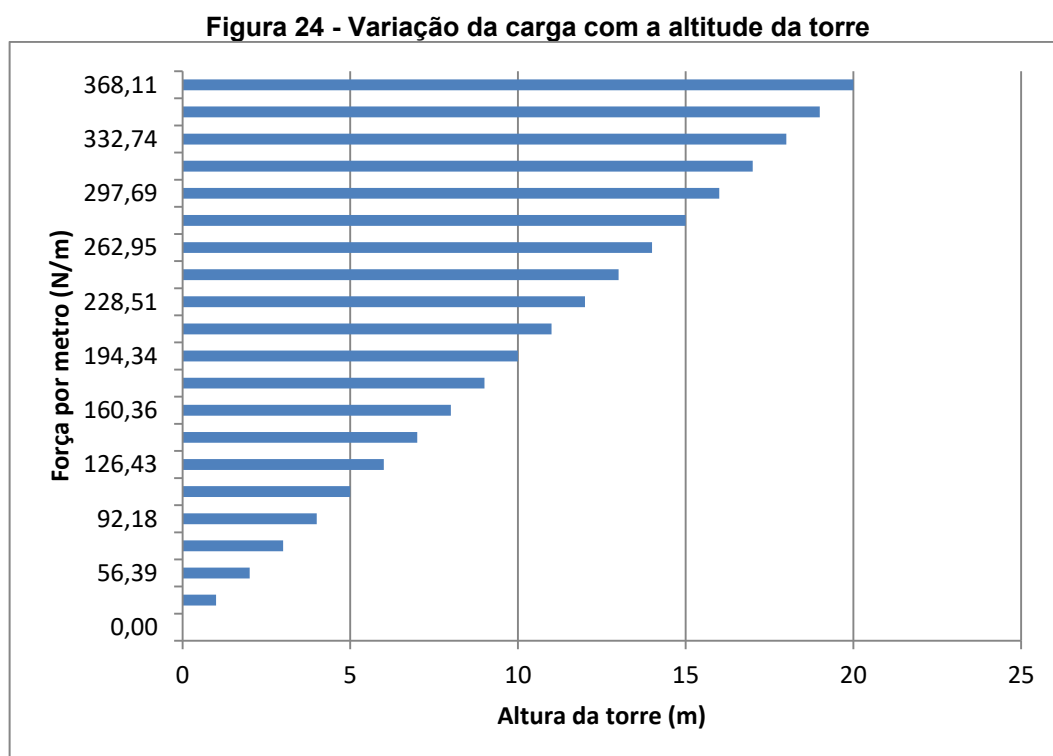


**Fonte: Autoria própria (2020)**

### 3.2.3 Condições de Contorno

Visto que a torre está diretamente exposta à ação do vento e, conseqüentemente, sujeita ao carregamento gerado por este, a simulação será realizada baseando-se nos esforços causados por este fenômeno sobre a estrutura. No Brasil, a norma que rege a análise de tal fenômeno é a ABNT NBR 6123:1988, que possibilita a determinação da pressão dinâmica envolvendo a torre.

No presente estudo, o modelo utilizado abordado pela norma ABNT NBR 6123:1988, será o modelo contínuo simplificado. Através das Equações 1 a 4 citadas na revisão bibliográfica e levando em consideração a instalação do aerogerador de eixo horizontal em um típico ambiente urbano encontrado nas cidades do sul do Brasil, onde se têm características de um terreno plano ou pouco acidentado e com uma rugosidade de terreno equivalente a uma região industrial ou urbana. A distribuição de carga resultante pode ser visualizada na Figura 24, nesta percebe-se uma linearidade que ocorre pela velocidade de projeto média estabelecida pela norma em questão.



Fonte: Autoria própria (2020)

Para fins de cálculos, a carga gerada pelo vento sobre as pás será considerada constante e calculada para a mesma velocidade média de projeto encontrada para a torre. Os pesos relacionados ao nacele, cauda, pás e rotor são estabelecidos a partir das densidades anteriormente mencionadas para o modelo Einar 70. Enquanto a força de arraste é obtida através da área total das pás, de um coeficiente de arrasto de dois, conforme a EN 61400-2 recomenda para ângulos de ataque diferentes de zero e da mesma velocidade média utilizada para a determinação do carregamento.

Os valores de forças encontradas agindo sobre a torre devido à presença dos componentes superiores do aerogerador podem ser visualizados na Tabela 4. Vale destacar que o peso da torre em si também deve ser levado em consideração, onde o peso total desta é de aproximadamente 5192 N.

**Tabela 4 - Carregamentos dos componentes do aerogerador**

Tipo de carregamento	Valor [N]
Força de arraste nas pás	295,81
Força peso das pás e rotor	272,43
Força peso do nacele	1065,85
Força peso da cauda	488,15

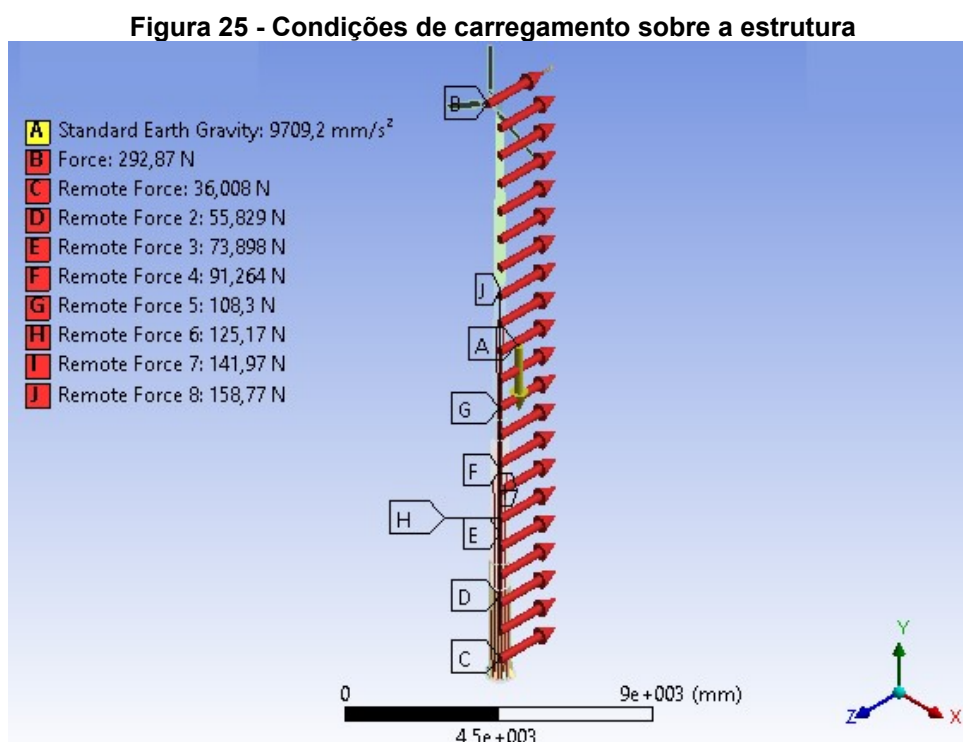
**Fonte: Autoria própria (2020)**

Com os carregamentos expostos na Tabela 4, na Figura 24 e o peso da torre, temos caracterizadas as forças mínimas e máximas agindo sobre a estrutura, onde o conjunto de forças peso é constante com o tempo, enquanto a pressão dinâmica desenvolvida ao longo da torre varia de 0 até as forças expostas na Tabela 23. Portanto, o conjunto das forças peso e a ausência de pressão dinâmica gerada pelo vento sobre a estrutura caracterizam as tensões mínimas na torre, enquanto as forças expostas na Tabela 23, juntamente ao carregamento constante exercido pelas forças peso geram a condição de tensão máxima que age sobre a estrutura. Percebe-se então, que a força mínima é igual à força peso atuante sobre determinado elemento e a força máxima de cada elemento é constituída pelas forças pesos atuantes sobre ele e da força desenvolvida pelo vento.

