

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ANTONIO PORFIRIO DA GAMA JUNIOR

**PROJETO ESTRUTURAL OTIMIZADO DE TORRES TUBULARES DE
AEROGERADORES EM MATERIAL COMPÓSITO**

Maceió
2019

ANTONIO PORFIRIO DA GAMA JUNIOR

**PROJETO ESTRUTURAL OTIMIZADO DE TORRES TUBULARES DE
AEROGERADORES EM MATERIAL COMPÓSITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil com área de concentração em Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Márcio André Araújo
Cavalcante

Maceió
2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

G184p Gama Júnior, Antonio Porfirio da.
Projeto estrutural otimizado de torres tubulares de aerogeradores em material compósito / Antonio Porfirio da Gama Júnior. - 2020.
87 f. : il. color.

Orientador: Márcio André Araújo Cavalcante.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2019.

Bibliografia: f. 83-87.

1. Energia eólica. 2. Turbinas eólicas. 3. Aerogeradores. 4. Materiais compósitos. I. Título.

CDU: 624: 620.91



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC



**PROJETO ESTRUTURAL OTIMIZADO DE TORRES TUBULARES DE
AEROGERADORES EM MATERIAL COMPÓSITO**

ANTONIO PORFIRIO DA GAMA JÚNIOR

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 20 do mês de dezembro do ano de 2019.

Banca Examinadora:

Márcio André Araújo Cavalcante

Prof. Dr. Márcio André Araújo Cavalcante
(Orientador – PPGEC/UFAL)

Eduardo Toledo de Lima Junior

Prof. Dr. Eduardo Toledo de Lima Junior
(Avaliador Interno – PPGEC/UFAL)

Janaína Accordi Junkes

Prof.ª Dr.ª Janaína Accordi Junkes
(Avaliador Externo – UNIT)

RESUMO

A energia eólica é uma importante fonte de energia renovável, sendo explorada no Brasil e com forte tendência a aumentar nas próximas décadas, considerando-se o potencial do país. A maneira mais comum de explorar a energia eólica é através das turbinas eólicas, geralmente projetadas para ter a máxima eficiência energética. A torre é uma parte importante do projeto do aerogerador, uma vez que define a posição da turbina eólica e deve ser projetada para suportar diferentes cargas, representando, aproximadamente, 30% do custo total do aerogerador. Os materiais compósitos são uma opção interessante para a fabricação de torres tubulares de aerogeradores de pequeno porte, pois apresentam ótimas relações entre resistência e peso e entre rigidez e peso, além de oferecer maior flexibilidade no projeto estrutural, em comparação com os materiais convencionais. Este trabalho apresenta um estudo de otimização estrutural de torres tubulares de aerogeradores em materiais compósitos, dentro de uma abordagem baseada na resistência dos materiais, na teoria da instabilidade linear e no princípio dos trabalhos virtuais, além de técnicas de otimização, com o objetivo de minimizar a massa da torre. Comparações são realizadas com torres de aço e de alumínio otimizadas. A minimização da massa da torre através do emprego de técnicas de otimização permite a redução de custos com insumos, transporte, montagem e manutenção da torre, com o objetivo de viabilizar a fabricação de torres de material compósito para pequenos aerogeradores, especialmente aqueles que serão instalados em áreas remotas e de difícil acesso, além de contribuir com o estudo dessa tecnologia ainda pouco explorada no Brasil.

Palavras chaves: energia eólica; aerogeradores; turbinas eólicas; materiais compósitos; otimização estrutural.

ABSTRACT

The wind energy is a valuable renewable energy resource, and it has been explored in Brazil, with a strong tendency to increase in the next decades, considering the Brazil's potential. The most common way to explore wind energy is through wind turbines, usually designed to have maximum energetic efficiency. The tower is an essential part of the wind turbine design, once it defines the wind turbine position and must be designed to resist to different loadings, responding for 30% of the wind turbine cost, approximately. The composite materials are an interesting choice to manufacture tubular towers of small wind turbines, because they present excellent relations between strength and weight, also between stiffness and weight, and they offer more flexibility in the structural design, in comparison with the conventional materials. This work presents a structural optimization study of tubular towers of wind turbines in composite materials, which is based on the strength of materials, the linear instability theory, and the principle of virtual work, to minimize the tower's weight. Some comparisons are made with optimized steel and aluminum towers. The minimization of the tower's weight through the employment of optimization techniques allows a reduction of the costs with materials, transportation, assembling and maintenance of the tower, with the intention to make feasible the manufacturing of composite material towers for small wind turbines, especially those ones that will be installed in remote areas with difficult access, besides contributing with the study of this technology not much explored in Brazil.

Keywords: wind energy; wind turbines; composite materials; structural optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade instalada de energia eólica no mundo.....	19
Figura 2 - Capacidade instalada de energia eólica no Brasil.....	20
Figura 3 - Cata-vento utilizado no bombeamento de água.....	21
Figura 4 - (a) Aerogerador de eixo vertical e (b) aerogerador de eixo horizontal.....	23
Figura 5 - Componentes do aerogerador de eixo horizontal.....	24
Figura 6 - (a) Torre treliçada e (b) torre tubular.....	25
Figura 7 - (a) Manutenção de aerogeradores de pequeno porte e (b) máquina hidráulica.....	26
Figura 8 - (a) Compósito particulado; (b) compósito reforçado por fibras curtas orientadas; (c) compósito reforçado por fibras contínuas orientadas e (d) whiskers.....	28
Figura 9 - Laminado típico constituído por três lâminas.....	28
Figura 10 - Elemento representativo do compósito.....	30
Figura 11 - RVE (Elemento de Volume Representativo).....	32
Figura 12 - Representação do modelo CAA.....	32
Figura 13 - Modelo de Três Fases.....	33
Figura 14 - Ângulo formado pelas fibras em uma lâmina de material compósito.....	37
Figura 15 - Códigos de alguns laminados.....	39
Figura 16 - Forças e momentos resultantes em um laminado.....	41
Figura 17 - Geometria da torre tubular.....	45
Figura 18 - Carregamentos atuantes na torre.....	46
Figura 19 - Excentricidade do peso do conjunto nacelle e rotor.....	47
Figura 20 - Braço de alavanca da força de arrasto em relação ao topo da torre.....	48
Figura 21 - Cargas virtuais $\delta P1$ e $\delta P2$ aplicadas ao longo da torre.....	54
Figura 22 - Espaçamento entre fibras para arranjos quadrático (a) e hexagonal (b).....	57
Figura 23 - Aspectos levados em consideração na otimização da torre tubular.....	65
Figura 24 - Diagrama tensão-deformação dos materiais.....	69
Figura 25 - Otimização estrutural de torres de aço de aerogeradores.....	70
Figura 26 - Otimização estrutural de torres de alumínio de aerogeradores.....	71
Figura 27 - Otimização estrutural de torres de material compósito (Vidro-E/Epóxi) de aerogeradores.....	72
Figura 28 - Otimização estrutural de torres de material compósito (Carbono T800/Epóxi) de aerogeradores.....	73
Figura 29 - Massa das torres otimizadas para diferentes valores de espaçamento entre as seções dos trechos.....	73
Figura 30 - Torre otimizada de aço (seis trechos e 10 centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos).....	74
Figura 31 - Torre otimizada de alumínio (quatro trechos e 10 centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos).....	75
Figura 32 - Torre otimizada de fibra de vidro e epóxi (quatro trechos e 10 centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos).....	76
Figura 33 - Torre otimizada de fibra de carbono e epóxi (seis trechos e 10 centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos).....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução da potência das turbinas eólicas na segunda metade do século 20...	22
Tabela 2 - Modificações necessárias para a estimativa das propriedades elásticas de lâminas reforçadas por fibras transversalmente isotrópicas.....	35
Tabela 3 - Valores obtidos para ventos de baixa velocidade registrados por Niemann. ..	49
Tabela 4 - Parâmetros de resistência das lâminas.....	56
Tabela 5 - Coefficientes da NBR 8800 (2008).....	62
Tabela 6 - Especificações técnicas do Skystream 3.7 da Xzeres.....	67
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do Alumínio 6061-T6 e Aço estrutural A-36.	67
Tabela 8 - Propriedades dos materiais constituintes do material compósito.....	68
Tabela 9 - Propriedades elásticas efetivas e os parâmetros de resistência das lâminas de material compósito.	68
Tabela 10 - Propriedades efetivas do laminado.....	69
Tabela 11 - Percentual de solicitações das restrições não lineares – Aço.....	78
Tabela 12 - Percentual de solicitações das restrições não lineares – Alumínio.....	78
Tabela 13 - Percentual de solicitações das restrições não lineares - Fibra de vidro e epóxi.	79
Tabela 14 - Percentual de solicitações das restrições não lineares - Fibra de carbono e epóxi.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GWEC: *Global Wind Energy Council.*

DW: *Deutsche Welle.*

FEM: *Finite Element method.*

IRENA: *International Renewable Energy Agency.*

IEC: *International Electrotechnical Commission.*

CCA: *Composite Cylinder Assemblage.*

EVR: Elemento de Volume Representativo.

ACG: Auto-Consistente Generalizado.

NBR: Norma Brasileira Registrada.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnica.

PQS: Programação Quadrática Sequencial.

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 3:

E_1 : módulo longitudinal de Young do compósito reforçado por fibras longas.

E_2 : módulo transversal de Young do compósito reforçado por fibras longas.

ν_{12} : coeficiente de Poisson do compósito reforçado por fibras longas.

G_{12} : módulo de cisalhamento do compósito reforçado por fibras longas.

h : altura da fibra e matriz.

t_f : espessura da fibra.

t_m : espessura da matriz.

t_c : espessura do compósito.

V_f : fração volumétrica de fibra.

V_m : fração volumétrica de matriz.

E_m : módulo de Young longitudinal da matriz.

E_f : módulo de Young longitudinal da fibra.

ν_f : coeficiente de Poisson da fibra.

ν_m : coeficiente de Poisson da matriz.

G_f : módulo de cisalhamento da fibra.

G_m : módulo de cisalhamento da matriz.

a : raio da fibra.

b : raio da matriz.

G_{23} : módulo de cisalhamento transversal do compósito reforçado por fibras longas.

k_{23} : módulo de elasticidade volumétrica em estado plano de tensão.

k_f : módulo de elasticidade volumétrica em estado plano de tensão da fibra

k_m : módulo de elasticidade volumétrica em estado plano de tensão da matriz

ν_{23} : coeficiente de Poisson transversais do compósito na direção 2-3.

ν_{32} : coeficiente de Poisson transversais do compósito na direção 3-2.

G_{13} : módulo de cisalhamento do compósito na direção 1-3.

E_3 : módulo de Young do compósito na direção 3.

ν_{31} : coeficiente de Poisson transversais do compósito na direção 3-1.

ν_{13} : coeficiente de Poisson transversais do compósito na direção 1-3.

$G_{23,f}$: módulo de cisalhamento da fibra na direção 2-3.

$G_{12,f}$: módulo de cisalhamento da fibra na direção 1-2.

$E_{1,f}$: módulo longitudinal de Young da fibra
 ε_3 : deformação da lâmina na direção 3.
 ε_1 : deformação da lâmina na direção 1.
 ε_2 : deformação da lâmina na direção 2.
 γ_{23} : deformação de cisalhamento da lâmina na direção 2-3.
 γ_{31} : deformação de cisalhamento da lâmina na direção 3-1.
 $[Q]$: matriz de rigidez reduzida da lâmina.
 σ_1 : tensão normal da lâmina na direção 1.
 σ_2 : tensão normal da lâmina na direção 2.
 τ_{12} : tensão de cisalhamento da lâmina na direção 1-2.
 $[\bar{Q}]$: matriz de rigidez reduzida transformada da lâmina.
 γ_{zr} : deformação de cisalhamento do laminado na direção z - θ .
 $\gamma_{\theta r}$: deformação de cisalhamento do laminado na direção θ - r .
 σ_r : tensão normal do laminado na direção r .
 τ_{zr} : tensão de cisalhamento do laminado na direção z - r .
 $\tau_{\theta r}$: tensão de cisalhamento do laminado na direção θ - r .
 u : deslocamento do laminado.
 v : deslocamento do laminado.
 w : deslocamento do laminado.
 e_l : espessura do laminado.
 ε_z : deformação do laminado na direção z .
 ε_θ : deformação do laminado na direção θ .
 $\gamma_{z\theta}$: deformação cisalhante do laminado na direção z - θ .
 ε_z^0 : deformação na superfície média do laminado na direção z .
 ε_θ^0 : deformação na superfície média do laminado na direção θ .
 $\gamma_{z\theta}^0$: deformação cisalhante na superfície média do laminado na direção z - θ .
 κ_z : curvatura da superfície média do laminado na direção z .
 κ_θ : curvatura da superfície média do laminado na direção θ .
 $\kappa_{z\theta}$: curvatura da superfície média do laminado na direção z - θ .
 t : distância até a superfície média do laminado.
 N_z : força resultante por unidade de comprimento no laminado na direção z .
 N_θ : força resultante por unidade de comprimento no laminado na direção θ .
 $N_{z\theta}$: força resultante por unidade de comprimento no laminado na direção z - θ .

M_z : momentos resultantes por unidade de comprimento na direção z .
 M_θ : momentos resultantes por unidade de comprimento na direção θ .
 $M_{z\theta}$: momentos resultantes por unidade de comprimento na direção z - θ .
 $[A]$: matriz de rigidez extensional.
 $[B]$: matriz de acoplamento membrana-flexão.
 $[D]$: matriz de rigidez a flexão.
 E_z : módulo longitudinal de Young do laminado.
 E_θ : módulo transversal de Young do laminado.
 $G_{z\theta}$: módulo de cisalhamento do laminado na direção z - θ .
 $\nu_{\theta z}$: coeficiente de Poisson do laminado na direção θ - z .
 $\nu_{z\theta}$: coeficiente de Poisson do laminado na direção z - θ .
 $e_{(i)}$: espessura do trecho n da torre.
 $r_{e(i)}$: raio externo do trecho n da torre.
 $r_{i(i)}$: raio interno do trecho n da torre.
 es : espaço entre os trechos.
 n : número de trechos.
 H : altura da torre.
 $h_{(i)}$: tamanho do trecho i .
 P_n : peso do conjunto nacele e rotor.
 M_n : momento resultante da excentricidade do peso do conjunto nacele e rotor.
 F_v : força resultante da carga de vento no conjunto nacele e rotor.
 M_v : momento resultante da carga de vento no conjunto nacele e rotor.
 $q(z)$: componente horizontal do carregamento distribuído resultante da carga de vento na torre.
 p_t : carregamento vertical distribuído resultante do peso próprio da torre.
 ρ : a densidade do ar.
 V_k : a velocidade característica do vento.
 A_r : a área de varredura do rotor.
 n_p : o número de pás do rotor.
 M_v : momento fletor resultante da força de arrasto do conjunto nacele e rotor.
 e_{fv} : excentricidade da força de arrasto do conjunto nacele e rotor em relação ao topo da torre.
 $p_v(\theta, z)$: é a pressão dinâmica normal a superfície da torre produzida pelo vento.
 q_v : pressão dinâmica do vento.

$H_z(z)$: termo que governa a distribuição vertical do vento.

$H_\theta(\theta)$ é o termo que governa a distribuição do vento ao longo circunferência da torre.

$N_{(i)}(z)$: esforço normal dos trechos da torre.

$M_{(i)}(z)$: momento fletor dos trechos da torre.

$\sigma_{z(i)}(\theta, r, z)$: campo de tensão normal longitudinal dos trechos da torre.

$A_{(i)}$: área da seção transversal de um anel circular fino dos trechos da torre.

$r_{0(i)}$: raio médio de um anel circular fino dos trechos da torre.

$I_{(i)}$: momento de inércia da seção transversal de um anel circular fino dos trechos da torre.

$Q_{(i)}(z)$: esforço cortante atuante nos trechos da torre.

$\tau_{z\theta(i)}(\theta, r, z)$: campo de tensão de cisalhamento atuante nos trechos da torre.

$V_{(i)}(\theta, z)$: momento estático de primeira ordem de um arco circular fino dos trechos da torre.

CAPÍTULO 4:

$\sigma_{cri_fl(i)}$: tensão crítica para colunas cilíndricas de parede fina submetidas a uma carga de compressão axial para materiais isotrópicos.

$\sigma_{cri_fl(i)}$: tensão crítica para colunas cilíndricas de parede fina submetidas a uma carga de compressão axial para materiais ortotrópicos.

P_{cri} : carga crítica para flambagem global.

$\sigma_{cri_fl(i)}$: tensão crítica para flambagem global dos trechos da torre.

$\varepsilon_{z(i)}(\theta, r, z)$: deformação longitudinal dos trechos da torre.

$\gamma_{z\theta(i)}(\theta, r, z)$: deformação de cisalhamento dos trechos da torre.

δP_1 : carga virtual.

δP_2 : carga virtual.

$u_r(z)$: deslocamento da torre (eixo r).

$u_z(z)$: deslocamento da torre (eixo z).

X_t : Resistência à tração na direção paralela às fibras.

Y_t : Resistência à tração na direção perpendicular às fibras.

S : Resistência ao cisalhamento no plano da lâmina

$(\varepsilon_{1,f})_{ult}$: deformação última da fibra na direção 1.

$(\varepsilon_m)_{ult}$: deformação última da matriz.

$E_{2,f}$: módulo transversal de Young da fibra.

$(\gamma_m)_{ult}$: deformação cisalhante última da matriz.

$(\gamma_{12,f})_{ult}$: deformação cisalhante última da fibra na direção 1-2.

s : espaçamento entre os centroides de cada fibra.

d : diâmetro das fibras.

$f(\sigma)$: Critério de Tsail-Hill

$[T]$: matriz de transformação.

θ_f : ângulo das fibras.

$\lambda(\sigma)$: Inversa da Razão de Resistência.

σ_e : tensão efetiva de *von Mises*.

CAPÍTULO 5:

V_0 : velocidade básica do vento.

S_1 : fator da NBR 6123 que leva em conta as variações do relevo do terreno.

S_2 : fator da NBR 6123 que leva em conta o efeito combinado da rugosidade do terreno com as dimensões da construção.

S_3 : fator da NBR 6123 que leva em conta o grau de segurança requerido e a vida útil da torre baseada em conceitos estatísticos

CAPÍTULO 6:

ρ_m : densidade do material.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações iniciais	13
1.2	Objetivo	14
1.3	Justificativa	15
1.4	Metodologia	16
1.5	Organização da dissertação	17
2	CONCEITOS GERAIS.....	19
2.1	Energia eólica.....	19
2.2	Aerogeradores	20
2.3	Torres	24
2.4	Materiais compósitos	27
3	ANÁLISE DE TENSÕES DA TORRE TUBULAR.....	29
3.1	Avaliação das propriedades elásticas das lâminas.....	29
3.1.1	Modelo baseado na resistência dos materiais	29
3.1.2	Modelo baseado na teoria da elasticidade linear	31
3.1.3	Matriz de rigidez reduzida da lâmina.	35
3.2	Laminado de material compósito	38
3.2.1	Configuração do laminado (layup) e classificação.....	38
3.2.3	Teoria clássica da laminação	40
3.2.4	Propriedades efetivas do laminado	43
3.3	Torres tubulares.....	44
3.3.1	Carregamentos atuantes.....	45
3.3.1.1	Ação do vento	47
3.3.2	Tensão normal longitudinal	49
3.3.3	Tensão de cisalhamento em elementos de parede fina.....	50
4	REQUISITOS ESTRUTURAIS.....	52
4.1	Flambagem local e global	52
4.2	Avaliação dos deslocamentos da torre	53
4.2.1	Análise da deformação elástica	53
4.2.2	Princípio dos trabalhos virtuais	54
4.3	Análise de resistência.....	56
4.3.1	Avaliação dos parâmetros de resistência das lâminas	56
4.3.2	Critérios de resistência e razão de resistência	57
5	RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS.....	61
6	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	63
7	RESULTADOS.....	67

8	CONCLUSÕES.....	81
8.1	Sugestões para trabalhos futuros	82
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A energia eólica é a energia proveniente da força dos ventos. Segundo Picolo *et al.* (2014), o vento pode ser definido como o deslocamento de massas de ar que trazem consigo energia cinética, possuindo um grande potencial para ser utilizada na produção de energia elétrica. De acordo com Martins *et al.* (2008), a utilização dessa energia cinética como fonte de energia mecânica para o funcionamento de um sistema eólico ocorreu a mais de 3.000 anos, através de moinhos de vento utilizados para a moagem de grãos e bombeamento de água para atividades agrícolas.

O *Annual Market Update* de 2010 do *Global Wind Energy Council* (GWEC), que é a associação comercial internacional para o setor de energia eólica, demonstrou que o Brasil, principalmente as regiões norte e nordeste, possui um grande potencial e uma posição privilegiada em relação à produção de energia eólica mundial. Em 2015, o GWEC (2017) destacou que o Brasil possui potencial eólico três vezes maior do que a sua necessidade elétrica.

A maneira mais comum de explorar a energia eólica é através dos aerogeradores. O aerogerador é um equipamento que utiliza a energia cinética do vento, convertendo-a em energia elétrica. O projeto de um aerogerador pode ser dividido em basicamente duas importantes estruturas: a turbina eólica e a torre.

As torres de aerogeradores têm sido objeto de estudo de alguns trabalhos na literatura. Feijó *et al.* (2010) propõem em seu trabalho uma formulação para o dimensionamento ótimo de uma torre tubular de aço composta de segmentos em tronco de cone, admitindo como modelo uma viga engastada na base e livre no topo. O objetivo do dimensionamento é reduzir o peso da torre.

Negm e Maalawi (2000) realizam um estudo de várias estratégias de otimização para o projeto de uma torre de aerogerador, com diferentes formas para avaliar a função objetivo. A torre considerada constitui-se de segmentos tubulares circulares e uniformes, no qual as variáveis efetivas de projeto são a área de seção transversal, o raio de giração e a altura de cada segmento.

Gutierrez *et al.* (2003) em seu trabalho investigam uma torre de aerogerador confeccionada em material compósito. O seu trabalho tem como principal motivação o potencial de fabricação de estruturas de compósitos próximo ao local onde são empregadas, gerando um benefício para os aerogeradores que são instalados em terrenos montanhosos ou acidentados.

Young *et al.* (2017) apresentam uma metodologia para o projeto e otimização de uma torre de aerogerador em material compósito para o uso em plataforma *offshore* (em alto-mar) flutuante. Eles propõem uma formulação com um único objetivo, denominada de otimização de torre restrita, contemplando o cálculo da função objetivo e as restrições de projeto para aplicações de aerogeradores em plataforma *offshore* flutuante.

Em seu trabalho, Kong *et al.* (2013) propõem um procedimento de otimização aplicado ao projeto de torres de materiais compósitos produzidas em larga escala empregando camadas de *glass/polyester* e *sheets-sand/epoxy*. Nesse trabalho, é empregado o enrolamento filamentar como método de fabricação da torre de material compósito e são analisados os ângulos e as espessuras ótimas de cada seção da torre, atendendo aos critérios de segurança estrutural da torre avaliados por meio de uma análise em elementos finitos.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma formulação para o dimensionamento ótimo de torres tubulares de aço, alumínio e materiais compósitos compostas de n segmentos, buscando encontrar a configuração com a menor massa da torre para cada tipo de material.

