

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Especialização em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço

Mirelle Batista dos Santos

**ANÁLISES E VERIFICAÇÕES DE TORRES TUBULARES DE AÇO PARA
AEROGERADORES**

Belo Horizonte

2022

Mirelle Batista dos Santos

**ANÁLISES E VERIFICAÇÕES DE TORRES TUBULARES DE AÇO PARA
AEROGERADORES**

Versão Final

Monografia de especialização apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Orientadora: Prof. Dr Rodrigo Barreto Caldas

Belo Horizonte

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos dezesseis dias do mês de agosto de 2022, às 18h 00min, a estudante Mirelle Batista dos Santos, matrícula 2018699177, defendeu o Trabalho intitulado "Análises e verificações de torres tubulares de aço para aerogeradores." tendo obtido a média () .

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 80 (oitenta pontos)

Orientador(a): Prof. Rodrigo Barreto Caldas

Nota: 80 (oitenta pontos)

Examinador(a): Prof. Lucas Ribeiro dos Santos



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 01/09/2022, às 13:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Ribeiro dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 02/09/2022, às 17:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1700344** e o código CRC **04A0E53C**.

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

AGRADECIMENTOS

À **Deus**, por me conceder o dom da vida.

Ao meus **Pais e Irmãos** cujas orações, paciência e fidelidade inspiram-me a continuar cumprindo o meu propósito e potencial.

Ao meu orientador **Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas**, pela paciência, conhecimento e assistência transmitida ao longo do trabalho, muito obrigada!

RESUMO

Com a crescente demanda por energia elétrica e a conscientização da sociedade quanto à preservação do meio ambiente, tornou-se necessário a utilização de fontes de energia que causem menos impacto à natureza e que sejam inesgotáveis. Uma destas fontes é o vento, explorado para a geração de energia através da implantação de aerogeradores, que são acoplados em torres, que na sua maioria são constituídas por anéis de aço sobrepostos. As torres estão sujeitas a uma série de ações que podem levar à sua ruptura por fadiga, ou por instabilidade da casca metálica em virtude da minimização da sua espessura. Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento estrutural de torres com base em estudos acadêmicos voltados à análise estrutural, ao projeto estrutural e à análise dinâmica de torres tubulares de aço para aerogeradores de eixo horizontal.

Palavras chaves: Meio Ambiente, Energia Eólica, Torres, Aço, Desempenho

ABSTRACT

With the growing demand for electric energy and the society's awareness about the preservation of the environment, it became necessary to use energy sources that cause less impact on nature and that are inexhaustible. One of these sources is the wind, exploited for energy formation through the implementation of wind turbines, which are coupled in towers, which are mostly made up of overlapping steel rings. The towers are subject to a serie of actions that can lead to their failure due to fatigue, or due to instability of the metallic shell because of the minimization of its thickness. In this sense, the present work aims to analyze the structural conduct of towers based on academic studies focused on structural analysis, structural design and dynamic analysis of tubular steel towers for horizontal axis wind turbines.

Key-words: Environment, Wind Energy, Towers, Steel, Performance

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira.	11
Figura 2 - Topologias usuais para aerogeradores.	13
Figura 3 - Principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal	14
Figura 4 - Crescimento dos aerogeradores	15
Figura 5 - Parque Eólica em Osório – RS	16
Figura 6 - Ilustração de uma chapa calandrada em formato tronco cônico.....	17
Figura 7 - Sistema de ligação entre tramos.....	17
Figura 8 - Tipos de fundação de torres eólicas.....	18
Figura 9 - Representação da ação do vento.	21
Figura 10 - Isopletas de Velocidade Básica do Vento V_0 (m/s).	24
Figura 11 - Valores mínimos do fator estatístico S_3	26
Figura 12 - Coeficiente de Arrasto.	27
Figura 13 - Diagrama Tensão x Deformação	29
Figura 14 - Tipos de carregamento no domínio do tempo.	31
Figura 15 - Frequência de trabalho.....	33
Figura 16 - Representação da torre eólica MM92.	39
Figura 17 - Esquema de ligação.	40
Figura 18 - Parte superior da torre.....	41
Figura 19 - Representação da ação do vento.	43
Figura 20 - Distribuição de tensão.....	44
Figura 21 - Variação dos deslocamentos horizontais ao longo da altura do modelo estrutural.....	45
Figura 22 - Possíveis posições para aplicação de carga.	46
Figura 23 - Curvas carregamento x deslocamentos.....	47
Figura 24 - Flambagem local da parede do modelo da torre analisada.	47
Figura 25 - Modelo e discretização da torre analisada.	50
Figura 26 - Característica da torre investigada.	53
Figura 27 - Representação das forças/momentos aplicados ao topo da torre.	53
Figura 28 - Expressão de interação para esforços axiais.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - -Parâmetros meteorológicos	26
Tabela 2 - Carregamentos e deslocamentos máximos para as três posições de força analisada	47
Tabela 3 - Carregamentos aplicados ao topo da torre	54

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1- Desenvolvimento histórico de instalações totais	10
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Energia Eólica.....	13
2.2	As Torres	15
2.3	Normatização para Projetos de Torres.....	19
2.3.1	IEC 61400.....	19
2.3.2	EN 1993 Eurocódigos 3: Projeto de estruturas de aço	20
2.4	O vento.....	21
2.4.1.1	Velocidade Característica do Vento (V_k)	23
2.4.1.2	Velocidade básica do vento (V_0)	23
2.4.1.3	Fator Topográfico (S_1)	24
2.4.1.4	Fator S_2	25
2.4.1.5	Fator Estatístico (S_3)	26
2.5	Análise Estrutural	28
2.5.1	Análise Linear e Não Linear.....	28
2.5.2	Análise Dinâmica.....	30
2.5.2.1	Frequências naturais e Modos de vibração	32
2.6	Verificação da Estabilidade	34
2.6.1	Estado Limite de Plastificação	35
2.6.2	Estado Limite de Plastificação devido a Cargas Cíclica	36
2.6.3	Estado de Flambagem.....	36

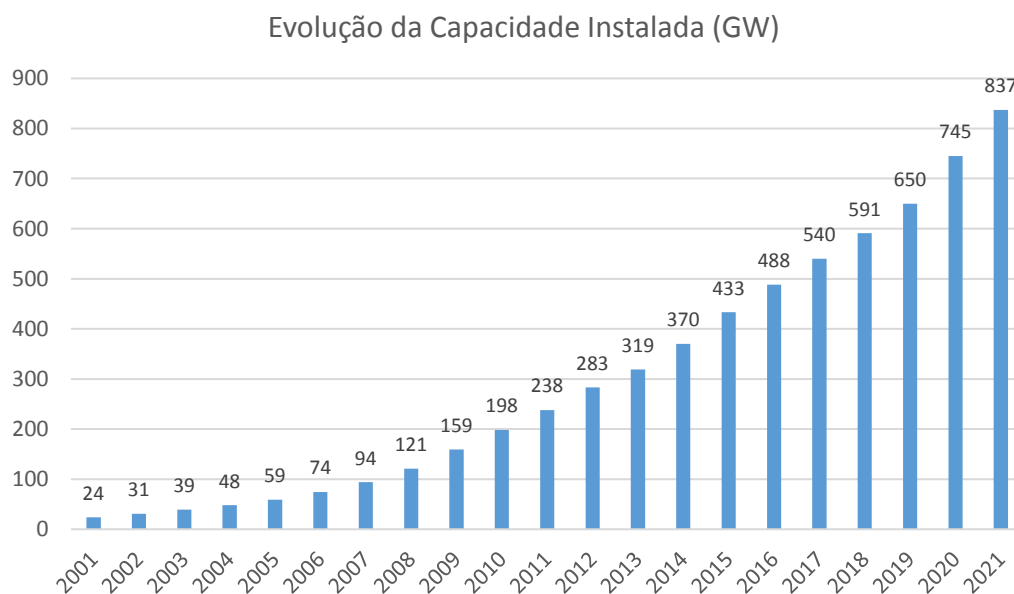
2.6.4	Estado de Fadiga.....	37
3	REVISÃO DA LITERATURA	39
4	CONCLUSÃO	56
5	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes renováveis de energia cresceu consideravelmente nos últimos anos. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, esse crescimento ocorreu devido à busca pela diminuição dos impactos ambientais causados pela queima de combustíveis fósseis. Além disso, fatores como o aumento da demanda por energia, a diminuição da disponibilidade dos combustíveis fósseis, legislações ambientais mais rígidas e vislumbre pela produção da própria energia de forma barata e sustentável, impulsionaram o desenvolvimento de energias alternativas.

Dentre as energias renováveis, a energia eólica é uma das mais promissoras e tem apresentado uma taxa de crescimento exponencial no Brasil e no mundo, conforme Gráfico 1 apresentado a seguir (GWEC, 2022).

Gráfico 1- Desenvolvimento histórico de instalações totais

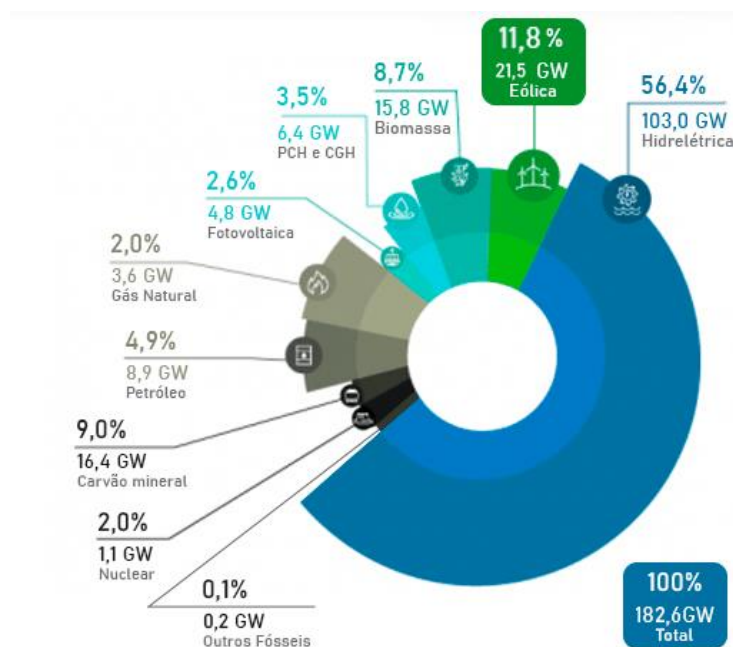


Fonte: GWEC,2022

Pode-se observar, a partir do gráfico 1 extraído do relatório divulgado em 2021 pelo Conselho Global de Energia Eólica (GWEC - Global Wind Energy Council), que atualmente a capacidade eólica instalada no mundo é de aproximadamente 837 Giga Watts (GW). Segundo o mesmo documento, os países com as maiores capacidades totais instaladas são: a China, os Estados Unidos, e a Alemanha. Em seguida estão a Índia, a Espanha e o Brasil.

De acordo com o boletim anual da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), em 2021 a energia dos ventos foi considerada como a segunda maior responsável pela produção de energia no País, com 11,8% de participação, ficando atrás apenas das hidrelétricas – energia gerada a partir da água, que corresponde por cerca de 56,4% de toda a energia do Brasil, como pode ser observado na figura 1. Para Elbia Gannoun, presidente executiva a ABEEolica, é esperado que nos próximos anos essa porcentagem cresça, haja vista a contratação de novos empreendimentos. Estima-se que em 2026 o Brasil alcance a marca de 34,68 GW de potência instalada no País (ABEEólica, 2021).

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira.



Fonte: Siga/ANEEL, 2021

Por ser uma indústria em expansão, muitas tecnologias surgiram, principalmente relacionadas aos equipamentos responsáveis pela produção de energia. Basicamente esses equipamentos são os aerogeradores (rotor e nacelle) e as torres. Os aerogeradores são os responsáveis em aproveitar a energia cinética do vento a partir da força motriz que faz girar as pás e transformar a energia obtida pelo vento em eletricidade. Já as torres, são as componentes que suportam os aerogeradores. Estas, além de terem função estrutural, têm uma participação significativa na produção de energia, uma vez que a capacidade de explorar o potencial do vento é proporcional à distância do solo, ou seja, a quantidade de energia captada está diretamente relacionada com a altura da torre. Desse modo, este trabalho tem por objetivo principal o estudo do comportamento das torres tubulares de aço, visto a sua relevância no projeto de parques eólicos *onshore* (em terra). Realizou-se inicialmente, uma percepção quanto aos conceitos relacionados ao tema. Em seguida, foi feita uma revisão bibliográfica de alguns trabalhos acadêmicos voltados a análise da estabilidade estática e dinâmica das torres.