Levando em consideração as forças mínimas agindo sobre a estrutura e as forças máximas, nota-se que duas simulações numéricas pelo método de elementos finitos deverão ser feitas, onde cada uma englobará uma das condições citadas.



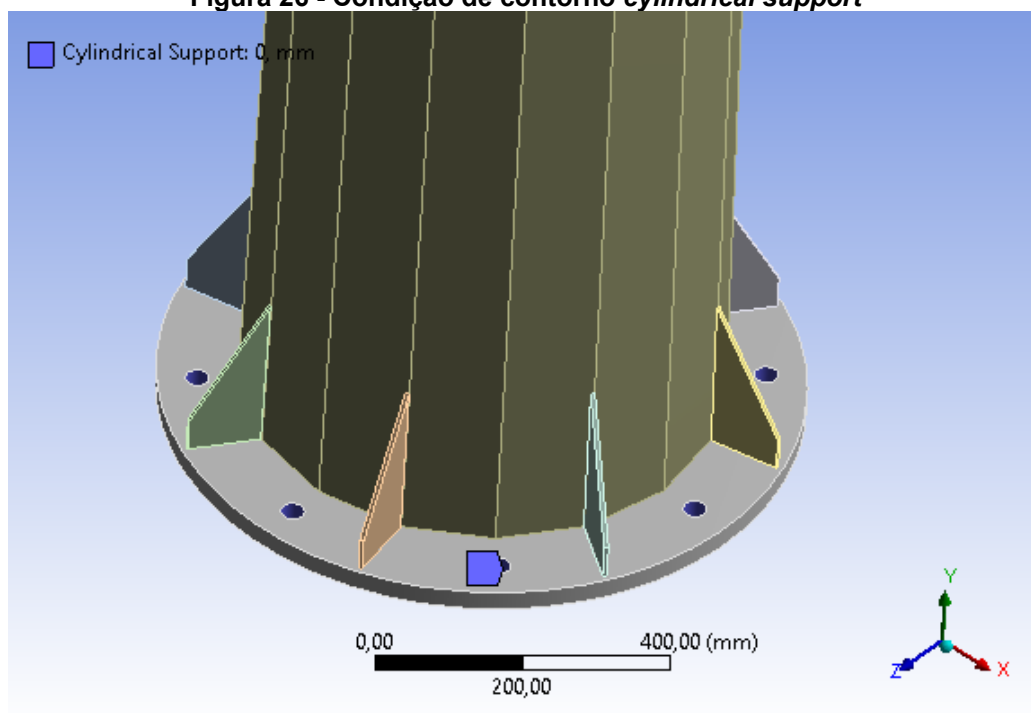
As forças aplicadas sobre a torre são apresentadas na Figura 25, onde os pesos encontram-se na direção - y, mesma direção da força gravitacional, enquanto a força de arraste nas pás e o carregamento ao longo da torre devido ao vento ocorrem na direção - z, sendo o rotor posicionado de forma frontal ao vento (*upwind*), conforme indicado na Figura 3.



Fonte: Autoria própria (2021)

Além das condições de carregamentos citadas acima, vale salientar a importância das restrições de movimentos e outras condições impostas à geometria, para que o comportamento da estrutura seja o mais próximo ao real possível.

O flange da base é fixo através de chumbadores presentes na fundação, portanto, para simular tal fixação será utilizada a ferramenta *cylindrical support* sobre a região cilíndrica do flange onde os chumbadores seriam acoplados, onde a movimentação nos três eixos principais x, y e z não serão permitidas como mostrado na Figura 26.

**Figura 26 - Condição de contorno *cylindrical support***

Fonte: Autoria própria (2021)

### 3.2.4 Propriedades dos Materiais

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados nos componentes da TEEH, bem como suas propriedades utilizadas na simulação.

A torre é feita em aço S275JR e as pás de fibra de vidro com resina epóxi. No entanto, a cauda e o nacele devem levar em consideração o peso de outros elementos presentes internamente. Assim, mesmo que tais componentes sejam do mesmo material que as pás, as massas específicas adotadas para a simplificação geométrica devem ser levadas em consideração.

Tendo em vista os pontos citados acima, as propriedades dos materiais a serem utilizados são expostas na Tabela 5. Vale salientar que o objetivo é analisar a torre metálica e não os componentes superiores, portanto, o que torna-se importante nos componentes superiores é apenas a ação que estes têm sobre a torre.

**Tabela 5 - Propriedades dos materiais**

Propriedades	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Tensão de escoamento [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Módulo de Young [MPa]
Aço S275JR	7850	275	485	210000
Fibra de vidro com resina epóxi	1850	-	284,79	X-35000 Y-9000 Z-9000
Fibra de vidro com resina epóxi - nacele	3074,14	-	284,79	X-35000 Y-9000 Z-9000
Fibra de vidro com resina epóxi - cauda	1767,96	-	284,79	X-35000 Y-9000 Z-9000

Fonte: Adaptado de European Committee for Standardization (2004) e Kennedy. et. al. (2016)

### 3.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE FADIGA

No capítulo dois do presente trabalho, foram abordados alguns critérios de falha por fadiga, dando um maior foco ao critério de falha de Goodman modificado e Langer. Tais métodos serão utilizados para a análise da torre metálica da classe CGS3 por garantirem maior segurança, visto que o critério de Goodman Modificado é um dos critérios mais conservadores de avaliação quanto a fadiga por não admitir valores de tensão média e alternante tão elevados e que o critério de Langer se resguarda da falha por escoamento (NORTON, 2016). Novamente, torna-se viável citar que a análise será feita sobre a torre metálica e não sobre os componentes superiores do aerogerador, visto que para uma análise de fadiga de componentes de fibra de vidro a teoria utilizada no presente trabalho não se aplica.

Para verificar a falha por fadiga nas regiões que possuam concentração de tensões encontradas através da simulação por elementos finitos, a resistência à fadiga será determinada através da Equação 10 para um número de ciclos mínimo a ser suportado pela estrutura, obtido pela Equação 5, levando em consideração uma vida útil mínima de 20 anos, como recomendado pela IEC, através da norma IEC 61400, parte 1.

Após obter a resistência à fadiga esta pode ser aplicada sobre a Equação 16, obtendo-se assim, o coeficiente de segurança de Goodman Modificado para um período de 20 anos.

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_f} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (18)$$

Portanto, o valor do coeficiente de segurança de Goodman Modificado deve ser superior a uma unidade, como mostrado na relação abaixo, caso contrário, este indicará uma situação de possível falha por fadiga pelo critério adotado. Vale destacar que o coeficiente de segurança de Langer segue a mesma lógica, onde caso o valor obtido pela Equação 15 seja menor que uma unidade o elemento estrutural indicará falha no primeiro ciclo de fadiga por escoamento.

$$n_f > 1$$

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise estrutural do presente trabalho consiste em avaliar a falha por fadiga da torre de um aerogerador de eixo horizontal, para tal, os principais pontos de concentração de tensões presentes na estrutura são avaliados, utilizando-se dos métodos expostos na seção anterior.

As condições de contorno impostas sobre o modelo desenvolvido possuem como base a norma ABNT NBR 6123:1988, assim como as condições presentes no ambiente urbano sulista brasileiro. O objetivo deste tópico é analisar o comportamento estrutural da torre quando esta é exposta as condições citadas e determinar a falha ou não quanto à fadiga perante a uma estimativa de ciclos sofridos pela torre ao longo de um período de tempo pré-determinado.