Objetivando entender e encontrar a melhor configuração para a torre, são admitidas algumas configurações, em função do número de trechos das torres (2 a 6 trechos) e do espaçamento entre as seções dos trechos (de 0cm, de 5cm e de 10cm). Além dos objetivos gerais, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Entender o comportamento das torres;
- b) Observar as recomendações das normas;
- c) Estabelecer as restrições lineares e não-lineares;
- d) Avaliar os parâmetros de resistência dos materiais compósitos;
- e) Implementar o processo de otimização para obtenção da menor massa e
- f) Realizar o comparativo entre as torres com diferentes tipos de material.

1.3 Justificativa

Foi a necessidade de ter uma fonte de energia limpa que incentivou muitos países a investirem em fontes de energias renováveis. De acordo com Picolo *et al.* (2014), vários países mudaram a sua matriz elétrica devido à preocupação com os impactos ambientais e o aquecimento global. Um bom exemplo de país que vem mudando sua matriz energética para energia renovável é a Alemanha, que no ano de 2018 teve 40% da sua matriz baseada em energias renováveis (DW, 2019).

Comparada com outras fontes de energia renovável, a energia eólica demonstra algumas vantagens devido à sua maturidade tecnológica, boa infraestrutura e competitividade comercial, além do cenário da energia eólica no mundo ser bastante favorável, pois apresenta um potencial de exploração avaliado de $20000 \cdot 10^9$ kWh a $50000 \cdot 10^9$ kWh por ano, se comparado com o consumo mundial em 2015, de $15000 \cdot 10^9$ kWh por ano (HERBERT *et al.*, 2007). Em relação as desvantagens da energia eólica, é possível citar a poluição visual e o barulho produzido pelos aerogeradores.

Em um projeto de implementação de geradores eólicos, as torres apresentam um custo significativo, estimado em torno de 20% a 30% de todo o projeto (FEIJO *et al.*, 2010), tornando a redução do seu custo um importante objeto de estudo. Essa redução pode ser atingida ao minimizar a sua massa, pois isso reduz o custo com insumos, transporte, montagem e manutenção, especialmente para as torres que são instaladas em áreas remotas e de difícil acesso.

As torres tubulares são utilizadas com mais frequência nos projetos de aerogeradores, pois elas apresentam algumas vantagens em relação à outras topologias. Se comparadas as torres estaiadas, elas apresentam geralmente uma melhor estética, além de não comprometerem a utilização da área ao redor delas.

As torres de aerogeradores confeccionadas com materiais compósitos apresentam vantagens em relação a sua massa e a maior facilidade no transporte. Segundo Young *et al.* (2017), as torres de materiais compósitos, como aquelas empregadas em estruturas flutuantes *offshore*, apresentam uma menor massa, algo valorizado neste cenário, pois o aumento na massa implica no aumento do volume da base flutuante, acarretando numa série de problemas, além de um maior custo.

O processo de otimização estrutural visa encontrar um dimensionamento racional de uma certa estrutura, ou seja, obter um desempenho ótimo da estrutura segundo um objetivo estabelecido, por exemplo: a mínima massa possível, a máxima resistência etc. Com o processo de otimização estrutural é possível encontrar a melhor configuração geométrica para o tipo de torre investigada, visando a menor massa possível.

1.4 Metodologia

A metodologia deste trabalho consiste em realizar revisões bibliográficas e, assim, formar um referencial teórico necessário ao projeto estrutural das torres tubulares de aerogeradores. Inicialmente, é definida a geometria da torre, na sequência, são analisados os carregamentos atuantes, os esforços internos solicitantes e os campos de tensões e, por fim, são definidos os requisitos estruturais do projeto.

As propriedades elásticas efetivas das lâminas de material compósito são determinadas, neste trabalho, pela Teoria da Elasticidade Linear. Enquanto as propriedades efetivas do laminado são estimadas a partir da teoria clássica da laminação.

Os carregamentos atuantes considerados são a ação do vento, o peso próprio da torre e o peso do aerogerador. Esses carregamentos são avaliados observando as recomendações das normas brasileiras. O processo de otimização proposto contempla uma função objetivo, algumas variáveis de projeto, além de restrições lineares e não-lineares.

O processo de otimização é implementado no MATLAB empregando o comando *fmincon*, considerando como restrições não-lineares: as flambagens local e global, a inversa da razão de resistência e o deslocamento no topo da torre. Alguns aspectos da geometria da torre são considerados como restrições lineares e as variáveis de projeto são a espessura e o raio no topo da torre.

O laminado de material compósito adotado é do tipo angle-ply, com a orientação da fibra em relação ao eixo da torre assumindo valores de 15° e -15° . As lâminas delgadas do laminado de material compósito são compostas de uma matriz polimérica, mais especificamente o epóxi, e fibras de vidro ou de carbono, admitindo-se uma fração volumétrica de fibras igual a 60%.

1.5 Organização da dissertação

É apresentada nesta seção a organização deste trabalho. Neste primeiro capítulo são apresentados o tema proposto, os objetivos, a justificativa e as motivações deste estudo e a metodologia empregada na pesquisa.

No capítulo 2 são apresentados referenciais teóricos de alguns conceitos importantes para o trabalho. São também abordados a evolução da energia eólica no mundo e no Brasil, a classificação e o histórico dos aerogeradores, a importância da torre e sua classificação e, por fim, aspectos básicos relacionados aos materiais compósitos.

O capítulo 3 trata da análise das tensões em torres tubulares de aerogeradores. Inicialmente, é abordada a avaliação das propriedades elásticas das lâminas reforçadas por fibras longas, na sequência são abordados o conceito, as configurações, a classificação e a avaliação das propriedades efetivas do laminado, finalizando-se com a análise dos campos de tensões das torres tubulares a partir da definição de sua configuração geométrica e da determinação das ações atuantes.

No capítulo 4 são apresentadas as restrições lineares e não-lineares adotadas neste trabalho. Também são abordadas as metodologias empregadas para determinar as flambagens local e global, os deslocamentos da torre e a inversa da razão de resistência.

O capítulo 5 aborda as normas brasileiras empregadas neste trabalho. São contempladas as normas brasileiras para a ação do vento, NBR 6123 (1988), e para o projeto de estruturas metálicas, NBR 8800 (2008).

Por sua vez, o capítulo 6 trata da otimização estrutural implementada neste trabalho. Apresentando uma visão sobre o processo de otimização e o método utilizado para determinar a massa ótima da torre tubular.

No capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos neste trabalho, contemplando as massas ótimas obtidas para as torres com diferentes tipos de materiais e configurações, estabelecendo qual a melhor configuração para cada material. Além disso, é possível entender o comportamento da torre, ou seja, por qual critério o seu dimensionamento é regido.

O capítulo 8 aborda as conclusões, na qual apresenta as observações sobre os resultados obtidos. Com este trabalho espera-se ter contribuído com estudo de torres otimizadas de aerogeradores, além de incentivar a inovação tecnológica na área de energias renováveis.

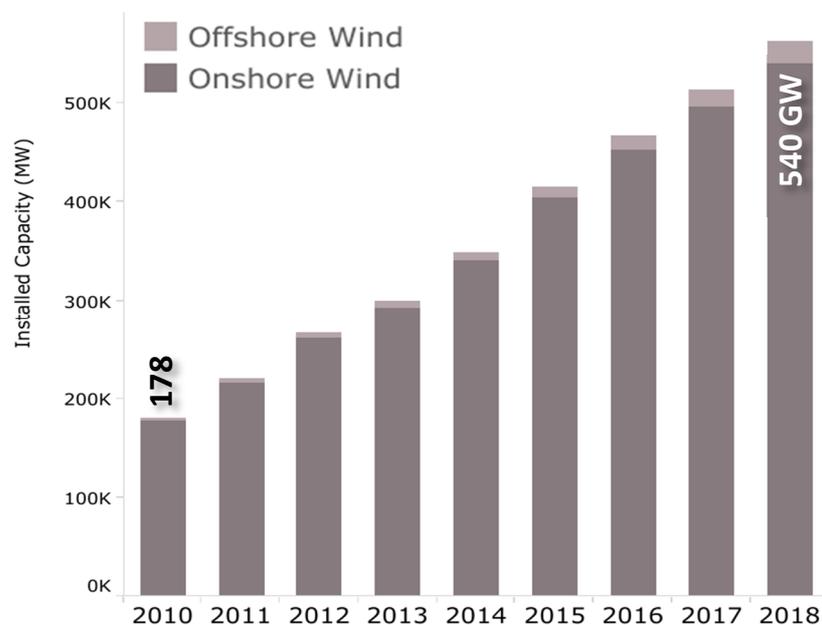
2 CONCEITOS GERAIS

2.1 Energia eólica

Até o início do século 20, a energia eólica era utilizada para o fornecimento de energia mecânica, e não elétrica. Foi no início da industrialização moderna que a energia eólica foi substituída por motores que empregam combustíveis fósseis ou pela rede elétrica, que forneciam uma energia mais perene e confiável (ACKERMANN; SÖDER, 2002).

No final do século 20 ocorreu o ressurgimento da utilização da força dos ventos como uma fonte relevante de energia no mundo, esse ressurgimento foi observado a partir do final da década de 60, mas foi na década de 90 que houve uma real mudança, quando ocorreu um aumento de cinco vezes na sua capacidade instalada (MANWELL *et al.*, 2009). A energia eólica após passar por um período de preterição, vem crescendo nos últimos anos, devido ao seu caráter renovável, despontando como uma das principais fontes energéticas, como mostra a Figura 1, na qual demonstra que a capacidade mundial de energia eólica instalada vem crescendo, atingindo em 2018 a capacidade de 540 GW (IRENA, 2019).

Figura 1 - Capacidade instalada de energia eólica no mundo.



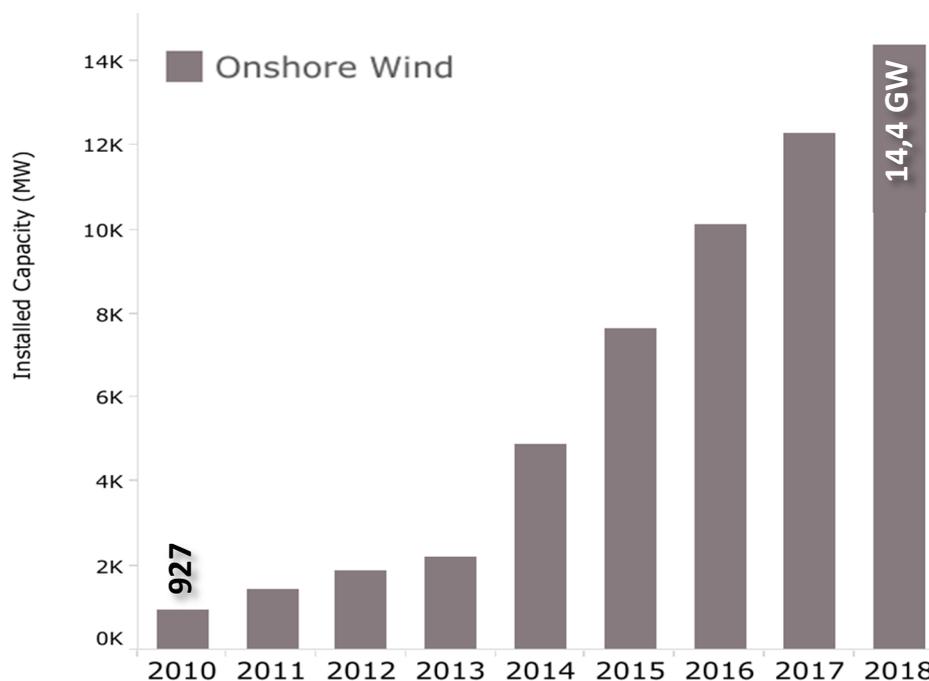
Fonte: IRENA (2019)

A Figura 1 mostra que a capacidade instalada de energia eólica ocorre predominantemente através do sistema *onshore*, ou seja, sistemas instalados nos continentes. O aumento apresentado na Figura 1 é compreensível, pois alguns países estão investindo em

energias renováveis com o objetivo de reduzirem a emissão de dióxido de carbono na atmosfera, que em excesso leva à poluição do ar, chuvas ácidas e possível desequilíbrio do efeito estufa.

A *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2019), uma organização intergovernamental que apoia os países em sua transição para uma matriz energética mais sustentável, servindo como uma plataforma de cooperação internacional, um centro de excelência e um repositório de políticas, tecnologia, recursos e conhecimentos financeiros sobre energia renovável, constatou que o potencial eólico brasileiro começou a ser aproveitado no ano de 2005, seguido de um aumento gradativo até o ano de 2018 na sua capacidade instalada, Figura 2, demonstrando ser um mercado em plena expansão através de seu notável crescimento nos últimos anos. Em 2018, a capacidade instalada de energia eólica no Brasil atingiu a marca de 14,4 GW, o equivalente a usina hidrelétrica de Itaipu.

Figura 2 - Capacidade instalada de energia eólica no Brasil.



Fonte: IRENA (2019)

2.2 Aerogeradores

Daniel Halladay desenvolveu a rosa dos ventos ou o cata-vento, o primeiro aerogerador, que possuía um dispositivo mecânico, uma grande pá paralela ao plano da turbina, cuja função era de girar a turbina sobre seu eixo vertical de maneira a proteger o aparelho em

situações em que a força do vento poderia danificar as pás da turbina (DELLEZZOPOLLES, 2011). A Figura 3 mostra um exemplo de cata-vento que era comumente utilizado no Brasil para o bombeamento de água.

No início do século 19, Poul la Cour, considerado o precursor dos modernos aerogeradores, e Charles Brush foram os primeiros a estudar a utilização de turbinas eólicas para geração de eletricidade (DALMAZ *et al.*, 2008). Em 1941, na Dinamarca, surgiu o precursor dos aerogeradores modernos, que utilizava aerofólios no lugar de pás de arrasto, além de possuir controle de velocidade do rotor pela variação do perfil das pás da turbina. Esse aerogerador foi construído pela empresa F. L. Smidth, motivada pela grande escassez de energia devido à segunda guerra mundial (DELLEZZOPOLLES, 2011).

Figura 3 - **Cata-vento utilizado no bombeamento de água.**



Fonte: Dellezzopolles (2011).

Neste mesmo período, nos Estados Unidos da América, foi desenvolvida por Palmer Putnam uma turbina eólica com 53 metros de diâmetro, para a empresa americana Morgan Smith Co., que além do tamanho tinha uma filosofia diferente da dinamarquesa. Enquanto a dinamarquesa era baseada em um rotor contra o vento com regulação de parada, operando em velocidade lenta, a americana era baseada em um rotor a favor do vento com uma regulação de passo variável, mas esse tipo de turbina não teve sucesso (ACKERMANN; SÖDER, 2002).

Como após a segunda grande guerra a matriz energética mundial ficou baseada no petróleo, o desenvolvimento de novas tecnologias de aerogeradores foi restringido a

iniciativas individuais, que culminaram em uma produção de aparelhos de pequeno porte por parte das empresas. Somente após a crise do petróleo, no final da década de 70, houve um incentivo nas políticas de investimento público para as energias renováveis (DELLEZZOPOLLES, 2011).

No início dos anos 80 a potência típica da turbina eólica era inferior a 100 kW, aumentando a sua capacidade para 500 kW no início da década de 90, e evoluindo para 2500 kW no final da década de 90 (HERBERT *et al.*, 2007). A Tabela 1 mostra a evolução da potência das turbinas eólicas na segunda metade do século 20 e algumas de suas características (país, diâmetro da turbina, velocidade, número de pás, potência e período).

Tabela 1 - Evolução da potência das turbinas eólicas na segunda metade do século 20.

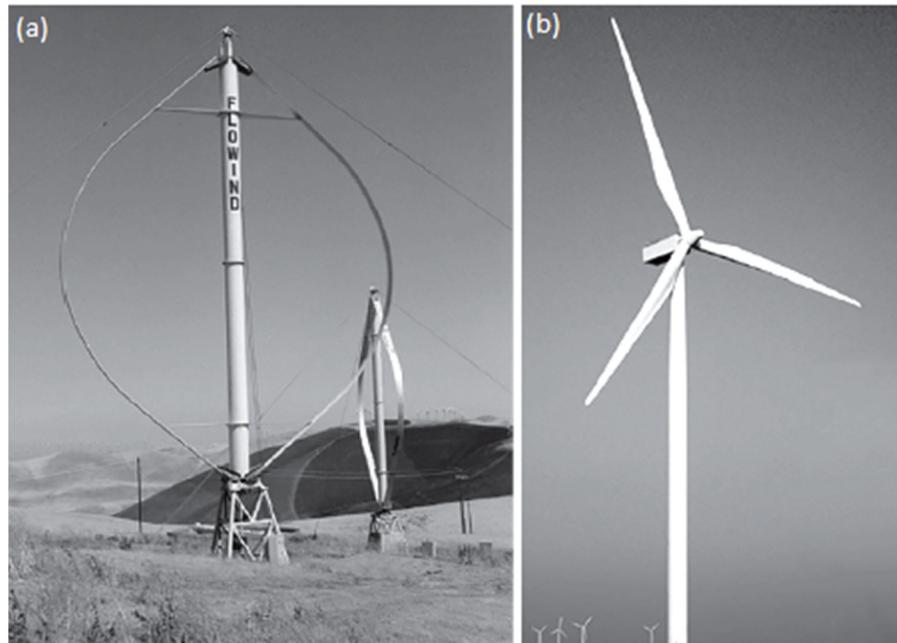
Aerogerador	País	Diâmetro da turbina	Velocidade (rpm)	Número de pás	Potência (kW)	Período
GEDSER	Dinamarca	24	30	3	200	1957-1967
NASA/DOE MOD-0	EUA	38,1	40	2	100	1974-1988
NASA/DOE MOD-0A	EUA	38,1	-	2	200	1977-1979
NIBE A	Dinamarca	40	34	3	630	1979
NASA/DOE MOD-1	EUA	61	-	2	2000	1979-1981
Maglarp	Suécia	78	25	2	3000	1981-1992
Näsudden	Suécia	75	25	2	2000	1982
NASA/DOE WTS-4	EUA	78,2	-	2	4000	1982-1994
ELSAM	Dinamarca	61	-	3	2000	1989-2001
Aeolus II	Alemanha	75	-	2	3000	1992
Näsudden II	Suécia	80	14/21	2	3000	1993

Fonte: Dellezzopolles (2011)

É possível observar através da Tabela 1 que o diâmetro da turbina foi aumentando com o passar dos anos, assim como a potência dos aerogeradores. É possível também verificar que o número de pás variou de 2 e 3, onde apenas os aerogeradores dinamarqueses eram construídos com três pás.

De acordo com a posição do rotor dos aerogeradores, eles podem ser classificados como aerogeradores de eixo vertical, Figura 4 (a), ou aerogeradores de eixo horizontal, Figura 4 (b). Os aerogeradores de eixo vertical são menos eficientes e mais simples, pois não apresentam mecanismo de direcionamento, evitando que o ângulo de ataque do vento nas pás seja mantido constante e a ocorrência de vibrações excessivas (FEIJÓ *et al.*, 2010).

Figura 4 - (a) Aerogerador de eixo vertical e (b) aerogerador de eixo horizontal.

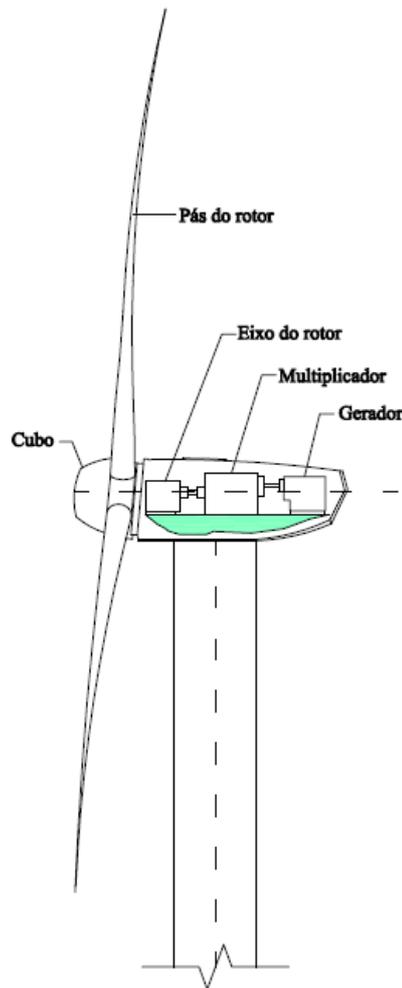


Fonte: Adaptada Picolo *et al.* (2014)

Usados em todas as turbinas modernas, os aerogeradores de eixo horizontal possuem mecanismos que direcionam a posição do aerogerador conforme a direção do vento, proporcionando um melhor aproveitamento do potencial eólico, pois possuem uma elevada razão entre a potência extraída e a área de varredura do rotor, demandando, no entanto, ventos de altas velocidades (FEIJÓ *et al.*, 2010). Os aerogeradores de eixo horizontal são compostos pelas pás do rotor, eixo do rotor, multiplicador, gerador e cubo (PICOLO *et al.*, 2014), tal como apresentado na Figura 5.

Além da classificação quanto ao eixo, os aerogeradores podem ser denominados como aerogeradores de pequeno porte ou de grande porte. Segundo a *International Electrotechnical Commission* (IEC, 2018), que se define como a organização líder mundial que prepara e publica Normas Internacionais para todas as tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas, os aerogeradores de pequeno porte podem ser definidos como aqueles que apresentam um rotor com área de varredura menor que 200 m^2 , segundo o padrão IEC 61400-2.

Figura 5 - Componentes do aerogerador de eixo horizontal.



Fonte: Elaborada pelo Autor

2.3 Torres

A torre exerce papel fundamental no desempenho do aerogerador, pois ela tem como objetivo principal posicionar a turbina na melhor altura de trabalho, definindo o desempenho do aerogerador (CUSTÓDIO, 2009), além de ter o papel de transferir o carregamento da turbina para a base (YOUNG *et al.*, 2017). O aumento da potência dos aerogeradores fez com que os estudos sobre as torres fossem aprofundados, pois aerogeradores mais potentes e com maior valor agregado precisam de torres mais seguras e com maiores alturas.

As torres podem apresentar diferentes soluções estruturais e podem ser confeccionadas com diferentes materiais. Segundo DELLEZZOPOLLES (2011), podem ser adotadas as seguintes soluções estruturais para as torres: tubular, cilíndrica, cônica ou treliçada. Na Figura 6 (a) encontra-se uma torre treliçada e a Figura 6 (b) mostra uma torre tubular.

Figura 6 - (a) Torre treliçada e (b) torre tubular.



Fonte: Adaptada de GWEC (2010)

As torres treliçadas apresentam como principal desvantagem a agressão visual ao meio ambiente, tornando-a uma solução estrutural praticamente não mais utilizada, enquanto as torres estaiadas, que são utilizadas somente em pequenos aerogeradores, apresentam como vantagem o baixo custo de fabricação e como desvantagens uma grande dificuldade de acesso ao aerogerador para manutenção e a necessidade de uma área livre ao redor da torre para a fixação dos cabos de estais (FEIJÓ *et al.*, 2010).