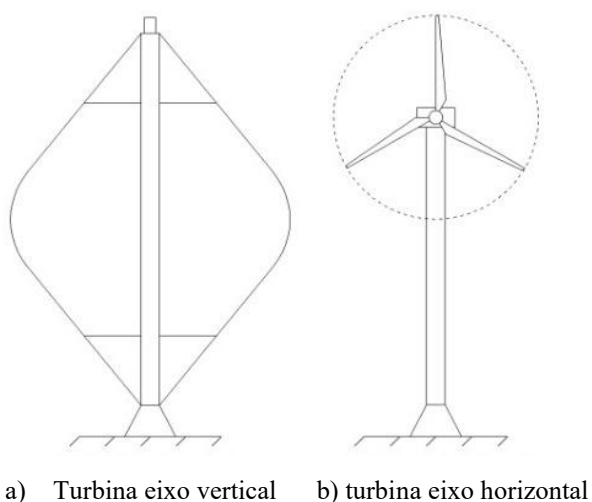
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energia Eólica

Por definição, a energia eólica é um tipo de energia obtido a partir do vento. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também conhecida como aerogeradores. Esses aerogeradores funcionam a partir do movimento das pás que faz girar o rotor que por sua vez transmite a rotação multiplicada pela caixa multiplicadora ao gerador. Dessa forma, o gerador converte a energia mecânica recebida em energia elétrica (NEOENERGIA, 2022).

A figura 2 ilustra as topologias mais usuais para os aerogeradores de acordo com a rotação do rotor da turbina.

Figura 2 - Topologias usuais para aerogeradores.

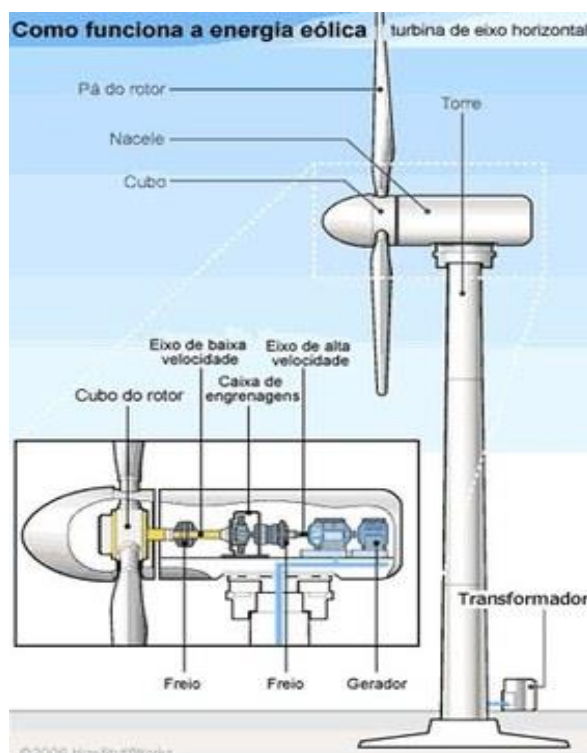


Fonte: Zanchettin, 2012

Embora exista dois tipos de turbinas eólicas, tanto de eixo horizontal como vertical, um tipo se tornou preferível e muitas empresas adoraram como padrão nos grandes parques eólicos: a turbina de eixo horizontal, com três pás e de configuração *upwind* (contra o vento ou a montante). Desse modo, a atenção nesse trabalho será voltada para esse tipo de aerogerador.

Para ROSA (2019) os aerogeradores com eixo horizontal apresentam como principais componentes: pás, rotor, nacelle, caixa multiplicadora, torre e fundação. A figura 3 exibe o esquema de uma torre eólica com os componentes e a configuração típica de uma turbina de grande porte.

Figura 3 - Principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal



Fonte: CRESESB,2008

A nacelle é a região que informalmente é conhecida como a cabeça do aerogerador. Em seu interior há diversos componentes, como o rotor da turbina, o sistema de transmissão, o gerador, o sistema de controle, o transformador e os cabos que conectam à rede elétrica.

O rotor, ou hub, é o elemento que efetua a transformação da energia cinética do vento em energia mecânica de rotação. Nele é fixado as pás da turbina, as quais geralmente são fabricadas em

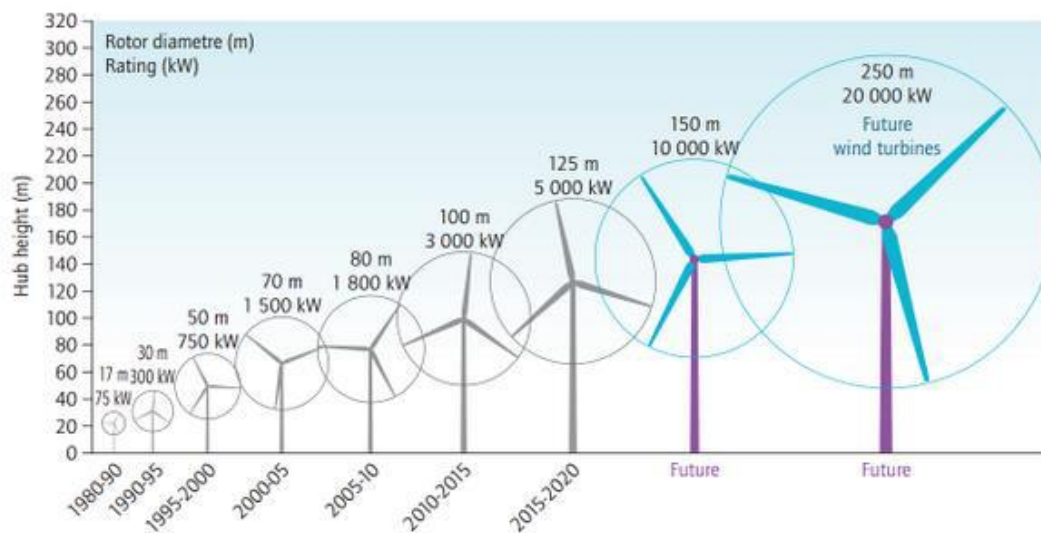
fibra de vidro ou em fibra de carbono. Vale salientar que, tipicamente os rotores têm de 60 a 150 metros de diâmetro.

2.2 A Torre

A torre é o elemento estrutural que sustenta a rotor e os outros componentes do aerogerador. Ela é considerada como um item de grande porte e exerce um papel fundamental no potencial de geração de energia, pois ela tem como objetivo principal posicionar a turbina na melhor altura de trabalho, definindo o desempenho do aerogerador (CUSTÓDIO,2009).

Para PORFIRIO (2019), nas últimas décadas, a altura da torre tem sendo alvo de estudos, pois aerogeradores mais potentes e com maior valores agregados precisam de torres mais seguras e mais altas. A figura 4 mostra o crescimento acelerado dos aerogeradores, assim como o aumento do diâmetro do rotor, das torres de sustentação e do potencial nominal.

Figura 4 - Crescimento dos aerogeradores



Fonte: CGEE,2013

As torres podem apresentar diferentes soluções estruturais e podem ser confeccionadas com diferentes materiais. O mais comum nas construções de parques eólicos *onshore* (em terra) é a estrutura em aço, mas também podem ser encontradas feitas em concreto armado ou híbridas

(concreto e aço). Quanto a parte estrutural, DELLEZZOPOLLES (2011) afirma que pode ser adotada as seguintes soluções: tubulares, cilíndricas, cônicas e treliçadas. Neste trabalho será dada ênfase apenas as torres construídas em aço no formato cônico.

Figura 5 - Parque Eólica em Osório – RS



Fonte: < <https://solareolicarenovavel.com/parques-eolicos/> > Acesso em:05/06/2022

As torres tubulares de aço são formadas de segmentos pré-fabricados com comprimento de 20 a 30 m. As seções são produzidas a partir de chapas de aço com espessura de 10 a 50 mm (Figura 6a). As chapas, com largura de aproximadamente 2 m, são passadas em uma máquina que executa a calandragem (Figura 6b). Após os segmentos serem conformados, as seções são soldadas. Em muitos casos, soldadores automáticos são utilizados. Para LIMA (2018), a solda requer atenção especial em determinadas situações de carregamento da torre; desta forma, deve-se checá-la por métodos ultrassônicos, raios-X e exame de fissuras superficiais.

Figura 6 - Ilustração de uma chapa calandrada em formato tronco cônico.



a) Chapa de aço

b) Calandragem da chapa

Fonte: LIMA, 2018

Nas extremidades de cada segmento da torre, flanges são soldados (Figura 7a). LIMA (2018) chama atenção quanto ao processo de conformação e soldagem dos flanges, uma vez que os componentes podem ficar distorcidos e, portanto, será dificultada a montagem e o aparafusamento entre flanges (Figura 7b).

Figura 7 - Sistema de ligação entre tramos



a) Flange

b) Aparafusamento dos flanges

Fonte: LIMA, 2018

É importante salientarmos que, sendo a torre constituída de aço, é necessário aplicar proteção contra corrosão, principalmente em áreas agressivas, como em zonas costeiras – ambiente considerado como o principal local de produção de energia eólica.

Quanto a parte interna da torre, há uma série de instalações elétricas e de equipamentos de segurança, para manutenção do aerogerador, como porta de acesso instalada na base da torre e plataformas intermediárias; além de cabos para transmissão de energia elétrica, transformador, sistema de climatização, sistema de iluminação, sistema de controle.

Um outro fator importante em um projeto de torres é quanto a sua base de sustentação. Em geral, as torres eólicas são suportadas no terreno por um bloco circular, retangular ou octogonal de concreto que transfere as cargas para o subsolo. Devido às cargas elevadas que deve suportar e transmitir ao terreno, normalmente estes blocos possuem diâmetro de grandes dimensões, podendo atingir os 20 metros (PESTANA, 2016).

Na figura 8 é possível visualizar modelos de fundação de torre eólica.

Figura 8 - Tipos de fundação de torres eólicas



a) Fundação circular em laje

b) fundação octogonal em laje cônica

Fonte: CBPE,2021

2.3 Normatização para Projetos de Torres

No ramo da energia eólica, para que um projeto de aerogerador possa ser comercializado é necessário que o mesmo possua os certificados de conformidade quanto os requisitos de projetos que foram definidos e aceitos, esses certificados geralmente são obtidos por meio das organizações independentes e compreendem a turbina eólica completa ou até mesmo os seus componentes, como as pás, caixas de engrenagens ou torres (DUMBY,2014).

De acordo com a norma europeia EN 45020, a certificação é a confirmação de conformidade de um produto ou um serviço com os requisitos definidos como manuais, códigos e normas nos quais avaliam projetos (modo de fabricação, teste de tipo, e as fundações), conceito de segurança e avaliação de carga.

2.3.1 IEC 61400

O IEC 61400 - norma internacional publicada pela Comissão Eletrotécnica Internacional, aborda um conjunto de requisitos mínimos de concepção de projetos feitos para garantir que as turbinas eólicas sejam projetadas de forma adequadas contra os danos que podem ocorrer durante a vida útil da peça. Estes requisitos são essenciais para que seja assegurada a integridade da engenharia de aerogeradores. Na norma, todos os subsistemas ligados as turbinas eólicas são levadas em consideração, como os mecanismos de controle e proteção dos sistemas, os sistemas mecânicos e de elétrica interna, e as estruturas de apoio.

O padrão da norma diz respeito a todo o período de vida útil da turbina, tomando como base as condições do local onde será implantada a construção, até os componentes das turbinas na fase de testes, de montagem e de operação.

A norma IEC 61400 não estabelece condições para avaliação minuciosas em relação à segurança estrutural da torre nem da fundação. Assim, para que as ações e as regras de projeto sejam analisadas deve-se recorrer a normas e códigos além da IEC 61400, sendo:

- ISO 2394: Princípios gerais sobre a confiabilidade para estruturas ou EN 1990: Eurocódigo - Bases para o projeto estrutural;
- ISO 4354: Ações de vento em estruturas ou EN 1991-1-4: Eurocódigo 1: Ações na estruturas (ações de vento)
- EN 1993 Eurocódigo 3: Projeto de estruturas de aço
- EN 1997 Eurocódigo 7: Projeto Geotécnico

2.3.2 EN 1993 Eurocódigos 3: Projeto de estruturas de aço

A Europa, fim de desenvolver e uniformizar as diretrizes de cálculo e de dimensionamento para diferentes tipos de estruturas, teve um enorme trabalho nas últimas décadas em busca de unificar as informações. E como solução de todo esse esforço, surgiram os Eurocódigos estruturais, sendo um conjunto de normas europeias (EN) de responsabilidade do Comitê Europeu de Normalização (Comitê Técnico CEN/TC 250) que visa unificar critérios e normativas de cálculo e dimensionamento de estruturas.

Dentre os diversos Eurocódigos existentes, para o trabalho em questão, destacaremos somente a EC3, Eurocódigo destinada a projetos de estruturas de aço. Esta, por sua vez é dividida em seis partes, sendo:

- EN 1993-1: Regras gerais e regras para edifícios;
- EN 1993-2: Pontes;
- EN 1993-3: Torres, mastros e chaminés;
- EN 1993-4: Silos, reservatórios e condutas;
- EN 1993-5: Estacas;
- EN 1993-6: Caminho de rolamento de guias e pontes rolantes.