### 4.1 TENSÕES TOTAIS

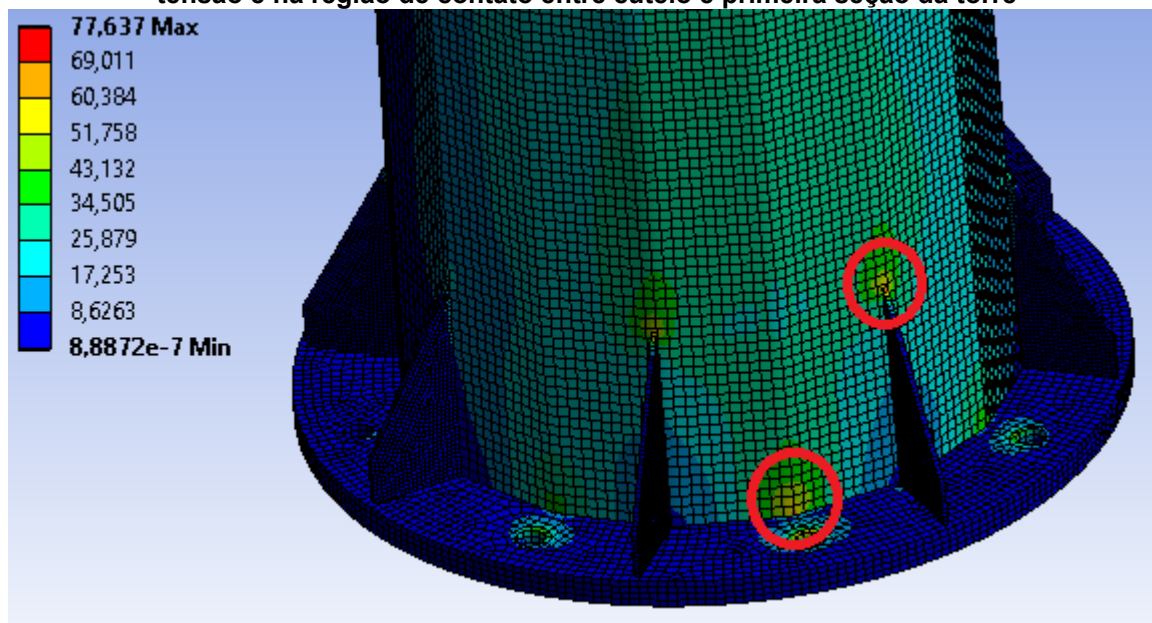
Inicialmente foram analisadas as tensões equivalentes de von Mises ao longo da torre para as condições impostas e então determinados os pontos críticos da estrutura. Na análise em questão, três pontos principais foram encontrados, sendo estes expostos nas Figuras 27 e 28. É importante destacar que através da simulação numérica, ouve a presença de uma região específica de contato entre os chumbadores e o flange da base que apresentou valores um pouco superiores as demais regiões, porém tal região na realidade não indica um ponto real de concentração, visto que as tensões desenvolvidas próximas a região são bem inferiores, ou seja, algo que foge da realidade, portanto, tal ponto foi desconsiderado nas análises subsequentes.

Os maiores gradientes de tensão apresentados na torre encontram-se na área de contato entre a primeira seção da torre e o flange da base a sotavento e a barlavento, onde as regiões a sotavento apresentam valores de tensão um pouco superiores. Sendo assim, o principal ponto crítico encontrado com uma tensão equivalente de von Mises média de 62,05 MPa é circundado em vermelho e apresentado na Figura 27.

Além da principal zona crítica já citada, foram notadas tensões equivalentes de von Mises elevadas na área de contato entre os cutelos e a primeira

seção da torre, sendo estes maiores nos dois cutelos a sotavento e a barlavento quando comparado aos cutelos laterais (Figura 27). Sendo tais valores de 53,12 MPa entre os cutelos e primeira seção.

**Figura 27 - Tensões equivalentes de von Mises (MPa) no principal ponto de concentração de tensão e na região de contato entre cutelo e primeira seção da torre**



Fonte: Autoria própria (2021)

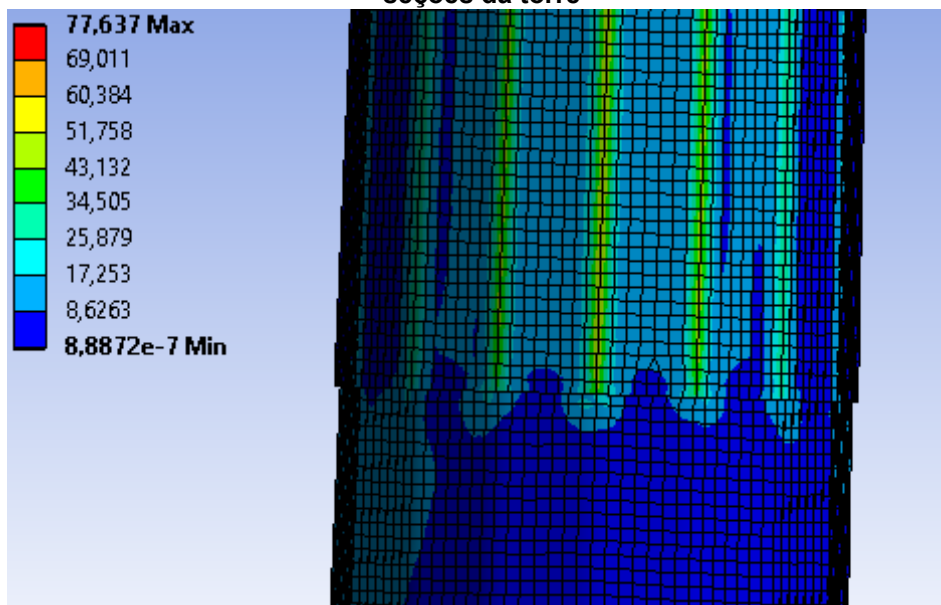
As regiões de contato citadas acima entre a primeira seção da torre o flange e os cutelos adquiriram tais gradientes elevados, provavelmente por apresentarem um local de contato entre duas geometrias distintas, caracterizado por um canto vivo que favorece muito a concentração de tensão local. Além disso, os contatos entre as geometrias mencionados são feitos a partir de solda, onde esta por si só é uma variável muito importante que deve ser levada em consideração para a resistência da estrutura, pois sua qualidade está diretamente relacionada à nucleação e o crescimento de trincas.

Outra zona em potencial de falha identificada, possuindo tensões equivalentes de von Mises de aproximadamente 49 MPa foi nas arestas laterais da torre, onde existe contato entre suas diferentes seções, uma destas regiões é mostrada na Figura 28.

As seções da torre são feitas através da conformação de chapas metálicas de quatro milímetros, tais seções após conformadas apresentam 16 arestas que servem principalmente para se obter uma melhor fixação por *slip joint*. Sendo assim, tais regiões além de apresentarem uma mudança de geometria ao

longo da altura total da torre, estas ainda apresentam arestas constantemente em fricção nas regiões de encaixe entre as seções tendendo assim a desenvolverem maiores tensões.

**Figura 28 - Tensões equivalentes de von Mises (MPa) nas arestas laterais de contato entre seções da torre**



Fonte: A autoria própria (2021)

Ao realizar uma análise acerca da influência dos carregamentos sobre o resultado final das tensões encontradas, percebeu-se que os gradientes de tensão na torre diminuíram cerca de 4% ao desconsiderar a influência do aerogerador sobre a torre, ou seja, o peso dos componentes superiores como o nacele, cauda, gerador, pás, rotor e outros e o momento gerado pelo arraste do vento nas pás e no rotor não demonstram grande influência sobre o resultado final, porém vale salientar que os efeitos da vibração do gerador presente no nacele não foi considerado nos cálculos.

#### 4.1.1 Tensões Máximas e Mínimas

Após determinados os principais pontos críticos da estrutura, torna-se necessário adquirir as tensões máximas e mínimas presentes em tais pontos, para que a partir destas, o cálculo das tensões médias e alternantes possa ser efetuado. Como citado anteriormente, as tensões equivalentes de von Mises encontradas são desenvolvidas em grande parte pelo carregamento de flexão exercido pelo vento, para tal, o carregamento passa a ser considerado simples, porém flutuante, onde

este flutua da tensão equivalente desenvolvida pelas forças peso até a tensão equivalente de von Mises desenvolvida em certo ponto. Portanto, as tensões médias e alternantes tornam-se calculáveis através das Equações 13 e 14 e seus resultados para os pontos críticos encontrados são expostos na Tabela 6 abaixo.