As torres tubulares de grande porte apresentam uma boa forma estrutural, dotadas de flanges internos em trechos intermediários e nas extremidades, favorecendo a manutenção e a estética. No caso das torres tubulares de pequeno e médio porte, estas apresentam uma solução estrutural que proporciona facilidade na manutenção, através de máquinas hidráulicas (Figura 7), e tem seu custo reduzido quando as torres apresentam menores massas. Uma forma de atingir essa redução é adotando materiais alternativos na sua fabricação.

Figura 7 - (a) Manutenção de aerogeradores de pequeno porte e (b) máquina hidráulica.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Orenda (2018)

Os materiais mais utilizados na fabricação de torres são o aço e o concreto, porém, há torres tubulares de aerogeradores sendo confeccionadas com materiais compósitos. As torres de concreto foram viabilizadas com o aumento da altura das torres e da potência dos aerogeradores ao longo dos anos, se apresentando como uma melhor alternativa técnica e econômica. As torres em material metálico apresentam um certo protagonismo quando se trata

de torres de aerogeradores, sendo o material tradicionalmente utilizado na fabricação destas torres. As torres em materiais compósitos estão se tornando objeto de estudo, pois estes materiais apresentam alta resistência e rigidez específicas e alta resistência à corrosão (YOUNG *et al.*, 2017).

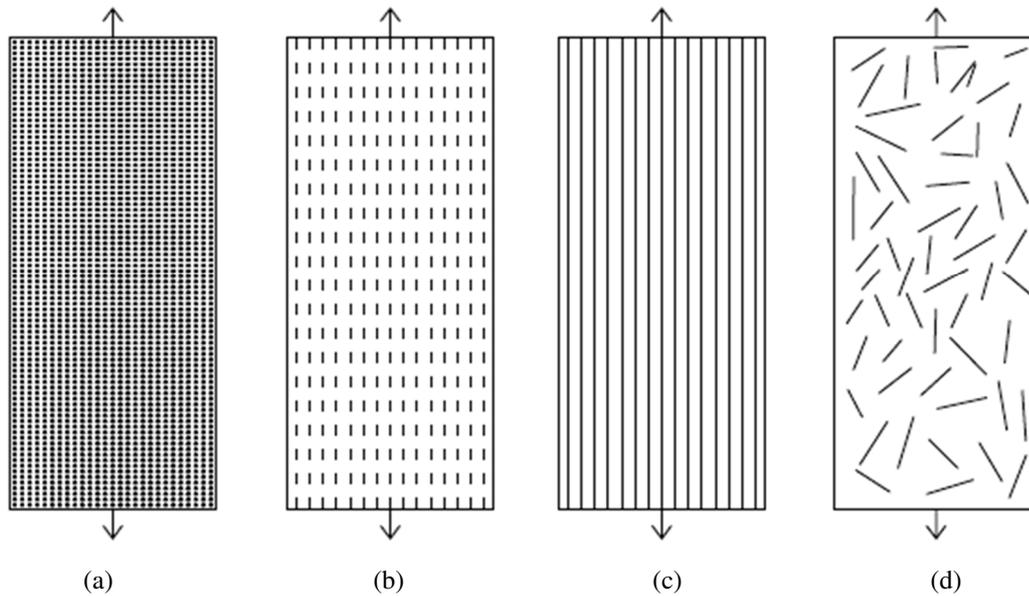
2.4 Materiais compósitos

Os compósitos são materiais estruturais formados de dois ou mais constituintes, a fase de reforço, que pode ser formada por fibras, partículas ou flocos, e a matriz, que é geralmente contínua, sendo combinados a um nível macroscópico e não são solúveis entre si (KAW, 2006). O uso de materiais compósitos é abundante na história, como as paredes de barro reforçadas com rebentos de bambu, a madeira laminada colada confeccionada pelos egípcios (1500 a.C.) e os metais laminados em espadas forjadas.

No século 20 os compósitos passaram por uma mudança tecnológica considerável, com a confecção de materiais reforçados por fibras de vidro, utilizados em barcos e aeronaves, e posteriormente aqueles reforçados por fibras de carbono, de boro ou aramidas, além do advento de matrizes metálicas e cerâmicas (KAW, 2006). Os materiais compósitos podem ser classificados quanto ao tipo de matriz, tipo de reforço, forma, processo de fabricação, entre outros critérios (DANIEL E ISHAI, 1994).

A classificação em relação ao tipo de reforço se dá em compósitos laminados (reforçado por fibras) e compósitos particulados (reforçado por partículas), os materiais do reforço podem ser metais, polímeros ou cerâmicos, podendo ser sintéticos ou naturais (TORRES, 2013). As lâminas delgadas são caracterizadas por uma camada fina de uma matriz reforçada por fibras, que podem ser classificadas de acordo com a orientação ou com a disposição das fibras (em contínuas ou descontínuas), podendo as fibras descontínuas serem denominadas de fibras curtas ou whiskers (CALLISTER, 2007). A Figura 8 (a) ilustra um compósito particulado, (b) compósito reforçado por fibras curtas orientadas, (c) compósito reforçado por fibras contínuas orientadas e (d) whiskers.

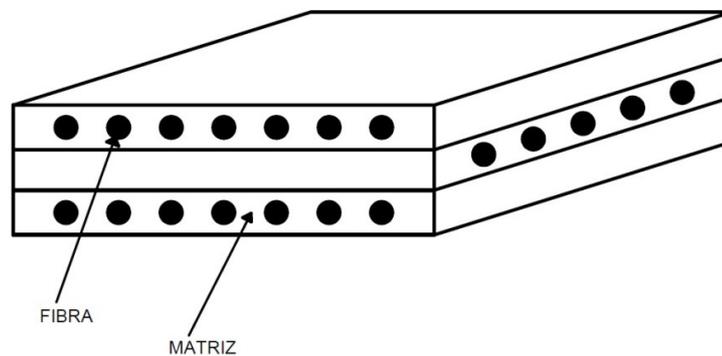
Figura 8 - (a) Compósito particulado; (b) compósito reforçado por fibras curtas orientadas; (c) compósito reforçado por fibras contínuas orientadas e (d) whiskers.



Fonte: Elaborada pelo Autor

Os compósitos constituídos por camadas de lâminas sobrepostas são denominados laminados, podendo as fibras serem unidirecionais ou multidirecionais. Um laminado é construído empilhando uma série de lâminas na direção da espessura do laminado (Figura 9), no entanto, os blocos de construção de um laminado são lâminas únicas, de modo que a compreensão da análise mecânica de uma lâmina precede a compreensão de um laminado, sendo necessário conhecer as propriedades efetivas, as tensões e as deformações aplicadas às lâminas e depois ao laminado, e a resistência de ambos (KAW, 2006).

Figura 9 - Laminado típico constituído por três lâminas.



Fonte: Adaptada Kaw (2006)

3 ANÁLISE DE TENSÕES DA TORRE TUBULAR

Para analisar as tensões que atuam no laminado, tem-se que analisar as tensões incidentes sobre as lâminas. As ferramentas para projetar, como análises elásticas, teorias de falhas e algoritmos de otimização, precisam dos valores das tensões e deformações do laminado (KAW, 2006).

Uma lâmina de compósitos é diferente de um material isotrópico homogêneo, pois pode apresentar uma rigidez variável de ponto a ponto por conta da heterogeneidade. Devido a essas variações, a análise mecânica de uma lâmina se torna mais complicada, assim, uma das abordagens consiste na aproximação macromecânica baseada nas suas propriedades efetivas, considerando-se a lâmina como homogênea.

3.1 Avaliação das propriedades elásticas das lâminas

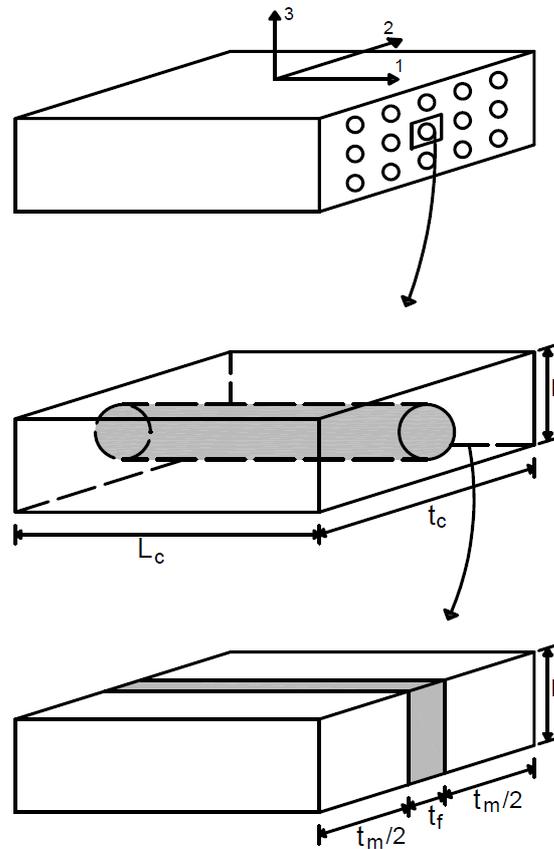
As propriedades das lâminas podem ser determinadas empiricamente ou são avaliadas matematicamente com base nas propriedades dos seus materiais constituintes. Nos materiais compósitos, o emprego de técnicas de homogeneização baseadas na micromecânica visa estimar as propriedades macromecânicas, com base nas propriedades de seus constituintes individualmente e na forma como eles interagem entre si (SILVA, 2017).

Uma lâmina de compósitos na condição de esforço de membrana pode ser elasticamente caracterizada por quatro propriedades: módulo longitudinal de Young (E_1), módulo transversal de Young (E_2), coeficiente de Poisson (ν_{12}) e módulo de cisalhamento (G_{12}). Os modelos estudados neste trabalho para avaliar estas propriedades macroscópicas são baseados na Resistência dos Materiais e na Teoria da Elasticidade Linear.

3.1.1 Modelo baseado na resistência dos materiais

O modelo baseado na resistência dos materiais, a princípio, considera uma lâmina unidirecional, tomando-se um elemento de volume representativo tal como representado na Figura 10, formado por uma fibra cercada por uma matriz, assumindo-se que ambos possuam a mesma altura h , mas com espessura diferente, sendo t_f a espessura da fibra, t_m a espessura da matriz e t_c a espessura do compósito.

Figura 10 - Elemento representativo do compósito.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

As seguintes hipóteses são necessárias ao adotar o modelo baseado na Resistência dos Materiais para lâminas delgadas:

- A aderência entre fibras e matriz é perfeita.
- As propriedades elásticas, os diâmetros e os espaçamentos entre fibras são uniformes.
- As fibras são contínuas e paralelas entre si.
- As fibras e a matriz satisfazem a lei de Hooke (material linearmente elástico).
- As fibras e a matriz possuem resistências uniformes.
- O compósito não apresenta poros ou microfissuras.

Segundo Kaw (2006), as expressões obtidas pelo modelo baseado na Resistência dos Materiais para determinar as propriedades efetivas da lâmina de material compósito reforçado por fibras longas (módulo longitudinal de Young (E_1), módulo transversal de Young (E_2), coeficiente de Poisson (ν_{12}) e módulo de cisalhamento (G_{12})) são apresentadas nas Equações

1, 2, 3 e 4, respectivamente, na qual V_i representa a fração volumétrica do constituinte, E_i o módulo de Young longitudinal ou módulo de elasticidade longitudinal, ν_i o coeficiente de Poisson e G_i o módulo de cisalhamento. Os subscritos f e m representam as propriedades da fibra e da matriz, respectivamente.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2)$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (3)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (4)$$

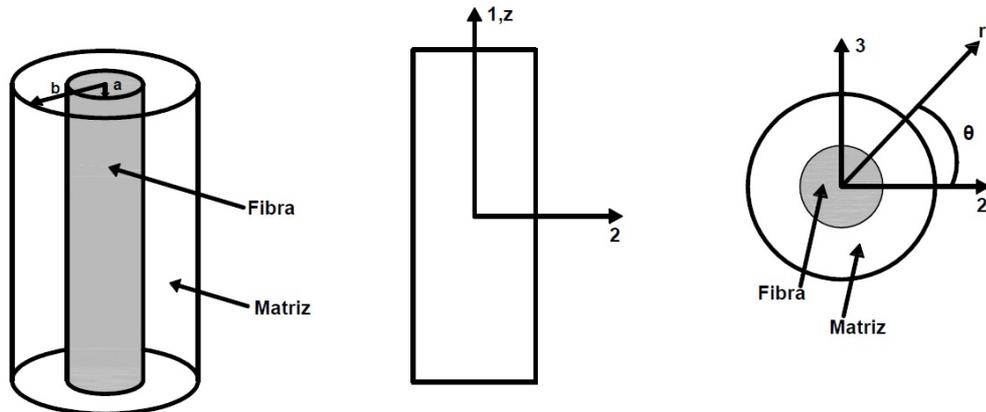
No processo de homogeneização das lâminas de material compósito, o modelo baseado na Resistência dos Materiais apresenta diferenças em relação aos resultados obtidos experimentalmente. Essas diferenças revelam a necessidade de uma melhor abordagem no processo de homogeneização da lâmina.

3.1.2 Modelo baseado na teoria da elasticidade linear

O modelo CCA (Composite Cylinder Assemblage) foi proposto por Hashin e Rosen em 1964. Esse modelo assume o compósito como constituído por um conjunto de cilindros concêntricos, os chamados Elementos de Volume Representativos (EVRs), consistindo-se num sólido cilíndrico (fibra) de raio a envolto por uma casca cilíndrica (matriz) de raio externo b (Figura 11). Cada EVR deve satisfazer a relação da Equação 5 e apresentar a mesma fração volumétrica de fibras e de matriz do material compósito, fornecendo as mesmas respostas para as propriedades efetivas do material, seja para uma condição de contorno homogênea em tensão ou em deformação.

$$V_f = \frac{a^2}{b^2} \quad (5)$$

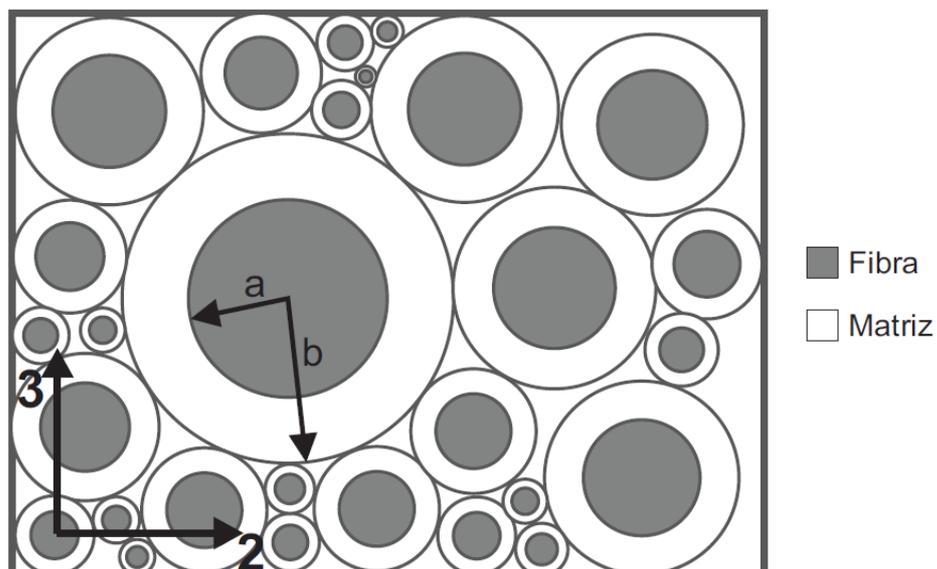
Figura 11 – RVE (Elemento de Volume Representativo).



Fonte: Elaborada pelo Autor

Os EVRs são utilizados para estimar as propriedades efetivas da lâmina reforçada por fibras longas e contínuas, pois apresentam comportamentos axissimétricos em seu plano de isotropia, representando, assim, o comportamento isotrópico no plano transversal ao eixo longitudinal das fibras (SILVA, 2017). O CCA é o conjunto de EVRs distribuídos por toda lâmina, possuindo diferentes dimensões, para que seja possível preencher todo o domínio da mesma, como representado na Figura 12.

Figura 12 - Representação do modelo CAA.

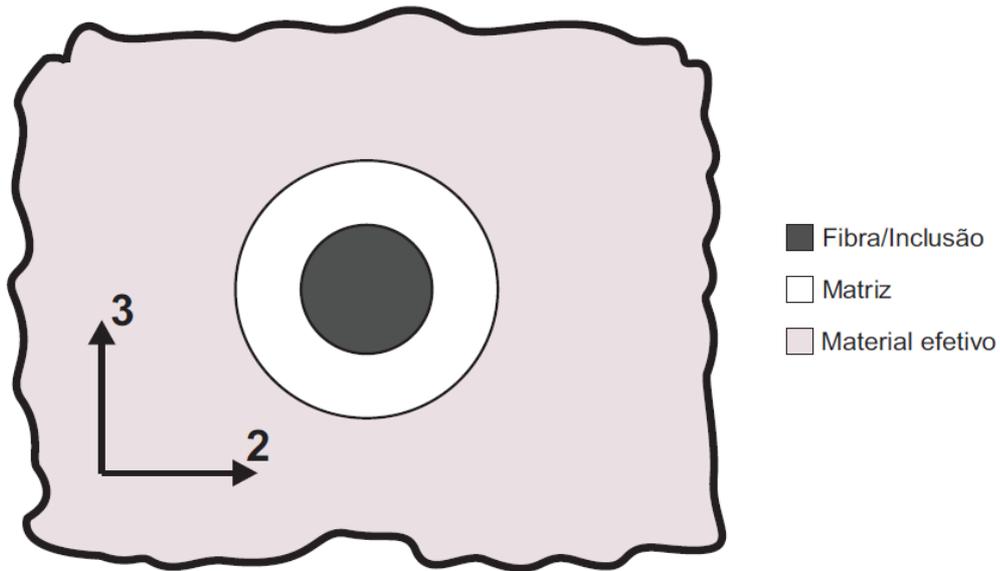


Fonte: Silva (2017).

Na análise das propriedades elásticas efetivas de lâminas reforçadas por fibras longas, o Modelo de Três Fases ou ACG (Auto-Consistente Generalizado) fornece os mesmos valores das propriedades elásticas efetivas encontradas no Modelo CCA, diferindo-se, somente, na

avaliação do módulo de cisalhamento transversal. O modelo de Três Fases, representado pela Figura 13, foi analisado por Christensen em 1990, após Christensen e Lo proporem o modelo em 1979. O Modelo considera a interação entre a fibra e a matriz, assim como a interação entre as fibras (SILVA, 2017).

Figura 13 - **Modelo de Três Fases.**



Fonte: SILVA (2017).

Segundo o Modelo de Três Fases, as propriedades elásticas efetivas das lâminas reforçadas por fibras longas são determinadas pelas Equações 6, 12, 13 e 14, no qual G_{23} é o módulo de cisalhamento transversal e k_{23} é o módulo de elasticidade volumétrica em estado plano de tensão. E_1 , ν_{12} e G_{12} são o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e o módulo de cisalhamento longitudinais, respectivamente. Os subscritos f e m representam as propriedades da fibra e da matriz, respectivamente.

$$A \left(\frac{G_{23}}{G_m} \right)^2 + 2B \left(\frac{G_{23}}{G_m} \right) + C = 0 \quad (6)$$

na qual:

$$A = 3V_f(1 - V_f)^2 \left(\frac{G_f}{G_m} - 1 \right) \left(\frac{G_f}{G_m} + \eta_f \right) + \left[\frac{G_f}{G_m} \eta_m + \eta_f \eta_m - \left(\frac{G_f}{G_m} \eta_m - \right. \right. \quad (7)$$

$$\eta_f) V_f^3] \left[V_f \eta_m \left(\frac{G_f}{G_m} - 1 \right) - \left(\frac{G_f}{G_m} \eta_m - 1 \right) \right]$$

$$B = -3V_f(1 - V_f)^2 \left(\frac{G_f}{G_m} - 1 \right) \left(\frac{G_f}{G_m} + \eta_f \right) + \frac{1}{2} \left[\frac{G_f}{G_m} \eta_m + \left(\frac{G_f}{G_m} - 1 \right) V_f + 1 \right] \left[(\eta_m - 1) \left(\frac{G_f}{G_m} + \eta_f \right) - 2 \left(\frac{G_f}{G_m} \eta_m - \eta_f \right) V_f^3 \right] + \frac{V_f}{2} (\eta_m + 1) \left(\frac{G_f}{G_m} - 1 \right) \left[\frac{G_f}{G_m} + \eta_f + \left(\frac{G_f}{G_m} \eta_m - \eta_f \right) V_f^3 \right] \quad (8)$$

$$C = -3V_f(1 - V_f)^2 \left(\frac{G_f}{G_m} - 1 \right) \left(\frac{G_f}{G_m} + \eta_f \right) + \left[\frac{G_f}{G_m} \eta_m + \left(\frac{G_f}{G_m} - 1 \right) V_f + 1 \right] \left[\frac{G_f}{G_m} + \eta_f + \left(\frac{G_f}{G_m} \eta_m - \eta_f \right) V_f^3 \right] \quad (9)$$

$$\eta_m = 3 - 4v_m \quad (10)$$

$$\eta_f = 3 - 4v_f \quad (11)$$

$$E_1 = E_f V_f + E_f (1 - V_f) - \frac{4V_f(1 - V_f)(v_f - v_m)^2 G_m}{\frac{(1 - V_f)G_m}{k_f + \frac{G_f}{3}} + \frac{V_f G_m}{k_m + \frac{G_m}{3}} + 1} \quad (12)$$

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m + \frac{V_f V_m (v_f - v_m) \left(\frac{G_m}{k_m + \frac{G_m}{3}} - \frac{G_m}{k_f + \frac{G_f}{3}} \right)}{\frac{V_m G_m}{k_f + \frac{G_f}{3}} + \frac{V_f G_m}{k_m + \frac{G_m}{3}} + 1} \quad (13)$$

$$G_{12} = G_m \left[\frac{G_f(1 + V_f) + G_m(1 - V_f)}{G_f(1 - V_f) + G_m(1 + V_f)} \right] \quad (14)$$

$$k_{23} = k_m + \frac{G_m}{3} + \frac{V_f}{\frac{1}{k_f - k_m + \frac{1}{3}(G_f - G_m)} + \frac{V_m}{k_m + \frac{4}{3}k_m}} \quad (15)$$

Segundo Christensen (2005), o módulo de elasticidade (E_2) e o coeficiente de Poisson transversais (ν_{23}) podem ser estimados, respectivamente, pelas equações 16 e 17. Por se tratar de um material transversalmente isotrópico no plano 2-3, são atendidas as seguintes relações: $\nu_{13} = \nu_{12}$, $\nu_{32} = \nu_{23}$, $G_{13} = G_{12}$, $E_3 = E_2$, $\nu_{21}/E_2 = \nu_{12}/E_1$ e $\nu_{31}/E_3 = \nu_{13}/E_1$. Para os casos de fibras transversalmente isotrópicas devem ser realizadas as modificações nas propriedades das fibras de acordo com a Tabela 2 (HASHIN, 1983).

$$E_2 = \frac{4G_{23}k_{23}}{k_{23} + G_{23} + \frac{4\nu_{12}^2 G_{23}k_{23}}{E_1}} \quad (16)$$

$$\nu_{23} = \frac{k_{23} - G_{23} - \frac{4\nu_{12}^2 G_{23}k_{23}}{E_1}}{k_{23} + G_{23} + \frac{4\nu_{12}^2 G_{23}k_{23}}{E_1}} \quad (17)$$

Tabela 2 - **Modificações necessárias para a estimativa das propriedades elásticas de lâminas reforçadas por fibras transversalmente isotrópicas.**

Propriedade efetiva	Fibras isotrópicas	Fibras transversalmente isotrópicas
$k_{23}, G_{23}, E_2, \nu_{23}$	k_f	k_f
	G_f	$G_{23,f}$
	E_f	$G_{23,f} (3 - G_{23,f}/k_f)$
	ν_f	$0.5 (1 - G_{23,f}/k_f)$
G_{12}	G_f	$G_{12,f}$
E_1	E_f	$E_{1,f}$

Fonte: Adaptada Silva (2011)

3.1.3 Matriz de rigidez reduzida da lâmina.

A análise de tensões e de deformações de uma lâmina pode ser reduzida para apenas duas dimensões, assumindo-se um estado plano de tensões, com a deformação normal (ε_3) dependente das outras duas deformações normais (ε_1 e ε_2), assim, pode-se omiti-la, além disso, as deformações de cisalhamento (γ_{23} e γ_{31}) também são omitidas, pois são consideradas nulas (KAW, 2006). A partir da lei de Hooke é possível estabelecer a relação

entre as tensões e as deformações para cada lâmina através da Equação 18, sendo $[Q]$ a matriz de rigidez reduzida da lâmina.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (18)$$

na qual,

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{23}\nu_{21}} \quad (19)$$

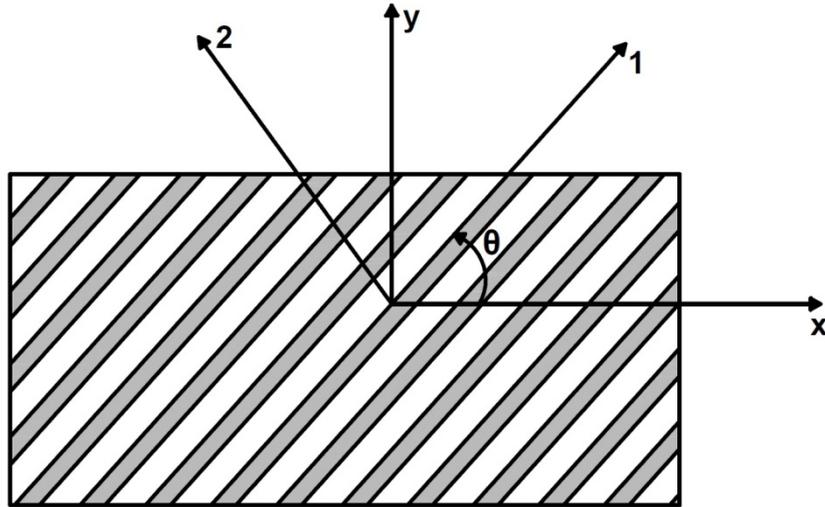
$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (20)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (21)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (22)$$

As lâminas apresentam um comportamento ortotrópico, logo, a matriz de rigidez reduzida muda com a orientação das fibras, como mostra a Figura 14. Essa relação tensão-deformação para lâminas com diferentes orientações de suas fibras pode ser expressa pela Equação 23, sendo $[\bar{Q}]$ a matriz de rigidez reduzida transformada da lâmina.