A terceira parte do Eurocódigo 3 (EN 1993-1) é destinada ao estudo das torres, no entanto, para o entendimento do objetivo do trabalho, levaremos em consideração apenas algumas sub partes elencadas à primeira parte do Eurocodigo 3, sendo:

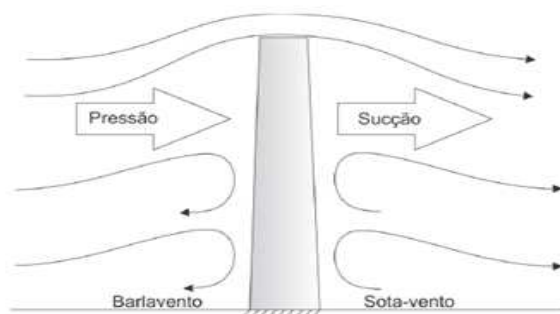
- EN 1993-1-1: Regras gerais e regras para edifícios;
- EN 1993-1-6: Resistência e estabilidade de casca;
- EN 1993-1-8: Projeto de ligações;
- EN 1993-1-9: Fadiga.

2.4 O vento

A energia eólica é oriunda da ação dos ventos, então convém entender como se dá a geração desse fenômeno atmosférico. Para SANTOS (2013) a manifestação do vento ocorre devido a diferença de pressões e do deslocamento de massas de ar na atmosfera. As diferenças de pressões podem provocar movimentos que variam de brisas a violentos furacões.

Em uma torre de suporte o vento pode incidir de duas formas, a primeira refere-se ao lugar de onde o vento vem, conhecido como barlavento. Este produz sobre a estrutura um esforço de pressão empurrando-a na direção e sentido em que sopra o vento. Já a segunda, conhecida como sotavento, está relacionada com a região oposta àquela de onde sopra o vento. A ação deste, produz um esforço de sucção vertical puxando-a na sua direção e sentido (SANTOS,2013). A figura 9 ilustra esse fenômeno.

Figura 9 - Representação da ação do vento.



Fonte: Santos 2013

Para realização da análise quanto a ação do vento nas estruturas de suporte de aerogeradores, são adotadas prescrições da norma brasileira NBR 6123,1988 – “Forças devido ao vento em edificações” da ABNT- Associação Brasileira de Normas técnicas. De acordo com o descrito na referida norma, um carregamento devido ao vento pode ser considerado como uma ação estática e dinâmica. A primeira leva em consideração apenas o coeficiente de arrasto e a pressão de obstrução, enquanto que a segunda é devido a turbulência atmosférica; esta, por sua vez provoca um efeito sobre a estrutura fazendo-a vibrar nas suas frequências naturais, induzindo solicitações dinâmica em todos os pontos da torre.

Em termos de análise do efeito do vento em construções esbeltas e compridas necessita-se conhecer a componente da força que atua na direção do vento. Esta força é chamada de Força de Arrasto (F_a), sendo determinada a partir da equação 1, apresentada pela NBR 6123:

$$F_a = C_a * q * A \quad (1)$$

Onde,

C_a – coeficiente de arrasto;

q - pressão de obstrução;

A - área da superfície perpendicular à direção do vento.

Pressão de Obstrução

A pressão de obstrução (q) é determinada através da equação 2, apresentada pela NBR 6123, deduzida a partir do Teorema de Bernoulli.

$$q = 0,613.V_k^2 \quad (2)$$

onde,

q – pressão de obstrução (N/m²);

V_k - velocidade característica do vento (m/s);

2.4.1.1 Velocidade Característica do Vento (V_k)

A velocidade característica do vento é a velocidade que, de fato, atuará na edificação, pois ela multiplica a velocidade básica por fatores que são dados em função de aspectos particulares da mesma, como topografia do local, rugosidade do terreno, altura e dimensões da edificação e o tipo de ocupação, que visam corrigir a velocidade básica inicialmente obtida, para as condições reais da edificação (GONÇALVES et al., 2013, p. 17).

Ela é determinada em função da velocidade básica do vento multiplicada por três fatores: S_1 , que é determinado como fator topográfico, S_2 , que leva em consideração as dimensões da edificação, a rugosidade do terreno e a altura sobre ele e S_3 , que é o fator estatístico. Ela pode ser calculada conforme a Equação 3, extraída da NBR 6123 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988, p. 4).

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0 \quad (3)$$

onde,

S_1 - fator topográfico;

S_2 - depende da rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;

S_3 - fator estatístico;

V_0 - velocidade básica do vento.

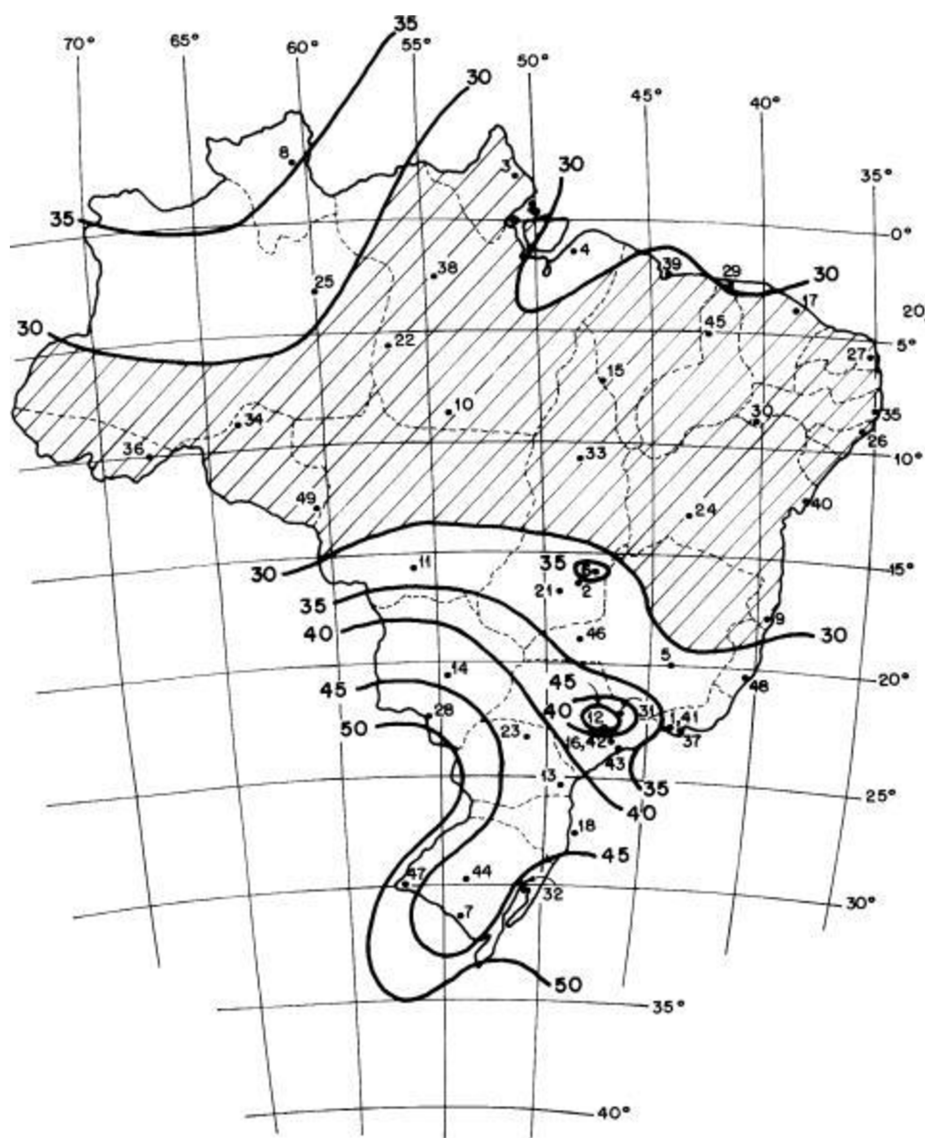
2.4.1.2 Velocidade básica do vento (V_0)

A velocidade básica do vento é, por definição, a velocidade de uma rajada com duração de três segundos, com probabilidade de ser superada uma vez a cada 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano.

Os valores da velocidade básica são obtidos a partir do gráfico das isopletras, figura 10, apresentado pela NBR 6123 (1988), o qual foi construído a partir de dados obtidos com base na

velocidade básica para uma rajada de três segundos, um período de retorno de 50 anos e altura de 10 metros em terreno plano, em campo aberto e sem obstruções.

Figura 10 - Isopletas de Velocidade Básica do Vento V_0 (m/s).



Fonte: ABNT (NBR 6123/88)

2.4.1.3 Fator Topográfico (S_1)

Segundo o item 5.2 da NBR 6123, o fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo do terreno e é determinado da seguinte maneira:

- a) Para terrenos planos ou fracamente acidentados: $S_1 = 1,0$
 b) Para taludes e morros (situado no topo do talude ou morro):

$$0 \leq \theta < 3^\circ: S_1(z) = 1,0$$

$$3^\circ \leq \theta < 17^\circ: S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \left(\frac{z}{d}\right)\right) \times \tan(\theta - 3^\circ) \geq 1$$

$$\theta \geq 17^\circ: S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \left(\frac{z}{d}\right)\right) \times 0,31 \geq 1$$

onde,

z é a altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

d é a diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

θ é a inclinação média do talude ou encosta do morro.

Para $3^\circ < \theta < 6^\circ$ e $17^\circ < \theta < 45^\circ$, deve-se interpolar linearmente.

- c) Para vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção: $S_1 = 0,9$

2.4.1.4 Fator S_2

De acordo com a NBR 6123, o fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte dela.

Para torre de aerogeradores, adota-se como rugosidade do terreno a categoria II – terrenos abertos, em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como: árvores e edificações baixas e típico de zonas costeiras planas. Seguindo com as dimensões, pode-se levar em conta o todo ou a parte da edificação, para qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda de 50m. Como a altura das torres eólicas tem variado no intervalo de 40m a 120m, validou-se a “Classe C” para este estudo (altura do projeto de construção de sobre o terreno). De acordo com a NBR 6123, o fator da rugosidade é dado por:

$$S_2 = bF_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (4)$$

Onde, b , F_r e p são parâmetros de projeto meteorológicos e a aplicação da equação é restringida pela altura z_g , que define o contorno superior da camada atmosférica. O fator de rajada deve ser tomado sempre o correspondente à categoria II

Tabela 1 - -Parâmetros meteorológicos

Categoria	Zg	Parâmetro	Classe		
			A	B	C
I	250	B	1,1	1,11	1,12
		P	0,06	0,065	0,07
II	300	B	1,00	1,00	1,00
		Fr	1,00	0,98	0,95
		P	0,085	0,09	0,1
III	350	B	0,94	0,94	0,93
		P	1,10	1,105	0,115
IV	420	B	0,86	0,85	0,84
		P	0,12	0,125	0,135
V	500	B	0,74	0,73	0,71
		P	0,15	0,16	0,175

Fonte: NBR 6123/1988

2.4.1.5 Fator Estatístico (S_3)

Segundo a NBR 6123, o fator S_3 é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. A Figura 11, retirada da referida norma, apresenta os valores mínimos do fator estatístico S_3 de acordo com o grupo correspondente à edificação:

Figura 11 - Valores mínimos do fator estatístico S_3

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: ABNT (NBR 6123/88)

Coeficientes de Arrasto C_a

De acordo com a NBR 6123 (1988), o valor do coeficiente de arrasto (C_a) está associado a gráficos e tabelas. Para as barras prismáticas de seção constante ou fracamente variável (caso das torres eólicas), o coeficiente de arrasto, é tabelado (NBR 6123, 1988, P.22) conforme a relação da altura com o diâmetro e depende do número de Reynolds, expresso por:

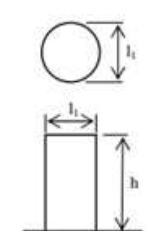
$$R_e = 70000 \cdot V_k \cdot d \quad (5)$$

onde,

d – diâmetro da barra (m)

V_k - velocidade característico do vento (m/s)

Figura 12 - Coeficiente de Arrasto.



$R_e \times 10^{-5}$	h / d						
	1/2	1	2	5	10	20	∞
$\leq 3,5$	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
$\geq 4,2$	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6

Fonte: NBR 6123/88, adaptada por FEIJÓ,2010

2.5 Análise Estrutural

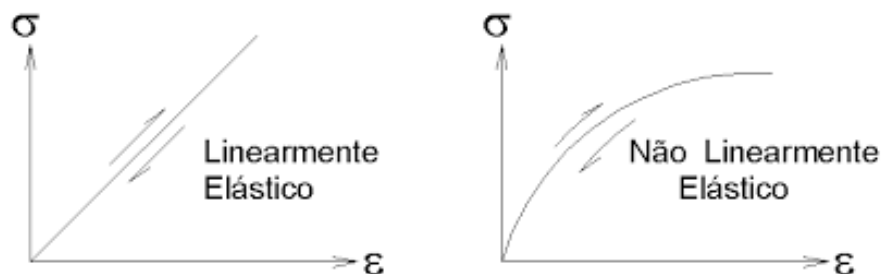
Análise estrutural é a determinação dos efeitos das ações sobre estruturas físicas e seus componentes. Segundo MARTHA (2010), através do estudo da análise estrutural é possível realizar uma previsão de como a estrutura irá se comportar diante dos esforços internos, das reações e dos deslocamentos. Uma de suas partes fundamentais é a idealização de um modelo de avaliação que seja o mais próximo possível de suas reais condições de utilização. Dessa forma, segundo SOUZA (2011), na escolha devem ser considerados os seguintes aspectos estruturais:

- Rigidez;
- Comportamento das seções;
- Imperfeições iniciais (execução, fabricação ou montagem);
- Comportamento das ligações;
- Estabilidades local (dos elementos) e global (da estrutura em seu conjunto).