**Tabela 6 - Tensões médias e alternantes nos pontos críticos**

	Tensão máxima [MPa]	Tensão mínima [MPa]	Tensão média [MPa]	Tensão alternante [MPa]
Conexão flange e torre a sotavento	62,05	3,41	32,73	29,32
Cutelos a sotavento	53,12	2,89	28,01	25,12
Arestas laterais entre seções	49	0,73	24,87	24,14

**Fonte: Autoria própria (2021)**

## 4.2 FALHA POR FADIGA

Como mencionado anteriormente, a tensão limite de fadiga corrigida deve ser obtida levando em consideração alguns fatores modificadores para cada região crítica. Portanto, tais fatores foram obtidos através das Equações 7 a 9, bem como dos Anexos A e B, enquanto as respectivas tensões limites de fadiga corrigidas foram adquiridas a partir da Equação 6, como apresentado na Tabela 7. Vale salientar que o tratamento considerado sobre o material para a obtenção de  $C_{superf}$  é a laminação a quente, vendo que a torre é produzida a partir de chapas de aço, para se obter  $C_{carreg}$  nota-se que as tensões desenvolvidas, como já citado são decorrentes principalmente pela ação do carregamento de flexão na torre. Além disso, foi dotada uma condição de temperatura de exposição da torre de 20 °C e uma confiabilidade de 99 % para a determinação de  $C_{conf}$ .



**Tabela 7 - Tensão limite de fadiga corrigida e seus fatores modificadores**

	$C_{superf}$	$C_{tamanho}$	$C_{carreg}$	$C_{temp}$	$C_{conf}$	$C_{fatores}$	$S_e'$ [MPa]	$S_e$ [MPa]
Conexão flange e torre a sotavento	0,68	0,638	1,0	1,0	0,814	1,0	242,5	85,64
Cutelos a sotavento	0,68	0,638	1,0	1,0	0,814	1,0	242,5	85,64
Arestas laterais entre seções	0,68	0,675	1,0	1,0	0,814	1,0	242,5	90,60

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Depois de determinada a tensão limite corrigida para os elementos da torre citados, o Anexo D foi utilizado para se encontrar a fração de  $S_{ut}$  a  $10^3$  ciclos  $f$  e, posteriormente as constantes do material  $a$  e  $b$  para cada elemento através das Equações 11 e 12, tendo assim os resultados apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 - Constantes do material para os pontos críticos da torre**

	Constante do material $a$	Constante do material $b$	Fração de $S_{ut}$ a $10^3$ ciclos $f$
Conexão flange e torre a sotavento	$2,225 \times 10^9$	- 0,236	0,9
Cutelos a sotavento	$2,225 \times 10^9$	- 0,236	0,9
Arestas laterais entre seções	$2,103 \times 10^9$	- 0,228	0,9

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Os resultados para os cálculos relacionados a resistência à fadiga presente em cada elemento crítico da torre CGS3 através da Equação 10, são expostos na Tabela 9. Onde, esta é determinada para um número de ciclos estimado à que a estrutura estará sujeita por um período de vida mínimo de 20 anos trazido pelo Eurocódigo 3 parte 3-1 e expresso pela Equação 5, como apresentado no capítulo dois.

**Tabela 9 - Resistência à fadiga para os elementos críticos**

	Tempo de vida da estrutura T [anos]	Número de ciclos estimados $N$ [ciclos]	Resistência à fadiga $S_f$ [MPa]
Conexão flange e torre a sotavento	20	$4 \times 10^4$	182,92
Cutelos a sotavento	20	$4 \times 10^4$	182,92
Arestas laterais entre seções	20	$4 \times 10^4$	188,51

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Fazendo uso dos dados de tensão média e alternante apresentados na Tabela 6, da resistência à fadiga para uma vida útil de 20 anos exibido acima e das propriedades do material da torre indicados na seção anterior, os coeficientes de segurança para a fadiga e escoamento podem ser expressos.

O coeficiente de segurança de Goodman modificado para a falha por fadiga e o de Langer para a falha por escoamento foram adquiridos pelas Equações 18 e 17, respectivamente e são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Coeficiente de segurança por fadiga e escoamento para vida útil mínima**

	Goodman Modificado $n_f$	Langer escoamento $n_y$
Conexão flange e torre a sotavento	4,39	4,43
Cutelos a sotavento	5,13	5,18
Arestas laterais entre seções	5,58	5,61

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Ao analisar os coeficientes de segurança encontrados e expostos acima, percebe-se que para garantir a segurança da torre, esta deve apresentar um valor de  $n_f$  superior a um, assim como  $n_y$ , como já citado no capítulo anterior. Tal necessidade é satisfeita quando comparados os valores exibidos na Tabela 10, ou seja, a torre estará isenta de falhas geradas por fadiga quando esta é submetida às condições presentes em um típico ambiente sulista brasileiro, pois suas regiões mais

críticas suportam números de ciclos superiores aos solicitados ao longo de 20 anos de trabalho, sendo o flange da base possuente da tensão equivalente de von Mises maior o local onde a resistência à fadiga mais se aproxima da tensão alternante gerada.

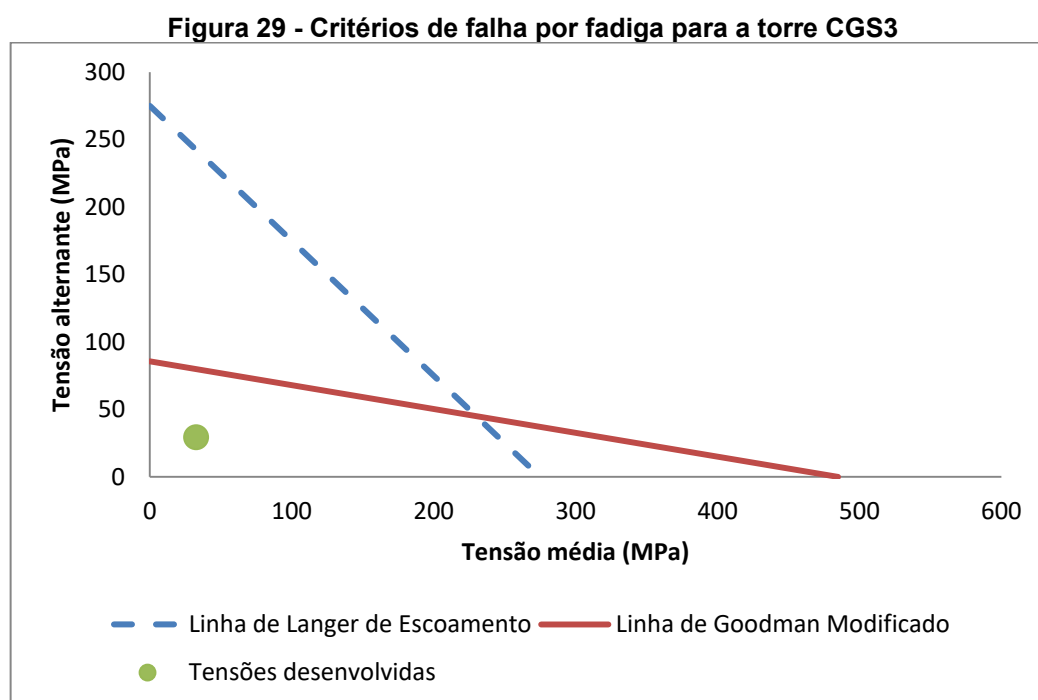
Podemos ainda calcular o coeficiente de segurança de Goodman Modificado para vida infinita com o auxílio da Equação 16, onde se percebe através da Tabela 11 que como o valor é superior a um para todos os elementos, estes apresentam uma vida infinita.

**Tabela 11 - Coeficiente de segurança para vida infinita**

	Conexão flange e torre a sotavento	Cutelos a sotavento	Arestas laterais entre seções
Goodman Modificado $n_f$	2,44	2,85	3,15

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Através da análise dos coeficientes de segurança calculados e expostos acima, nota-se que a tensão alternante e média situa-se abaixo das curvas de Goodman Modificado e Langer para o caso de menor coeficiente de segurança, ou seja, para a região mais crítica de contato entre a primeira seção da torre e o flange da base, como pode ser visto na Figura 29.