Figura 14 - Ângulo formado pelas fibras em uma lâmina de material compósito.



Fonte: Elaborada pelo Autor

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (23)$$

na qual,

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (24)$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(c^4 + s^2) \quad (25)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (26)$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})sc^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c \quad (27)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})sc^3 \quad (28)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(s^4 + c^4) \quad (29)$$

$$c = \cos(\theta) \quad (30)$$

$$s = \sin(\theta) \quad (31)$$

3.2 Laminado de material compósito

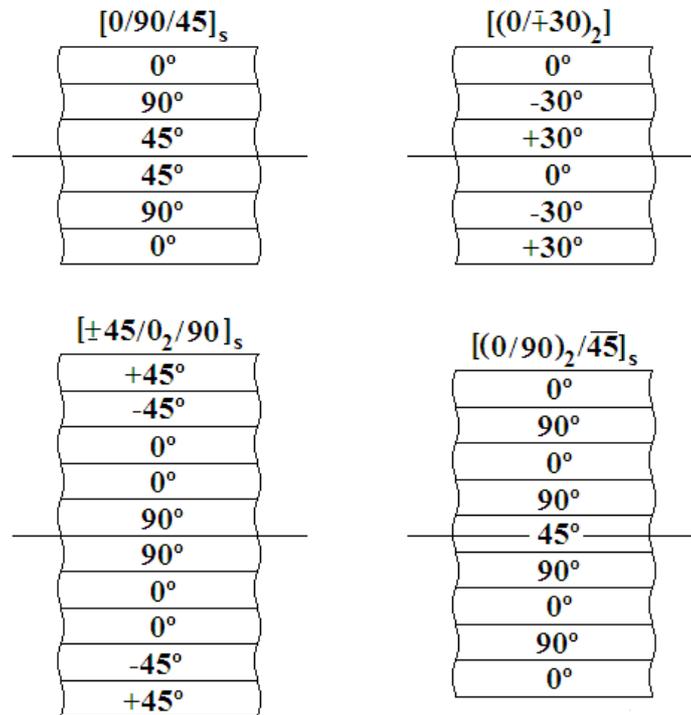
Uma estrutura de material compósito pode não se consistir apenas de uma única lâmina, mas de várias lâminas. As lâminas delgadas têm sua espessura na ordem de 0,125 mm, implicando na necessidade da construção de um laminado para suportar maiores cargas. Os laminados, geralmente, são utilizados para a fabricação de placas e cascas, apresentando uma configuração específica para atender as solicitações de projeto.

3.2.1 Configuração do laminado (layup) e classificação

A literatura relativa aos códigos de configuração de um laminado evoluiu devido à necessidade de uma descrição adequada das muitas combinações possíveis de orientação das camadas e da sequência de empilhamento em laminados (GIBSON, 1994). O código consiste em localizar cada camada no laminado, seu material e seu ângulo de orientação em relação ao eixo de referência, além de um plano médio, dividindo a espessura do laminado em duas partes iguais.

O laminado consiste de diversas camadas, considerando-se a camada superior como sua primeira camada. O laminado apresenta um código no qual cada lâmina é representada pelo ângulo de suas fibras, e cada lâmina é separada das outras por um sinal de barra (KAW, 2006), como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Códigos de alguns laminados.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Segundo Kaw (2006), os códigos dos laminados podem apresentar algumas peculiaridades, tais como:

- $[0/-45/90_2/60/0]$: consiste em um laminado de seis lâminas, no qual duas lâminas com 90° de orientação são adjacentes, representada por 90_2 , sendo 2 o número de lâminas adjacentes de mesmo ângulo.
- $[0/-45/60]_s$: esse código representa um laminado simétrico, no qual as lâminas acima do plano médio têm a mesma orientação, material e espessura das camadas abaixo do plano médio. Essa configuração é representada pelo s .
- $[0/-45/\overline{60}]_s$: indica um laminado simétrico com um número ímpar de lâminas, no qual a lâmina do plano médio é representada por uma barra em cima da orientação, nesse exemplo, ela é representada por $\overline{60}$.
- $[0^{Gr}/\pm 45^B]_s$: consiste em um laminado simétrico de seis lâminas, com as lâminas de 0° feitas de grafite/epóxi e as de $\pm 45^\circ$ feitas de boro/epóxi, além disso, a notação $\pm 45^\circ$ indica que a lâmina de 0° deve ser seguida por uma lâmina de $+45^\circ$ e depois por uma de -45° .

Duas nomenclaturas bastante usadas para laminados de materiais compósitos são: Cross-Ply e Angle-Ply. O Cross-Ply consiste em um laminado formado por lâminas com angulação de 0° e 90° , como, por exemplo: $[0/90/0]$ e $[0/90/90/0/0/90]$. O laminado Angle-Ply é constituído por um número igual de lâminas de mesma espessura e com uma angulação de $+\theta$ e $-\theta$, como, por exemplo: $[+45/-45/+45/-45/+45]$ e $[+30/-30/+30/-30]$.

Outra forma de classificação de um laminado é quanto a sua simetria. As denominações mais usadas para esse tipo de classificação são os laminados simétricos, antissimétricos e assimétricos. Segundo Prola (1987), os laminados simétricos apresentam uma simetria geométrica e nas propriedades do material em relação ao seu plano médio, tem-se, por exemplo, o laminado simétrico do tipo angle-ply ($[+\theta/-\theta/+ \theta/-\theta/+ \theta]$), os laminados antissimétricos apresentam uma característica antissimétrica geométrica, de distribuição de camadas, de espessuras e de propriedades mecânicas em relação ao plano médio, tem-se, por exemplo: $[+\theta_1/+ \theta_2/-\theta_2/-\theta_1]$, enquanto os laminados assimétricos não apresentam qualquer correspondência, seja da geometria, da distribuição das camadas ou das propriedades mecânicas, abaixo ou acima do plano médio, tem-se, por exemplo: $[+\theta_1/+ \theta_2/-\theta_1/-\theta_2]$.

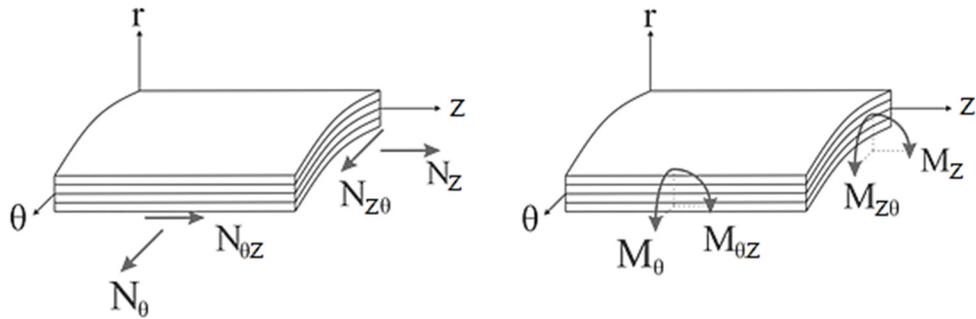
Os laminados podem apresentar ainda outra forma de classificação. Essa forma de classificação identifica as propriedades do material, podendo ser classificados como: isotrópico, ortotrópico, anisotrópico, monoclinico, transversalmente isotrópico e quase-isotrópicos.

As lâminas de um laminado podem possuir diferentes tipos de materiais e angulações influenciando diretamente no seu comportamento. Para compreender o comportamento do laminado, é necessário realizar a sua homogeneização, determinando, assim, a sua matriz de rigidez. A *Teoria Clássica da Laminação* é um método importante e amplamente utilizado para realizar essa homogeneização.

3.2.3 Teoria clássica da laminação

A *Teoria Clássica da Laminação* analisa o comportamento mecânico do laminado através de uma abordagem macromecânica (DANIEL; ISHAI, 1994). Ela é usada para obter as relações entre as deformações e as curvaturas que ocorrem em seu plano médio e os esforços de cisalhamento, os carregamentos uniaxiais e os momentos de flexão e torção (KAW, 2006), como mostra a Figura 16.

Figura 16 - **Forças e momentos resultantes em um laminado.**



Fonte: Adaptada Silva (2011)

A homogeneização de um laminado através da *Teoria Clássica da Laminação* adota as seguintes hipóteses:

- As lâminas são ortotrópicas.
- As lâminas são homogêneas.
- Uma linha reta e perpendicular à superfície média permanece reta e perpendicular à superfície média durante a deformação ($\gamma_{zr} = \gamma_{\theta r} = 0$).
- O laminado é fino e é carregado apenas no seu plano (estado plano de tensão) ($\sigma_r = \tau_{zr} = \tau_{\theta r} = 0$).
- Os deslocamentos são contínuos e pequenos em todo o laminado ($|u|, |v|, |w| \ll |e_l|$), sendo e_l a espessura do laminado, u , v e w são os deslocamentos.
- As lâminas apresentam um comportamento elástico linear.
- Não ocorrem deslizamentos nas interfaces das lâminas.

Com base nas hipóteses assumidas acima, a deformação do laminado é estabelecida pela Equação 32, em que as deformações se relacionam de forma linear com as curvaturas apresentadas pela superfície média do laminado, representadas por κ .

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{z\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_z^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{z\theta}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa_z \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{z\theta} \end{bmatrix} t \quad (32)$$

t = distância até a superfície média do laminado.

A relação entre as tensões e as deformações de um laminado pode ser obtida através da relação entre as tensões e as deformações de uma lâmina (Equação 23), ao substituir as

deformações pela Equação 32. Assim, é possível obter as tensões atuantes sobre uma lâmina do laminado através da Equação 33.

$$\begin{bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{z\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_z^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{z\theta}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_z \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{z\theta} \end{bmatrix} t \quad (33)$$

Integrando-se a Equação 33 ao longo de toda a espessura do laminado é possível estabelecer a relação entre os esforços e as deformações e curvaturas da superfície média do laminado. Essa relação é estabelecida através da relação constitutiva do laminado, ou seja, através da sua matriz de rigidez, conforme a Equação 34 ou 35.

$$\begin{bmatrix} N_z \\ N_\theta \\ N_{z\theta} \\ M_z \\ M_\theta \\ M_{z\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_z^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{z\theta}^0 \\ \kappa_z \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{z\theta} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_z^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{z\theta}^0 \\ \kappa_z \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{z\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^* & A_{12}^* & A_{16}^* & B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* \\ A_{12}^* & A_{22}^* & A_{26}^* & B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* \\ A_{16}^* & A_{26}^* & A_{66}^* & B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* \\ B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* & D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^* \\ B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* & D_{12}^* & D_{22}^* & D_{26}^* \\ B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* & D_{16}^* & D_{26}^* & D_{66}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_z \\ N_\theta \\ N_{z\theta} \\ M_z \\ M_\theta \\ M_{z\theta} \end{bmatrix} \quad (35)$$

na qual,

$$\begin{bmatrix} A_{11}^* & A_{12}^* & A_{16}^* & B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* \\ A_{12}^* & A_{22}^* & A_{26}^* & B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* \\ A_{16}^* & A_{26}^* & A_{66}^* & B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* \\ B_{11}^* & B_{12}^* & B_{16}^* & D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^* \\ B_{12}^* & B_{22}^* & B_{26}^* & D_{12}^* & D_{22}^* & D_{26}^* \\ B_{16}^* & B_{26}^* & B_{66}^* & D_{16}^* & D_{26}^* & D_{66}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}^{-1} \quad (36)$$

A matriz de rigidez do laminado é composta por três matrizes de rigidez, $[A]$, $[B]$ e $[D]$. A matriz $[A]$ é chamada de matriz de rigidez extensional, a matriz $[B]$ é a matriz de

acoplamento membrana-flexão e a matriz $[D]$ é a matriz de rigidez a flexão, e podem ser avaliadas através das Equações 37, 38 e 39, respectivamente, onde k representa a sequência das lâminas que compõem o laminado.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\overline{Q}_{ij})]_k (h_k - h_{k-1}), \quad i = 1,2,6; \quad j = 1,2,6, \quad (37)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\overline{Q}_{ij})]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad i = 1,2,6; \quad j = 1,2,6, \quad (38)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\overline{Q}_{ij})]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3), \quad i = 1,2,6; \quad j = 1,2,6, \quad (39)$$

3.2.4 Propriedades efetivas do laminado

Neste trabalho, as propriedades efetivas do laminado de material compósito são obtidas a partir da matriz de flexibilidade extensional, pois trata-se de um laminado simétrico, no qual são consideradas válidas as seguintes relações: $[B] = 0$, $[A^*] = [A]^{-1}$ e $[D^*] = [D]^{-1}$. Os módulos longitudinal na direção z (E_z), longitudinal na direção θ (E_θ), de cisalhamento ($G_{z\theta}$) e o coeficiente de Poisson ($\nu_{\theta z}$) do laminado podem ser avaliados pelas Equações 40, 41, 42 e 43, respectivamente.

$$E_z = \frac{1}{eA_{11}^*} \quad (40)$$

$$E_\theta = \frac{1}{eA_{22}^*} \quad (41)$$

$$G_{z\theta} = \frac{1}{eA_{66}^*} \quad (42)$$

$$\nu_{\theta z} = -\frac{A_{12}^*}{A_{22}^*} e \frac{\nu_{z\theta}}{E_z} = \frac{\nu_{\theta z}}{E_\theta} \quad (43)$$

3.3 Torres tubulares

A torre tubular pode apresentar uma geometria que facilita o transporte e a instalação, pois possibilita a fragmentação da torre em n partes iguais, mas com diferentes raios, de modo a viabilizar o encaixe de suas partes uma dentro da outra, como mostra a Figura 17 (uma torre tubular de três trechos de mesmo comprimento). Essa geometria pode estabelecer ou não a relação de igualdade entre o raio externo do trecho superior e o raio interno do trecho inferior, além de propiciar uma maior flexibilidade para as espessuras dos trechos. As Equações 44, 45 e 46 estabelecem as relações entre o raio externo, raio interno, espessura e o tamanho dos trechos e da torre, no qual o índice i representa o trecho analisado.

$$e_{(i)} = r_{e(i)} - r_{i(i)} \quad (44)$$

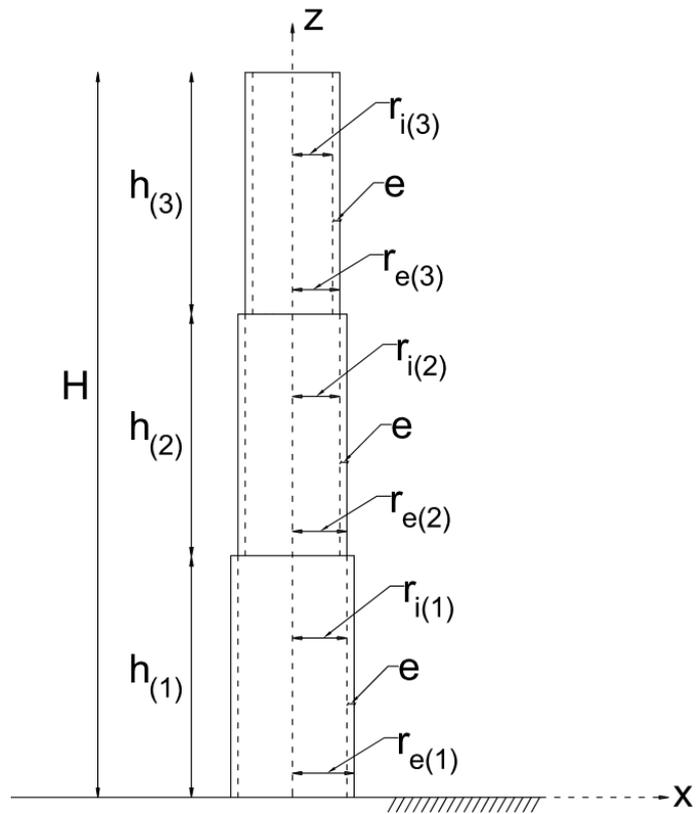
$$r_{i(i+1)} = r_{e(i)} + esp \quad (45)$$

$$h_{(i)} = \frac{H}{n} \quad (46)$$

em que:

- $r_{e(i)}$ = raio externo do trecho i ;
- $r_{i(i)}$ = raio interno do trecho i ;
- $e_{(i)}$ = espessura do trecho i ;
- $h_{(i)}$ = tamanho do trecho i .
- H = altura da torre;
- n = número de trechos e
- esp = espaçamento entre as seções dos trechos.

Figura 17 – Geometria da torre tubular.

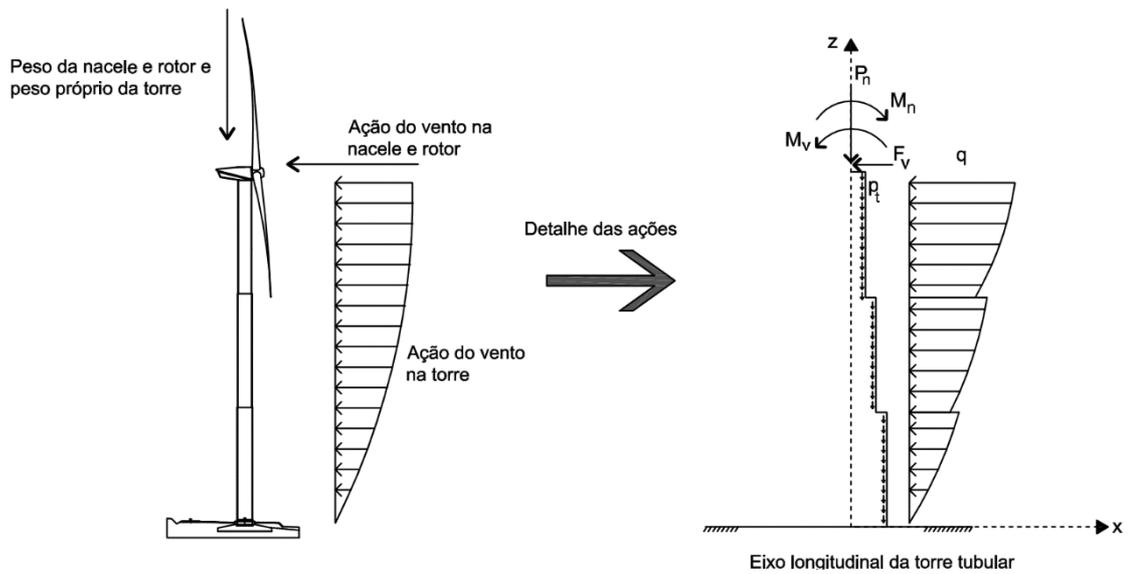


Fonte: Elaborada pelo Autor

3.3.1 Carregamentos atuantes

O dimensionamento de uma estrutura ocorre a partir do conhecimento dos carregamentos que atuam na mesma. As ações ou carregamentos que atuam sobre a torre são descritos como: a ação do vento, o peso próprio da torre e a carga proveniente do peso do conjunto nacelle e rotor (KONG *et al.*, 2013), como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Carregamentos atuantes na torre.



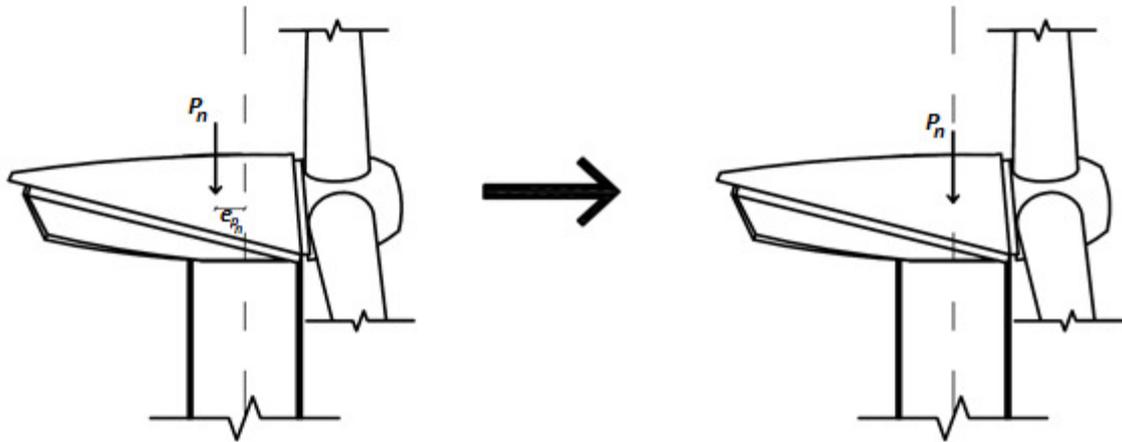
Fonte: Elaborada pelo Autor

sendo:

- P_n = peso do conjunto nacela e rotor;
- M_n = momento resultante da excentricidade do peso do conjunto nacela e rotor;
- F_v = força resultante da carga de vento no conjunto nacela e rotor;
- M_v = momento resultante da carga de vento no conjunto nacela e rotor;
- q = componente horizontal do carregamento distribuído resultante da carga de vento na torre;
- p_t = carregamento vertical distribuído resultante do peso próprio da torre.