2.5.1 Análise Linear e Não Linear

No estudo do comportamento de estruturas de aço, tem-se dois tipos de análises estáticas, linear e eletroplástica. No modelo elástico linear, admite-se que as tensões dos elementos estruturais são inferiores à tensão de escoamento do material, e que as tensões e deformações progridem proporcionalmente (lei de Hooke – figura 13a). Já na análise eletroplástica, admite-se a existência de plasticidade em algumas seções da estrutura, acarretando restrições de esforços em elementos estaticamente indeterminados. Nesse caso, o comportamento “tensão x deformação” do material é não linear e a análise dita fisicamente não linear (figura 13b).

Figura 13 - Diagrama Tensão x Deformação



Fonte: SANTOS,2013

No que diz respeito ao efeito dos deslocamentos sobre o comportamento da estrutura existem duas alternativas de análise, classificadas como análise de primeira ordem e de segunda ordem. A análise de primeira ordem (linear) pressupõe para o cálculo de esforços e deslocamentos o equilíbrio da estrutura em sua posição inicial indeformada. Esse tipo de análise se justifica quando os deslocamentos são muito pequenos e a geometria deformada é praticamente idêntica à indeformada. Já a análise de segunda ordem (não linear), o estabelecimento do equilíbrio da estrutura ocorre na posição deformada, gerando esforços adicionais devido as forças aplicadas sobre os deslocamentos.

Os efeitos de segunda ordem podem ser de suas formas: locais e globais. Os efeitos de segunda ordem local ($P - \delta$) ocorrem no âmbito dos elementos componentes da estrutura. Já os efeitos globais ($P - \Delta$) estão ligados a flexibilidade das estruturas, ou seja, relacionam-se com os nós. Vale salientar que, como os efeitos de segunda ordem decorrem dos deslocamentos, esses esforços adicionais produzem novos deslocamentos, configurando um comportamento geometricamente não linear.

Segundo RIBEIRO (2009), a não linearidade geométrica está relacionada a não linearidade da estrutura proveniente da variação da geometria, como mudança de forma e rotações. Essas variações podem levar ao aparecimento de imperfeições iniciais ou imperfeições geométricas. No caso das torres eólicas de aço, geralmente as imperfeições iniciais ocorrem no momento em que a casca metalizada está sendo fabricada ou montada, provocando alguma alteração em sua geometria.

A maneira de incluir as imperfeições geométricas iniciais na modelagem estrutural consiste na inclusão de forças horizontais fictícias (também chamadas de forças nocionais) aplicadas no topo da estrutura, estimadas como um percentual das ações gravitacionais atuantes (NBR 8800,2008).

No que se refere ao aspecto do comportamento das ligações, as torres são avaliadas como uma viga engastada na base e livre no topo. A base engastada pode ser assegurada como perfeitamente rígida e com vínculos do tipo ideal. Quanto os segmentos da torre, estes são tratados como tramos aparafusados por meio de flanges.

Quanto a estabilidade das torres (considerada como uma estrutural comprida e esbelta), SANTOS (2013) adverte que a análise de estudo mais adequada é por meio da análise não linear geométrica, uma vez que método permitirá o conhecimento da trajetória real de seu caminho de equilíbrio, além de uma maior flexibilidade do deslocamento imposto no topo da torre (onde há uma maior concentração de massa), favorecendo assim uma solução viável e útil.

2.5.2 Análise Dinâmica

O carregamento dinâmico pode ser definido como um conjunto de ações que apresentam variações no tempo (em sua magnitude, direção ou sentido). Segundo MORAES (2020), para a determinação da resposta quanto a estas ações dinâmicas, seja ela amortecida ou não, com um grau de liberdade ou mais, pode ser utilizada a equação de equilíbrio dinâmico, Eq. (6) mostrada abaixo, a qual baseia-se nas principais características da estrutura: rigidez ($[K]$), massa ($[M]$) e amortecimento ($[C]$).

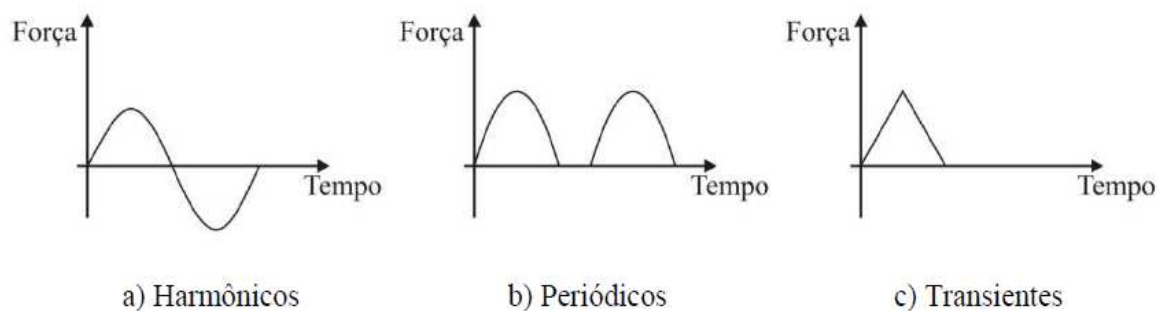
$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (6)$$

Essa equação forma um sistema de equações diferenciais de segunda ordem, onde $\{F(t)\}$ é o vetor de carregamentos aplicados na estrutura nos graus de liberdade correspondentes, $[M]$ é a matriz de massa da estrutura, $[C]$ é a matriz de amortecimento e $[K]$ é a matriz de rigidez. Para

resolver tal sistema e obter as respostas podem ser utilizados métodos no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

Conforme a forma de variação no tempo, as ações dinâmicas são classificadas como harmônicas, periódicas, transientes ou impulsivas. O carregamento é dito harmônico quando sua variação no tempo pode ser representada por uma função seno ou cosseno, sendo característicos de turbinas, geradores e bombas centrífugas de máquinas rotativas que apresentam massa desequilibrada. O carregamento periódico é aquele que apresenta repetições em um intervalo regular de tempo, chamado período. Uma carga que representa as forças geradas por uma máquina rotativa em operação também é periódica. Já o carregamento transiente é o que apresenta variação arbitrária ao longo do tempo, sem periodicidade. O carregamento impulsivo é caracterizado como sendo transiente com uma duração muito curta. Na Figura 14 tem-se uma representação dos tipos de carregamentos dinâmicos.

Figura 14 - Tipos de carregamento no domínio do tempo.



Fonte: BATELO,2014

Segundo ARAUJO (2015), os carregamentos dinâmicos estão relacionados aos parâmetros modais, sendo eles os modos de vibração e correspondentes frequências naturais. Para o referido autor, este tipo de análise tem sido amplamente utilizado na abordagem de problema de vibração, como: modificação da dinâmica das estruturas, atualização de modelos analíticos, dimensionamento ótimo e controle de vibração.

Para FERREIRA (2021), os valores das frequências naturais e dos correspondentes modos de vibração de uma estrutura são calculados a partir dos autovalores e autovetores obtidos através de uma representação da estrutura pelo Método de Elementos Finitos.

BRASIL e SILVA (2013), afirma que a determinação da frequência e dos modos naturais de vibração pode ser resolvida através do sistema de equações algébricas homogêneas:

$$[K - \omega^2 M]\hat{u} = 0 \quad (7)$$

onde

K - matriz de rigidez;

M - matriz de massa;

ω - frequência natural do sistema (autovalores);

\hat{u} - modos de vibração (autovetores).

2.5.2.1 Frequências naturais e Modos de vibração

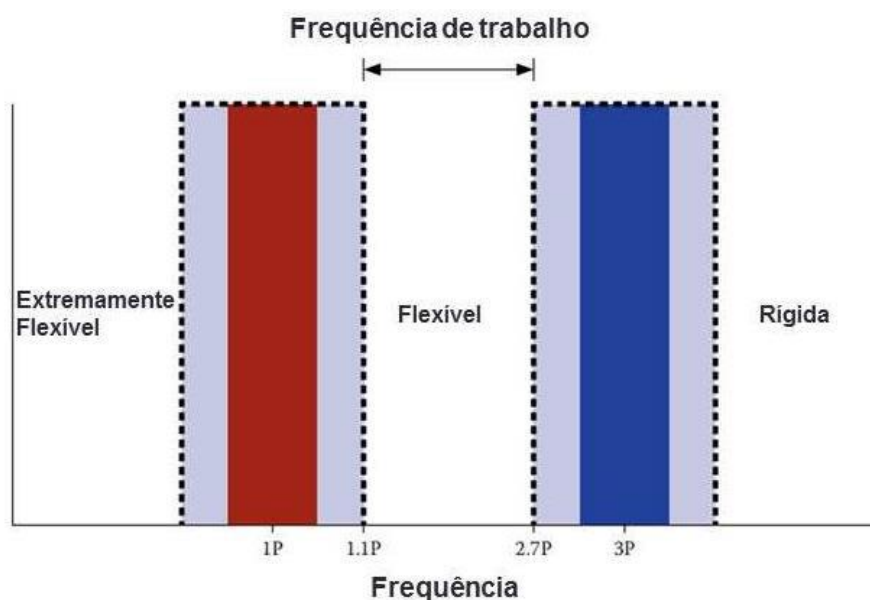
As frequências naturais de vibração de uma estrutura indicam a capacidade de oscilação livre após cessado o estímulo ou carga que gerou sua perturbação. Uma estrutura pode vibrar em diversas direções e de diversas formas, sendo que cada uma corresponderá ao seu respectivo modo de vibração. Ou seja, para cada maneira de vibrar, a estrutura apresentará uma frequência natural de vibração. É importante destacar que a frequência de maior relevância nos estudos dinâmicos é a primeira, menor entre todas, denominada frequência fundamental (BOLINA, 2014).

De acordo com SORIANO (2014), as primeiras frequências naturais são úteis em previsão do comportamento do modelo estrutural sob determinada ação externa. Tal fato ocorre porque as amplitudes de deslocamento aumentam à medida que aquelas frequências se aproximam da frequência preponderante da excitação e, desta forma, a correspondente oscilação pode danificar a estrutura.

FERREIRA (2021), afirma que para assegurar a integridade das torres eólicas é necessário garantir que a frequência natural da estrutura não coincida com nenhuma frequência de vibração externa que a estrutura possa estar sujeita durante a sua vida útil. Isso se justifica pelo fato de que, quando a frequência da vibração forçada (ação externa) da torre se iguala a frequência natural dela, ocorre um drástico aumento de amplitude. Esse fenômeno é denominado ressonância.

Portanto, o primeiro e mais importante requisito para manter sob controle o comportamento de vibração das torres eólicas é prevenindo que as forças de excitação do rotor entrem em ressonância com as frequências naturais de flexão da torre. Deste modo, FERREIRA (2021), considera como critério decisivo, no momento da análise, a posição da primeira frequência natural da torre em relação às frequências de excitação do rotor.

A figura 15 exemplifica os modos estruturais da torre a partir da frequência natural. Quando a primeira frequência natural estiver acima de $3P$, trata-se de uma torre rígida. No entanto, quando a primeira frequência estiver no intervalo abaixo de P , considera-se a torre como extremamente flexível. Estando a frequência natural entre $1P$ e $3P$, trata-se de uma estrutura flexível e mais comumente considerada nos projetos atualmente (FERREIRA, 2021).



Fonte: FERREIRA, 2021

De acordo com FERREIRA (2021), a solução mais segura seria colocar a frequência natural da estrutura acima da faixa de 3P. No entanto, nesta faixa a estrutura é considerada mais rígida, acarretando em um custo mais elevado. Deste modo, do ponto de vista econômico, as estruturas flexíveis são mais desejáveis.

Vale salientar que, no projeto de uma turbina, sendo avaliado o comportamento de vibração, o número de pás do rotor é um fator preponderante (FERREIRA, 2021).

2.6 Verificação da Estabilidade

No estudo da estabilidade das estruturas em casca (torres tubulares), segundo a EM 1993-1-6, existem alguns estados limites determinados que devem ser considerados, como o Estado Limite Último (plástico e de flambagem), o Estado Limite de Fadiga e o Estado Limite de Serviço. Os ELU são os estados que estão diretamente ligados a ruína ou qualquer forma de ruptura estrutural, que possam colocar em perigo a segurança de pessoas e de bens, e estão definidos como base de uma ocorrência de determinada conduta estrutural numa situação limite sendo independente da sua duração. São estados que normalmente são definidos através de tensões.

Segundo SIRQUEIRA (2008), os valores característicos de resistência relacionado a estruturas formadas por elementos de casca pode ser feito através do Eurocode 3, parte 1-1, fazendo-se necessário uma verificação nos estados limites últimos relativos a:

- limite de plastificação;
- plastificação cíclica;
- flambagem;
- fadiga

2.6.1 Estado Limite de Plastificação

O estado limite plástico deve ser tomado como o estado em que a capacidade da estrutura para resistir às ações não excede as tensões de escoamento do material. Para sua verificação é necessário seguir a expressão:

$$\sigma_{eq,Rd} \leq f_{eq,Rd} \quad (8)$$

Onde,

$\sigma_{eq,Rd}$ é o valor da tensão equivalente de Von Mises dada pela equação:

$$\sigma_{eq,Rd} = \sqrt{\sigma_{x,d}^2 + \sigma_{\theta,d}^2 - \sigma_{x,d}\sigma_{\theta,d} + 3(\tau_{x\theta,d}^2 + \tau_{xn,d}^2 + \tau_{\theta n,d}^2)} \quad (9)$$

e, $f_{eq,Rd}$ é a tensão resistente no estado limite de plastificação, dada pela seguinte equação:

$$f_{eq,Rd} = f_{yd} \frac{f_{yk}}{Y_m} \quad (10)$$

DUMBY (2014), salienta que todas as combinações relevantes de cargas extremas devem ser levadas em consideração ao verificar o limite plástico e que estado limite de ruptura à tração deve ser tomado como o estado em que a tensão seccional bruta atinge o valor de cedência.

2.6.2 Estado Limite de Plastificação devido a Cargas Cíclica

O estado limite de plasticidade cíclica deve ser tomado como a capacidade da estrutura para resistir à ciclos repetidos de carga e descarga que leva à quebra local e ao esgotamento da capacidade de absorção do material (DUMBY, 2014).

Segundo DUMBY, 2014, todas as cargas ditas como variáveis (tais como as cargas aplicadas e as variações de temperatura) que podem conduzir a cedência, e que apareçam mais do que três ciclos de vida da estrutura, devem ser consideradas quando se verifica a plasticidade cíclica de um elemento estrutural esbelto e comprido.

2.6.3 Estado de Flambagem

O estado limite de flambagem é considerado como sendo o estado em que toda a estrutura ou uma parte dela desenvolve repentinamente grandes deslocamentos normais à superfície da casca, que são causados devido à perda de estabilidade a compressão ou a força de cisalhamento da superfície da parede do tubo, possibilitando falhas trágicas ocasionadas devido a incapacidade de manter qualquer aumento das resultantes de tensões (DUMBY, 2014).

Para PESTANA (2016), a verificação ao estado limite de flambagem segue as seguintes condições:

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}}; \quad \sigma_{\theta,Rd} = \frac{\sigma_{\theta,Rk}}{\gamma_{M1}}; \quad \tau_{x\theta,Rd} = \frac{\tau_{x\theta,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (11)$$

Em que γ_{M1} é igual a 1,0 e $\sigma_{x,Rd}$, $\sigma_{\theta,Rd}$ e $\tau_{x\theta,Rd}$ são as características do tubo nas suas três vertentes.

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_{yk}; \sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} \cdot f_{yk}; \tau_{x\theta,Rk} = \chi_{\tau} \cdot \frac{f_{yk}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

Onde, os fatores de redução de flambagem $\chi_x, \chi_{\theta}, \chi_{\tau}$ são determinados em função da esbeltez relativa da casca $\bar{\lambda}$.

$$\chi = 1,0 \text{ se } \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad (13)$$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right) \text{ se } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_p \quad (14)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} \text{ se } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \quad (15)$$

Em que,

α - é o fator de redução elástico por imperfeições;

β - é o fator de intervalo plástico;

$\bar{\lambda}_0$ - é a esbelteza relativa ao esmagamento;

$\bar{\lambda}_p$ - é o valor da esbelteza relativa plástica dado por:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (16)$$

2.6.4 Estado de Fadiga

O estado limite de fadiga deve ser tomado como o estado em que corresponde a capacidade da estrutura para resistir a ciclos repetidos de aumento e diminuição de tensão nos quais podem levar ao desenvolvimento de uma fenda por fadiga (DUMBY,2014).

Para SIRQUEIRA, 2008, a verificação para este estado é analisada através de coeficientes parciais de segurança apropriados. Estes, por sua vez são aplicados afim de garantir, com um aceitável nível de probabilidade, que a performance de uma estrutura seja satisfatória durante a sua vida útil projetada, tal que seja improvável a ocorrência de falha por fadiga ou que sejam necessários reparos de danos causados pelo fenômeno.

$$Y_{Ff} \cdot \Delta_{\sigma_E} \leq \frac{\Delta\sigma_R}{Y_{Mf}} \quad (17)$$

Onde,

Y_{Ff} – é o fator parcial de carregamento de fadiga;

Y_{Mf} – é o fator parcial de resistência da fadiga;

Δ_{σ_E} - é a constante equivalente da amplitude da tensão espectral considerada;

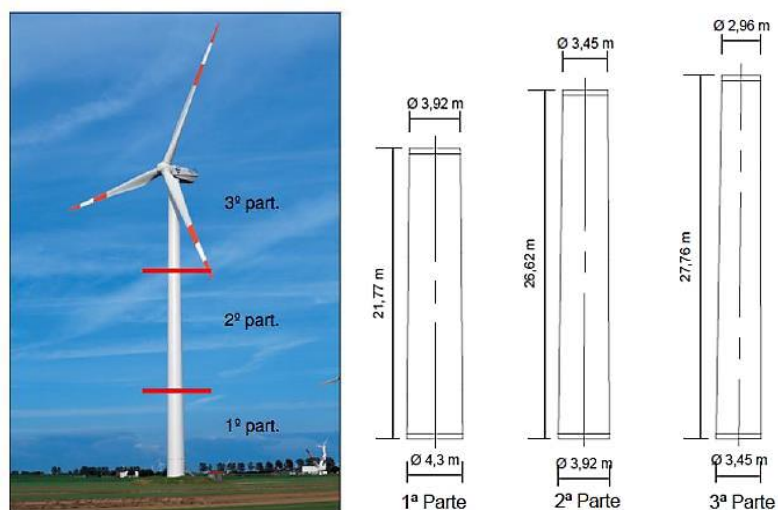
$\Delta\sigma_R$ – é a tensão da fadiga associado ao detalhe da categoria e ao número de ciclos da tensão espectral considerados.

3 Revisão da Literatura

Com o objetivo de analisar o comportamento das torres dos aerogeradores, nesta seção, apresentaremos alguns trabalhos nacionais relacionados à análise estrutural, ao projeto estrutural e à análise dinâmica de torres tubulares de aço para aerogeradores de eixo horizontal.

SIRQUEIRA (2008), em seu trabalho de dissertação, investigou uma torre de suporte de aerogerador modelo MM92 da empresa Repower, com potência nominal de 2 MW, bastante presente em países europeus como Portugal, Espanha e Alemanha. Este modelo de torre é considerado, atualmente, como um dos modelos de melhor tecnologia de captação de energia. Sua produção inicia a partir de uma velocidade de vento de 3 m/s e é interrompida quando a velocidade atinge 24 m/s. Quanto às suas características, o modelo possui um formato tronco-cônico vazado e tem uma altura total de 76,20 m, subdividida em três segmentos (segmento do topo). O primeiro segmento possui uma altura de 21,77 m, diâmetro na base de 4,30 m e no topo de 3,917 m; o segundo segmento possui uma altura de 26,62 m, diâmetro na base de 3,917 m e no topo de 3,45 m; e o terceiro segmento com altura de 27,81 m, diâmetros na base de 3,45 m e no topo de 2,96 m. É importante salientar que a espessura da parede do tubo varia ao longo de sua altura entre 30 mm na base e 12 mm no topo.

Figura 16 - Representação da torre eólica MM92.

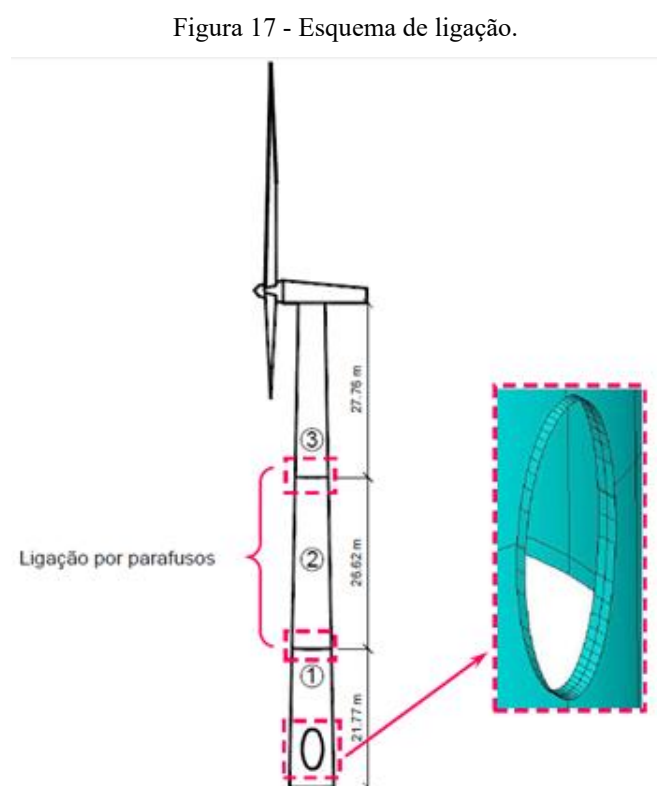


Fonte: SIRQUEIRA 2008

Na figura 16, pode-se observar uma igualdade na dimensão dos diâmetros que compõe as partes. Isto se faz necessário para se ter uma superfície externa contínua, ou seja, uma superfície plana.

Quanto ao sistema de ligação entre os segmentos da torre, este foi realizado por aparafusamento, sendo empregado um total de 464 parafusos: parafusos com diâmetro de 45 mm para a ligação do primeiro segmento com a fundação e com o segundo segmento; parafusos de 39 mm de diâmetro ligando o segmento ao terceiro; e parafusos de 30 mm ligando o terceiro segmento ao topo.

É importante evidenciar que o modelo investigado apresenta duas aberturas: uma maior para acesso interno e outra para ventilação, ambas as aberturas têm o formato de uma elipse com enrijecedores perpendicular à parede do tubo (Figura 17).



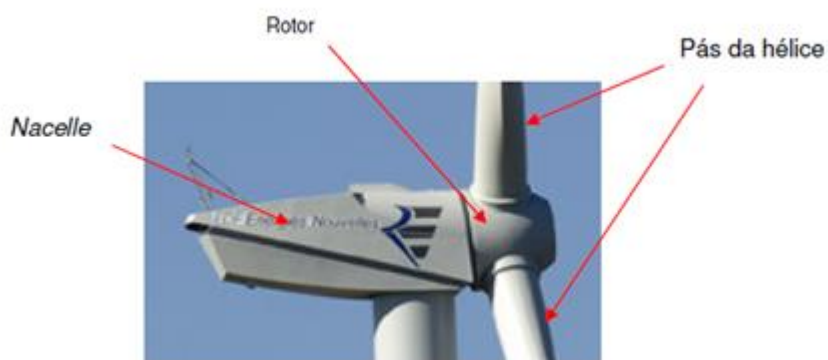
Fonte: SIRQUEIRA, 2008

Vale destacar que, o tubo (torre), os flanges e o enrijecedor de abertura da porta são fabricados em aço S355 no qual possui um módulo de elasticidade de 205 GPa e uma tensão de escoamento de 355MPa.

A parte superior da torre é composta por uma cabine, um rotor e três pás de hélice. Todos os equipamentos mecânicos e elétricos chegam a pesar 6900 kg. As pás, por sua vez, somam uma massa de aproximadamente 24000kg. As mesmas são fabricadas com resina plástica reforçada com fibra de vidro e chegam a medir 45,20 m e alcançam uma superfície de varredura de 6720 m².

A Figura 18 ilustra a cabine, o rotor e as pás da hélice da torre modelo MM92.

Figura 18 - Parte superior da torre.



Fonte: SIRQUEIRA,2008

A implementação computacional relativas às análises estruturais foram realizadas empregando-se técnicas usuais de discretização via Método dos Elementos Finitos – MEF, utilizando-se elementos de casca (SHELL 181 da biblioteca do *software* ANSYS). O elemento SHELL 181 é composto por quatro nós com seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações). Esse tipo método é apropriado para estruturas formadas por cascas de espessuras medias e finas e para análise linear e não linear física e geométrica. As malhas dos modelos de elementos finitos foram estabelecidas através de testes de validação de modelagem, isto é, as análises modais

foram realizadas com diversos tamanhos de malhas até obter-se um grau de refinamento adequado. O modelo final foi constituído de 17094 elementos e 17124 nos. As pás, o rotor e a nacele foram representados por elementos de casca com densidades equivalentes aos respectivos pesos.

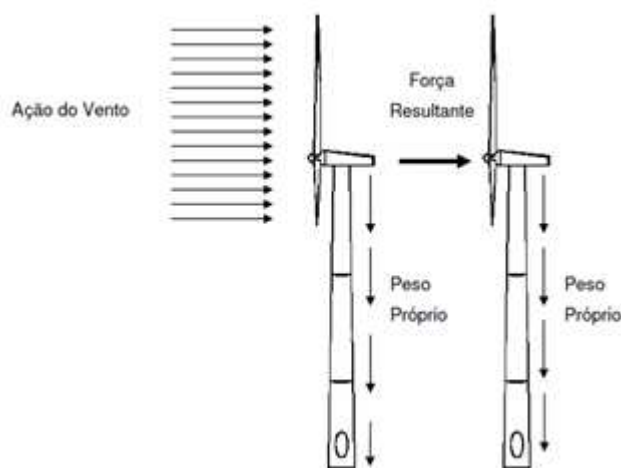
Foram adotadas algumas hipóteses simplificadoras para implementação computacional, sendo:

- A validade da hipótese clássica de Bernoulli a qual considera que as seções transversais permanecem planas e perpendiculares a linha neutra após as deformações, ou seja, os efeitos de empenamento e distorção foram desconsiderados na modelagem;
- As tensões impostas não causam plastificação na seção transversal dos elementos, mas os efeitos de segunda ordem foram considerados;
- A ligação das partes da torre não sofre o efeito de cisalhamento;
- O material da nacele, do rotor e da pá foi admitido com comportamento linear elástico e isotrópico;
- Na parede da torre, no flange e no enrijecedor das aberturas o modelo numérico tem um comportamento elastoplástico bilinear com um encruamento de 5%. A modelagem do amortecimento foi realizada com base na teoria do princípio de vibração estuda por Rayleigh, onde o conceito fundamental foi a oscilação de um sistema linear em uma configuração de equilíbrio.

É importante salientar que, para o cálculo da resposta dinâmica do vento foi aplicado o método simplificado conforme estabelecido na ABNT NBR 6123 (1988). Para SIRQUEIRA (2008), a ação do vento, pode ser vista como um carregamento distribuído sobre as pás do rotor ou, simplificada, como uma força resultante equivalente ao carregamento distribuído na altura

do cubo do rotor da turbina eólica; além disso, considerou-se o peso próprio da torre distribuído ao longo da altura (figura 19).

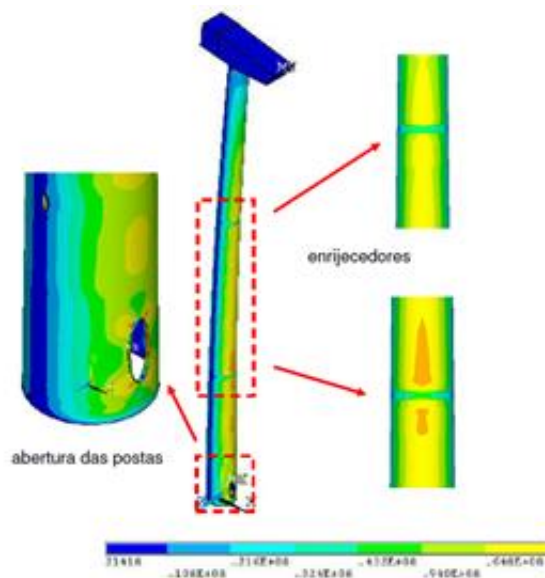
Figura 19 - Representação da ação do vento.



Fonte: SIRQUEIRA, 2008

A figura 20 ilustra a distribuição das tensões equivalente de *Von Mises* ao longo da torre, pela ação do vento de velocidade média de 36m/s, provocando um carregamento de 308,45 kN. O resultado da análise estática levou a uma máxima tensão de *Von Mises* igual a 97,2 MPa e um deslocamento horizontal máximo no topo da torre igual a 51 cm, ou seja, no ponto de concentração da carga. Também, pode-se observar que os maiores valores de tensão de *Von Mises* estão localizados na região de abertura das portas e os menores, no topo da torre. A figura 17 também apresenta a distribuição das tensões nos enrijecedores onde se encontra os menores das tensões de *Von Mises*.

Figura 20 - Distribuição de tensão.



Fonte: SIRQUEIRA,2008

Para a resposta dinâmica da torre, SIRQUEIRA (2008) verificou análises de autovalores e autovetores, harmônica e análise transiente. Na análise de autovalores e autovetores obteve as seguintes respostas:

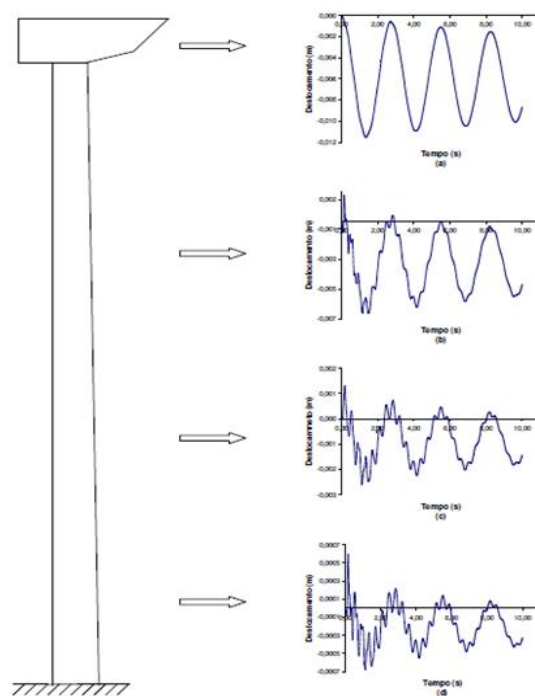
- No primeiro modo de vibração, predominou a flexão no plano XY (0,36 Hz);
- No segundo modo de vibração, predominou a flexão no plano YZ (0,36 Hz);
- No terceiro modo de vibração, predominou a torção em torno do eixo vertical global Y (2,59 Hz);
- No quarto modo de vibração, predominou novamente a flexão no plano XY (2,64 Hz);
- No quinto e no sexto modo, predominaram as flexões no plano YZ (2,89 Hz e 7,90 Hz, respectivamente).

Na análise harmônica, SIRQUEIRA (2008), verificou o comportamento dinâmico da torre sob um carregamento cíclico. A ideia do processo foi calcular a resposta da estrutura para várias frequências e obter um gráfico da resposta (deslocamento nodal) em função da frequência. Para isso, foi considerado uma carga determinística senoidal com valor máximo de 308,45 kN correspondente a ação do vento atuando sobre as pás da torre eólica. As frequências de excitação

foram variadas considerando-se um intervalo de 0 a 20 Hz. E concluído que a influência do primeiro modo de vibração na resposta do modelo da torre é preponderante, ou seja, a torre comporta-se como uma viga engastada e livre.

Na análise transiente o foco recaiu sobre a determinação da resposta dinâmica ao longo do tempo. Para tal, foi considerada novamente uma carga determinística senoidal com valor máximo de 308,45 kN que corresponde a ação do vento, de forma simplificada, atuando nas pás da torre eólica. Para a integração das equações de movimento foi utilizado o algoritmo de Newmark com um intervalo de integração, Δs , igual a 0,002s ($\Delta s = 0,002$) e foi adotado um coeficiente de amortecimento ξ , igual a 1,5% ($\xi = 1,5\%$). A Figura 21 mostra os deslocamentos translacionais horizontais no tempo de vários pontos ao longo da altura da torre. Observa-se, claramente, a predominância da frequência fundamental no gráfico deslocamento vs. Tempo do topo da torre. Além disso, a resposta dinâmica da torre diminui paulatinamente com o tempo devido ao amortecimento estrutural.

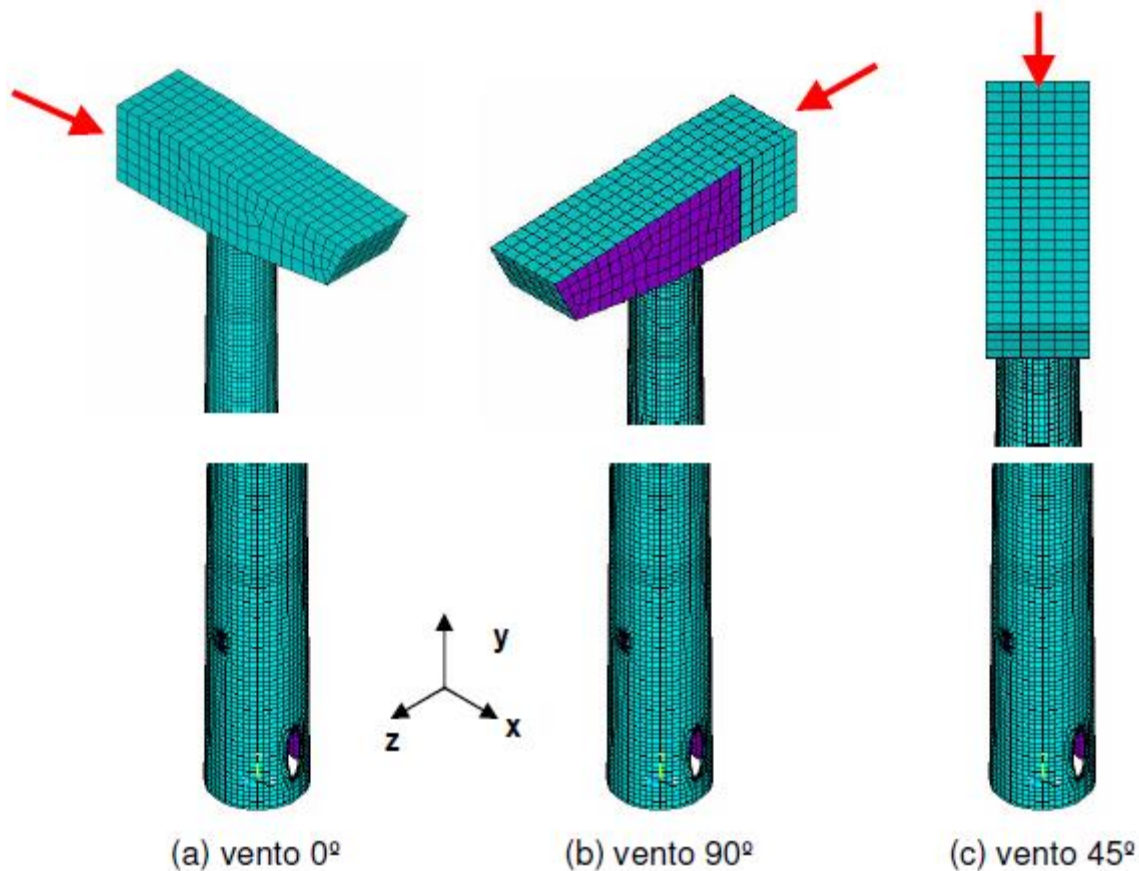
Figura 21 - Variação dos deslocamentos horizontais ao longo da altura do modelo estrutural.



Fonte: SIRQUEIRA, 2008

Quanto a análise não linear estática, SIRQUEIRA 2008, verificou o deslocamento a partir da aplicação da carga no centro do rotor analisando-a em três posicionamento diferente da nacele em relação as aberturas da torre, sendo: na direção do eixo x (vento 0°), na direção do eixo z (vento a 90°) e entre os eixos x e z (vento a 45°). A figura 22 ilustra as três diferentes posições:

Figura 22 - Possíveis posições para aplicação de carga.



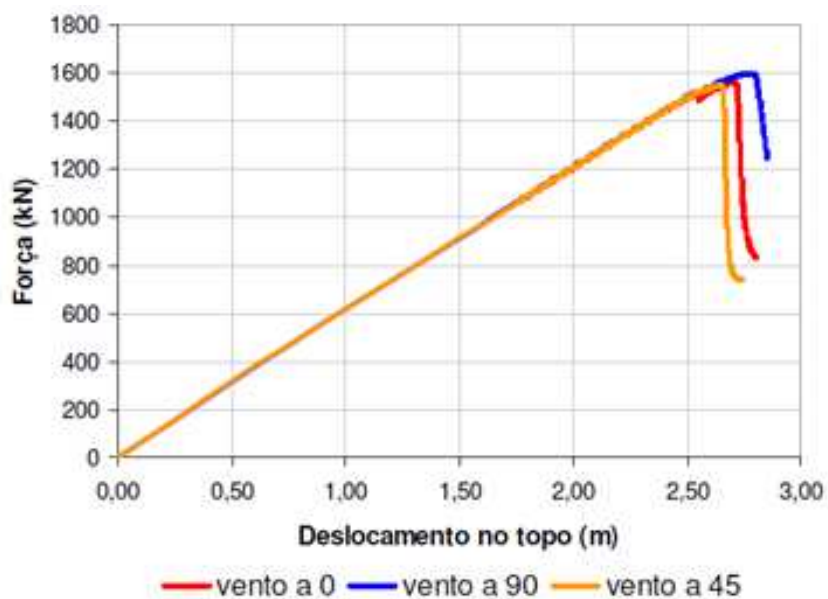
Fonte: SIRQUEIRA,2008

Na Figura 23 o gráfico mostra o carregamento atuante no centro do rotor da torre *versus* o deslocamento no ponto de aplicação da carga simulando a ação do vento sobre as pás da hélice. Inicialmente, observou que em todas as posições os primeiros valores de tensões surgiram próximos da tensão de escoamento entre enrijecedores e na(s) região(oes) de abertura(s) da torre; posteriormente, pode-se observar a ocorrência de plastificação na região das aberturas; por fim observou-se o aparecimento de flambagem local (figura 24) quando aplicado um

carregamento máximo de 1559,92 kN, 1595,5 kN e 1542,73kN, no ângulo de 0°, 90° e 45°, respectivamente. O autor ainda salienta que, na região com ocorrência de flambagem local foi apresentada uma deformação elevada, ou seja, a plastificação continuou a aumentar havendo a redistribuição de tensões no modelo.

A figura 23 ilustra as três curvas de carregamento *versus* deformação.

Figura 23 - Curvas carregamento x deslocamentos.



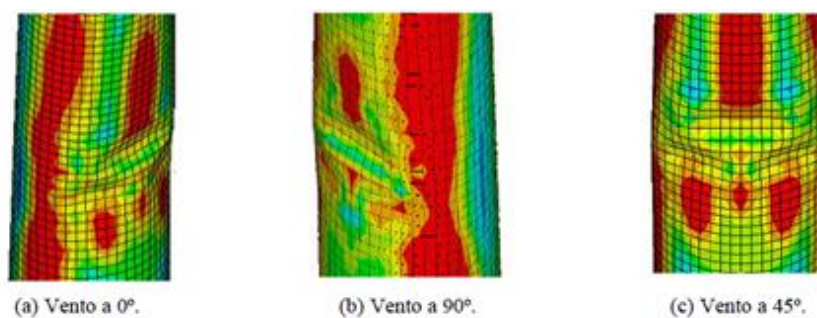
Fonte: SIRQUEIRA 2008

A tabela 2 informa os valores máximos de carregamento com seus deslocamentos correspondentes.

Tabela 2 - Carregamentos e deslocamentos máximos para as três posições de força analisada

	Direção da Ação do Vento		
	0°	90°	45°
Carregamento Máximo (kN)	1559,92	1595,5	1542,73
Desl. Máx. correspondente (m)	2,70	2,78	2,66

Figura 24 - Flambagem local da parede do modelo da torre analisada.



Fonte: SIRQUEIRA 2008

SIRQUEIRA (2008), obteve êxito quanto aos resultados de sua pesquisa, visto que o método numérico desenvolvido pelo mesmo mostrou-se eficaz na previsão das análises estática, dinâmica e não linear quando comparado com os resultados experimentais. Pode-se concluir que, no estudo da parcela dinâmica a resposta da estrutura pode ser determinante no seu comportamento e que somente a utilização de uma análise estrutural estática pode resultar no mau dimensionamento da torre e, possivelmente, possíveis acidentes.

FEIJÓ (2010) estudou duas formulações para otimização do projeto de torres tubulares para aerogeradores eólicos. O principal objetivo era achar o custo mínimo, minimizando o peso total da torre. Com isso, as variáveis de projeto foram os diâmetros médios dos segmentos e a espessura da casca desses segmentos. Primeiramente, foi analisado uma torre de aço cilíndrica modelada segundo a teoria de viga clássica de Euler-Bernoulli; em seguida, verificou-se uma torre formada por segmentos de tronco de cone, discretizada como elementos finitos de pórtico plano.

Para a realização das análises estática, FEIJÓ 2010, considerou o comportamento linear físico, homogêneo e isotrópico do material (aço ASTM A36 – com tensão de escoamento $F_y = 250 \text{ MPa}$). As torres foram analisadas como vigas engastadas na base e livre no topo sujeitas a carga axial de compressão no topo da torre decorrente do peso da nacela e das pás da turbina; e, uma carga trapezoidal aplicada transversalmente ao longo do comprimento da torre referente a ação estática do vento que seguiu as prescrições da ABNT NBR 6123 (1988). É importante salientar que, apesar de ser significativo e possuir a mesma ordem de grandeza dos

aerogeradores, o peso próprio da torre não foi considerado e que a análise quanto a verificação dinâmica e de fadiga foi desconsiderado.

Quanto as verificações de segurança relativas aos Estados Limites Últimos (ELU) e aos Estados Limites de Serviço (ELS), os mesmos seguiram os seguintes códigos normativos: ABNT NBR 8800 (2008) e ABNT NBR 8681 (2004).

Para o estudo da otimização da torre, FEIJÓ (2010) utilizou o método do Algoritmo Genético (AG) em um programa no ambiente MATLAB. O objetivo do modelo de otimização corresponde a minimização do peso da torre, com imposição de restrições referentes a resistência, a rigidez, a estabilidade, a frequência natural, ao deslocamento no topo da torre ($L/400$; conforme ABNT NBR 8800, 2008) e ao limite de diâmetro do tubo para transporte.

Depois de realizada a otimização do modelo no software MATLAB, FEIJÓ, 2010 modelou a solução em um software de elementos finitos (ABAQUS), utilizando-se um modelo de casca afim de obter-se os resultados de deslocamento e de tensões equivalentes de *von Mises*. FEIJÓ (2010) modelou quatro tipos de torre: uma torre cilíndrica com 45 m de altura, dividida em segmentos de mesmo comprimento (15 m cada seção); uma torre tronco-cônica com 45 m de altura (dois segmentos de 22,5 m e cada um destes discretizado em 3 elementos finitos, totalizando 6 elementos para toda a torre); uma torre tronco-cônica com 45 m de altura (três segmentos de 15 m e cada um também sendo discretizado em 3 elementos finitos) e por fim uma torre tronco-cônica com 60 m de altura (três segmentos de 20 m).

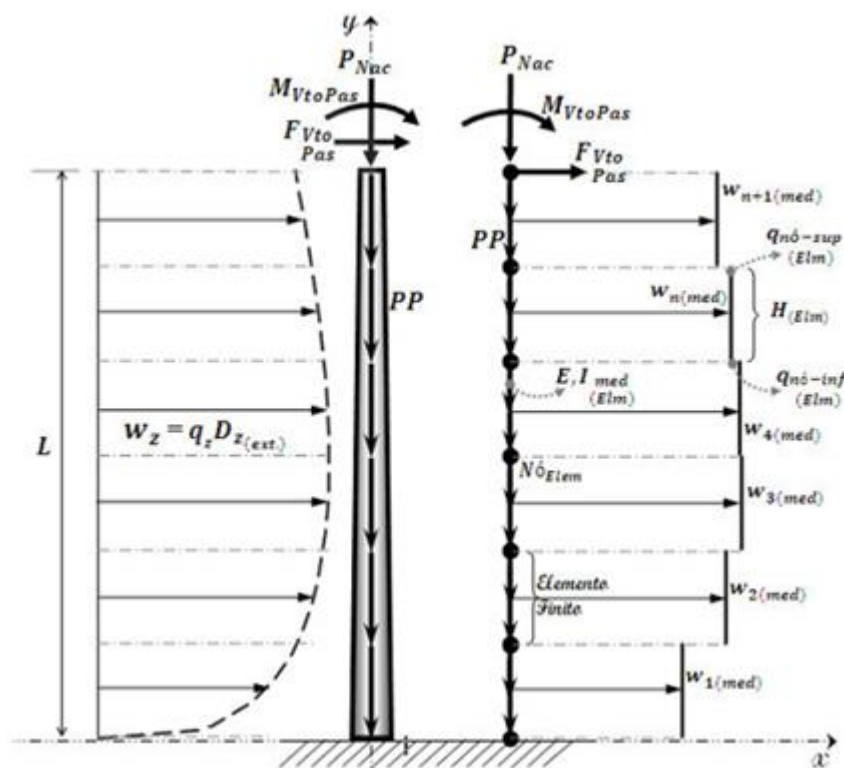
Lima (2011) estudou a otimização de torres eólicas tubulares de aço, composta de segmentos em tronco de cone, com o objetivo de formular um modelo de otimização afim de minimizar o peso da torre e conseqüentemente seu custo. A investigação tomou como base os estudos de LAVASSAS et al. (2003) e de FEIJÓ (2010).

A discretização da torre foi feita por meio do elemento finito de pórtico plano com seis graus de liberdade, admitindo-se o elemento com seção transversal constante e o efeito de inércia nas

direções dos deslocamentos em cada nó. Vale salientar que os efeitos devidos à torção decorrente da ação da força do vento sobre as pás da turbina eólica foram desconsiderados.

A figura 25 ilustra as condições de carregamento da torre e o modelo de EF com os elementos de barra adotados.

Figura 25 - Modelo e discretização da torre analisada.



Fonte: LIMA,2011

As cargas consideradas atuando sobre a torre (Figura 25), são denominadas por:

- P_{Nac} - peso do conjunto cubo/pás/nacele;
- PP - peso próprio da torre;
- F_{VtoPas} - força resultante do vento que incide perpendicularmente ao plano formado pela rotação das pás;
- M_{VtoPas} - momento resultante no topo da torre, devido a “ação de F_{VtoPas} ” com a excentricidade formada pela distância entre o eixo do rotor e o topo da torre.

O carregamento do vento incidente sobre a torre foi simulado estaticamente utilizando a ABNT NBR 6123 (1988). Para a ação da carga resultante do vento sobre as pás do aerogerador foi considerado o valor utilizado por LAVASSAS et al. (2003) para as torres com altura de 45 m e 60 m e, por extensão, aplicou uma carga proporcionalmente maior para as torres com 78 m e 91 m de altura. LIMA (2011), justifica que nem sempre é possível obter informações técnicas (a respeito das forças sobre as pás, especificamente), pois os fabricantes de turbinas eólicas têm a preocupação em reservar informações para que não sejam reveladas aos concorrentes mesmo que sejam patenteadas.

LIMA (2011) considerou como carga axial de compressão as ações do peso próprio da torre (PP distribuída ao longo do seu comprimento) e o peso do aerogerador (P aplicada no topo, correspondente ao conjunto nacele/rotor). Não foram consideradas as massas das instalações e dos equipamentos de manutenção ao longo da torre justificando-se que esta parcela da carga forma uma pequena fração do peso próprio da estrutura.

Para a otimização da torre, foi utilizado o método do Algoritmo Genético (AG) em um programa no ambiente MATLAB e, complementarmente, o algoritmo de Programação Quadrática Sequencial - SQP. O objetivo do modelo de otimização corresponde a minimização do peso da torre, com imposição de restrições referentes a resistência, à rigidez, à estabilidade, ao deslocamento no topo da torre ($L/400$; conforme BRUGHUIS, 2003), à geometria, à frequência natural fundamental (mínimo de 0,5 Hz; conforme LAVASSAS et al., 2003) e ao limite de diâmetro da torre para transporte (adotado um máximo de 4,20 m). As soluções ótimas obtidas foram modeladas no software ABAQUS por meio de elementos finitos de casca. Salientando que não foram levadas em consideração as aberturas, enrijecimentos, flanges e plataforma interna da torre.

Inicialmente foram implementados modelos de torres cilíndricas e, posteriormente, de torres tronco-cônicas. Para o cálculo da torre cilíndrica de 45 m foi utilizado os mesmos parâmetros do aço aplicado no trabalho de FEIJÓ (2010), ou seja, tensão de escoamento $f_y=250$ Mpa e módulo de elasticidade $E = 210$ Gpa, de modo a permitir compatibilização com o modelo de

comparação. Pode-se verificar que o peso da torre chega ser maior (35% maior) quando leva-se em conta a frequência natural em comparação a solução sem frequência natural, e que o valor obtido para a frequência natural igualou-se, praticamente, ao valor da frequência limite (imposta). Isso evidencia a importância da decisão quanto a concepção de rigidez a ser adotada para o projeto da torre. Vale destacar que ambos os casos foram estudados com a carga de vento atuando apenas na torre para poder-se comparar com os resultados obtidos por FEIJÓ, (2010).

A torre com formato tronco-cônica de 45 m (três segmentos de 15 m) foi inicialmente modelada sem frequência fundamental e com a carga do vento agindo somente sobre a torre. Foi observada uma redução de 35% do peso da torre quando comparada com a torre cilíndrica de mesma altura, visto no parágrafo anterior. LIMA (2011) ainda observou que, se for levada em consideração que a velocidade inicial de rotação das turbinas esteja entre 15rpm e 18rpm (0,25 Hz a 0,30 Hz de frequência), há possibilidade de ocorrência de problema de ressonância, evidenciando a necessidade de estabelecer restrições quanto a frequência fundamental, afim de se evitar problemas de natureza estrutural.

LIMA (2011) ainda verificou a torre cônica de 45m com a carga de vento sobre as pás do rotor e com a restrição na frequência fundamental contemplada. O resultado obtido indicou grande influência da força do vento quando esta é considerada atuando tanto na torre quanto sobre as pás, visto que houve um aumento de 560% no peso da torre; isso permitiu, segundo HAU (2006), classificar a torre como estrutura muito rígida e afastou o risco de ressonância, já que a frequência natural fundamental da torre se elevou para 1,35748 Hz.

No modelo cônico com 60m, a restrição de deslocamento imposta para o topo da torre foi responsável pela limitação da solução e a primeira frequência natural da estrutura foi de 1,11 Hz (18% inferior ao caso da torre com 45 m com frequência).

Para as torres com 78 m (seis segmentos de 13 m cada) e com 91 m (seis segmentos de 15,17 m cada) os valores encontrados da frequência natural fundamental foi de 0,60 Hz e 0,53 Hz, respectivamente. As restrições de deslocamento no topo e de frequência limite foram as mais críticas para obtenção da solução ótima; então, indicou-se que a rigidez e a possibilidade de

ressonância são pontos críticos inclusive na consideração dos efeitos dinâmicos dos carregamentos.

Lima (2018), com objetivo de analisar a estabilidade elástica de uma torre tubular de aço, com 120m de altura, estudou a peça de sustentação mediante o método dos elementos finitos (MEF) no software ANSYS, no qual considerou a torre engastada na base, com 4 nós e 6 graus de liberdade por nó, e 7272 elementos de casca. A nacele do aerogerador também foi modelada com elementos finitos, porém considerando sólidos tetraédricos, possuindo 10 nós e 3 graus de liberdade de translação por nó, considerando a nacele formada por uma massa uniforme.

Vale destacar que o aço considerado no modelo da torre foi o S355J2, seguindo as especificações da EM 10025-2 (2004), já o aerogerador seguiu o padrão SWT -3.2-113 (SIEMENS,2014), conforme características ilustradas na figura 26.

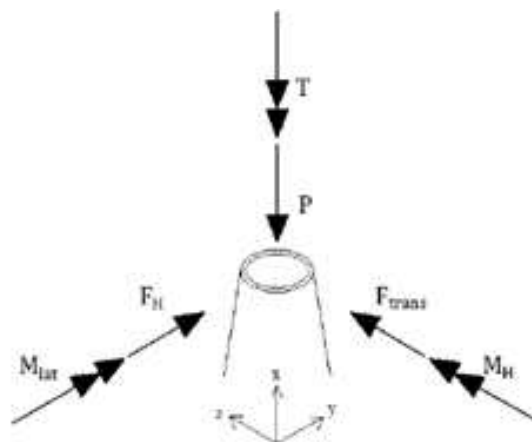
Figura 26 - Característica da torre investigada.

TIPO DE PARÂMETRO	
Classe Segundo IEC (<i>International Electrotechnical Commission</i>)	IIA
Potência nominal (MW)	3,2
Diâmetro do rotor (m)	113,0
Comprimento da pá (m)	55,0
Área varrida pelo rotor (m ²)	10000
Altura do cubo do rotor (m)	79,5 – 142,0 (usou-se 122,5 m)
Regulação de potência	Ângulo de passo regulado
Energia elétrica produzida anualmente a 8,5 m/s	14402 MWh
Peso da nacele (tf)	78
Peso do rotor (tf)	67

Fonte: LIMA,2018

Quanto aos valores de forças e momentos máximos aplicados ao topo da torre, estes tiverem como referência os valores estabelecidos por Asibor et al. (2015) e será ilustrado na figura a seguir:

Figura 27 - Representação das forças/momentos aplicados ao topo da torre.



Fonte: LIMA,2018

Tabela 3 - Carregamentos aplicados ao topo da torre

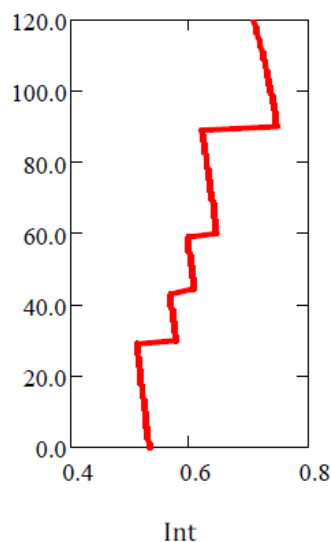
P (N)	F_H (N)	F_{trans} (N)	M_H(N.m)	M_{lat} (N.m)	T (N/m)
4299033	662186,43	32106,07	46644601	4147944	1985250,43

Fonte: Lima,2018

Afim de avaliar a confiabilidade e a precisão dos resultados numéricos obtidos se utilizou um modelo de elementos finitos, no qual se considerou a torre engastada na base, com 7272 elementos de casca, designado por SHELL 181, com 4 nós e 6 graus de liberdade por nó. Complementando o modelo, simulou-se a torre em conjunto com sua fundação. A sapata foi modelada com 11766 elementos sólidos tetraédricos, com 20 nós e 3 graus de liberdade de translação em cada nó. E além disto, para a avaliação da interação solo-estrutura, a reação elástica do solo foi modelada com 2145 elementos de mola com rigidez axial, colocados na base da sapata.

Para a obtenção dos esforços solicitantes de cálculo de 2º ordem geométrica houve a verificação das seções transversais da torre projetada, isto, sem considerar a redução das rigidezes à flexão e axial, uma vez que a análise realizada é elástica linear. A partir dos resultados, pode-se observar uma mudança significativa nos degraus resultantes referente a espessura da chapa, nas cotas de 30,45, 60 e 90m, como pode ser visto na figura 28, expressa a seguir:

Figura 28 - Expressão de interação para esforços axiais.



Fonte:LIMA,2018

Para o cálculo do esforço resistente à compressão simples utilizou-se o valor de carga de flambagem igual a 99607 kN, calculado a partir do método energético. Os quatro primeiros modos de instabilidade da torre engastada na base e discretizado com elementos finitos de casca resultaram em uma flexão nos planos YZ e XY; a partir do quinto modo ocorreu uma série de modos de flambagem de ovalização.

A análise do estado limite de serviço de deslocamento máximo apresentou um deslocamento transversal de 1º ordem e de 2º ordem no topo da torre, com grau de deslocabilidade indo desde 1,0612 a 1,07538. Os valores encontrados tornou o deslocamento transversal o critério determinante para a análise da estabilidade. Quanto a distribuição de Von Mises para o modelo investigado, a máxima tensão obtida (182,22 MPa) encontra -se na junção entre os dois últimos segmentos da torre na cota de 90m, porém com o valor abaixo da tensão admissível (208,82 MPa) do aço utilizado S355J2.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou estudar o comportamento estrutural de torres que suportam aerogeradores. Para tal, realizou-se uma revisão bibliográfica onde pode-se compreender a estabilidade da torre quando submetida a ações estáticas (linear e não linear) e dinâmicas. A primeira verificação foi voltada ao estudo desenvolvido por SIRQUEIRA (2008), em que investigou a resposta quanto a análise estática e dinâmica de uma torre modelo MM92 da Repower. No estudo, a metodologia de análise desenvolvida levou em consideração os efeitos de não linearidade do material e geometria, o peso próprio da torre e dos equipamentos necessários para o funcionamento e, bem como a ação do vento sobre as pás da hélice da torre. Os modelos numéricos, elaborados com base no método dos elementos finitos demonstrou-se bastante útil e eficaz quando comparado com resultados experimentais fornecido por REBELO e SILVA (2007). SIRQUEIRA (2008) concluiu que há segurança estrutural na torre avaliada, visto que o carregamento resultante não gerou uma tensão maior que a tensão de escoamento do material. A segunda verificação diz respeito ao estudo elaborado por FEIJÓ (2010). O mesmo, afim de reduzir o custo total da torre, procurou minimizar o peso da mesma; para isso, desenvolveu um estudo voltado para a otimização do projeto de torres tubulares para geradores eólicos de aço. Primeiramente, foi considerado um modelo simplificado de uma torre cilíndrica de 45m de altura, modelada como viga clássica, engastada na base e livre no topo. A torre estava sujeita a ação do carregamento do vento e de uma carga de compressão axial referente à massa do aerogerador; e teve como variável de projeto o diâmetro médio da torre e as espessuras das paredes de cada segmento. O segundo modelo trata-se de uma torre composta de segmentos de tronco de cone, onde foi discretizada em elementos finitos prismáticos de pórtico plano. Para este último, analisou-se duas alturas, uma de 45m e uma de 60m. Os resultados obtidos nas otimizações foram modelados no software ABAQUS como elementos finitos de casca e tiveram como resposta uma redução no peso da torre; resposta esta que está vinculada a consideração de algumas restrições como as relativas às vibrações e à estabilidade da estrutura. A terceira verificação partiu do trabalho de LIMA (2011) que, assim como FEIJÓ (2010), buscou formular um modelo de otimização. Para tal, focou em uma solução de peso mínimo, tendo como variáveis de projeto os diâmetros externos e as espessuras de chapas característica de cada segmento. A concepção de análise adotada na formulação não linear geométrica foi pelo método dos elementos finitos

onde trabalhou-se como uma viga engastada na base e livre no topo. O carregamento foi tratado de forma estático, considerando a ação do vento sobre a torre e/ou nas pás do rotor, a massa do conjunto rotor/nacele concentrada no topo da torre e seu peso próprio. No trabalho, a análise foi verificada com projetos de torres com alturas de 45m,60m,78m e 91m. Inicialmente, o modelo de otimização foi aplicado para torres de 45m (cilíndrica e cônica), sem atuação da ação do vento nas pás, sem a restrição de frequência e considerando o aço A -36 ($f_y= 250\text{MPa}$) e adotando $E=210\text{GPa}$, objetivando comparação com o trabalho de FEIJÓ (2010). Para as torres cilíndricas os resultados obtidos revelaram a importância da inclusão da frequência natural, uma vez que sua inclusão gerou um aumento no peso mínimo da torre. Para as torres cônicas, o resultado foi considerado satisfeito visto que houve uma redução significativa no peso mínimo devido a geometria da torre. No entanto, a restrição crítica passou a ser de flambagem local ao invés de deslocamento no topo. Para as torres cônicas de 60m, por ser mais alta, o colapso ficou mais sucessível de ocorrer pelo risco de ressonância ou pela não resistência do material aos esforços de flexão composta. As torres de 78 e 91m foram classificadas como flexíveis, uma vez que as restrições de deslocamento no topo e de frequência limite foram as mais críticas à obtenção ótima, indicando que a rigidez e o risco de colapso por ressonância são seus pontos mais vulneráveis. Por fim, o quarto trabalho foi extraído da tese elaborado por LIMA (2018). O autor teve como objetivo principal a análise da estabilidade elástica de uma torre tubular de aço com 120m de altura. O projeto desenvolvido foi modelado em elementos finitos com auxílio do software ANSYS objetivando analisar a interação do conjunto estrutural, torre-sapata-solo. O resultado do sistema tendeu para uma deformação final estável, quando considerada a interação solo-estrutura, visto que houve estabilidade. Quanto a tensão de *von Mises*, ao longo da torre, nenhum ponto da estrutura atingiu a tensão admissível do aço empregado.

5 REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123, NBR 6123, “Forças devidas ao vento em edificações”. 1988

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8681, “Ações e segurança nas estruturas”. 2003

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800, “Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edificações”. 2008

ABEEOLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica. Boletim anual, São Paulo 2020. Disponível em: < <http://abeeolica.org.br/>>.>

Amarante, O. A. C., Brower, M., Zack, J., & Sá, A. L. (2001). Atlas do potencial eólico brasileiro. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>: . Acesso em: 05 jun. 2022.

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica. Energia Eólica. Disponível em : [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf) Acesso em: 20/04/2022.

Araujo, I. D. G. “Análise modal operacional: métodos de identificação baseado na transmissibilidade”, Dissertação de doutorado, USP, SP, 2015

Brasil, R. M. L. R. F., Silva, M. A. “Introdução à dinâmica das estruturas para engenharia civil”, SP, 2013

Dellezzopolles Jr., C. F. “Análise dinâmica de torres de energia eólica”, Dissertação de mestrado, UnB, Portugal, 2014

Dumby, H. J. M. “Aspectos de dimensionamento de torres eólicas tubulares em aço”, Dissertação de mestrado, FCTUC, Portugal, 2014

Faria, Patricia de Oliveira; NORONHA, Marcos Aurelio Marques. “Fundações de Torres Eolicas: Estudo de Caso. Criciúma: Geosul, 2013.

Feijó, B. P. “Otimização de torres de aço para geradores eólicos”, Dissertação de mestrado, UFC, CE, 2010

Ferreira, I. A. “Influência da fundação e do solo da frequências naturais de torres eólicas”, USP, SP, 2021

Hau, E. Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economic. 2ª. Ed. Krailling-GERMANY: Springer, 2006

GWEC - Conselho Global de Energia Eólica. Relatório Global 2022. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/03/GWEC-GLOBAL-WIND-REPORT-2022.pdf>
Acesso em 21/04/2022

Lima, J. B. C. A. “Contribuições para otimização estrutural de torres tubulares de aço para turbinas eólicas”, Dissertação de mestrado, UFC, CE, 2011

Lima, D. M. “Análise da estabilidade elástica, análise dinâmica e controle de vibração em torres tubulares de aço para aerogerador de eixo horizontal”, Tese (Doutorado em engenharia civil) - Centro de Tecnologia e Geociência – UFPE, Recife, 2018.

Moraes, D. R. “Análise dinâmica estrutural de aerogeradores sob a ação do vento”, Dissertação de mestrado, UFRJS, POA, 2020

Oliveira, J.A.V.A. “Análise estática e dinâmica de estruturas reticuladas planas em microcomputador”, Dissertação de mestrado, 1987

Pestana, D. A. C. “Sistemas estruturais para torres eólicas”, Dissertação de mestrado, FCEE, Portugal, 2016

Porfírio, A. G. J. “Projeto estrutural otimizado de torres tubulares de aerogeradores em material compósito”, Dissertação de mestrado, UFA, AL, 2019

Santos, N. A. A. S. “Otimização de torres de aço para aerogeradores eólico”, Dissertação de mestrado, UERJ, RJ, 2013

Santos, R. “Melhoria no chanframento das bordas de anéis para soldagem por arco submerso durante a fabricação de torres eólicas: um estudo de caso”, USC, SP, 2017

Sirqueira, A. S. “Comportamento estrutural de torre de aço para suporte de turbinas”, Dissertação de mestrado, UERJ, RJ, 2007.