**Fonte: Autoria própria (2021)**

Mesmo encontrando valores relativamente baixos para as tensões alternantes e médias nas regiões críticas da torre, estas devem ser levadas em consideração, pois como já citado, são áreas que possuem concentrações locais de tensão pela alteração de geometria, presença de cantos vivos, contato entre um ou mais corpos e outros motivos. Além disso, a torre se apresenta exposta diretamente ao ambiente e, conseqüentemente, às reações como a corrosão que pode vir a ocorrer com mais facilidade em tais regiões, já que algumas destas também apresentam a presença de solda que caso não sejam realizadas com os devidos cuidados pode vir a nuclear trincas e gerar o colapso da estrutura.

O fator de modificação por efeitos variados vem a considerar alguns problemas citados acima que alteram significativamente o limite de fadiga, porém é difícil quantificá-lo sem a realização de ensaios (BUDYNAS; NISBETT, 2016). Com os dados obtidos é possível determinar o limite que tal fator pode atingir para garantir uma vida infinita. Tal valor é apresentado na Tabela 12.

**Tabela 12 - Valores limites de  $C_{fatores}$  para vida infinita nos elementos da torre**

	$S_e$ [MPa]	$n_f$	$C_{fatores}$
Conexão flange e torre a sotavento	31,44	1	0,367
Cutelos a sotavento	26,65	1	0,311
Arestas laterais entre seções	25,44	1	0,281

**Fonte: Aatoria própria (2021)**

Podemos ainda realizar uma análise dos critérios de falha de fadiga e escoamento similar, levando em consideração um carregamento obtido através do modelo discreto, também abordado na norma ABNT NBR 6123:1988. Através de tal modelo serão consideradas as quatro seções da torre separadas ao invés de admitir um diâmetro equivalente ao longo da torre como feito no modelo contínuo simplificado e os carregamentos gerados pelo vento serão médias obtidas ao longo de cada seção. Os dados de entrada, bem como os valores encontrados ao fazer uso do modelo discreto para a obtenção do carregamento são exibidos nos Apêndices B e C, respectivamente.

Ao realizar uma simulação com as mesmas características citadas no capítulo 3, alterando apenas o carregamento externo da torre gerado pelo vento

para o obtido pelo modelo discreto, percebem-se os mesmos pontos críticos já encontrados e citados anteriormente, sendo estes, a conexão entre o flange da base e a primeira seção da torre, a área de contato entre cutelos e a primeira seção da torre e nas arestas laterais das regiões de conexão entre seções.

Constata-se também através da simulação, que a tensão equivalente de von Mises desenvolvida na região mais crítica com o carregamento calculado pelo modelo contínuo simplificado, obteve uma tensão de 62,05 MPa que passou a ser de 42,34 MPa pelo modelo discreto, obtendo-se assim uma redução de aproximadamente 30 %. Como consequência, os valores de tensão média e alternante para o modelo discreto também são menores e a avaliação da falha por fadiga utilizando o mesmo método também resulta em uma estrutura sem falha para os critérios de Goodman Modificado e Langer. Percebe-se ainda, que o modelo adotado para a determinação do carregamento externo gerado pelo vento é mais conservador quando comparado ao modelo discreto.

Ainda tendo em vista o carregamento aplicado sobre a estrutura, é verificado que este encontra-se diretamente relacionado à velocidade do vento e a seu comportamento. Portanto, ao realizarmos alterações sobre o ambiente e nível de segurança que a torre deve atender em relação a sua localização e tempo de vida útil, a velocidade média de projeto do vento é alterada, provocando assim, uma resposta dinâmica maior sobre a estrutura. Consequentemente, as tensões médias e alterantes geradas pelo carregamento alteram-se podendo exceder os valores trazidos pela curva de Goodman Modificado e Langer.

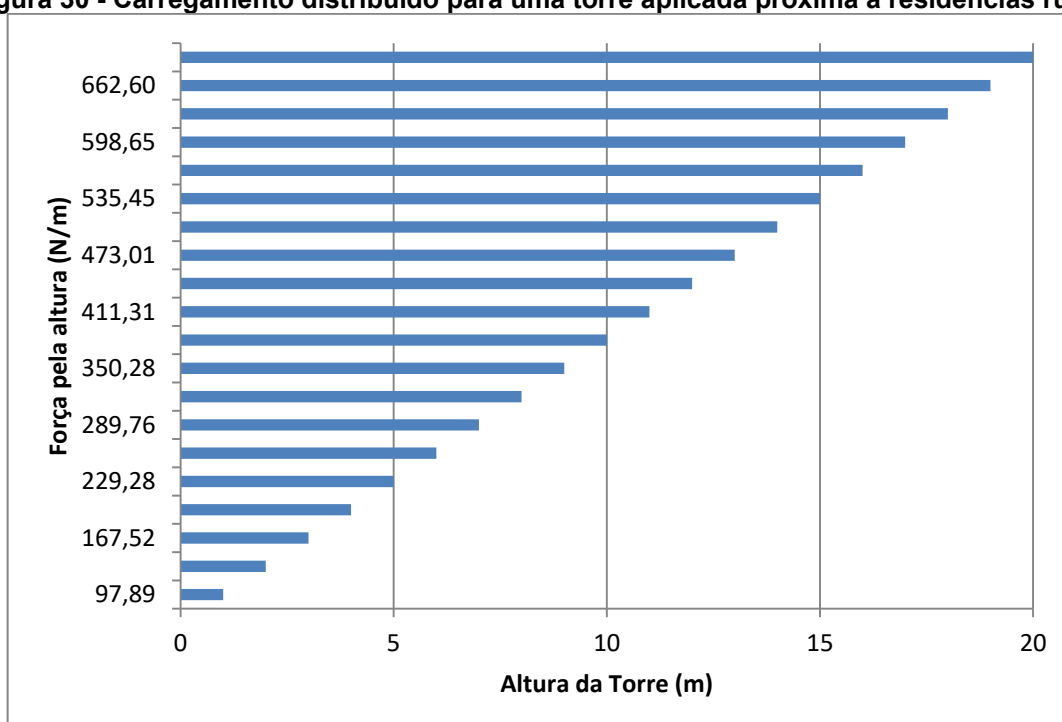
Quando levado em consideração um nível de perda de carga maior no escoamento do ar, ou seja, um aumento no número de obstáculos que o escoamento de ar encontra em seu deslocamento, mais elevado se torna o fator “ $p$ ”. Quando tal fato é observado sobre a Equação 3, percebe-se que a resposta média tende a diminuir, enquanto a máxima amplitude da resposta flutuante tende a aumentar em pequena quantidade. Já o fator “ $b$ ”, tende a ser maior quanto menor for a rugosidade do terreno de implantação da estrutura, gerando uma resposta média e uma amplitude máxima da resposta flutuante maiores.

Como já mencionado, outro fator a ser levado em consideração é o nível de segurança necessário na instalação em relação a sua vida útil ou fator estatístico  $S_3$ , tal fator impacta diretamente na velocidade de projeto a ser adotada, onde quanto maior o risco que esta pode gerar, maior o valor que deve ser assumido. Se

levarmos em consideração uma implantação em local próximo a cabamentos de distribuição de energia elétrica, juntamente a uma área de baixa perda de carga como, por exemplo, regiões rurais, notamos através da Figura 30 a mudança no carregamento ao longo da torre.

Quando comparados os valores de carregamento externo sobre a estrutura em condições adotadas para o estudo de caso e as condições propostas anteriormente, percebe-se através das Figuras 24 e 30 que as forças ao longo da torre desenvolvidas em ambientes com pequena perda de carga e com elevado grau de responsabilidade obtiveram valores de aproximadamente 80% maiores que as forças encontradas para as regiões urbanas e industriais adotadas inicialmente. Tal variação do carregamento faz com que a tensão equivalente de von Mises na região mais crítica seja de 120,04 MPa, desenvolvendo assim, um coeficiente de segurança por Goodman Modificado e Lange de 2,24 e 2,29, respectivamente, para uma vida útil mínima de 20 anos.