O peso do conjunto nacela e rotor pode gerar um momento fletor, devido a sua excentricidade em relação ao eixo longitudinal da torre. Esse momento pode ser evitado se o centro de gravidade do conjunto nacela e rotor estiver alinhado com o eixo longitudinal da torre, fazendo com que a excentricidade seja nula e, conseqüentemente, o momento fletor também seja nulo, como mostra a Figura 19.

Figura 19 – Excentricidade do peso do conjunto nacele e rotor.



Fonte: Elaborada pelo Autor

3.3.1.1 Ação do vento

A ação do vento é um importante fator que deve ser considerado em um projeto estrutural de torres tubulares de aerogeradores, pois ele incidirá sobre a torre e o conjunto nacele e rotor. Na análise da ação do vento, a sua velocidade do vento pode assumir diferentes velocidades básicas, variando-se a depender do caso adotado (LE GOURIERES, 1998):

- Caso 1: velocidade nominal do vento;
- Caso 2: velocidade de vento de corte;
- Caso 3: velocidade de vento de tempestade.

A ação do vento atua tanto na torre como no conjunto nacele e rotor. No caso do conjunto nacele e rotor, o vento gera uma força de arrasto que pode ser determinada pela Equação 47, sendo ρ a densidade do ar, V_k a velocidade característica do vento, A_r a área de varredura do rotor e n_p o número de pás do rotor (SONG, 2012).

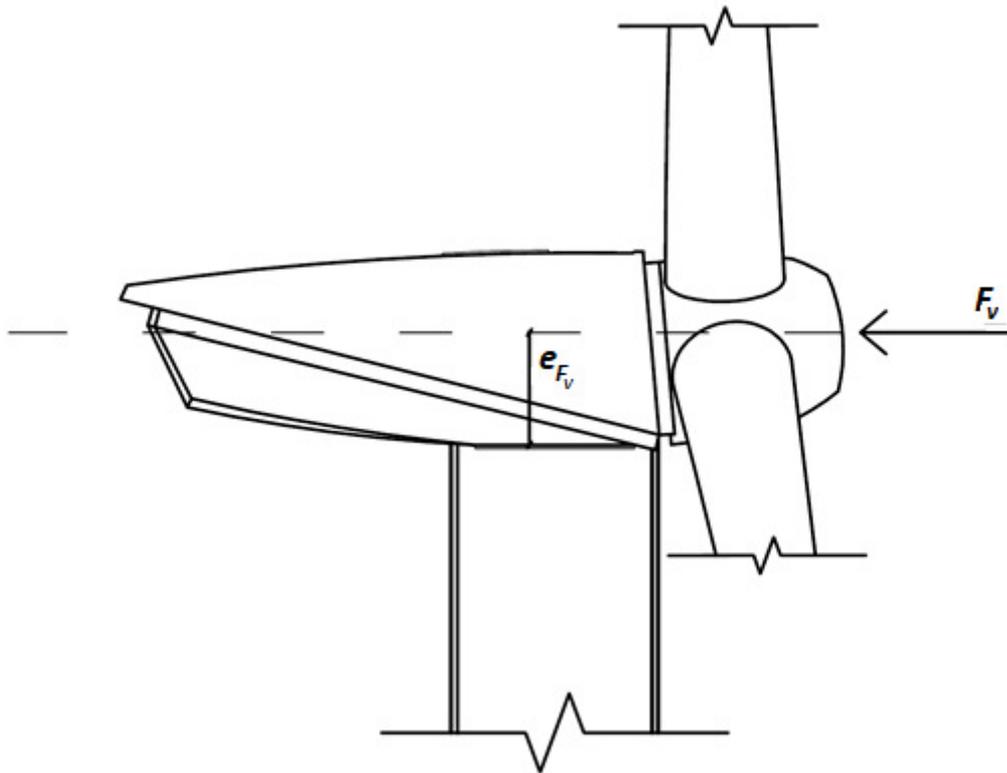
$$F_v = \frac{1}{2} \rho V_k^2 A_r n_p \quad (47)$$

A carga do vento quando atua sobre o conjunto nacele e rotor provoca uma força de arrasto que pode gerar um momento fletor. Esse momento é gerado pelo braço de alavanca da

força de arrasto em relação ao topo da torre, como mostra a Figura 20, podendo ser determinado pela Equação 48.

$$M_v = F_v e_{fv} \quad (48)$$

Figura 20 – Braço de alavanca da força de arrasto em relação ao topo da torre.



Fonte: Elaborada pelo Autor

Em relação à ação do vento sobre a torre, verifica-se que o carregamento distribuído aumenta gradualmente, à medida que aumenta a distância em relação ao solo, e apresenta uma leve diminuição com a mudança de trecho. Esse carregamento atua ao longo de todo o comprimento da torre, como expressa a Equação 49, no qual θ é o ângulo formado com o eixo x e $p_v(\theta, z)$ é a pressão dinâmica normal à superfície da torre produzida pelo vento.

$$q(z) = \int_0^{2\pi} p_v(\theta, z) \cos(\theta) r_{e(i)} d\theta \quad (49)$$

Para o cálculo desse carregamento, é adotada a hipótese que o vento só produzirá uma pressão dinâmica normal à superfície da torre (BILLINGTON, 1982), como expressa a Equação 50, em que q_v representa a pressão dinâmica do vento, avaliada pela Equação 51, G

é o fator de rajada, adotado igual a um para favorecer a segurança, $H_z(z)$ é o termo que governa a distribuição vertical do vento, expresso pela Equação 52, e $H_\theta(\theta)$ é o termo que governa a distribuição do vento ao longo da circunferência da torre, como mostra a Equação 53, na qual θ é o ângulo formado com o eixo x e os coeficientes A_n encontram-se na Tabela 3. Os valores apresentados na Tabela 3 foram obtidos para ventos de baixa velocidade registrados por Niemann (BILLINGTON, 1982).

$$p_v(\theta, z) = H_\theta(\theta)H_z(z)Gq_v \quad (50)$$

$$q_v = 0,613V_k^2 \text{ com } V_k \text{ em (m/s)} \quad (51)$$

$$H_z(z) = 2,64 \left(\frac{z}{y_g} \right)^{2\alpha} \quad (52)$$

$$H_\theta(\theta) = \sum_{n=0}^7 A_n \cos(n\theta) \quad (53)$$

Em que, de acordo com Billington (1982), temos:

- Cidades (Exposição A): $\alpha = 1/3$ e $y_g = 457m$;
- Campo fechado (Exposição B): $\alpha = 2/9$ e $y_g = 366m$;
- Campo aberto (Exposição C): $\alpha = 1/7$ e $y_g = 274m$.

Tabela 3 - Valores obtidos para ventos de baixa velocidade registrados por Niemann.

n	0	1	2	3	4	5	6	7
A_n	-0.2636	0.3419	0.5418	0.3872	0.0525	-0.0771	-0.0039	0.0341

Fonte: Billington (1982).

3.3.2 Tensão normal longitudinal

A tensão normal longitudinal é determinada a partir dos esforços internos solicitantes que ocorrem ao longo da torre. Considerando-se os carregamentos atuantes ao longo do eixo z da

torre tubular, é possível determinar o esforço normal e o momento fletor, expressos pelas as Equações 54 e 55, respectivamente, e, conseqüentemente, avaliar o campo de tensão normal longitudinal através da Equação 56.

$$N_{(i)}(z) = -P_n - p_{t(i)}(z) \quad (54)$$

$$M_{(i)}(z) = M_v - M_n + F_v(H - z') + \int_z^H q_{(i)}(z')(z' - z) dz' \quad (55)$$

$$\sigma_{z(i)}(\theta, r, z) = \frac{N_{(i)}(z)}{A_{(i)}} + \frac{M_{(i)}(z)}{I_{(i)}} r_{(i)} \cos \theta \quad (r_{i(i)} \leq r_{(i)} \leq r_{e(i)}, 0 \leq \theta \leq 2\pi) \quad (56)$$

em que:

- $A_{(i)} = 2\pi r_{0(i)} e_{(i)} \Rightarrow$ área da seção transversal de um anel circular fino;
- $I_{(i)} = \pi r_{0(i)}^3 e_{(i)} \Rightarrow$ momento de inércia da seção transversal de um anel circular fino;
- $r_{0(i)} = [r_{e(i)} - r_{i(i)}]/2 \Rightarrow$ raio médio de um anel circular fino.

3.3.3 Tensão de cisalhamento em elementos de parede fina

A tensão de cisalhamento em elementos de parede fina tem como resultante o esforço cortante, que varia ao longo do eixo z da torre tubular tal como descrito pela Equação 57. O campo de tensão de cisalhamento atuante na torre é determinado por meio do método do fluxo de cisalhamento para elementos de parede fina, como mostra a Equação 58.

$$Q_{(i)}(z) = -F_v - \int_z^H q_{(i)}(z') dz' \quad (57)$$

$$\tau_{z\theta(i)}(\theta, r, z) = -Q_{(i)}(z) \frac{1}{I_{(i)}} V_{(i)}(\theta, z) \frac{1}{2e_{(i)}} \left(r_{i(i)} \leq r_{(i)} \leq r_{e(i)}, 0 \leq \theta \leq 2\pi \right) \quad (58)$$

no qual:

- $V_{(i)}(\theta, z)$ = momento estático de primeira ordem de um arco circular fino;
- $V_{(i)}(\theta, z) = \frac{2\theta r_{0(i)} e_{(i)} r_{0(i)} \text{sen}\theta}{\theta} \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2});$
- $V_{(i)}(\theta, z) = \frac{2(\pi-\theta) r_{0(i)} e_{(i)} r_{0(i)} \text{sen}(\pi-\theta)}{(\pi-\theta)} \quad (\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi);$
- $V_{(i)}(\theta, z) = -\frac{2(\theta-\pi) r_{0(i)} e_{(i)} r_{0(i)} \text{sen}(\theta-\pi)}{(\theta-\pi)} \quad (\pi \leq \theta \leq 3\pi/2);$
- $V_{(i)}(\theta, z) = -\frac{2(2\pi-\theta) r_{0(i)} e_{(i)} r_{0(i)} \text{sen}(2\pi-\theta)}{(2\pi-\theta)} \quad (3\pi/2 \leq \theta \leq 2\pi).$

4 REQUISITOS ESTRUTURAIS

As restrições lineares estão relacionadas à geometria da torre. A primeira restrição linear é adotada para que a teoria de vigas seja aplicável, garantindo-se uma esbelteza mínima de acordo com a Equação 59, e a segunda restrição linear é imposta por uma questão de fabricação, considerando-se a espessura da parede do trecho não menor que dois milímetros.

$$r_{e(1)} \leq \frac{H}{20} \quad (59)$$

4.1 Flambagem local e global

As restrições não lineares levam em consideração o deslocamento no topo da torre, a inversa da razão de resistência e as flambagens global e local. Torres tubulares com paredes finas são suscetíveis a flambagens local e global quando submetidas a cargas axiais de compressão.

A instabilidade por distorção da seção, por flexão localizada do componente é definida como flambagem local (SANTOS, 2002). A flambagem local ou a tensão crítica para colunas cilíndricas de parede fina submetidas a uma carga de compressão axial para materiais isotrópicos pode ser avaliada pela Equação 60 (TIMOSHENKO; GERE, 1983), enquanto a flambagem local para materiais ortotrópicos pode ser avaliada pela Equação 61 (NEMETH; MIKULAS JR, 2009).

$$\sigma_{cri_fl(i)} = \frac{E e(i)}{r_{o(i)} \sqrt{3(1 - \nu^2)}} \quad (60)$$

$$\sigma_{cri_fl(i)} = \frac{\sqrt{E_z E_\theta}}{\sqrt{3(1 - \nu_{z\theta} \nu_{\theta z})}} \frac{e(i)}{r_{o(i)}} \quad (61)$$

em que:

- E é o módulo de elasticidade da parede da torre tubular e
- ν é o coeficiente de Poisson da parede da torre tubular.

O fenômeno da instabilidade por flexão, torção, ou flexo-torção do componente como um todo é definido como flambagem global (SANTOS, 2002). A flambagem global pode ser determinada pelo método energético aproximado através das Equações 62 e 63 (TIMOSHENKO; GERE, 1983).

$$P_{cri} = \frac{\pi^2 E_z}{8H} \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{I_{(i)}} \int_{h_{(i-1)}}^{h_{(i)}} \cos^2 \left(\frac{\pi z}{2H} \right) dz \right]^{-1} \quad (62)$$

$$\sigma_{cri_fl(i)} = \frac{P_{cri}}{A_{(i)}} \quad (63)$$

4.2 Avaliação dos deslocamentos da torre

Considerando-se o desempenho e a durabilidade da estrutura, os deslocamentos longitudinais, os deslocamentos transversais e os giros das seções são importantes restrições durante o processo de dimensionamento da torre (BARONI, 2003). Esses deslocamentos podem ser obtidos empregando-se uma abordagem energética.

4.2.1 Análise da deformação elástica

No dimensionamento de uma torre tubular, a análise de deformações é de extrema importância, para prever e controlar a magnitude dessas deformações e evitar a construção de torres tubulares exageradamente flexíveis (BARONI, 2003). As deformações longitudinais (ε_z) e de cisalhamento ($\gamma_{z\theta}$) podem ser determinadas através da lei de Hooke, que define uma relação linear entre as tensões e as deformações dentro da região elástica, como mostram as Equações 64 e 65.

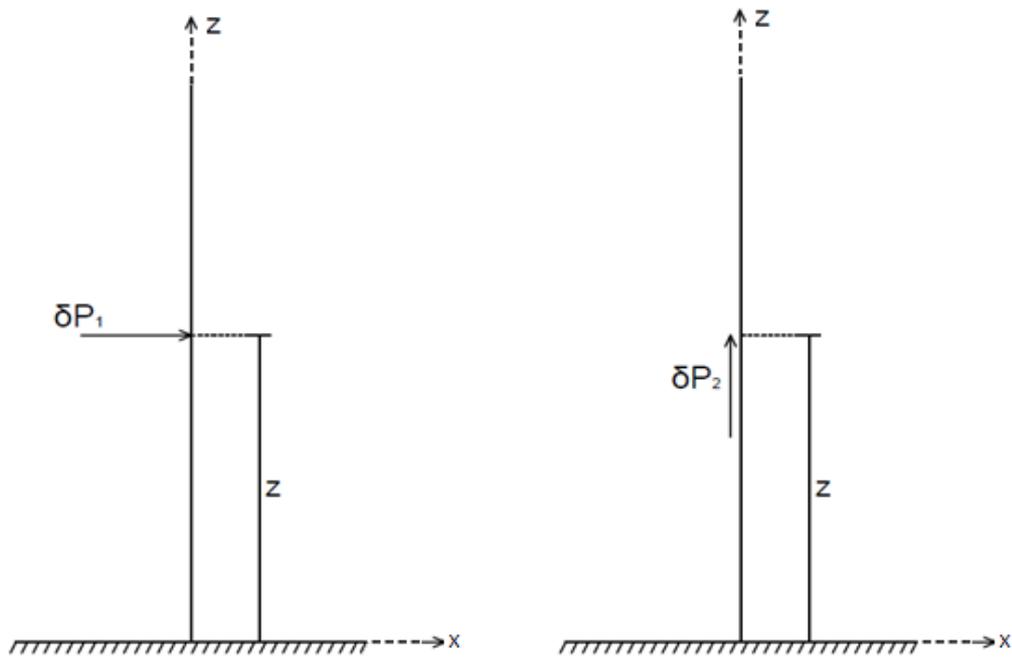
$$\varepsilon_{z(i)}(\theta, r, z) = \frac{\sigma_{z(i)}(\theta, r, z)}{E_z} \quad (64)$$

$$\gamma_{z\theta(i)}(\theta, r, z) = \frac{\tau_{z\theta(i)}(\theta, r, z)}{G_{z\theta}} \quad (65)$$

4.2.2 Princípio dos trabalhos virtuais

Proposto pelo matemático suíço Jean Bernoulli no século 18, o princípio dos trabalhos virtuais fornecia inicialmente um método alternativo para solucionar problemas que envolviam o equilíbrio de um sistema de corpos rígidos conectados (HIBBELER, 2011). No caso da torre tubular eólica, os sistemas virtuais contemplam as cargas virtuais δP_1 e δP_2 , separadamente, como ilustra a Figura 21, e os esforços e as tensões virtuais podem ser expressos pelas Equações 66 a 73.

Figura 21 – Cargas virtuais δP_1 e δP_2 aplicadas ao longo da torre.



Fonte: Elaborada pelo Autor

Para δP_1 , tem-se os seguintes esforços virtuais:

$$\delta N_1(z') = 0 \quad (66)$$

$$\delta Q_1(z') = \begin{cases} \delta P_1, z' \leq z \\ 0, z < z' \leq H \end{cases} \quad (67)$$

$$\delta M_1(z') = \begin{cases} -\delta P_1(z - z'), z' \leq z \\ 0, z < z' \leq H \end{cases} \quad (68)$$

Para δP_2 , tem-se os seguintes esforços virtuais:

$$\delta N_2(z') = \begin{cases} \delta P_2, z' \leq z \\ 0, z < z' \leq H \end{cases} \quad (69)$$

$$\delta Q_2(z') = 0 \quad (70)$$

$$\delta M_2(z') = 0 \quad (71)$$

Na análise de tensões destes sistemas virtuais, tem-se:

$$\delta \sigma_{z(i)}(\theta, R, z') = \frac{\delta N_i(z')}{A(z')} + \frac{\delta M_i(z')}{I(z')} R \cos(\theta) \quad (72)$$

$$\delta \tau_{z\theta(i)}(\theta, R, z') = -\delta Q_i(z') \frac{V(\theta, z')}{2e(z')I(z')} \quad (73)$$

Segundo Hibbeler (2011), como a carga virtual é aplicada antes das cargas reais provocarem deslocamentos, os trabalhos virtuais externos consistem simplesmente no produto entre as cargas virtuais e seus respectivos deslocamentos reais, que se igualam aos trabalhos virtuais internos tais como constam nas Equações 74 e 75.

$$\delta P_1 u_x(z) = \int_V \frac{\delta \sigma_{z(1)} \sigma_z}{E_z} dV + \int_V \frac{\delta \tau_{z\theta(1)} \tau_{z\theta}}{G_{z\theta}} dV \quad (74)$$

$$\delta P_2 u_z(z) = \int_V \frac{\delta \sigma_{z(2)} \sigma_z}{E_z} dV + \int_V \frac{\delta \tau_{z\theta(2)} \tau_{z\theta}}{G_{z\theta}} dV \quad (75)$$

Neste contexto, costuma-se atribuir às cargas dos sistemas virtuais δP_1 e δP_2 valores unitários, possibilitando-se, assim, determinar os deslocamentos reais que ocorrem ao longo da torre tubular de aerogerados por meio das Equações 76 e 77.

$$u_r(z) = \int_0^z \int_{R_i(z)}^{R_e(z)} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\delta \sigma_{z(1)} \sigma_z}{E_z} + \frac{\delta \tau_{z\theta(1)} \tau_{z\theta}}{G_{z\theta}} \right] d\theta dR dz' \quad (76)$$

$$u_z(z) = \int_0^z \int_{R_i(z')}^{R_e(z')} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\delta\sigma_z(z)\sigma_z}{E_z} + \frac{\delta\tau_{z\theta}(z)\tau_{z\theta}}{G_{z\theta}} \right] d\theta dR dz' \quad (77)$$

4.3 Análise de resistência

A partir das tensões atuantes nas lâminas que compõem o laminado, as teorias de falha determinam se o laminado falhou, ou seja, neste trabalho, a ocorrência de falha em uma lâmina é o suficiente para determinar a falha do laminado, esta abordagem é denominada de *First Ply Failure*, tratando-se de uma escolha conservadora. Para determinar a resistência do laminado é preciso estabelecer os parâmetros de resistência das lâminas.

4.3.1 Avaliação dos parâmetros de resistência das lâminas

As teorias de falha aplicadas às lâminas não são baseadas na avaliação das tensões normais e de cisalhamento máximas, como no caso dos materiais isotrópicos, mas são baseadas nas tensões nas direções principais do material, pois se trata de um material ortotrópico, possuindo, assim, propriedades diferentes para diferentes ângulos. A Resistência dos Materiais serve como base para o desenvolvimento das expressões que estima os parâmetros de resistência das lâminas de material compósito (KAW, 2006). No caso de lâminas reforçadas por fibras transversalmente isotrópicas são realizadas as devidas modificações nas expressões da Tabela 4, na qual constam as deformações normais e angulares últimas dos constituintes (SILVA, 2017).

Tabela 4 - **Parâmetros de resistência das lâminas.**

Resistência à tração na direção paralela às fibras:

$$X_t \leq \begin{cases} E_1(\varepsilon_{1,f})_{ult} \\ E_1(\varepsilon_m)_{ult} \end{cases}$$

Resistência à tração na direção perpendicular às fibras:

$$Y_t \leq \begin{cases} E_2 \left[\frac{d}{s} \frac{E_m}{E_{2,f}} + \left(1 - \frac{d}{s} \right) \right] (\varepsilon_m)_{ult} \\ E_2 \left[\frac{d}{s} + \frac{E_{2,f}}{E_m} \left(1 - \frac{d}{s} \right) \right] (\varepsilon_{22,f})_{ult} \end{cases}$$

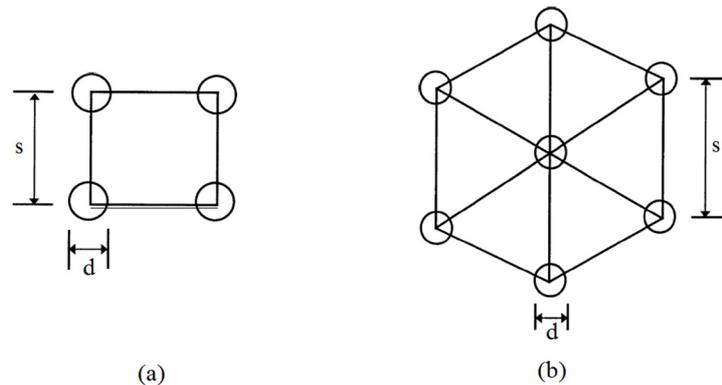
Resistência ao cisalhamento no plano da lâmina:

$$S \leq \begin{cases} G_{12}(\gamma_m)_{ult} \left[\frac{d}{s} \frac{G_m}{G_{12,f}} + \left(1 - \frac{d}{s}\right) \right] \\ G_{12}(\gamma_{12,f})_{ult} \left[\frac{d}{s} + \frac{G_{12,f}}{G_m} \left(1 - \frac{d}{s}\right) \right] \end{cases}$$

Fonte: Adaptada de Silva (2011)

A forma como as fibras estão distribuídas ao longo do plano de isotropia da lâmina está vinculada com a relação d/s (KAW, 2006). Na literatura podem ser encontrados dois possíveis tipos de arranjos de fibras, tal como mostra a Figura 22, em que s representa o espaçamento entre os centroides de cada fibra e d o diâmetro das fibras (SILVA, 2017).

Figura 22 - Espaçamento entre fibras para arranjos quadrático (a) e hexagonal (b).



Fonte: Kaw (2006)

Neste trabalho, é assumido que as fibras apresentam um arranjo hexagonal, apresentando desta forma um plano de isotropia transversalmente às fibras. A relação d/s é estabelecida para o caso de arranjos quadráticos por $d/s = \left(\frac{4V_f}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$, enquanto que para arranjos hexagonais tem-se $d/s = \left(\frac{2\sqrt{3}V_f}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$.

4.3.2 Critérios de resistência e razão de resistência

O *Critério de Resistência de Tsai-Hill* é uma adaptação ou versão do *Critério de von Mises* aplicado na análise de falhas de lâminas de materiais compósitos (SILVA, 2017). Ao se observar o critério da máxima energia de distorção aplicado aos materiais ortotrópicos, no qual o elemento estrutural encontra-se em um Estado Plano de Tensões, foi possível o desenvolvimento desse critério, que inicialmente foi aplicado por Hill na análise de materiais

anisotrópicos, posteriormente adaptado por *Tsai* para uma lâmina unidirecional (KAW, 2006), ocorrendo a falha da mesma quando a Equação 78 é violada.

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = \left[\frac{\sigma_1}{X_T} \right]^2 - \left[\frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_T^2} \right] + \left[\frac{\sigma_2}{Y_T} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{12}}{S} \right]^2 < 1 \quad (78)$$

em que,

- σ_1 : tensão na direção da fibra;
- σ_2 : tensão na direção perpendicular à fibra;
- τ_{12} : tensão de cisalhamento no plano da lâmina.

O *Critério de Resistência de Tsai-Hill* utiliza as tensões σ_1 , σ_2 e τ_{12} nas direções principais de cada lâmina, portanto, para realizar a análise da *First Ply Failure* de um laminado, faz-se necessário a avaliação dos campos de tensões de todas as lâminas que compõem o laminado (SILVA, 2017). Para determinar as tensões nas direções principais da lâmina, primeiro é estabelecido que a deformação do laminado é igual a deformação da lâmina nas direções z e θ , como mostra a Equação 79.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{z\theta} \end{Bmatrix}_{L\grave{a}mina} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{z\theta} \end{Bmatrix}_{Laminado} \quad (79)$$

Estabelecida esta compatibilidade cinemática, é possível determinar as tensões da lâmina nas direções z e θ , através da matriz de rigidez reduzida transformada da lâmina, como mostra a Equação 80. As tensões nas direções principais da lâmina podem ser determinadas por meio da matriz de transformação da lâmina, como mostra a Equação 81.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{z\theta} \end{Bmatrix}_{L\grave{a}mina} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{z\theta} \end{Bmatrix}_{L\grave{a}mina} \quad (80)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}_{L\grave{a}mina} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{z\theta} \end{Bmatrix}_{L\grave{a}mina} \quad (81)$$

na qual,

$$[T] = \begin{pmatrix} \cos^2\theta_f & \sin^2\theta_f & 2\sin\theta_f\cos\theta_f \\ \sin^2\theta_f & \cos^2\theta_f & -2\sin\theta_f\cos\theta_f \\ -\sin\theta_f\cos\theta_f & \sin\theta_f\cos\theta_f & \cos^2\theta_f - \sin^2\theta_f \end{pmatrix} \quad (82)$$

sendo θ_f o ângulo das fibras em relação a direção longitudinal da torre.

O critério de *Tsail-Hill* pode ser empregado por meio da avaliação da *Razão de Resistência*. A *Razão de Resistência* é aplicada em qualquer teoria de falha, porém, ela se mostra bastante interessante ao fornecer informações sobre o quanto de carga pode ser aplicado, se há reserva de segurança, ou o quanto de carga deve ser diminuído, para o caso de a lâmina falhar.

Além disso, o conceito da *Razão de Resistência* foi desenvolvido com o objetivo de detectar a primeira falha sem a necessidade de um processo de análise de falhas incremental, ou seja, o processo de acréscimo de carregamento até que ocorra a primeira falha (KOLIOS, 2012). Neste trabalho é determinada a *Inversa da Razão de Resistência* (Equação 83), uma vez que ela avalia o quanto da resistência está sendo utilizado.

$$\lambda(\sigma) = \sqrt{f(\sigma)} \quad (83)$$

com

- $\lambda(\sigma) < 1$, a lâmina está numa condição segura e a tensão aplicada pode ser aumentada.
- $\lambda(\sigma) > 1$, a lâmina está numa condição insegura e a tensão aplicada precisa ser reduzida.
- $\lambda(\sigma) = 1$ implica em uma carga de falha.

A violação do critério de resistência está associada ao colapso da estrutura ou ao início do processo de falha, de modo que seu uso deva ser interrompido. Nas análises de torres de aerogeradores confeccionadas em aço ou alumínio, que são materiais isotrópicos, a *Inversa da Razão de Resistência* é avaliada por meio da tensão equivalente do Critério de *von Mises*.

O Critério de *von Mises* ou a teoria da energia de distorção máxima propõe que o escoamento num material dúctil ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume do material é igual ou ultrapassa a energia de distorção por unidade de volume no material

que está sujeito ao escoamento no ensaio de tração (HIBBELER, 2010). Essa teoria estabelece um valor único de tensão que representa um estado de tensão multiaxial num determinado ponto do material.

Segundo Norton (2013), a tensão equivalente de *von Mises* é definida como a tensão de tração uniaxial que criaria a mesma energia de distorção que a combinação das tensões aplicadas. Na análise do comportamento de torres de turbinas eólicas é observada somente a atuação das tensões normal longitudinal e de cisalhamento. Assim, a tensão equivalente de *von Mises* pode ser determinada pela Equação 84.

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_z)^2 + 3(\tau_{z\theta})^2} \quad (84)$$

5 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

O Brasil não possui uma norma específica para projetos de torres de aerogeradores e nem para torres estruturais em materiais compósitos. Além disso, não foram encontradas normas internacionais para torres estruturais em materiais compósitos. De acordo com Mathijsen (2013), Ten Busschen, então presidente da VKCN (Associação Holandesa de Compósitos Plásticos), declarou que “os compósitos têm muitos códigos de projeto em áreas específicas, como aviação, turbinas eólicas, tanques e tubos, mas num sentido geral, especificamente na engenharia civil, não existe um padrão europeu, enquanto madeira, concreto, aço, alumínio e até tijolo e argamassa os possuem.”

Diante das dificuldades citadas acima, e com o intuito de estabelecer um único padrão para comparar as torres em material compósito, aço e alumínio, além de priorizar a utilização das normas brasileiras, opta-se neste trabalho por empregar as recomendações da NBR 8800 (2008) e da NBR 6123 (1988) para a análise de torres tubulares de aerogeradores. A NBR 6123 (1988) é a norma recomendada para determinar a velocidade básica do vento, através do mapa das isopletas, e a velocidade característica do vento, expressa pela Equação 85, na qual V_0 é a velocidade básica do vento. S_1 , S_2 e S_3 são fatores determinados pela NBR 6123 (1988), que levam em conta as variações do relevo do terreno, o efeito combinado da rugosidade do terreno com as dimensões da construção e o grau de segurança requerido e a vida útil da torre baseada em conceitos estatísticos, respectivamente.

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (85)$$

As recomendações para estruturas metálicas podem ser encontradas na NBR 8800 (2008). Ela contempla recomendações de análise estrutural de materiais metálicos, além dos coeficientes usados nas ações e nos critérios de resistência e dos estados limites considerados na análise.

O estado limite é quando uma estrutura ou parte dela se torna, de modo efetivo ou convencional, inutilizável ou quando deixa de satisfazer as condições previstas para a sua utilização (NBR 8800, 2008). Em um projeto estrutural são abordados dois estados limites: o de serviço e o último.

O estado limite de serviço é o estado no qual a estrutura não se encontra apta ao uso normal, esse estado está relacionado com a durabilidade da estrutura, com a aparência da construção e com o conforto do usuário. O estado limite último é o estado em que a estrutura atinge uma condição crítica, esse estado está relacionado ao colapso ou ruína da estrutura, determinando, assim, a paralização imediata do seu uso.

O estado limite de serviço recomendado para o dimensionamento da torre está relacionado com o deslocamento máximo no topo, de forma a não prejudicar o funcionamento da turbina eólica e nem causar insegurança aos usuários. O estado limite último é aplicado para análise de resistência e de flambagens local e global da torre.

Para análise de estado limite último, a velocidade de vento a ser considerada é a do Caso 3 (velocidade de vento de tempestade), enquanto para análise de estado limite de serviço deve ser considerada a velocidade de vento do Caso 1 (velocidade nominal do vento). A NBR 8800 (2008) estabelece coeficientes de majoração para as ações e de ponderação para os critérios de resistência. Esses coeficientes e suas aplicações são apresentados na Tabela 5. Como a norma adota uma abordagem diferente deste trabalho na análise de flambagem, que não se aplica a materiais compósitos, os coeficientes de ponderação adotados para as flambagens local e global são 5 e 3, respectivamente, pois são geralmente estes os valores adotados para favorecer a segurança. Além disso, segundo Akin (2009), a flambagem geralmente leva a resultados ruins ou até catastróficos, assim, pode ser utilizado um alto coeficiente de segurança para cargas críticas de flambagem (por exemplo, $CS > 2$).

Tabela 5 - Coeficientes da NBR 8800 (2008).

Coeficientes Segundo a NBR 8800 (2008)	Estado limite de serviço	Estado limite último
Ação do vento (Majoração)	1	1.4
Peso próprio (Majoração)	1	1.25
Sobre carga (Majoração)	1	1.5
Tensão de Escoamento (Ponderação)	-	1.1
Deslocamento máximo no topo	H/400	-

Fonte: Elaborada pelo Autor

6 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

O conceito de otimização está bastante presente no cotidiano de engenheiros e administradores, uma vez que o processo de otimização tem por fundamento encontrar a melhor solução para uma certa operação (VANDERPLAATS, 1984). A otimização estrutural procura pela melhor solução para suportar cargas, ou seja, tornar a estrutura mais leve ou tão rígida o quanto possível, ou ainda, torná-la menos suscetível ao encurvamento ou à instabilidade (CHRISTENSEN; KLARBRING, 2009).

Há diversos métodos para a solução de problemas de otimização, a depender do tipo de problema. Segundo Olivieri (2004), os métodos de otimização podem ser divididos de acordo com a natureza e/ou com as restrições do problema em dois grupos principais: a programação linear e a programação não-linear.

A programação linear busca encontrar a solução ótima em problemas no qual a função objetivo e todas as restrições são definidas por funções lineares envolvendo as variáveis de projeto, enquanto a programação não-linear trata dos problemas nos quais a função objetivo ou alguma(s) das restrições do problema são funções não-lineares das variáveis envolvidas (OLIVIERI, 2004). Neste trabalho é tratado um problema de programação não-linear.

A programação linear pode ter como método de solução o Simplex, um dos principais métodos para esse tipo de análise. A programação não-linear apresenta diversos métodos para a sua solução, podendo ser divididos em duas grandes famílias: os métodos determinísticos (Método do Gradiente, de Newton etc.) e não-determinísticos (Computação evolutiva, lógica de fuzzy etc.) (OLIVIERI, 2004).

Dentro desses métodos determinísticos, encontra-se o método de Programação Quadrática Sequencial (PQS). Segundo Venkataraman (2010), a programação quadrática sequencial é um método que busca minimizar a função Lagrangeana do problema aplicando o método de Newton, sendo um dos mais empregados em problemas de otimização não-linear.

A implementação das técnicas de otimização estrutural pode ser feita por diversos *softwares*, optando-se neste trabalho pela função *fmincon* do MATLAB, função na qual o algoritmo de otimização utiliza o método PQS (GIRARDI; SEVERO, 2009). Segundo Almeida Jr. (2015), o MATLAB permite ao usuário criar o seu próprio código para ser usado na otimização, além da *toolbox* incluir rotinas numéricas para vários tipos de otimização:

- Minimização não-linear sem restrições;
- Minimização não-linear com restrições;
- Programação quadrática e linear;
- Ajustes não-lineares de curvas;
- Solução de sistemas de equações não-lineares.

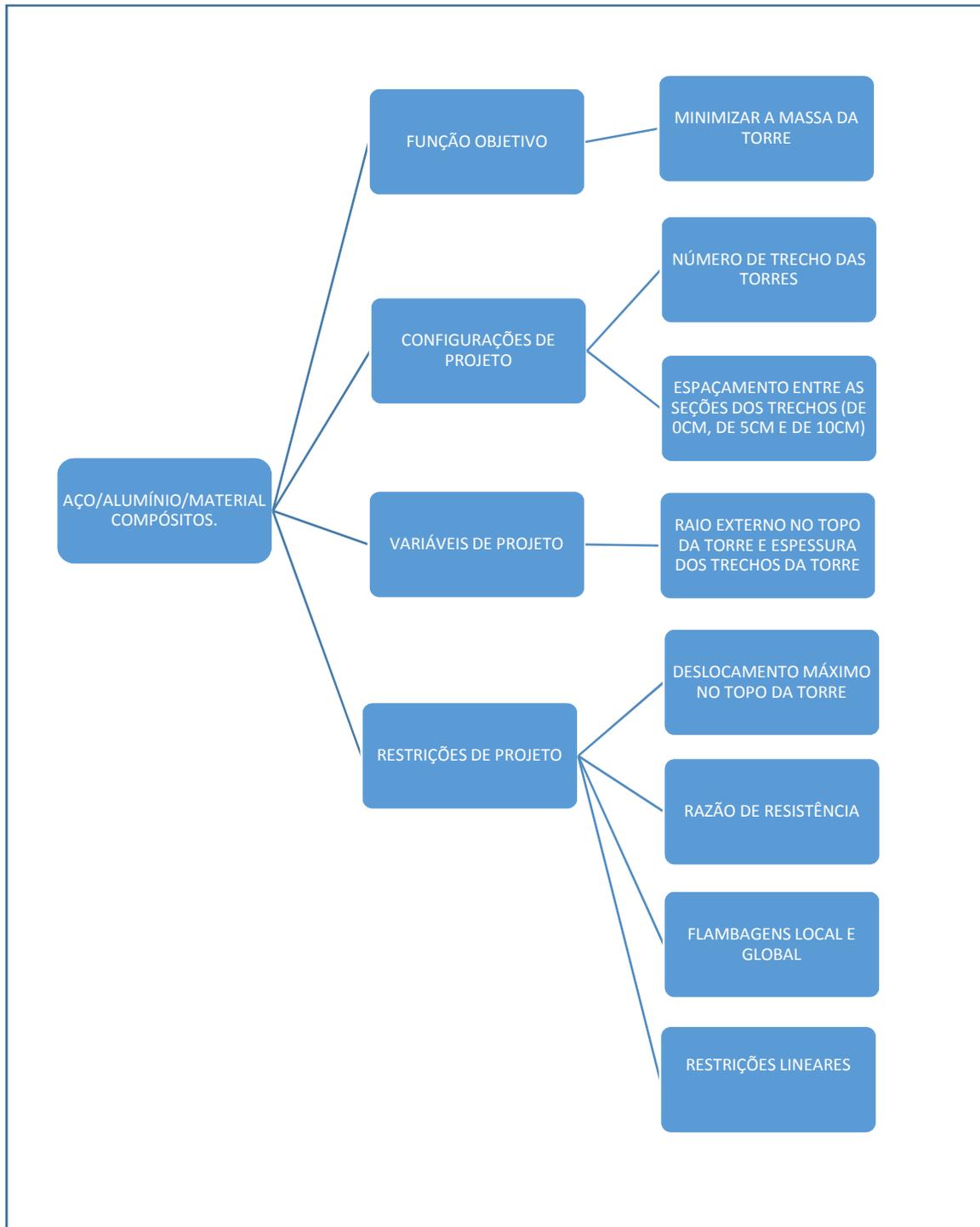
O comando *fmincon* é um solucionador de programação não linear fornecido na *toolbox* de otimização do MATLAB. Ele permite encontrar um mínimo restrito de uma função escalar de várias variáveis a partir de uma estimativa inicial, admitindo restrições lineares e não-lineares.

O processo de otimização tem início a partir da definição da função objetivo (definir o que vai ser maximizado ou minimizado), da definição das restrições (as especificações que devem ser atendidas), e da definição das variáveis de projeto (os parâmetros que podem ser alterados na estrutura). Esse processo normalmente tem uma configuração inicial que pode ser chamada de chute inicial, na qual estabelece uma configuração que serve de referência para o processo de otimização.

As torres tubulares têm como função objetivo a minimização de sua massa, como define a Equação 86, em que ρ_m é a densidade do material. São variáveis de projeto a espessura dos trechos e o raio externo no topo da torre, e como restrições não-lineares têm-se o deslocamento máximo no topo da torre, a inviolabilidade da *Razão de Resistência* e as flambagens local e global, além das restrições lineares definidas anteriormente. Todo esse processo de otimização é implementado no ambiente da *toolbox* de otimização do MATLAB, por meio do comando *fmincon*. Os aspectos levados em consideração na otimização das torres de materiais compósitos, de aço e de alumínio podem ser visualizados na Figura 23.

$$M_t = \rho_m \sum_{i=1}^n A_{(i)} h_{(i)} \quad (86)$$

Figura 23 - Aspectos levados em consideração na otimização da torre tubular.



Fonte: Elaborada pelo Autor

A Figura 23 demonstra que os requisitos do processo de otimização são estabelecidos de forma igual para todos os materiais (aço, alumínio e materiais compósitos). Também é possível verificar que o número de configurações estruturais aumenta ao ser estabelecido

variações no número de trechos e o espaçamento entre as seções dos trechos da torre, viabilizando encontrar mais e melhores soluções estruturais.

7 RESULTADOS

Neste trabalho, é considerado o dimensionamento de torres hipotéticas para um aerogerador de pequeno porte da Xzeres, modelo Skystream 3.7 (XZERES, 2018). As especificações técnicas do Skystream 3.7 da Xzeres são detalhadas na Tabela 6. É possível verificar através da Tabela 6 que o Skystream 3.7 é um aerogerador com baixa massa, o seu design apresenta três pás e trata-se de um aerogerador de pequeno porte devido a sua baixa potência.

Tabela 6 - **Especificações técnicas do Skystream 3.7 da Xzeres.**

Potência máxima	2,6 kW
Diâmetro do rotor	3,72 m
Número de pás	3
Massa	77 kg

Fonte: Elaborada pelo Autor

É considerada uma parte remota da cidade de Maceió no estado de Alagoas como local de instalação, com a velocidade básica do vento de 30 m/s, a densidade do ar de 1.131 kg/m³ e uma torre de dezoito metros de altura. As torres tubulares são dimensionadas considerando-se o aço, o alumínio e o material compósito (epóxi reforçado com fibra de vidro e de carbono) como materiais de fabricação.

Neste trabalho, as propriedades mecânicas do aço e do alumínio são encontradas na Tabela 7. A Tabela 7 mostra que o resultado obtido para relação entre o módulos de elasticidade longitudinal e transversal é praticamente o mesmo para o alumínio 606-T6 e o aço estrutural A-36, com o alumínio apresentando menor massa específica.

Tabela 7 - **Propriedades mecânicas do Alumínio 6061-T6 e Aço estrutural A-36.**

Propriedades mecânicas do material	Alumínio 606-T6	Aço estrutural A-36
Massa específica	2710 kg/m ³	7850 kg/m ³
Módulo de elasticidade longitudinal	68900 MPa	200000 Mpa
Módulo de elasticidade transversal	26000 MPa	75000 Mpa
Coefficiente de Poisson	0,35	0,32
Tensão de escoamento	255MPa	250 Mpa

Fonte: Elaborada pelo Autor

Na Tabela 8, encontram-se as propriedades dos materiais constituintes do material compósito. É possível observar que as fases de reforço, ou seja, a fibra de vidro-E e o carbono

T800, apresentam maiores módulos de elasticidade se comparados à fase de matriz (epoxy 8551-7), algo já esperado.

Tabela 8 - **Propriedades dos materiais constituintes do material compósito.**

Propriedades mecânicas	Vidro-E	Carbono T800	Epoxy 8551-7
$\rho(kg/m^3)$	2540	1800	1273,3
$E_{11}(MPa)$	72395	234500	4080
$E_{22}(MPa)$	72395	14120	4080
$G_{12}(MPa)$	30336,9	14700	1478
$G_{23}(MPa)$	30336,9	6418	1478
ν_{12}	0,2	0,246	0,38
ν_{23}	0,2	0,1	0,38
$(\sigma_{11})_{ult}(MPa)$	2150	5685	98,9
$(\sigma_{12})_{ult}(MPa)$	-	-	110,8
$(\varepsilon_{11})_{ult} (%)$	2,97	2,42	2,423
$(\gamma_{12})_{ult}$	-	-	0,075

Fonte: Adaptada de Silva (2017).

O laminado é simétrico do tipo *angle-ply*, com lâminas de fibras de vidro e de carbono orientadas a $[+15^\circ / -15^\circ]_s$ em relação ao eixo da torre e com uma fração volumétrica de fibras igual a 60%. Por meio das expressões apresentadas nas sessões anteriores, são estimadas as propriedades elásticas efetivas, através do modelo baseado na teoria da elasticidade linear, e os parâmetros de resistência das lâminas de material compósito, como mostra a Tabela 9.

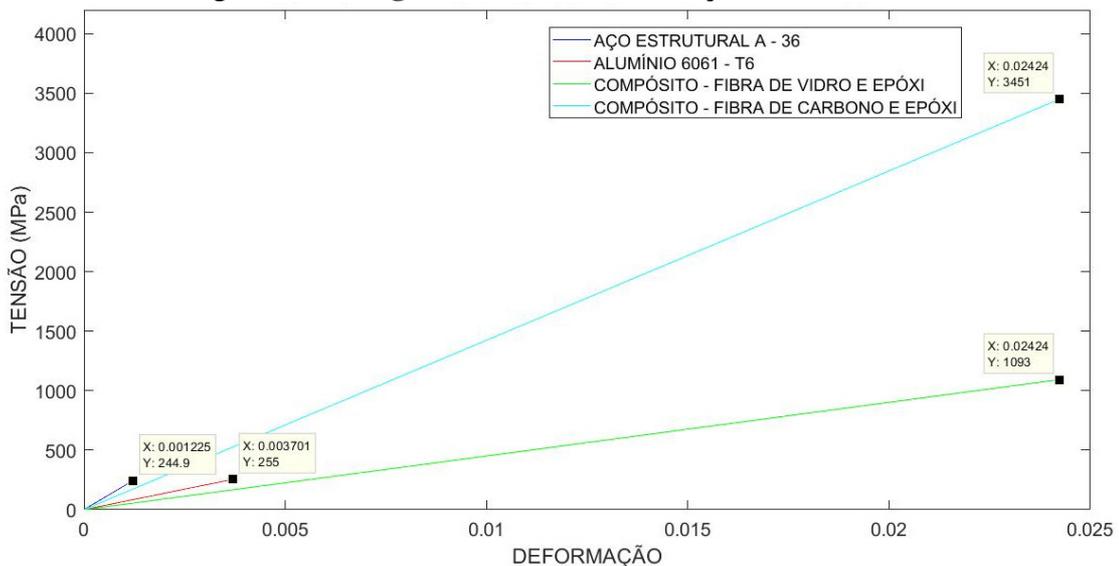
Tabela 9 - **Propriedades elásticas efetivas e os parâmetros de resistência das lâminas de material compósito.**

	Vidro-E / Epoxy 8551-7	Carbono T800 / Epoxy 8551-7
$E_{11}(MPa)$	45109,2	142354,1
$E_{22}(MPa)$	15241,3	8745,9
$G_{12}(MPa)$	5004,5	3254,8
ν_{12}	0,264	0,295
$X_T(MPa)$	1093,4	3450,7
$Y_T(MPa)$	85,9	89,4
$S(MPa)$	84,9	65,5

Fonte: Adaptada de Silva (2017).

É possível verificar a rigidez e resistência relativas dos quatros materiais (aço, alumínio, fibra de vidro e epóxi e fibra de carbono e epóxi) através da Figura 24 que mostra a relação da tensão com a deformação dos materiais no regime elástico (até a ruptura ou escoamento do material). Isso pode ser observado, pois o módulo de elasticidade dos materiais quantifica a sua rigidez (inclinação do diagrama tensão-deformação), enquanto os parâmetros de resistência (tensões de escoamento e de ruptura) quantificam a resistência.

Figura 24 – Diagrama tensão-deformação dos materiais.



Fonte: Elaborada pelo Autor

Determinadas as propriedades efetivas das lâminas, é possível avaliar as propriedades efetivas do laminado por meio das expressões apresentadas nos capítulos anteriores, de acordo com a Tabela 10. É possível verificar através da Tabela 10 que o laminado de fibra de carbono e epóxi apresenta uma menor densidade, porém um maior módulo longitudinal na direção z , se comparado com o laminado de fibra de vidro e epóxi, sendo, desta forma, um material mais leve e com uma maior rigidez relativa na direção z .

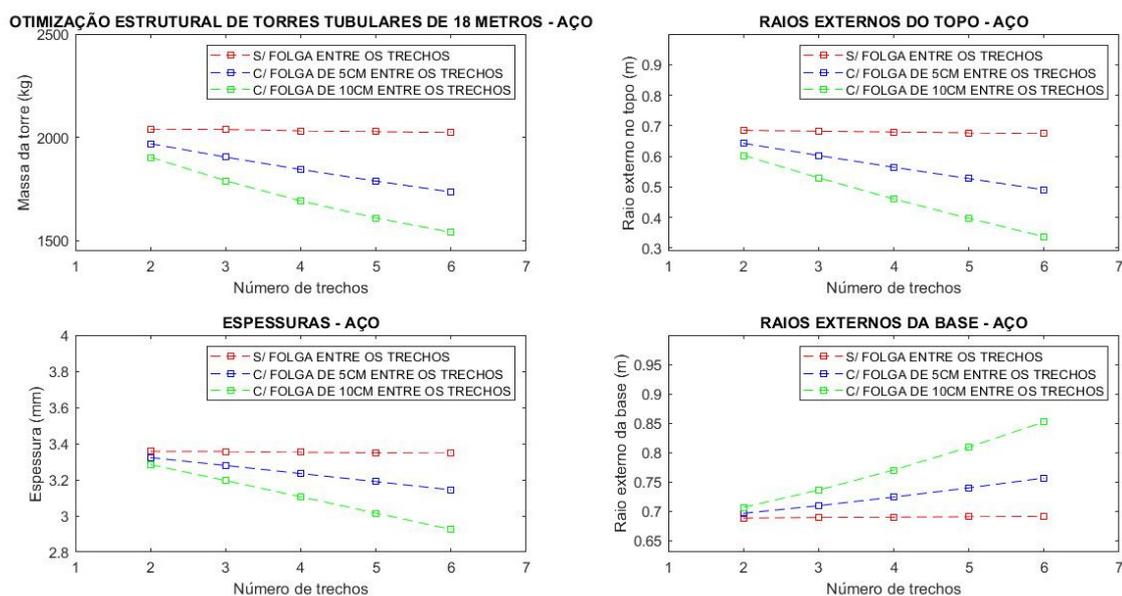
Tabela 10 - Propriedades efetivas do laminado.

Propriedades efetivas do laminado	Fibra de vidro/Epóxi	Fibra de carbono/Epóxi
Densidade	2033,32 kg/m ³	1589,32 kg/m ³
Módulo longitudinal na direção z	39567,28 MPa	113054,50 Mpa
Módulo longitudinal na direção θ	14641,98 MPa	8481,03 Mpa
Módulo de cisalhamento	7101,15 MPa	11611,37 Mpa
Coefficiente de Poisson ($\nu_{z\theta}$)	0,4	1,16
Coefficiente de Poisson ($\nu_{\theta z}$)	0,15	0,09

Fonte: Elaborada pelo Autor

O processo de otimização é aplicado em torres com espessuras constantes, com diferentes números de trechos (de dois a seis trechos) e com diferentes configurações (torres sem espaçamento entre as seções dos trechos, com cinco centímetros e dez centímetros de espaçamento). Os resultados ótimos obtidos para torres de aço, podem ser observados na Figura 25, na qual podem ser verificados os raios externos da base e do topo da torre, em metros, as espessuras, em milímetros, e as massas, em quilogramas, das configurações ótimas obtidas.

Figura 25 – Otimização estrutural de torres de aço de aerogeradores.



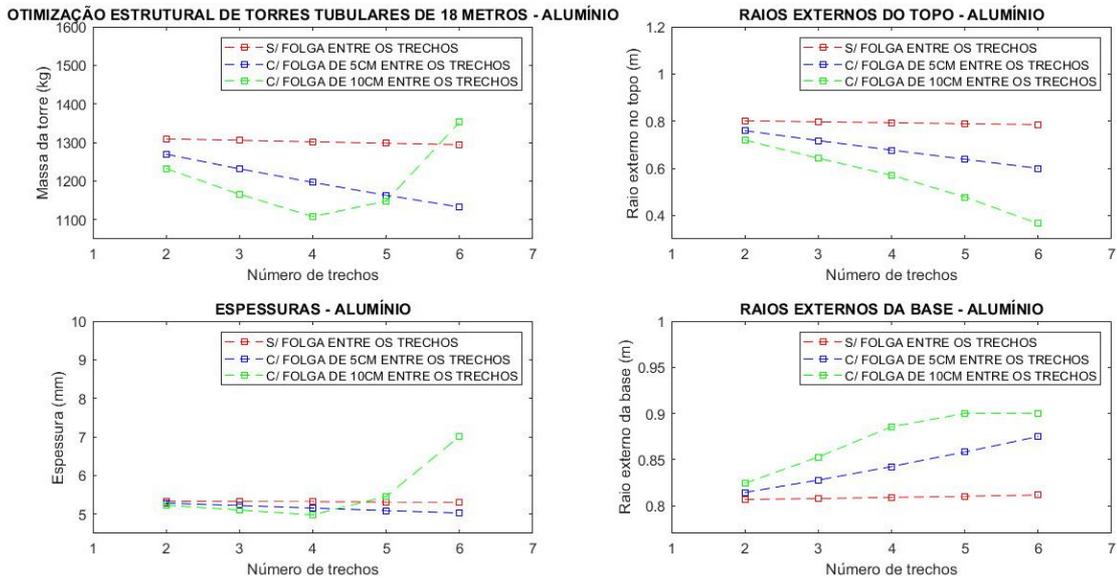
Fonte: Elaborada pelo Autor

A Figura 25 mostra que as massas, os raios externos do topo e as espessuras apresentam o mesmo comportamento, ou seja, à medida que aumenta o número de trechos e o espaçamento entre as seções dos trechos, a massa, o raio externo no topo e as espessuras reduzem os seus valores. Os raios externos da base apresentam um comportamento inverso ao citado anteriormente, ou seja, seus valores aumentam à medida que o número de trechos e espaçamento entre as seções dos trechos aumentam.

Os resultados obtidos para as torres de alumínio são apresentados na Figura 26, na qual é observado o comportamento das massas, dos raios externos do topo, das espessuras e dos raios externos da base das torres. As torres em alumínio apresentam comportamento similar aos das torres em aço, porém, para as configurações de cinco e seis trechos com dez centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos, a massa e a espessura da torre têm

seus valores aumentados devido ao raio da base atingir seu valor máximo imposto pela restrição linear da Equação 60.

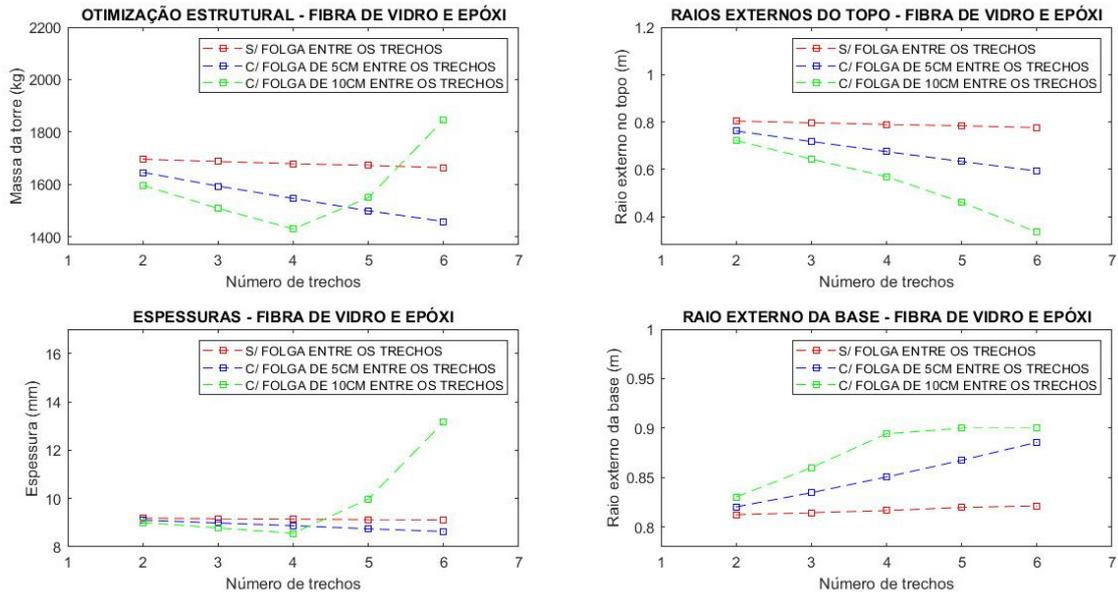
Figura 26 – Otimização estrutural de torres de alumínio de aerogeradores.



Fonte: Elaborada pelo Autor

As configurações obtidas para as torres de fibra de vidro e epóxi são mostradas na Figura 27. As torres de fibra de vidro e epóxi apresentam comportamentos semelhantes às torres de alumínio, ocorrendo o mesmo fenômeno quando se tem as configurações de cinco e seis trechos com dez centímetros de espaçamento entre as seções da torre. Esse fenômeno ocorre devido ao raio da base não ter como aumentar o seu tamanho, fazendo com que a espessura aumente e conseqüentemente aumente a massa da torre.

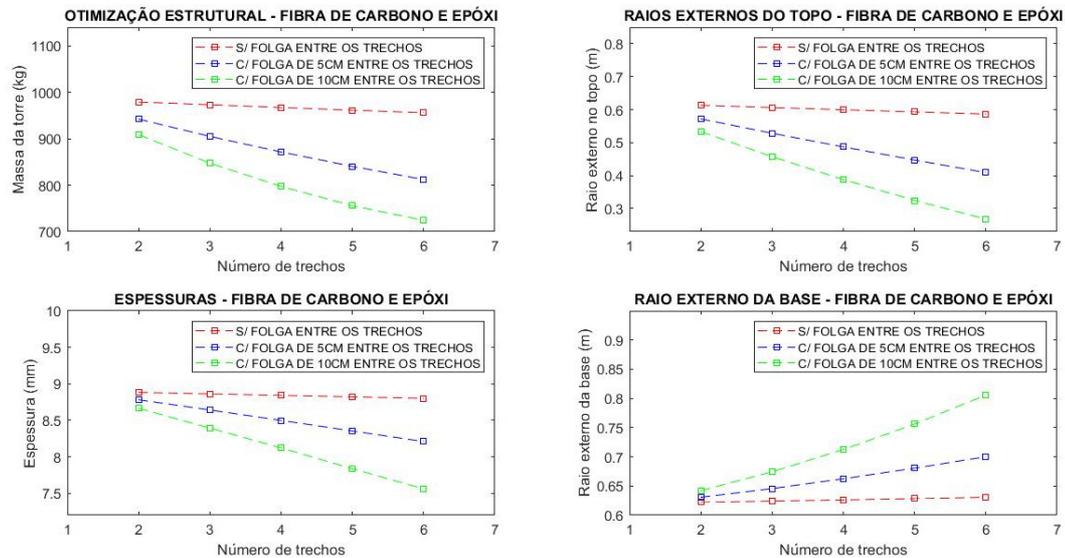
Figura 27 – Otimização estrutural de torres de material compósito (Vidro-E/Epóxi) de aerogeradores.



Fonte: Elaborada pelo Autor

A Figura 28 mostra os resultados obtidos para as torres de fibra de carbono e epóxi, na qual observa-se os comportamentos das massas, dos raios externos no topo, das espessuras e dos raios externo da base da torre. Elas têm o mesmo comportamento das torres em aço, não apresentando o fenômeno que ocorre nas torres de alumínio e fibra de vidro, pois os raios externos da base das torres não atingem o valor máximo imposto para atender a teoria de vigas, que estabelece uma esbeltes mínima.

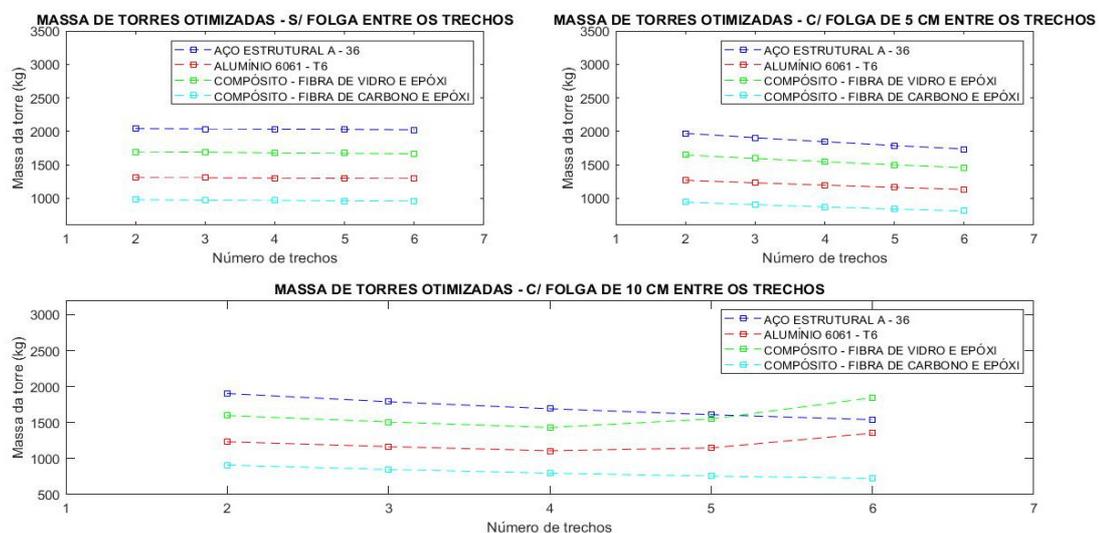
Figura 28 – Otimização estrutural de torres de material compósito (Carbono T800/Epóxi) de aerogeradores.



Fonte: Elaborada pelo Autor

A partir desses resultados, é possível estabelecer um comparativo entre as torres de aço, de alumínio e de material compósito. As torres de epóxi reforçado com fibra de carbono têm uma menor massa comparadas às torres dos demais materiais, e devido ao comportamento citado anteriormente, a torre com 6 trechos de epóxi reforçado com fibra de vidro com espaçamento de dez centímetros entre as seções dos trechos tem uma massa superior à torre de aço, como mostra a Figura 29.

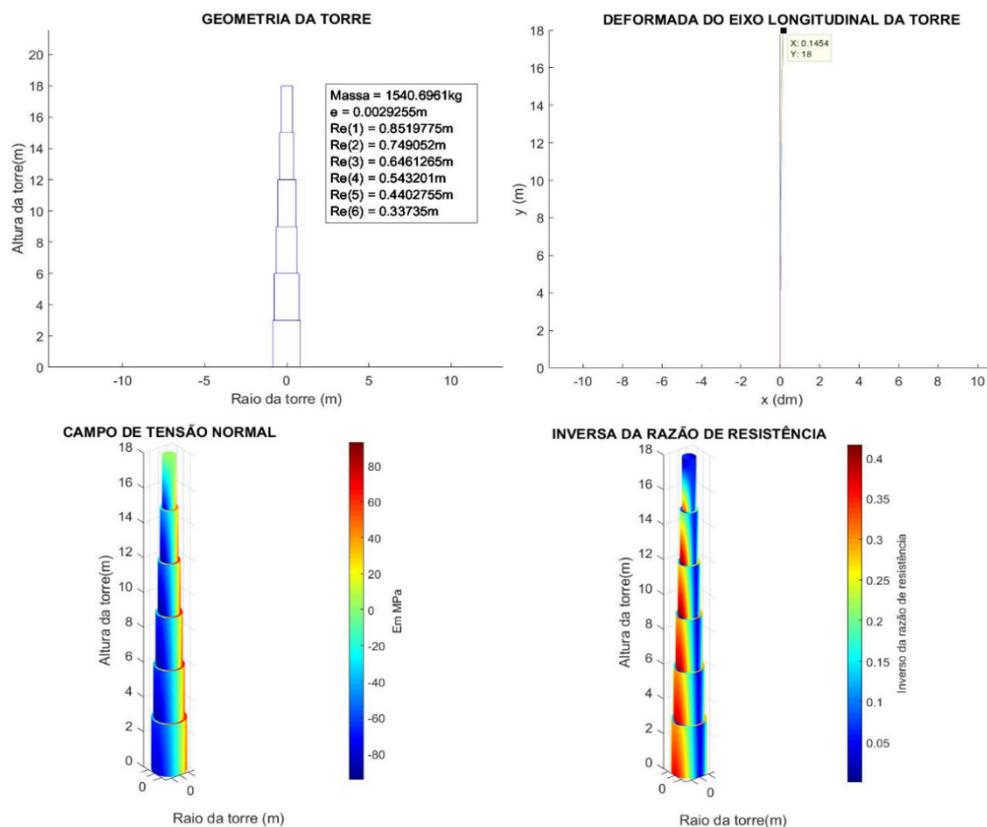
Figura 29 – Massa das torres otimizadas para diferentes valores de espaçamento entre as seções dos trechos.



Fonte: Elaborada pelo Autor

Após realizar o estudo comparativo entre as torres de diferentes materiais e configurações, é possível estabelecer a melhor configuração da torre para cada tipo de material. As Figuras 30, 31, 32 e 33 demonstram a melhor configuração geométrica, o campo de tensão normal atuante, a *Inversa Da Razão De Resistência* e o deslocamento máximo da torre, para as torres fabricadas em aço, alumínio, epóxi e fibra de vidro e epóxi e fibra de carbono, respectivamente.

Figura 30 – Torre otimizada de aço (seis trechos e 10 centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos).

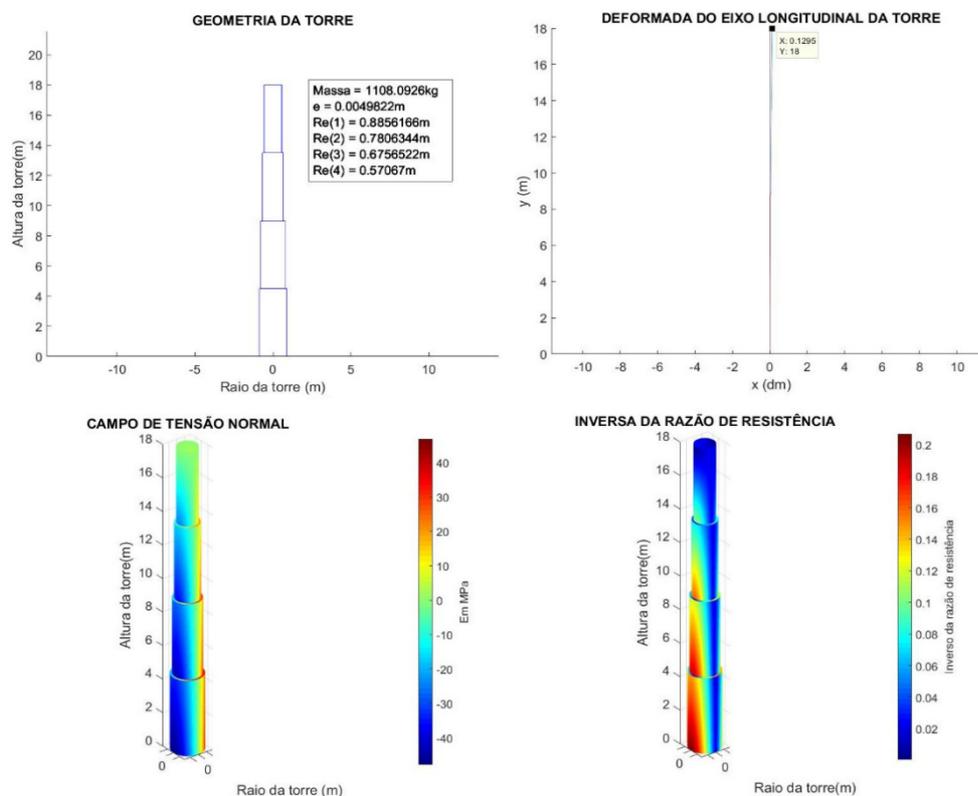


Fonte: Elaborada pelo Autor

A configuração ótima obtida para torre em aço, Figura 30, é de uma torre com seis trechos e dez centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos e com uma massa de 1540,69 kg, na qual apresenta uma espessura de quase 3 milímetros, um raio externo no topo de 33,74 centímetros e um raio externo na base de 85,20 centímetros. O deslocamento máximo obtido é de 1,45 centímetros, valor dentro das recomendações normativas, como também os valores da inversa da razão de resistência não ultrapassam o valor de 1, demonstrando que a torre está segura.

A torre ótima de alumínio apresenta uma massa de 1108,09 kg e uma geometria com quatro trechos, dez centímetros de espaçamento entre as seções da torre e uma espessura de quase 5 milímetros, como mostra a Figura 31. Além da geometria da torre, é possível observar através da Figura 31 o deslocamento máximo no topo da torre de 1,3 centímetros, o campo de tensão normal, no qual mostra que as maiores tensões ocorrem na base dos trechos, como já era esperado.

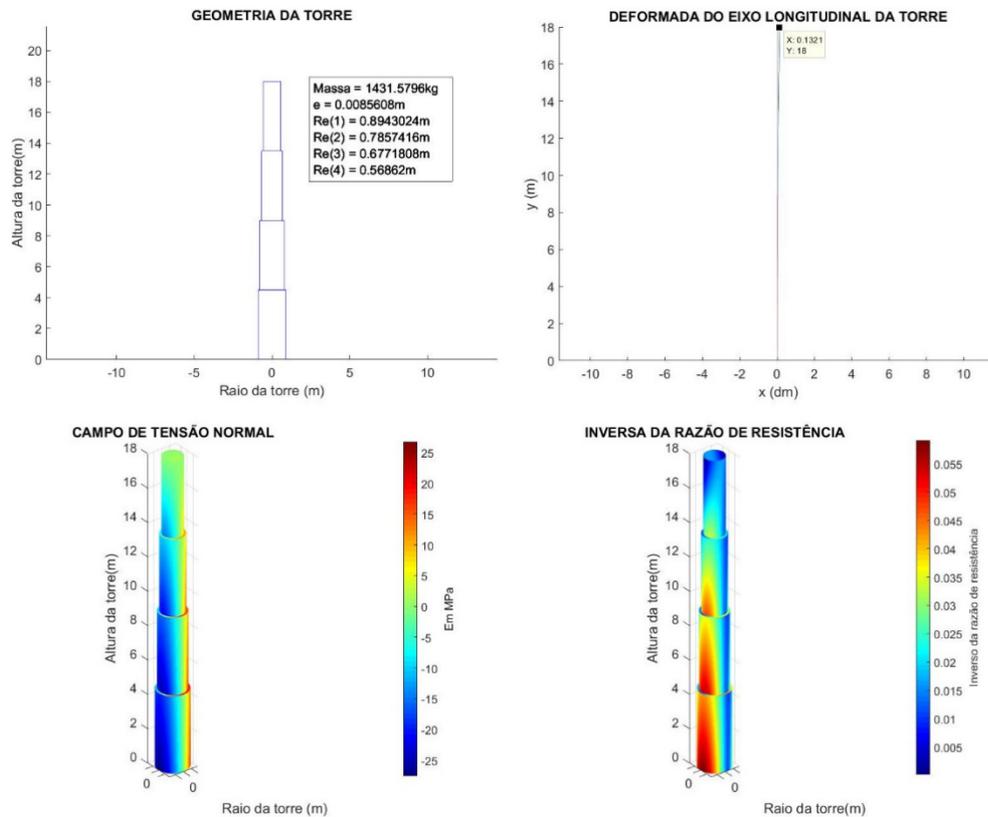
Figura 31 – Torre otimizada de alumínio (quatro trechos e 10 centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos).



Fonte: Elaborada pelo Autor

A Figura 32 apresenta a configuração ótima obtida para a torre de fibra de vidro e epóxi com uma massa de 1431,57 kg. A configuração ótima obtida apresenta quatro trechos e dez centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos, além de contar com uma espessura de 8,5 milímetros, espessura essa superior as obtidas para as torres de aço e de alumínio. Ainda pode ser observado o deslocamento máximo no topo da torre de quase 1,3 centímetros.

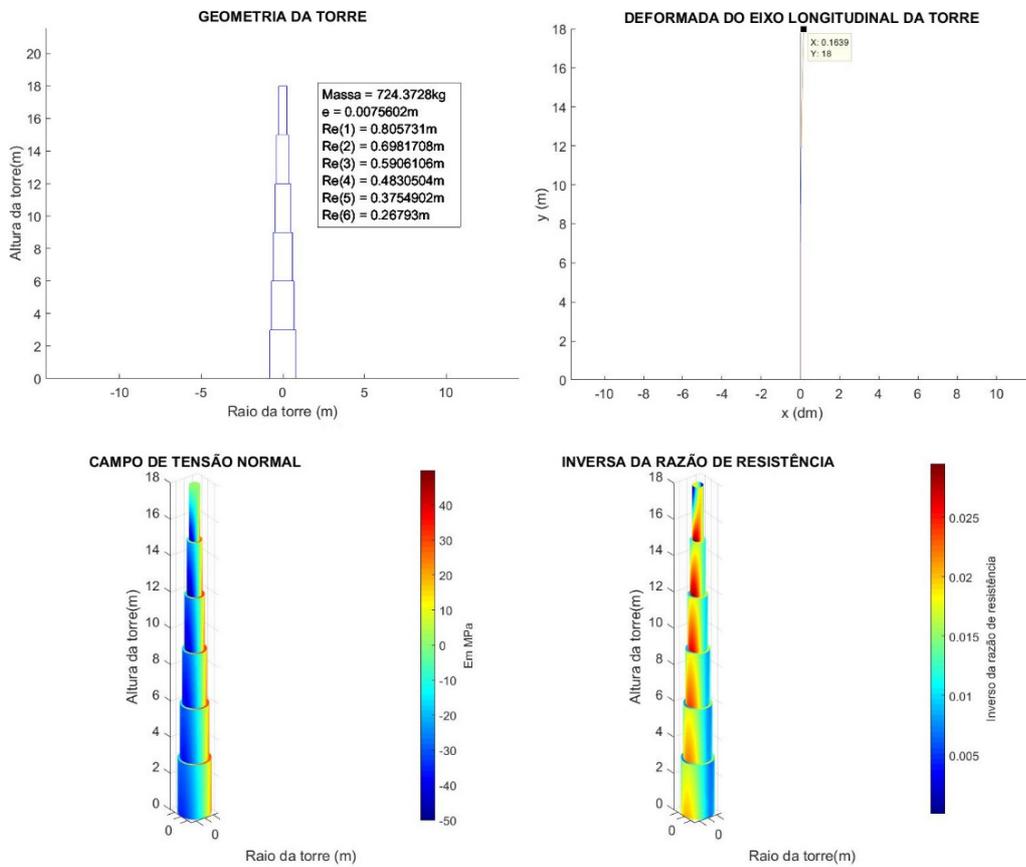
Figura 32 – Torre otimizada de fibra de vidro e epóxi (quatro trechos e 10 centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos).



Fonte: Elaborada pelo Autor

A Figura 33 apresenta a configuração ótima da torre de fibra de carbono e epóxi com uma massa de 724,37 kg, logo, uma massa menor que as torres para os demais materiais. O campo de tensão normal da torre ótima de fibra de carbono e epóxi, Figura 33, mostra que as tensões máximas ocorrem nas bases dos trechos, como ocorre para os demais materiais, além de apresentar um deslocamento de 1,6 cm no topo da torre para uma configuração ótima com seis trechos e dez centímetros de espaçamento entre os trechos.

Figura 33 – Torre otimizada de fibra de carbono e epóxi (seis trechos e 10 centímetros de espaçamento entre as seções dos trechos).



Fonte: Elaborada pelo Autor

A Tabela 11 fornece importantes informações sobre as solicitações das restrições não lineares das torres de aço por meio dos seus percentuais. Ela evidencia que as restrições não lineares com maiores percentuais de solicitação são as flambagens local e global, atingindo normalmente 100% de solicitação.

Tabela 11 - Percentual de solicitações das restrições não lineares – Aço.

Espaçamento entre os trechos	Nº de trechos	Inversa da razão de resistência	Flambagem local	Flambagem global	Deslocamento no topo da torre
<i>esp</i> = 0	2	52,46%	100,00%	100,00%	27,83%
	3	52,36%	100,00%	99,99%	27,83%
	4	52,27%	100,00%	100,00%	27,84%
	5	52,16%	100,00%	100,00%	27,85%
	6	52,06%	100,00%	100,00%	27,86%
<i>esp</i> = 5cm	2	51,30%	99,95%	99,93%	27,72%
	3	49,70%	100,00%	99,98%	27,86%
	4	48,03%	99,99%	99,97%	28,12%
	5	46,35%	100,00%	100,00%	28,46%
	6	44,68%	100,00%	100,00%	28,88%
<i>esp</i> = 10cm	2	49,96%	100,00%	99,99%	27,73%
	3	46,69%	100,00%	100,00%	28,24%
	4	43,35%	100,00%	99,99%	29,15%
	5	40,66%	99,98%	99,81%	30,41%
	6	41,62%	99,97%	99,99%	32,32%

Fonte: Elaborada pelo Autor

A Tabela 12 mostra os percentuais das solicitações das restrições não lineares das torres de alumínio. As restrições não lineares com maiores percentuais de solicitação são as flambagens local e global, assim como as torres em aço, atingindo normalmente 100% de solicitação, porém, para 5 e 6 trechos com espaçamento entre as seções dos trechos de 10 cm, o percentual de solicitação da flambagem global se mantém o mesmo dos anteriores, enquanto que o da flambagem local diminui, devido ao comportamento citado anteriormente, no qual o raio externo da base atinge seu limite estabelecido pela restrição linear.

Tabela 12 - Percentual de solicitações das restrições não lineares – Alumínio.

Espaçamento entre os trechos	Nº de trechos	Inversa da razão de resistência	Flambagem local	Flambagem global	Deslocamento no topo da torre
<i>esp</i> = 0	2	24,30%	100,00%	100,00%	27,86%
	3	24,24%	100,00%	100,00%	27,86%
	4	24,17%	100,00%	100,00%	27,87%
	5	24,11%	100,00%	100,00%	27,88%
	6	24,04%	100,00%	100,00%	27,90%
<i>esp</i> = 5cm	2	23,84%	100,00%	100,00%	27,78%
	3	23,18%	99,99%	100,00%	27,88%
	4	22,49%	100,00%	100,00%	28,08%
	5	21,80%	100,00%	100,00%	28,19%
	6	21,10%	99,92%	99,94%	28,66%
<i>esp</i> = 10cm	2	23,31%	100,00%	99,99%	27,75%
	3	22,00%	99,99%	99,98%	28,11%
	4	20,65%	99,91%	99,97%	28,77%
	5	17,96%	80,60%	100,00%	29,00%
	6	15,20%	50,81%	100,00%	31,15%

Fonte: Elaborada pelo Autor

A Tabela 13 apresenta os percentuais das solicitações das restrições não lineares das torres de fibra de vidro e epóxi. As restrições não lineares com maiores percentuais de solicitação são as flambagens local e global, onde ocorre o mesmo fenômeno das torres em alumínio para 5 e 6 trechos com 10 cm de espaçamento entre as seções dos trechos. Outra importante informação é observada através do percentual de solicitação da inversa da razão de resistência. O baixo percentual de solicitação da inversa da razão de resistência que ocorre na Tabela 13, também ocorre na Tabela 14, onde constam os percentuais de solicitação das restrições não lineares das torres de fibra de carbono e epóxi. Isso ocorre devido aos materiais compósitos apresentarem uma alta resistência relativa se comparada com o aço e o alumínio como foi mostrado anteriormente através da Figura 24. Além disso, as torres de fibra de carbono e epóxi apresentam o mesmo comportamento das torres em aço, ou seja, o seu comportamento é governado pelas flambagens local e global.

Tabela 13 - Percentual de solicitações das restrições não lineares - Fibra de vidro e epóxi.

Espaçamento entre os trechos	Nº de trechos	Inversa da razão de resistência	Flambagem local	Flambagem global	Deslocamento no topo da torre
<i>es</i> = 0	2	6,89%	100,00%	100,00%	28,21%
	3	6,86%	100,00%	100,00%	28,22%
	4	6,83%	100,00%	100,00%	28,24%
	5	6,78%	99,98%	99,55%	28,14%
	6	6,76%	100,00%	100,00%	28,30%
<i>es</i> = 5cm	2	6,76%	100,00%	100,00%	28,15%
	3	6,55%	100,00%	100,00%	28,27%
	4	6,35%	99,98%	99,99%	28,54%
	5	6,14%	100,00%	100,00%	28,87%
	6	5,93%	100,00%	100,00%	29,27%
<i>es</i> = 10 cm	2	6,61%	100,00%	100,00%	28,16%
	3	6,22%	99,98%	99,97%	28,59%
	4	5,83%	100,00%	99,99%	29,37%
	5	4,86%	71,70%	100,00%	30,67%
	6	4,41%	40,53%	100,00%	33,55%

Fonte: Elaborada pelo Autor

Tabela 14 - Percentual de solicitações das restrições não lineares - Fibra de carbono e epóxi.

Espaçamento entre os trechos	Nº de trechos	Inversa da razão de resistência	Flambagem local	Flambagem global	Deslocamento no topo da torre
<i>es = 0</i>	2	3,04%	100,00%	100,00%	28,67%
	3	3,02%	100,00%	100,00%	28,68%
	4	3,00%	100,00%	100,00%	28,72%
	5	2,99%	100,00%	99,99%	28,75%
	6	2,97%	99,99%	99,98%	28,79%
<i>es = 5cm</i>	2	2,96%	100,00%	100,00%	28,63%
	3	2,85%	100,00%	100,00%	28,88%
	4	2,73%	99,98%	99,96%	29,30%
	5	2,61%	100,00%	100,00%	29,87%
	6	2,49%	100,00%	100,00%	30,56%
<i>es = 10cm</i>	2	2,87%	100,00%	99,99%	28,72%
	3	2,65%	100,00%	100,00%	29,58%
	4	2,43%	99,85%	99,92%	31,03%
	5	2,48%	99,99%	99,99%	33,23%
	6	2,81%	100,00%	100,00%	36,42%

Fonte: Elaborada pelo Autor

8 CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma proposta de um estudo de dimensionamento ótimo de torres de aerogeradores. Foi possível o dimensionamento ótimo de torres com diferentes configurações, atendendo-se aos critérios de segurança e objetivando-se a menor massa possível, com o intuito de reduzir os custos do projeto.

Era esperado que a massa da torre fosse diminuindo à medida que o número de trechos fosse aumentado, porém, isso só ocorreu até que a restrição linear que limitou o aumento do tamanho dos raios da base fosse atingida, ocasionando-se um aumento da espessura e, conseqüentemente, da massa das torres. Caso não houvesse essa restrição, as torres tenderiam a ter o comportamento previsto.

Os locais de maior insegurança são as bases dos trechos, como já era esperado, pois é onde ocorrem as maiores tensões, provocando uma maior insegurança, considerando-se a análise de estado limite último, em termos de resistência e de estabilidade. Os critérios de restrições não-lineares mais solicitados foram as flambagens local e global, apresentando o seu desempenho limitado pela rigidez, e o critério de restrição linear limitante foi o raio da base da torre ser menor ou igual a altura da torre dividida por vinte.

Com base nos resultados apresentados, percebe-se, de forma geral, um melhor desempenho das torres de epóxi reforçado com fibra de carbono, uma vez que é possível confeccionar torres com uma menor massa. Tais resultados justificam o emprego de materiais compósitos na indústria eólica, pois apresentam uma menor massa por metro linear, possibilitando, assim, uma redução no custo do transporte e da manutenção e uma melhor condição para a instalação de aerogeradores em locais remotos e de difícil acesso.

Com este trabalho, espera-se ter contribuído para o estudo de torres otimizadas de projetos de aerogeradores, além de incentivar a inovação tecnológica na área de energias renováveis. Este trabalho teve o intuito de contribuir academicamente e tecnicamente com a formação do mestrando, possibilitando ao mesmo o dimensionamento otimizado de torres de aerogeradores por meio da metodologia empregada neste trabalho.

8.1 Sugestões para trabalhos futuros

Ao realizar o presente trabalho, verificou-se a existência de outros estudos que poderiam ser desenvolvidos no sentido de contribuir para o aumento do conhecimento sobre otimização de torres tubulares de aerogeradores em material compósito. Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) realizar uma análise objetivando minimizar os custos com insumos, ao invés da massa da torre;
- b) considerar diferentes configurações na análise, incluindo soluções mistas, com laminados de aço e compósitos;
- c) aplicar o algoritmo para uma solução real de projeto e confeccionar a torre;
- d) implementar a análise da confiabilidade estrutural no processo de dimensionamento otimizado;
- e) realizar um estudo para utilizar diferentes ferramentas de otimização com o intuito de aumentar o número de variáveis de projeto e
- f) realizar um estudo de custo-benefício de torres de aerogeradores em material compósito.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, T.; SÖDER, L. An overview of wind energy-status 2002. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 6, p. 67–128, 2002.

AKIN, J. E. **Finite element analysis concepts via solidworks**, Rice University, Houston, Texas, 2009.

ALMEIDA JR, H. A. **Otimização estrutural de treliças metálicas planas empregadas em cobertas considerando critérios de resistência**. Monografia. Delmiro Gouveia, AL: UFAL, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT/ NBR 6123. Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, Brasil. 1988.

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

BARONI, H. J. M. **Avaliação do comportamento dos deslocamentos transversais ao longo do tempo em vigas de concreto armado não convencional**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, RS: UFRS, 2003.

BILLINGTON, D. P., **Thin Shell Concrete Structures**, ed. 2. New York: McGraw Hill Book Company, 1982.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**, ed. 4, John Wiley & Sons, USA, 2007.

CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. **An Introduction to Structural Optimization**. [S.l.]: Springer, 2009.

CHRISTENSEN, R. M. **Mechanics of Composite Materials**, 1. Ed., Dover Publications, 2005.

CUSTÓDIO, R. DOS S. **Energia Eólica para produção de Energia Elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras -Eletrobrás, 2009.

DALMAZ, A.; PASSOS, J. C.; COLLE, S. Energia eólica para geração de eletricidade e a importância da previsão. *Revista ABCM – Engenharia*, v. 13, p. 27 – 32, 2008.

DANIEL, I.M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**, ed. 2. Oxford University Press, New York: 1994.

Deutsche Welle (DW), 2019. Disponível em: <<https://www.dw.com/pt-br/alemanha-registra-recorde-de-energia-renov%C3%A1vel/a-47001526>>. Acessado em: 21 nov. 2019.

DELLEZZOPOLLES JR., C. F. **Análise dinâmica de torres de energia eólica**. Dissertação de Mestrado. Brasília: UnB, 2011.

FEIJÓ, B. P.; LIMA, J. B. C. A.; MELO, A. M. C.; PARENTE, E. JR. Otimização estrutural de torres de aço tubulares para geradores eólicos. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, v. 29, p. 781-792, 2010.

GIBSON, F. R. **Principles of Composite Material Mechanics**, 1. Ed, McGraw-Hill, Inc, 1994.

GIRARDI, A.; SEVERO, L. C. Projeto Automático de Blocos Analógicos Integrados Usando Métodos de Otimização Não-Linear. Alegrete, RS: UNIPAMPA, 2009. Disponível em: <http://www.pucrs.br/ciencias/viali/graduacao/po_2/literatura/otimizacao/artigos/lucas_iberchip2009.pdf>. Acessado em: 15 out. 2019.

Global Wind Energy Council (GWEC), 2017. Disponível em: <<http://gwec.net/>>. Acessado em: 20 out. 2017.

GUTIERREZ, E.; PRIMI, S.; TAUCER, F.; CAPERAN, P.; TIRELLI, D.; MIERES, J.; CALVO, I.; RODRIGUEZ, J.; VALLANO, F.; GALIOTIS, C.; MOUZAKIS, D. A wind turbine tower design based on the use of fibre-reinforced composites, ELSA-JRC, Contract No. ENK5-CT-2000-00328, 2003.

HASHIN, Z. Analysis of Composite Material - A Survey. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 50, pp. 481-505, 1983.

HERBERT, J. G.M.; INIYAN, S.; SREEVALSAN, E.; RAJAPANDIAN, S. A review of wind energy Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, p. 1117–1145, 2007.

HIBBELER, R. C. **Estática: Mecânica para engenharia**, 12. Ed, Pearson, 2011.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**, 7. Ed, Pearson, 2010.

International Electrotechnical Commission (IEC), 2018. Disponível em: <<http://www.iec.ch/>>. Acessado em: 02 março, 2018.

International Renewable Energy Agency (IRENA), 2019. Disponível em: <<http://www.irena.org/wind>>. Acessado em: 06 agosto, 2019.

KAW, K. **Mechanics of Composite Materials**, 2. Ed., Taylor & Francis, 2006.

KOLIOS, A. J. Evaluation of the Reliability Performance of Failure Criteria for Composite Structures. *World Journal of Mechanics*, v. 02, n. 03, p. 162–170, 2012.

KONG, C.; LIM, S.; PARK, H. A study on optimal design of filament winding composite tower for 2 MW class horizontal axis wind turbine systems. *Proceedings of ASME turbo expo 2013: Turbine technical conference and exposition*, v.8, p. 1-8, 2013.

LE GOURIERES, D., **Wind power plants theory and design**, 1. Ed, Pergamon Press, UK, 1998.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**, 2. Ed, John Wiley & Sons, Ltd., 2009.

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E E.B. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, 1304 – 1317, 2008.

MATHIJSEN, D. Composite sandwich structures: the new milestone in bridge building. *Reinforced Plastics*. v. 57, 17 – 23, 2013.

NEGM, H. M.; MAALAWI, K. Y. Structural design optimization of wind turbine towers. *Computers and Structures*, v. 74, p. 649-666, 2000.

NEMETH, M. P.; MIKULAS JR, M. M. Simple Formulas and Results for Buckling-Resistance and Stiffness Design of Compression-Loaded Laminated-Composite Cylinders. NASA/TP-2009-215778, 2009.

NORTON, R. L.; **Projeto de Máquinas**, 4 Ed., Bookman, 2013.

OLIVIERI, B. P. **Otimização do projeto de pontes protendidas pré-moldadas pelo método dos algoritmos genéticos**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2004.

Orenda Energy Solutions (ORENDA), 2018. Disponível em: <<http://orendaenergy.com/>>. Acessado em: 03 maio, 2018.

PICOLO, A. P.; BÜHLER, A. J.; RAMPINELLI G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, p. 4306 - 4319, 2014.

PROLA, L. C. **Comportamento de pós-flambagem de placas laminadas de materiais compostos dispostos simetricamente**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, RS: UFRGS, 1987.

SANTOS, W. S. **Interação flambagem global – flambagem local em pilares metálicos de seção I duplamente simétricos sob compressão uniforme**. Dissertação. Vitoria, ES: UFES, 2002.

SILVA, R. M. **Análise de confiabilidade estrutural de tubos de materiais compósitos submetidos à pressões uniformes**. Monografia. Delmiro Gouveia, AL: UFAL, 2017.

SONG, J. **The Comparison and Study of Cone-Shaped Tower and Truss-Type Tower of 1.5 MW Wind Turbine Generator (in Chinese)**. Tese de Doutorado. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. **Theory of elastic stability**. New York: McGraw-Hill, 1983.

TORRES, R. B. **Desenvolvimento de compósito híbrido de fibra de vidro e micropartículas de sílica e cimento para uso em caneleiras**. Dissertação de Mestrado. São João Del-Rei, MG: UFSJ, 2013.

VANDERPLAATS, G. N. *Numerical optimization techniques for engineering design with applications*, EUA: McGraw-Hill, 1984.

VENKATARAMAN, P. **Applied Optimization with Matlab Programming**. John Wiley & Sons, New York, 2002.

XZERES wind, 2018. Disponível em: <<https://www.xzeres.com/>>. Acessado em: 30 maio, 2018.

YOUNG, C. A.; GOUPEE, A. J.; DAGHER, H. J.; VISELLI, A. M. Methodology for optimizing composite towers for use on floating wind turbines. *Journal of renewable and sustainable energy*, v. 9, p. 33306 – 33327, 2017.