**Figura 30 - Carregamento distribuído para uma torre aplicada próxima a residências rurais**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

Sendo assim, nota-se através dos dados obtidos que mesmo sob condições de baixa perda de carga e elevada responsabilidade a torre de modelo

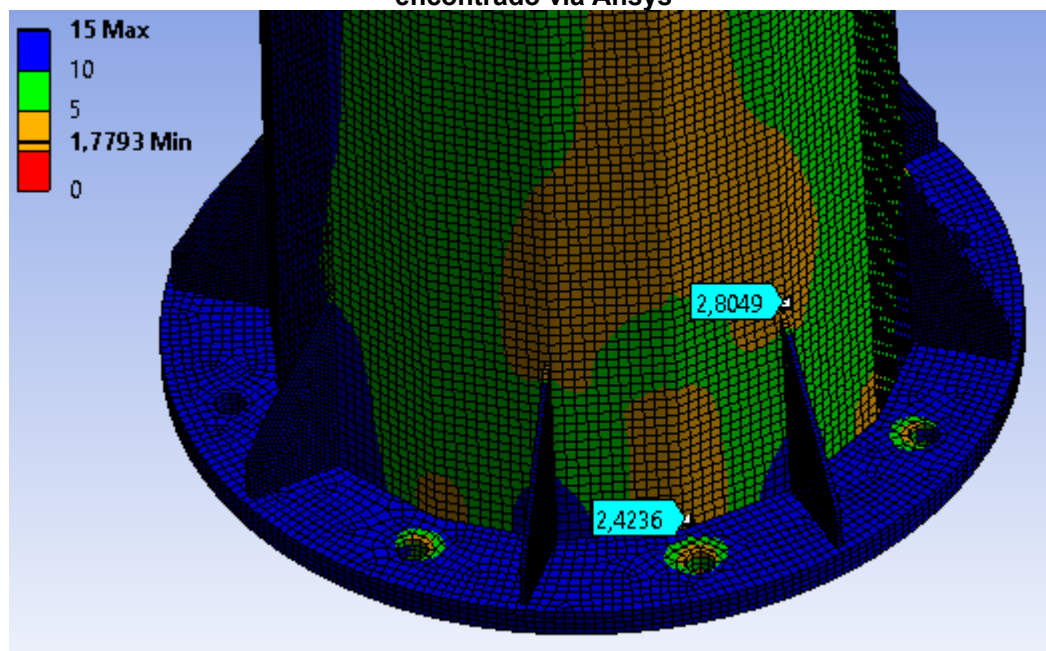
CGS3 utilizada em aerogeradores de eixos horizontais de pequeno porte, mostra-se apta a ser aplicada na região sul do Brasil.

### 4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Como a torre mostrou obter vida infinita por apresentar um coeficiente de segurança de Goodman Modificado superior a uma unidade para a análise de fadiga feita, os coeficientes de segurança encontrados foram reavaliados agora através da simulação numérica de fadiga sobre a torre, com esta contendo as características e condições de contorno citadas no capítulo anterior.

Através da simulação, notou-se que os pontos com menores coeficientes de segurança identificados foram as regiões de concentrações de tensões já expostas, onde a seção mais crítica pode ser vista na Figura 31 circundado em vermelho, apresentando um coeficiente de 2,42 muito próximo ao calculado e exposto na Tabela 11.

**Figura 31 - Coeficiente de segurança de Goodman Modificado para uma vida infinita encontrado via Ansys**



Fonte: Autoria própria (2021)

Portanto, os dados encontrados analiticamente anteriormente mostram-se muito próximos aos encontrados por simulação numérica, onde os dois demonstraram que a estrutura não apresentará falha por fadiga ao ser implantada no sul do Brasil,

além disso, averigua-se também que esta apresenta vida infinita para as condições dadas.



## 5 CONCLUSÃO

Por meio do estudo realizado, conclui-se que a torre CGS3 utilizada para aerogeradores de eixos horizontais de pequeno porte, quando exposta as condições apresentadas em ambiente urbano e industrial na região sul do Brasil, apresenta três pontos críticos ou pontos com maiores gradientes de tensões na estrutura, sendo estes, a conexão entre a primeira seção da torre e o flange da base, a área de contato entre os cutelos e a primeira seção da torre e as arestas laterais das regiões de contato entre as seções da torre.

Os níveis de tensões médias e alternantes encontradas para os pontos críticos não excedem sua resistência ao escoamento de acordo com o critério de Langer e sua resistência à fadiga para uma vida útil mínima de 20 anos, caracterizando assim uma estrutura livre de falhas por fadiga.

Mesmo com níveis de tensões médias e alternantes baixas, os pontos críticos devem receber cuidado especial, visto que todos estão sujeitos a ações como corrosão e, conseqüentes diminuições das propriedades mecânicas, bem como dois dos três pontos apresentam solda o que pode gerar pontos de nucleação de trincas. Levando em conta tais pontos, o fator modificador de fatores adversos presente deve ser superior a 0,367 caso se deseje obter uma vida útil infinita.

Através da comparação entre os valores de carregamentos apresentados na aplicação do aerogerador de eixo horizontal de pequeno porte em duas regiões distintas no sul do Brasil, a aplicação da torre CGS3 de acordo com especificações da norma ABNT NBR 6123:1988 se mostra apta a ocorrer em todas as regiões, por apresentar mesmo sob condições de baixa perda de carga e elevada responsabilidade, valores aceitáveis dos coeficientes de segurança. Porém, quando aplicada em regiões mais intensas deve-se obter cuidado redobrado sobre as regiões críticas, vendo que a estrutura apresentou valores de carregamentos até 80 % maiores sob tais condições.

Após a comparação realizada entre os resultados analíticos e numéricos, notou-se grande semelhança nos resultados encontrados, onde estes também indicam uma aplicabilidade da estrutura na região sul com vida infinita.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **Forças devidas ao vento em edificações**: NBR 6123:1988. 2013.
- AMARAL, L. L. **Metodologia para Garantir a Convergência de Modelos bem Aplicados à Simulação de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Maracanaú, 2016.
- AREIAS, L. C.; MELOTTI, G.; SILVA, F. L. **Materiais para a Produção de Energia Eólica**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Joinville – SC, 2012.
- BRETSCHNEIDER, M. R. **Projeto e Simulação de Pás para Aerogerador Horizontal de Pequeno Porte**. Universidade Feevale – Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais. Novo Hamburgo, 2018.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- CALLISTER, W. D. JR. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 1a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CASTRO, R. M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução à Energia Eólica**. Universidade Técnica de Lisboa. DEEC, 2009.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Processos de fabricação e tratamento**. Volume 3, 2. Ed. São Paulo, 1986.
- COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 3a. Ed. EUA: John Wiley & Sons, INC, 2002.
- CTGÁS-ER. **Normalização e Desempenho de Aerogeradores**. Natal, 2012.
- DUTRA, R. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologia**. CRESESB. Rio de Janeiro, 2008.
- ENERGÉTICA, EMPRESA DE PESQUISA. **Matriz Energética e Elétrica. EPE**, 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acessado em: 16 Abr. 2020.

European Committee for Standardization (CEN). EN 10025-2. **European Structural Steel Standard**: Technical Delivery Conditions for Non-alloy Structural Steels, 2004.

European Committee for Standardization (CEN). EN1993-1-9 – Eurocode 3. **Design of Steel Structures Part 1-9**: Fatigue, 2009.

European Committee for Standardization (CEN). EN1993-3-1 – Eurocode 3. **Design of Steel Structures Part 3-1**: Towers, Masts and Chimneys, 2006.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos**: A Base da Tecnologia CAE. São Paulo: Érica, 2000.

FILHO, J. G. A. C. **Análise de Fadiga em Pás de Aerogeradores de Pequeno Porte**. PUCRS. Porto Alegre, 2011.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. 7a. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

IMA. **Energia Eólica** (biotecnologias). 2009. Disponível em: <<https://reformaminera.wordpress.com/2009/11/16/170-energia-eolica-biotecnologias/>>, Acesso em: 18 fev. 2016.

International Electrotechnical Commission (IEC). 61400-1. **Wind Energy Generation Systems Part 1**: Design Requirements, 2019.

KENNEDY, C. R.; LEEN, S. B.; O'BRADAIGH, C. M. **Immersed Fatigue Performance of Glass Fibre-Reinforced Composites for Tidal Turbine Blade Applications**. Journal of Bio and Tribo Corrosion. 2016.

LAGE, C. M. **Fadiga em Estruturas Metálicas Tubulares Soldadas**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2008.

MAIOLINO, P. **Análise Dinâmica de Turbina Eólica Offshore do Tipo Monocoluna**. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2014.

MARQUES, J. **Turbinas Eólicas**: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS, 2004.

MORELLI, F. S. **Panorama Geral da Energia Eólica no Brasil**. USP. São Carlos – SP, 2012.

MÜLLER, M. N. **Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2015.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PEREIRA, C. **Fontes Renováveis**: Energia Eólica. Disponível em: <<https://blogdaengenharia.com/fontes-renovaveis-parte-1-energia-eolica/>>. Acesso em: 16 set. 2020.

PEREIRA, R. A.; FERREIRA, W. G.; BEZERRA, A. D. S. **Abalos Sísmicos no Brasil e no Mundo**. Vitória, 2008.

PESTANA, D. A. C. **Sistemas Estruturais para Torres Eólicas**. Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia – FCCE. Portugal, 2016.

POLÍCIA, A. R. **Estudo do Efeito da Fadiga em Torres com Aerogeradores**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2015.

PRACIANO, J. S. C.; PARENTE, E. **Otimização Estrutural de Torres Metálicas para Aerogeradores**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

RIVERA, J. S. T. **Aerodinâmica do Sistema Torre**: Turbina Eólica de Eixo Horizontal. UFRJ. Rio de Janeiro, 2013.

ROCHA, R. V. Simulação de Aerogeradores em uma Bancada Experimental. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2008.

ROSA, E. **Análise de Resistência Mecânica**: Mecânica da Fratura e Fadiga. UFSC. Santa Catarina, 2002.

SHEPHERD, D. G. **Wind Turbine Technology**: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering. 1a. ed. New York, 1994.

WENZEL, G. M. **Projeto Aerodinâmico de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS. Porto Alegre – RS, 2007.

WMTC. **Energia Eólica**: Não Podemos Esquecer dos Materiais. 2016. Disponível em: < <http://wmtc.com.br/2016/09/19/energia-eolica-nao-podemos-esquecer-dos-materiais/>> Acessado em: 21 Mai. 2020.

## APÊNDICE A – ANÁLISE DE MALHA

O presente apêndice tem como objetivo determinar a melhor malha a ser utilizada na simulação numérica da torre CGS3, tal estudo foi feito com base na convergência de valores da tensão equivalente de von Mises para diferentes tamanhos de elementos utilizados nas quatro seções da torre, sendo nestas, onde se encontram os principais pontos críticos. As malhas analisadas são designadas na Tabela A1, onde estas apresentam diferentes tamanhos de elementos.

**Tabela 13 - Variação do tamanho de elementos da malha**

Componente	Malha 1 [mm]	Malha 2 [mm]	Malha 3[mm]
Seções da torre	12	15	30

**Fonte: Autoria própria (2021)**

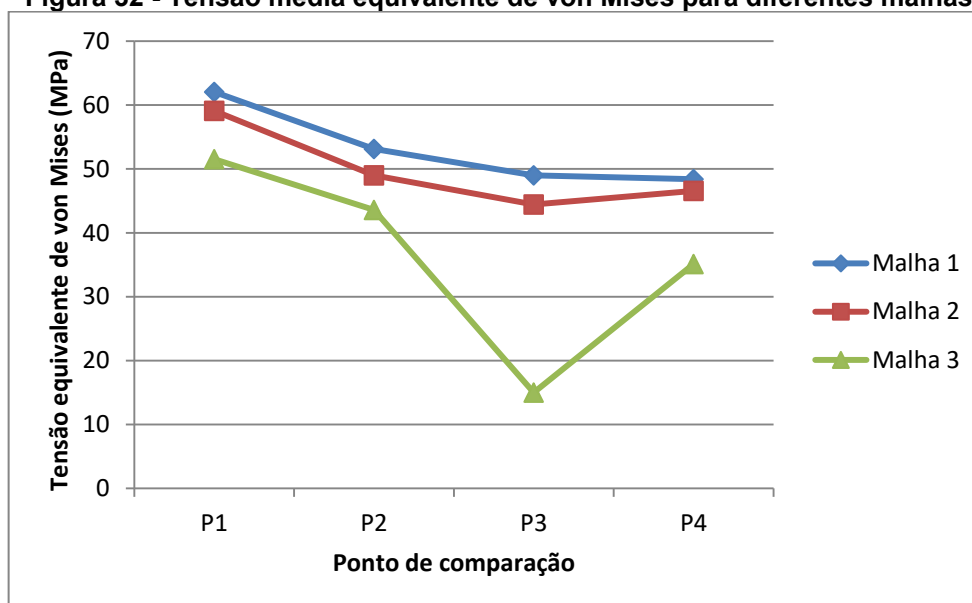
As tensões equivalentes encontradas para quatro pontos distintos comparados entre as simulações podem ser observadas através da Tabela A2 para suas respectivas malhas. Nesta tabela também se encontram presentes o número total de elementos e nós para a malha estipulada.

**Tabela 14 - Tensão equivalente de von Mises para os quatro pontos críticos da estrutura sob condições de diferentes malhas**

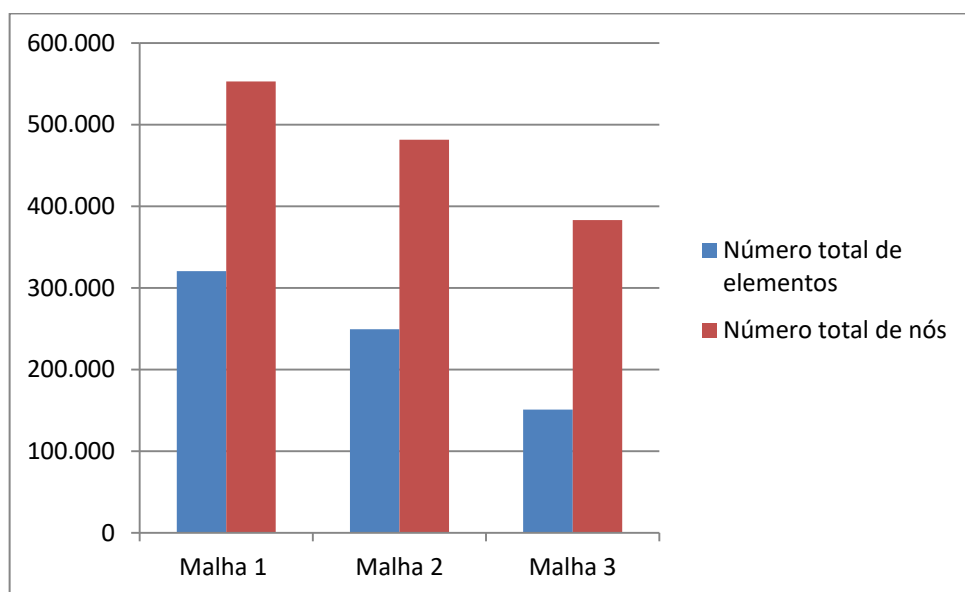
Malha	Tensão média equivalente de von Mises [MPa]				Número total de elementos	Número total de nós
Malha 1	62,05	53,12	49	48,4	320.649	552.958
Malha 2	59,1	49	44,45	46,57	249.396	481.654
Malha 3	51,52	43,59	15	35,13	151.048	383.216

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Os gráficos apresentados nas Figuras A1 e A2 tornam mais visíveis a tendência gerada pelos dados adquiridos e expostos na Tabela A2.

**Figura 32 - Tensão média equivalente de von Mises para diferentes malhas**

Fonte: Autoria própria (2021)

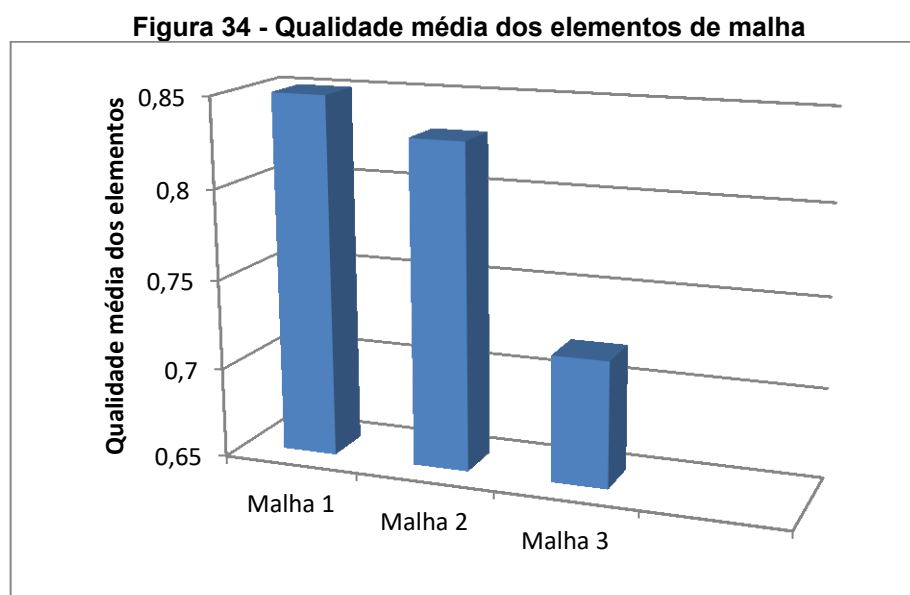
**Figura 33 - Número total de elementos e nós para diferentes malhas**

Fonte: Autoria própria (2021)

As malhas podem ser constituídas por um ou diversos tipos de elementos que dependerá da complexidade geométrica da estrutura, a fim de se adaptar a tais geometrias, muitas vezes estes elementos acabam não adquirindo o formato desejado, fazendo com que isso impacte diretamente de forma negativa sobre os resultados.

Portanto, torna-se pertinente realizar uma análise sobre a qualidade média dos elementos desenvolvidos para cada malha especificada na Tabela A1. O

Ansys disponibiliza da ferramenta *Mesh Metric* que dispõe de informações métricas relacionadas às malhas, uma destas é a opção *Element Quality*, onde um valor entre 0 e 1 é determinado para cada elemento presente na estrutura. Tal valor indica a razão entre o volume e o comprimento da aresta de cada elemento, um valor igual a 1 indica um cubo ou quadrado perfeito, enquanto 0 indica que o elemento tem um volume nulo ou negativo. Portanto, quanto mais próximo de 1 o valor encontrado, maior será a homogeneidade dos elementos na estrutura e o resultado será mais próximo daquilo especificado na definição da malha. O gráfico da Figura A3 indica a qualidade média dos elementos desenvolvidos para suas respectivas malhas.



Fonte: Autoria própria (2021)

Através dos dados expostos na Tabela A2 nota-se que a malha 1 apresentou valores de tensões equivalente de von Mises muito próximos aos obtidos com a utilização da malha 2 e um pouco superiores aos da malha 3, sendo tal variação máxima de 9 % quando comparada a malha 2. É visto que o custo operacional da utilização da malha 1 é superior ao apresentado na aplicação das demais, visto que esta apresenta uma quantidade de nós e elementos maior, bem como uma qualidade média dos elementos maior. Porém, como o objetivo é obter dados mais próximos possíveis aos de convergência, conclui-se que a malha 1 é a melhor a ser utilizada no presente trabalho por apresentar uma melhor qualidade em seus elementos e adquirir valores mais próximos possíveis aos de convergência.

Vale salientar que a malha ainda poderia ser mais refinada para o melhor resultado, porém o custo computacional torna-se inviável.



## APÊNDICE B – DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO DISCRETO

Dados de Entrada				
Seção da torre	1	2	3	4
Zi [m]	1,59	5,835	11,245	17
Diâmetro eq. [m]	0,639	0,513	0,373	0,175
Espessura [m]	0,004	0,004	0,004	0,004
Massa [kg]	120,812	150,5	113,324	74,65
xi [m]	0,00044	0,0009	0,00219	0,00395
Ai [m <sup>2</sup> ]	2,0321	2,7258	2,0541	1,05
Ca	0,97	0,97	0,97	0,97
f1 [Hz]	4,42	4,42	4,42	4,42
Vp [m/s]	26,22	26,22	26,22	26,22
Vp/(f1*L)	0,003295626	0,0033	0,003295626	0,003295626
l1/h	0,3931	0,3931	0,3931	0,3931
ξ	1,5	1,5	1,5	1,5
p	0,23	0,23	0,23	0,23
b	0,71	0,71	0,71	0,71
qo [N/m <sup>2</sup> ]	421,4303892	421,43	421,4303892	421,4303892
Ao [m <sup>2</sup> ]	7,862	7,862	7,862	7,862
mo [kg]	1000000	1E+06	1000000	1000000

### APÊNDICE C – RESULTADOS PARA O MODELO DISCRETO

Valores Calculados				
i	1	2	3	4
Zi [m]	1,59	5,835	11,245	17
Ai [m <sup>2</sup> ]	2,0321	2,7258	2,0541	1,05
Ai/Ao [m <sup>2</sup> ]	0,258471	0,346706	0,261269	0,133554
xi [m]	0,00044	0,00088	0,00219	0,00395
Bi*(xi/Ca)	0,000075	0,00027	0,00059	0,0006
ψi	0,0001208	0,0001505	0,0001133	7,47E-05
ψi*(xi <sup>2</sup> )	2,34E-11	1,17E-10	5,44E-10	1,16E-09
Bi*xi	7,23E-05	0,0002615	0,0005702	0,0005781
FH [N]	2,00E+09	2,00E+09	2,00E+09	2,00E+09
$\bar{X}_t$ [N]	179,72	438,42	446,76	276,19
$\hat{X}_t$ [N]	106,8	266,08	498,6	5,92E+02
Xi [N]	2,87E+02	704,49	945,37	868,59

**ANEXO A – COEFICIENTES PARA A EQUAÇÃO DO FATOR DE SUPERFÍCIE**

Acabamento superficial	A (para $S_{ut}$ em MPa)	B (para $S_{ut}$ em MPa)
Retificado	1,58	- 0,085
Usinado ou estirado a frio	4,51	- 0,265
Laminado a quente	57,7	- 0,718
Forjado	272	- 0,995

## ANEXO B – FATOR MODIFICADOR DE TEMPERATURA

Temperatura [°C]	$\frac{S_T}{S_{RT}}$	Temperatura [°F]	$\frac{S_T}{S_{RT}}$
20	1,000	70	1,000
50	1,010	100	1,008
100	1,020	200	1,020
150	1,025	300	1,024
200	1,020	400	1,0118
250	1,000	500	0,995
300	0,975	600	0,963
350	0,943	700	0,927
400	0,900	800	0,872
450	0,843	900	0,797
500	0,768	1000	0,698
550	0,672	1100	0,567
600	0,549		

**ANEXO C – FATOR MODIFICADOR DE CONFIABILIDADE**

Confiabilidade [%]	Variante de transformação $z_a$	Fator de confiabilidade $C_{conf}$
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,620

**ANEXO D – FRAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA**