



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ESTRUTURAL

THAYS GUERRA ARAÚJO DUARTE

**UM MODELO EFICIENTE PARA OTIMIZAÇÃO DE TORRES EÓLICAS DE
CONCRETO ARMADO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS**

FORTALEZA

2019

THAYS GUERRA ARAÚJO DUARTE

UM MODELO EFICIENTE PARA OTIMIZAÇÃO DE TORRES EÓLICAS DE
CONCRETO ARMADO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Engenharia Estrutural.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Macário Cartaxo de Melo

Co-Orientador(a): Prof. Dra. Tereza Denyse Pereira de Araújo

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D875m Duarte, Thays Guerra Araujo.

Um Modelo Eficiente Para Otimização de Torres Eólicas de Concreto Armado Via Algoritmos Genéticos / Thays Guerra Araujo Duarte. – 2019.
86 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Antônio Macário Cartaxo de Melo.

Coorientação: Profa. Dra. Tereza Denyse Pereira de Araújo.

1. Otimização Estrutural. 2. Algoritmos Genéticos. 3. Ação do Vento. 4. Concreto Armado. 5. Torres Eólicas. I. Título.

CDD 624.1

THAYS GUERRA ARAÚJO DUARTE

UM MODELO EFICIENTE PARA OTIMIZAÇÃO DE TORRES EÓLICAS DE
CONCRETO ARMADO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Engenharia Estrutural.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Macário Cartaxo de Melo

Co-Orientador(a): Prof. Dra. Tereza Denyse Pereira de Araújo

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Macário Cartaxo de Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Tereza Denyse Pereira de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Evandro Parente Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Antônio Hernandez
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

Dedico este trabalho à toda minha família,
meus pais, minhas irmãs e meu esposo
por todo o incentivo, apoio e carinho
concedido durante estes anos de estudos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Antônio Macário Cartaxo de Melo, pela orientação, incentivo integral e ensinamentos transmitidos durante todo o curso, principalmente pela ajuda na execução desta dissertação.

A todos os professores do Curso de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFC, em especial a Profa. Tereza Denyse Pereira de Araújo, pela co-orientação na dissertação e pelas ajudas prestadas durante todas as atividades do mestrado.

À CAPES pelo financiamento desta pesquisa.

À Deus por permitir que eu passe por esse momento de crescimento profissional e pessoal.

Às minhas irmãs, que sempre me apoiaram e me incentivaram neste mestrado.

Aos meus pais, por toda a educação e estudo que eles me proporcionaram, sem os quais, esta dissertação não seria possível.

Ao meu esposo Pedro Felipe, por todo o amor e companheirismo, pela compreensão nos momentos de ausência e, principalmente, por ser o maior incentivador neste mestrado e a seguir meus sonhos.

RESUMO

Nos últimos anos, o interesse pela energia eólica cresceu exponencialmente, assim como os investimentos em novas tecnologias para aumentar a potência das turbinas e minimizar os custos de energia. As turbinas são comumente sustentadas por torres metálicas, porém, para captar ventos mais fortes e consistentes, as torres precisam atingir maiores alturas e o uso do concreto tem se tornado mais vantajoso, pois permite alcançar alturas mais elevadas com uma solução mais econômica. Além disso, as torres de concreto apresentam outras vantagens como melhor desempenho estrutural, durabilidade, segurança, e menos problemas com transporte. A torre é uma das partes que mais consome material na estrutura e, reduzindo-se os custos do concreto e aço, a energia eólica pode se tornar mais competitiva frente às energias provenientes de combustíveis fósseis. O dimensionamento eficiente da torre é importante para garantir a viabilidade econômica da instalação de um parque eólico. Melhores projetos podem ser alcançados por meio da otimização do projeto das torres, buscando-se, por exemplo, a redução do custo dos materiais. O estudo de técnicas de otimização numérica aplicadas a torres de concreto se torna muito interessante e pouco tem sido divulgado, ainda mais quando se considera a natureza dinâmica da ação do vento. O objetivo deste trabalho é a formulação de um modelo de otimização de custo de torres eólicas de concreto armado e realizar uma discussão sobre a modelagem dinâmica da ação do vento. São investigadas como variáveis de projeto as dimensões características da torre tubular em segmentos de tronco de cone e a quantidade de aço, ambas tratadas como de natureza discreta. Buscando a eficiência da solução, a análise será feita por elementos finitos unidimensionais e são investigados modelos simplificados para o tratamento da não linearidade física, e da modelagem dinâmica do vento, e são avaliadas as condições de carregamento e recomendações da NBR 6118 e IEC 61400-1. O modelo é resolvido com algoritmos genéticos. Aplicações são feitas a torres com 100 m de altura. Soluções preliminares otimizadas para a torre eólica foram obtidas de forma eficiente auxiliando a fase de pré-dimensionamento dessas estruturas que têm comportamento bastante complexo.

Palavras-chave: Otimização estrutural, Algoritmos Genéticos, Ação do vento, Concreto Armado, Torre Eólica.

ABSTRACT

In recent years, there has been growing interest in wind energy and investments in new technologies to enhance turbine power and minimize energy costs. Turbines are commonly supported by steel towers. However, to capture stronger and more consistent winds, towers need to reach higher altitudes. Concrete towers have become more advantageous as it allows higher heights and presents itself as a more economical solution. Besides, concrete towers have other advantages such as improved structural performance, durability, safety, and fewer transportation problems. The tower is the most material consuming part in the entire structure and by reducing the costs of concrete and steel, wind energy can become more competitive than fossil fuels. The efficient design of the tower is important to ensure the economic feasibility of a wind farm. Better projects can be achieved by optimizing the tower design, for example reducing the cost of materials. The study of numerical optimization techniques applied onto concrete towers becomes very interesting and little has been done, especially when considering the dynamic nature of wind. The main objective of this paper is the formulation of a cost optimization model for reinforced concrete wind towers discussing the dynamic modeling of wind action. Finite Element Analysis is applied, and 1D elements are investigated. Simplified models for the treatment of physical nonlinearity and dynamic wind modeling are investigated for efficient optimization. In tower analysis, NBR 6118 and IEC 61400-1 loading conditions and recommendations are followed. Once the design variables, represented by the characteristic dimensions of the tubular cone tower segments, reinforcement and the concrete resistance, are treated as discrete, associated with the nonlinearities of the problem, the model is solved with genetic algorithms. Towers 100 m or more in height are studied. Preliminary optimized solutions were efficiently obtained for the wind towers during the dimensioning phase of these structures that have complex behavior.

Key-words: Optimization, Structural Dynamics, Genetic Algorithms, Reinforced Concrete, Wind Tower.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da Capacidade Eólica Instalada no mundo.	11
Figura 2 – Principais componentes de um aerogerador.....	23
Figura 3 – Exemplo de Vento EOG	29
Figura 4 - Determinação do Coeficiente de arrasto C_a para concreto.....	30
Figura 5 - Pressão do vento atuante na torre de concreto (exemplo da NBR6123).	34
Figura 6 – Diagrama de Campbell para uma torre eólica com turbina de 3 pás	39
Figura 7 – Diagrama tensão-deformação para o aço	42
Figura 8 - Domínios do estado-limite último de uma seção transversal	43
Figura 9 - Esquema das torres eólicas e suas variáveis de projeto.....	55
Figura 10 - Taxas mínimas de armaduras de flexão.....	59
Figura 11 – Comparação das funções objetivo das análises com E_{cs} íntegro.	66
Figura 12 – Comparação das funções objetivo das análises com E_s reduzido.	66
Figura 13 - Comportamento das restrições para vento estático e E_{cs} íntegro.	69
Figura 14 - Comportamento geral das restrições para vento estático e E_{cs} reduzido.	70
Figura 15 – Função objetivo x Número de Segmentos na análise com E_{cs} íntegro.....	71
Figura 16 – Função objetivo x Número de Segmentos na análise com E_{cs} reduzido.....	71
Figura 17 - Geometria da torre obtida para o vento estático.	74
Figura 18 - Geometria da torre obtida para o vento dinâmico simplificado.....	75
Figura 19 - Geometria da torre obtida para o vento dinâmico discreto.....	75
Figura 20 - Resultado da otimização para vento estático, em escala. À esquerda E_{cs} íntegro, e à direita E_{cs} reduzido.	76
Figura 21 - Resultado da otimização para vento dinâmico simplificado, em escala. À esquerda E_{cs} íntegro, e à direita E_{cs} reduzido.....	76
Figura 22 - Resultado da otimização para vento dinâmico discreto, em escala. À esquerda E_{cs} íntegro, e à direita E_{cs} reduzido.	77
Figura 23 - Geometria da torre obtidos com vento estático e custo fictício.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros básicos (IEC 61400-1)	26
Tabela 2 - Modelos de vento	27
Tabela 3 - Fatores de segurança para cargas	37
Tabela 4 - Coeficientes de ponderação dos esforços atuantes.....	37
Tabela 5 - Custos adotados para o concreto e para o aço	54
Tabela 6 - Especificações da turbina utilizada	60
Tabela 7- Carregamentos obtidos para EWM e EOG	60
Tabela 8 - Dados gerais dos materiais utilizados na análise.....	61
Tabela 9 - Parâmetros dos Algoritmos Genéticos	62
Tabela 10 – Solução ótima com E_{cs} íntegro.	64
Tabela 11 – Solução ótima com E_{cs} reduzido.....	65
Tabela 12 - Restrições ativas na análise com E_{cs} íntegro	68
Tabela 13 - Restrições ativas na análise com E_{cs} reduzido.....	68
Tabela 14 – Comportamento da convergência da função objetivo – E_{cs} íntegro	72
Tabela 15 - Comportamento da convergência da função objetivo com E_{cs} reduzido	72
Tabela 16 - Custos do concreto e do aço para análise com E_{cs} íntegro	73
Tabela 17 - Custos do aço e concreto com E_{cs} reduzido.	73
Tabela 18 – Custos fictícios adotados para o concreto e para o aço.	77
Tabela 19 – Volume de concreto e massa de aço para E_{cs} e E_{cs} red e vento estático	78
Tabela 20 – Restrições críticas para otimizações com novo custo fictício	79
Tabela 21 – Deslocamentos no topo obtidos com o vento sintético.....	79

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Revisão Bibliográfica.....	13
1.2	Justificativa	19
1.3	Objetivo	20
1.4	Organização do trabalho.....	21
2	TORRES EÓLICAS.....	22
2.1	Principais componentes de um aerogerador	22
2.2	Tipos de Torres	24
2.3	Carregamentos atuantes	24
2.3.1	<i>Cargas Permanentes e Variáveis.....</i>	<i>25</i>
2.4	Classificação das turbinas eólicas.....	25
2.5	Modelos de Vento da IEC 61400-1	26
2.6	Modelos de vento da NBR6123.....	29
2.6.1	<i>Vento Estático</i>	<i>29</i>
2.6.2	<i>Modelo Simplificado.....</i>	<i>31</i>
2.6.3	<i>Modelo discreto.....</i>	<i>32</i>
2.6.4	<i>Comparação entre os modelos de vento da NBR 6123.....</i>	<i>33</i>
2.7	Vento sintético.....	35
2.8	Fatores de Carga.....	36
2.9	Carregamentos dinâmicos.....	38
3	ANÁLISE ESTRUTURAL E VERIFICAÇÃO DA TORRE.....	40
3.1	Modelagem com Elementos Finitos (MEF)	40
3.2	Concreto.....	40
3.3	Aço de armadura passiva.....	42
3.4	Resistência das seções de concreto armado	44
3.4.1	<i>Normal e Momento Resistentes.....</i>	<i>44</i>
3.4.2	<i>Cisalhamento resistente.....</i>	<i>47</i>
3.5	Análise não-linear física	48
4	OTIMIZAÇÃO DE TORRES EÓLICAS DE CONCRETO ARMADO	50
4.1	Forma padrão de um problema de otimização	50
4.2	Algoritmos Genéticos.....	51
4.3	Modelo de otimização de torres eólicas	52
4.3.1	<i>Função objetivo.....</i>	<i>53</i>

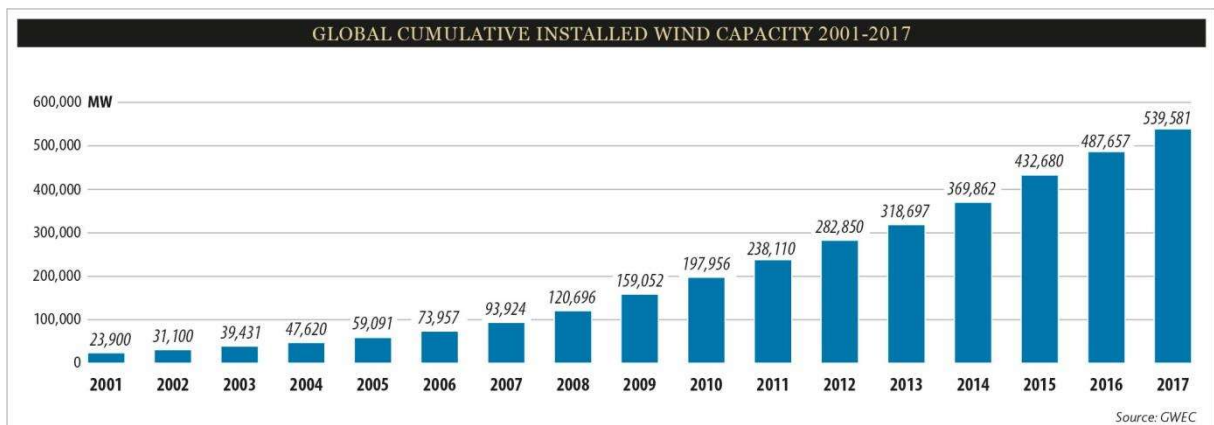
4.3.2	<i>Variáveis de Projeto</i>	54
4.3.3	<i>Restrições</i>	55
4.3.3.1	<i>Parâmetros Geométricos</i>	55
4.3.3.2	<i>Critério de Resistência</i>	57
4.3.3.3	<i>Limite na frequência natural da torre</i>	58
4.3.3.4	<i>Armaduras longitudinais</i>	58
4.3.3.5	<i>Comportamento em serviço</i>	59
4.4	Dados da turbina	59
5	RESULTADOS	61
5.1	Parâmetros adotados	61
5.2	Resultados da Otimização	63
5.3	Função Objetivo x Modelos de Vento da NBR 6123	66
5.4	Comportamento das restrições	67
5.5	Função Objetivo x Número de Segmentos	70
5.6	Propriedades Geométricas x Número de Segmentos	74
5.7	Variação do custo dos materiais na otimização	77
5.8	Análise com Vento Sintético	79
6	CONCLUSÕES E DISCUSSÕES	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1 INTRODUÇÃO

O interesse no desenvolvimento de fontes energéticas alternativas cresceu consideravelmente, principalmente devido à busca pela diminuição dos impactos ambientais causados pela queima de combustíveis fósseis. Além do apelo ambiental, fatores como o aumento da demanda energética, a diminuição da disponibilidade dos combustíveis fósseis, regulamentações ambientais mais rígidas e vislumbre pela produção da própria energia de forma barata e competitiva, impulsionaram o desenvolvimento de energias alternativas.

Dentre as energias renováveis, a energia eólica é uma das mais promissoras e tem apresentado uma taxa de crescimento exponencial no Brasil e no mundo, conforme Figura 1 (GWEC, 2017). A cada ano, a energia eólica vem conquistando mais espaço no cenário energético mundial com vultosos investimentos voltados para o desenvolvimento de novas tecnologias.

Figura 1 – Evolução da Capacidade Eólica Instalada no mundo.



Fonte: GWEC (2017)

De acordo com dados da Global Wind Energy Council (2017), a capacidade eólica instalada no mundo é de aproximadamente 540 GW, onde a China é responsável por mais de 35% dessa parcela mundial. Só nos Estados Unidos, é esperado que em 2030, aproximadamente 20% da energia do país seja fornecida através do vento (ENERGY, U.S. DEPARTMENT OF, 2008). E segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2018), de 2011 a 2018 foram investidos mais de US\$31,2 bilhões em energia eólica só no Brasil, e a tendência é aumentar cada vez mais.

Por ser uma indústria em expansão, muitas tecnologias surgiram, visando justamente diminuir os custos da energia eólica, os quais ainda são menos competitivos frente às fontes energéticas provenientes de combustíveis fósseis. Um dos principais avanços foi o

aumento significativo da capacidade das turbinas eólicas, que saíram de quilowatts para megawatts. Isso levou à necessidade de torres com maiores alturas para se conseguir ventos com melhores condições e maiores velocidades (HAU, 2013) e a componentes mais pesados. Desse modo, devido ao aumento da altura das torres e dos carregamentos atuantes, a torre se tornou mais solicitada.

As torres utilizadas para suportar as turbinas são, em geral, metálicas e possuem diâmetro máximo de aproximadamente 4,4 m devido a limitações relacionadas ao seu transporte (LANIER, 2005). O aumento da potência das turbinas exigiu estruturas mais altas e mais solicitadas, requerendo diâmetros maiores na base, inviabilizando seu transporte (HAU, 2013). Desse modo, novas soluções foram estudadas, como as torres híbridas e torres de concreto, e essas alternativas vêm provando ser viáveis economicamente para turbinas multi-megawatts, onde alturas maiores são necessárias (GAMA, 2015).

O uso do concreto tem se tornado uma solução preferível para torres com alturas acima de 100 m (HAU, 2013), pois, para essas situações, existe uma maior flexibilidade com o projeto e a construção, onde essas torres podem ser segmentadas em concreto pré-moldado ou até mesmo produzidas *in-loco*, diminuindo os problemas com transporte. Além disso, as torres de concreto apresentam outras vantagens, como menor custo em alturas maiores, melhor performance estrutural, durabilidade e segurança. Outro ponto favorável para o uso do concreto em torres eólicas de maiores alturas é a melhor resposta dinâmica em comparação às torres metálicas, pois elas ganham capacidade estrutural quando solicitadas dinamicamente por conta do aumento da espessura da parede (GAMA, 2015).

A torre pode representar até 30% dos custos totais (HAU, 2013), e um dimensionamento que a otimize pode representar grandes ganhos em termos econômicos, já que as torres geralmente são instaladas em grandes quantidades, e toda economia tem um impacto forte no custo.

Essa maior procura por aumentar a produtividade, reduzir custos e melhorar a eficiência do dimensionamento de torres eólicas, resultou em um crescimento por pesquisas voltadas para otimização estrutural como forma de auxílio aos profissionais nas tomadas de decisão relativas ao projeto da torre de concreto. O principal objetivo da otimização da torre tem sido a minimização do seu custo e, conseqüentemente, da energia produzida, e para isso, deve-se diminuir os custos relativos à construção das torres eólicas e aumentar seu potencial energético produtor.

A evolução da mecânica computacional tem permitido o uso de modelos mais refinados para a análise e a otimização dessas estruturas. Entretanto, o uso destes modelos pode

resultar em um custo computacional elevado, principalmente quando o problema de otimização é resolvido com algoritmos ditos de ordem zero, como por exemplo os algoritmos genéticos, onde o número de análises é elevado. É imprescindível buscar modelos que representem de forma mais aproximada o comportamento dessas estruturas para se tirar proveito das técnicas de otimização disponíveis. Porém, é importante ressaltar que quanto mais detalhado é o modelo, mais complexa e onerosa será a solução do problema.

Algumas questões têm atraído a atenção de pesquisadores nesse tema. No modelo de otimização, uma delas é o critério de resistência e, no modelo de análise, a ação dinâmica do vento e as não linearidades do problema (SILVA, BRASIL e ARORA, 2008; BRASIL e SILVA, 2016). Uma alternativa aos modelos refinados são os modelos substitutos, que procuram, com um número reduzido de execuções de modelos refinados, representar o comportamento desejado sem causar prejuízo ao desempenho da otimização. Outra opção bastante atrativa é o emprego de uma análise simplificada, mas eficiente, com o uso, por exemplo, de elementos de viga ao invés de elementos de casca, onde efeitos de não linearidades e da ação dinâmica do vento possam ser tratados de forma simples.

O que torna um modelo atrativo é sua capacidade de representar a realidade, mas, do ponto de vista da solução, é a sua simplicidade, duas questões que são antagônicas, em geral. Sendo assim, o desenvolvimento de modelos de otimização eficientes para torres eólicas de concreto é um grande desafio e podem ter um grande impacto no desenvolvimento da energia eólica no mundo, auxiliando engenheiros nos projetos preliminares dessas estruturas que possuem comportamento complexo, e ajudando a tornar a energia eólica cada vez mais competitiva.

1.1 Revisão Bibliográfica

Diversos trabalhos na área de otimização aplicados a torres eólicas foram realizados e forneceram importantes contribuições, mostrando a eficiência e as vantagens dessas técnicas na resolução de problemas de engenharia. A seguir estão comentados alguns trabalhos que utilizaram técnicas de otimização para torres eólicas de concreto e aço, com o intuito de fornecer um contexto inicial e informações que auxiliaram no direcionamento deste trabalho.

Muitos estudos têm sido feitos para verificar a viabilidade econômica de torres eólicas de concreto com o aumento da potência das turbinas. Um estudo pioneiro que forneceu resultados confiáveis, foi a primeira fase de um projeto conceitual de torres de 100m feitas de concreto, onde para turbinas de 3,6 MW e 5 MW foi verificado que a economia poderia ser de

68% e 63% respectivamente, comparando com torres metálicas. Em regiões com ventos de baixa velocidade, foi feito esse estudo para verificar a capacidade dessas localidades no que tange à energia eólica (LANIER, 2005).

Silva, Brasil e Arora (2008) estudaram o comportamento de torres de concreto armado com dados reais de turbinas disponíveis no mercado, de 65 m, 82,5 m e 100 m de altura, com diâmetro, espessuras e área de aço variáveis ao longo da altura da torre e apresentaram formulações para o projeto ótimo, mas não chegaram a fazer aplicações. Para o desenvolvimento das formulações, a estrutura foi discretizada em elementos finitos e o conceito de rigidez efetiva em estrutura de concreto armado foi utilizado em um modelo dinâmico não-linear. Eles levaram em consideração a não-linearidade geométrica e física. As variáveis de projeto são relacionadas às propriedades geométricas da seção e à área de aço em cada nó do modelo de elementos finitos, tratadas como contínuas. A função objetivo escolhida foi a minimização dos custos da torre, incluindo os custos do concreto e do aço e as restrições eram relativas a: áreas mínimas de aço longitudinal e transversal; resistência às cargas axiais e momentos fletores em cada nó, a seção transversal ao cisalhamento, espessura mínima, e a frequência natural. Sugeriu-se utilizar o método lagrangiano aumentado para resolver o problema de otimização. Para modelagem do vento, utilizou-se o modelo dinâmico discreto da ABNT 6123. Somando os valores obtidos na análise estática do vento e na análise utilizando o vento flutuante obtém-se a análise dinâmica não-linear da estrutura. O problema de otimização formulado não é resolvido de fato, apenas são apresentados o comportamento da função custo e da frequência em função das inclinações e do diâmetro do topo da torre.

Nicholson, Arora, *et al.* (2013) desenvolveram um estudo de otimização multi-objetivo não-linear para uma torre eólica híbrida de 130 m e uma torre de aço, onde as funções eram minimizar o custo e maximizar a rigidez da estrutura para reduzir o desgaste devido à vibração. Para a torre, as variáveis de projeto são suas dimensões, e as restrições são relacionadas à frequência natural, às tensões e ao deslocamento horizontal no topo. As restrições relacionadas à fundação são os limites na rigidez rotacional e horizontal, resistência do solo, segurança ao tombamento e pressão no solo. O trabalho também levou em consideração a fundação não rígida e a interação do solo com a estrutura. Eles propuseram uma metodologia de metamodelo e otimização generalizado. O método proposto levou a melhoras no dimensionamento e entendimento do problema.

Ma e Meng (2014) apresentaram um modelo de otimização para uma torre de concreto protendido de seção transversal regular octogonal com nervuras internas em cada lado. A torre foi dividida em três segmentos verticais para fins de otimização, e cada segmento possui

uma seção tronco de pirâmide linear de oito lados. As variáveis do sistema são a frequência natural, o nível da carga de protensão, as dimensões da seção transversal e a resistência dos materiais. A função objetivo é a minimização do custo do concreto e dos cabos de protensão. Os parâmetros de projeto foram restringidos de acordo com os requisitos construtivos das normas como a IEC 61400-1, a DNV-OS-J101 (especificação Norueguesa), GB50009-2001, GB50135-2006 e GB50010-2010 (especificações Chinesas), onde as restrições foram relativas às tensões últimas e de serviço, deslocamentos, dimensões da torre, fadiga e frequência natural da torre. O modelo de vento utilizado para a turbina foi o da IEC61400-1 e para o vento lateral foi utilizado o método equivalente estático da GB50009-2012 (especificação chinesa). A torre também foi dimensionada para carregamento sísmico. A torre foi analisada não-linearmente, onde os momentos de segunda ordem também foram levados em consideração. O problema foi resolvido utilizando os algoritmos genéticos e o método dos elementos finitos através do programa ABAQUS. Os resultados mostraram que o custo é diminuído em aproximadamente 15% comparando com a torre original de aço.

Bai *et al.*(2017) buscaram minimizar o custo da construção de uma torre eólica de 140 m, de concreto pós-tensionado. A torre possui uma parte cônica de concreto com espessura variável na base, uma parte cilíndrica de concreto no centro, e um adaptador metálico cilíndrico com espessura constante no topo. A função objetivo adotada busca a minimização do custo do concreto e do aço. As variáveis de projeto escolhidas foram as espessuras de cada segmento de concreto. As restrições impostas foram baseadas nos requisitos do EuroCode e CEB-FIP Model Code 1990. Os carregamentos considerados foram o peso próprio dos elementos estruturais, a massa da turbina, a força nos cabos de protensão, as combinações últimas de carregamentos e fadiga, e a carga do vento, considerada como sendo estática. As tensões e as frequências naturais da torre foram encontradas por meio de uma análise estática utilizando o elemento de viga de Timoshenko por meio de um software denominado FEA Code_Aster. O método lagrangiano aumentado e o enxame de partículas foram utilizados para resolver o problema de otimização da estrutura, com uma população de 48 conjuntos (sets). Aproximadamente 18h foram necessárias para alcançar a convergência, utilizando um computador com 12 núcleos. Em torno de 170 toneladas de concreto foram economizados, representando aproximadamente 10% do volume total. Nesse trabalho, foi possível concluir que existe a possibilidade de integrar a modelagem mecânica (fadiga e MEF) ao problema de otimização estrutural para o dimensionamento de torres eólicas de concreto.

O trabalho desenvolvido por Al-Kaimakchi, Jung, *et al.* (2017) comparou torres de diferentes materiais: aço, concreto e híbrido. As torres possuem alturas que variam de 80 a 150

m. Esse foi um dos poucos trabalhos realizados onde utilizou-se a otimização multi-objetivo de torres eólicas, e tinha como funções a minimização dos custos de materiais e maximização da eficiência da turbina. Para cada tipo de torre o número de variáveis de projeto foi, respectivamente, 5, 9 e 11 para torres de aço, concreto e híbridas, que variavam entre diâmetro, espessura e altura da torre e número de cabos de protensão no caso de torres de concreto. As restrições consideradas foram flambagem, tensões de flexão e de cisalhamento para as torres de aço, e os estados limites último e de serviço para torres de concreto. O método de otimização dos algoritmos genéticos foi escolhido para resolução do problema devido às restrições não-lineares e acentuada natureza não-convexa do problema. A força do vento foi simplificada para estática equivalente. Assim como em outros trabalhos, diversas normas foram utilizadas para verificação dos esforços e aplicação dos carregamentos, já que não se tem uma específica para esse tipo de construção. Al-Kaimakchi, Jung, *et al.*, (2017) utilizaram a IEC 61400-1 e a ASCE 7-10 para calcular a força do vento na torre e as combinações de carregamento. O estudo mostrou que torres metálicas acima de 80 m não são economicamente competitivas comparando com as torres de concreto e torres híbridas. Para alturas de até 150 m, o custo das torres de concreto e híbridas acaba sendo bem próximo, com a torre híbrida sendo pouco mais vantajosa para alturas entre 100 m e 135 m. Devido a limitações de estimativa de custos, utilizou-se as fórmulas providas por relatórios da National Renewable Energy Laboratory (NREL) e foi possível verificar que as torres de aço foram aproximadamente 30% mais caras que as torres de concreto e híbridas no geral.

Os trabalhos apresentados anteriormente utilizaram as técnicas de otimização voltados para torres de concreto. Entretanto, muitos trabalhos envolvendo otimização de torres metálicas foram realizados e também forneceram grandes contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Negm e Maalawi (2000) estudaram cinco estratégias de otimização para uma torre de aço com número variado de segmentos circulares uniformes, considerada engastada no solo. O problema é formulado como um problema de programação não-linear e é resolvido utilizando o método da penalidade interior. O material utilizado é elástico linear, isotrópico e homogêneo. A carga de vento é considerada estática. As cinco funções objetivo analisadas foram: a minimização do peso da torre, a maximização da rigidez da torre, a maximização da relação rigidez/massa, a minimização da vibração e a maximização direta da soma ponderada das frequências naturais do sistema. O elemento de viga de Euler-Bernoulli foi utilizado para prever as deflexões e negligenciou-se os efeitos de segunda ordem durante as análises. As variáveis de projeto são a área da seção transversal, o raio de giração e a altura de cada segmento. Como

restrições, os autores adotaram os requerimentos de resistência e tensões axiais (compressão e tração), deflexão máxima, ressonância e peso máximo, além de limitar a espessura mínima de cada segmento, de modo a evitar a flambagem local. Concluíram que a melhor estratégia foi a da maximização das frequências naturais do sistema, apesar de todas as outras também apresentarem bom desempenho quando comparados com o projeto de referência.

O trabalho de Uys, Farkas, *et al.* (2007) também buscou a minimização do custo do material e de construção de uma torre eólica de aço de formato cônico, com 45 m de altura e diâmetros de 3,3 m na base e 2,1 m no topo. Utilizaram enrijecedores para evitar ovalização e a torre foi dividida em três segmentos iguais. As variáveis de projeto adotadas foram a espessura da torre, o número de reforços e as dimensões dos reforços. A carga de vento foi modelada conforme os requisitos do Eurocode 1 Parte 2-4. As restrições de flambagem local e flambagem de anéis de reforços foram considerados e seguiram as normas DNV (Noruega) e API (Estados Unidos da América). Para resolver o problema de otimização proposto, o método de busca direta de Rosenbrock foi utilizado. Foi possível concluir que o custo da torre aumenta quando o número de enrijecedores aumenta, mas não consideravelmente, e que a espessura da torre não depende no número de enrijecedores.

Yildirim e Özkol (2010) analisaram uma torre eólica metálica de 52 m, com formato de tronco de cone, onde o diâmetro da base era de 4,3 m e do topo 2,56 m. O objetivo do problema era a minimização da massa da torre, aplicando o método dos algoritmos genéticos. As normas de referência adotadas para análise e combinação de carregamentos foram a ASCE 7-98, AISC-89 e IEC61400-1. As restrições foram relacionadas às tensões admissíveis da norma AISC-89 do aço e a combinação de carregamentos no estado de serviço foi baseada na ASCE 7-98. A carga de fadiga também foi considerada na análise da torre, assim como a carga equivalente de ruptura (*damage equivalent load*), flambagem local, carga sísmica, e carga de vento estática. A espessura encontrada foi de 26 mm na base variando de forma contínua até 12 mm no topo.

Santos (2013) otimizou uma torre eólica de aço buscando a minimização do volume total tendo como variáveis de projeto a espessura da parede da torre. A torre possui 76,20 m de altura com formato cônico vazado, dividida em três segmentos, com espessura variando de 30 mm na base a 12 mm no topo. As restrições relativas à frequência natural, tensão e deslocamentos foram adotadas em conformidade com os requisitos do Eurocode. As restrições referentes aos estados limites, se basearam na norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008). A análise linear da torre é feita com elementos finitos de casca no programa ANSYS e a carga do vento é considerada estática, conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988). Um método iterativo foi

utilizado de modo que o projeto ótimo fosse alcançado. O problema de otimização foi resolvido pelo otimizador do ANSYS, onde se utilizaram métodos de primeira ordem e de aproximação por subproblema (método de ordem-zero). Ele concluiu que esse tipo de estrutura merece atenção e deve ser submetido a análises de otimização, além das análises estáticas e dinâmicas.

Yilmaz (2014) teve como objetivo otimizar uma torre eólica metálica *offshore* da NREL de 5MW e a sua fundação do tipo monopilar, com o objetivo de minimizar a massa desses elementos. Ele examinou se o uso de Tuned Mass Dampers (TMD) que continham uma massa, uma mola e um amortecedor, permitiam a redução da espessura da estrutura da torre e da fundação. As variáveis de projeto foram consideradas discretas. O autor utilizou o IECWind para gerar carregamentos extremos do vento, onde foram aplicados ao longo do tempo para verificar o comportamento da torre. A espessura da torre foi reduzida em incrementos iguais de 5% até atingir a redução de 50% da espessura inicial. Diversas ferramentas computacionais foram utilizadas, como o FAST-SC, BModes, entre outros, para auxiliar na análise da torre. Nos casos estudados, o TMD foi mais eficiente na redução dos efeitos de fadiga do que na redução do carregamento último. Desse modo, concluiu-se que o TMD tem maior importância na diminuição dos efeitos dinâmicos na estrutura.

Brasil e Silva (2016) desenvolveram um trabalho na área de análise de uma torre de telecomunicações em concreto armado de 40 m de altura e paredes de 12 cm de espessura. Diferentemente dos trabalhos já apresentados anteriormente, a carga do vento foi aplicada como sendo dinâmica por meio do método do vento sintético formulado por Franco (1993). As análises foram realizadas em conformidade com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), e a estrutura foi discretizada em elementos finitos, de modo a determinar os deslocamentos de cada elemento da torre. Uma análise não-linear geométrica foi realizada utilizando o método P-delta, de forma que a rigidez efetiva dos elementos fosse recalculada. Os autores consideraram que 48% dos carregamentos são estáticos, enquanto os 52% são predominantes de cargas dinâmicas como a do vento. Foram comparados os deslocamentos gerados pela carga do vento considerada estática e foi possível verificar que ao se considerar a dinamicidade do vento, os deslocamentos e esforços chegaram a atingir valores até 3 vezes maiores do que aqueles obtidos pela simples análise estática linear da estrutura. Desse modo, foi possível mostrar a importância de se realizar estudos considerando os carregamentos como sendo dinâmicos nas estruturas de concreto.

1.2 Justificativa

Como o aumento do tamanho das turbinas e das torres eólicas é uma realidade, pesquisas por inovações e estudos voltados para análise e dimensionamento das torres, tanto de aço quanto de concreto, tornaram-se de grande relevância.

O emprego do concreto é mais recente na indústria eólica (torres), e por isso, há ainda necessidade de estudos e pesquisas nas várias disciplinas relacionadas ao planejamento, dimensionamento e construção de torres eólicas de concreto.

O projeto convencional das torres é baseado em tentativa e erro das diversas combinações das variáveis envolvidas, como dimensões, resistência do material, área de aço e situações de carregamento, de modo a respeitar os requisitos de segurança admitidos. Mesmo os engenheiros mais experientes recorrem a esse processo para o dimensionamento dessas estruturas. Essa forma de dimensionamento se torna bastante onerosa e dificilmente se chega a um resultado ótimo e, muitas vezes, os grandes fabricantes detêm as tecnologias e os métodos utilizados referentes ao dimensionamento das torres de concreto por motivos de sigilo empresarial ou direitos autorais.

As técnicas de otimização disponíveis podem auxiliar engenheiros na busca pelo aumento da produtividade, redução de custos e melhoria da eficiência no dimensionamento de torres eólicas. Assim, há uma tendência cada vez maior no uso de técnicas de otimização para projeto dessas estruturas.

O número de pesquisas realizadas que aplicam técnicas de otimização para a obtenção de projetos eficientes de torres eólicas cresceu bastante, mas ainda se encontram limitados por conta de carência de informações e normas de projeto específicas. Em relação aos trabalhos já realizados para torres de concreto, alguns resultados foram alcançados, principalmente quando se adotam modelos mais simplificados, de modo a reduzir os custos computacionais, como por exemplo, utilizando elementos mais simples ou comportamento físico e geométrico simplificados. Esses aspectos tornam a aplicação de técnicas de otimização bastante atrativas para o dimensionamento de torres eólicas de concreto, principalmente por fornecer meios de reduzir custos.

Não existem atualmente códigos ou normas que tratam exclusivamente do dimensionamento de torres de concreto, então um modelo de análise simplificado aplicado juntamente com as técnicas de otimização pode auxiliar consideravelmente o profissional que trabalha com essas estruturas. Não se encontrou na literatura pesquisada estudos conclusivos

de otimização de torre eólica de concreto aplicando as normas brasileiras. Verificou-se também que pouco tem sido feito quando se considera a natureza dinâmica do problema.

Unindo a escassez de bibliografias para dar suporte aos engenheiros, a necessidade de realizar projetos de forma mais eficiente e a redução de custos em busca da competitividade da energia eólica, buscou-se a formulação de um modelo de otimização de torres eólicas de concreto. Grandes ganhos podem ser alcançados através da otimização da forma das torres, pois elas são responsáveis por uma parcela considerável dos custos totais da construção e instalação de um aerogerador.

Por esses motivos, optou-se por seguir essa linha de pesquisa, devido à grande relevância do tema não só para o atual cenário energético mundial, mas também para a engenharia, pois torres de concreto armado ainda são pouco exploradas frente a torres metálicas. É importante realizar um estudo onde as hipóteses adotadas são melhor esclarecidas e escolher simplificações que não afetem de forma acentuada a representatividade do modelo e nem o tornem tão complexo, já que do ponto de vista prático, modelos mais simples são preferíveis no dia-a-dia dos engenheiros. A função objetivo, restrições, algoritmos, ferramentas computacionais, técnicas de análise e modelos serão discutidos em detalhes ao longo deste trabalho.

1.3 Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo a formulação de um modelo de otimização de torres eólicas de concreto armado com ênfase na modelagem da ação do vento na torre e o uso de análises estruturais simplificadas. Com a ferramenta a ser desenvolvida na pesquisa, pretende-se fornecer ao projetista soluções para um projeto preliminar otimizado de torres eólicas de concreto armado.

Tem-se como objetivos específicos:

- Conhecer o estado da arte sobre o projeto e a otimização de torres eólicas de concreto;
- Atender normas pertinentes ao projeto de torres eólicas, principalmente no que diz respeito à modelagem do vento e condições de carregamento;
- Avaliação de modelos para a carga de vento em torres de turbinas eólicas, considerando sua natureza estática e dinâmica;
- Avaliação de modelos de elementos finitos de viga para a modelagem da torre considerando não linearidade física. Pretende-se adotar procedimentos simplificados para incorporar esses efeitos como, por exemplo, a modificação das propriedades do

material para considerar a fissuração do concreto, etc, com o objetivo de reduzir o custo computacional;

- Estudo dos critérios de resistência adotados para as seções tubulares em concreto armado com foco no uso de diagramas tensão deformação simplificados frente a diagramas mais precisos;
- Avaliação da eficiência dos algoritmos genéticos na otimização;
- Aplicação da formulação a torres reais;
- Avaliação da sensibilidade das soluções otimizadas em função da variação de parâmetros da função objetivo.

1.4 Organização do trabalho

O Capítulo 1 fornece informações introdutórias sobre torres eólicas de concreto e as motivações e objetivos existentes para a realização desse estudo. No capítulo 2 se tem um breve embasamento acerca dos componentes de um aerogerador e os carregamentos aplicáveis para o dimensionamento das estruturas de suporte. O capítulo 3 foca nos métodos de análise e verificação utilizados para auxiliar na formulação do problema. O capítulo 4 traz alguns conceitos básicos de otimização, algoritmos genéticos e o modelo de otimização idealizado para as torres em concreto armado. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e o capítulo 6 traz as conclusões com algumas considerações finais.

2 TORRES EÓLICAS

A energia eólica é proveniente da transformação da energia cinética do vento em energia elétrica e em outros tipos de energia (LETCHER, 2017). Os primeiros relatos que se tem acerca da utilização da energia eólica foi há aproximadamente 2000 anos em moinhos de ventos, inicialmente para moer sementes e levantar água, e séculos depois para irrigar as terras, bombear água de poços e auxiliar no fornecimento de água (LETCHER, 2017). No século 19, com os avanços tecnológicos, turbinas eólicas foram produzidas pela primeira vez em larga escala nos EUA (HAU, 2013) e foram utilizadas para geração e armazenamento de energia elétrica.

A energia eólica tem sido uma das mais promissoras dentre as energias alternativas por possuir diversas vantagens, dentre elas, e uma das mais importantes, é por ser uma fonte limpa de energia, fornecendo energia sem a produção de dióxido de carbono (LETCHER, 2017). Além disso, é um tipo de energia sustentável, possui facilidade em ser alocada em diversas regiões, mantém os recursos hídricos preservados, e também é uma fonte de energia que não depende de combustíveis, o que pode ser importante para a independência energética de um país, entre diversas outras vantagens (LETCHER, 2017).

Dentre as desvantagens da energia eólica, a maior delas é a variação da disponibilidade dos ventos e o problema do alto custo inicial na instalação dos aerogeradores. O problema da restrição de locais também é pertinente, pois alguns locais são de difícil acesso, como em montanhas e regiões afastadas de centros urbanos. Poluição sonora também é uma das desvantagens da energia eólica, assim como a agressão visual. Problemas com a segurança das turbinas também é recorrente, podendo levar a um colapso da estrutura (LETCHER, 2017).

A energia gerada por uma turbina eólica é proporcional ao cubo da velocidade do vento. A potência gerada também é proporcional a área das pás varrida pelo vento, onde a potência é função do quadrado do comprimento da pá, então, quanto maior a pá e mais alto ela está localizada, maior a potência gerada, levando então, a turbinas cada vez maiores (LETCHER, 2017).

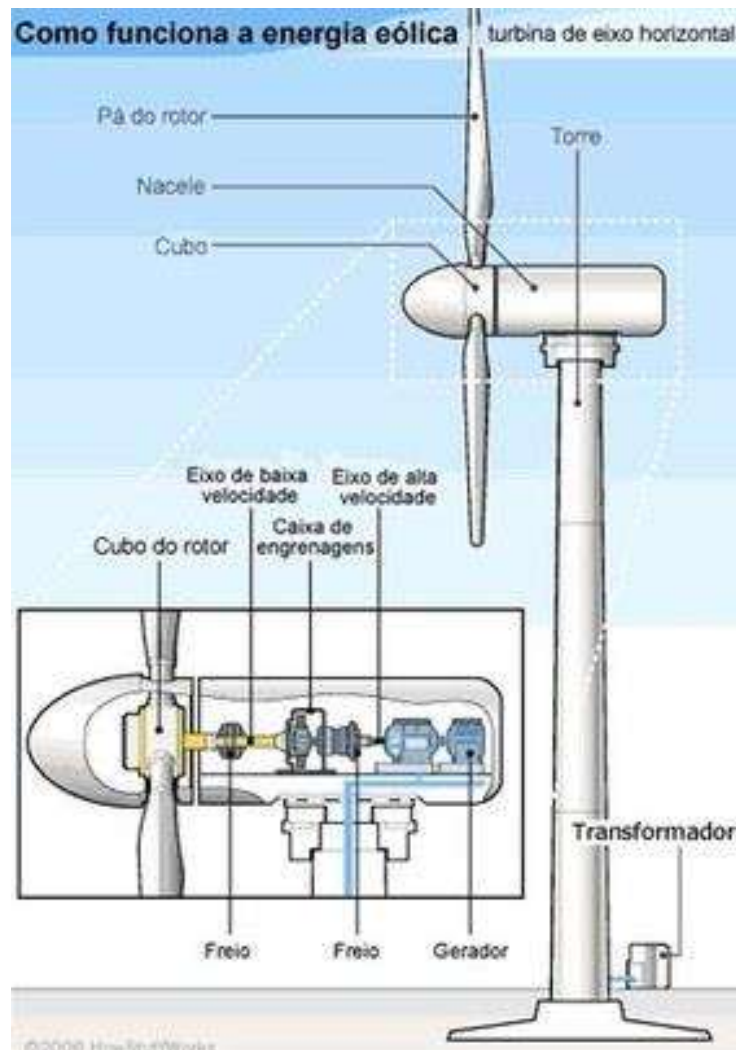
2.1 Principais componentes de um aerogerador

Diversas configurações, tipos e tamanhos de torres eólicas são encontradas. Quanto à posição do eixo, as turbinas podem ser de eixo vertical ou horizontal, com um número variável de pás. Entretanto, um tipo de aerogerador se tornou preferível e muitas empresas adotaram

como padrão as turbinas de eixo horizontal, com três pás e configuração *upwind* (GAMA, 2015). Desse modo, a atenção nesse trabalho será voltada para esse tipo de aerogerador.

Os principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal com turbina de três pás convencional são a fundação, a torre, a nacelle e o rotor. A Figura 2 exhibe o esquema de uma torre eólica com os componentes e configuração típica de uma turbina de grande porte.

Figura 2 – Principais componentes de um aerogerador



Fonte: <<https://microeolica.weebly.com/constituiccedilatildeo-de-uma-teh.html>>
Acesso em: 31/07/2019

A nacelle é encaixada no topo da torre e possui diversos componentes internos como o rotor da turbina, o sistema de transmissão, o gerador, o sistema de controle, transformador e os cabos que conectam à rede elétrica (LETCHER, 2017).

O rotor é o componente que efetua a transformação da energia cinética do vento em energia mecânica de rotação. Ele recebe as pás da turbina, as quais geralmente são fabricadas em material compósito com fibras de vidro e matriz epóxi.

2.2 Tipos de Torres

As torres são necessárias para dar sustentação ao rotor e aos outros componentes do aerogerador. É um item de grande porte e contribui consideravelmente com o custo do sistema. As torres podem ter diversos formatos, como cônicas, cilíndricas e treliçadas. Dentre os materiais utilizados para a construção das torres eólicas, o aço e o concreto se tornaram predominantes.

O concreto se tornou preferível para torres de maior porte por possuir maior flexibilidade em termos de método construtivo e projeto e eliminar problemas de transporte das torres metálicas. Ele é muitas vezes utilizado na forma de pré-moldado, armado ou protendido. As torres híbridas (concreto e aço) também vem sendo estudadas e se apresentam como uma solução alternativa viável para torres mais altas (acima de 100 m). O uso do concreto também trouxe benefícios para a fundação, pois ela pode ser em torno de 25 a 35% mais barata que uma torre metálica equivalente, além de ser mais rápida de executar (JIMENO, 2012).

2.3 Carregamentos atuantes

Para o dimensionamento seguro de uma torre eólica de concreto e qualquer outra estrutura, é necessário saber quais os possíveis carregamentos que a estrutura vai suportar ao longo da sua vida útil e considerar diferentes combinações que satisfaçam os requisitos normativos, que são os Estados Limites Último e de Serviço. Entretanto, a previsão dessas cargas nas torres eólicas é complexa e se apresenta como um dos maiores desafios para o projeto dessas estruturas, principalmente devido às características do vento.

Ao se trabalhar com aerogeradores, o projetista tem que lidar com diferentes circunstâncias de carregamentos e requerimentos comparado àqueles utilizados para estruturas convencionais, sendo necessário recorrer a diversas fontes e especificações para que se possa dimensionar essas estruturas de forma segura e eficiente. A norma usualmente utilizada para se obter os carregamentos nas turbinas eólicas é a IEC 61400-1 (2005).

No Brasil, devido à ausência de especificações para este tipo de projeto, serão utilizadas neste trabalho as normas voltadas para estruturas em concreto armado convencionais, como a NBR 6118 (ABNT, 2014), e a própria norma de vento NBR6123 (ABNT, 1988). Além

dos carregamentos de vento propostos na NBR6123 (ABNT, 1988), será também abordado o método do Vento Sintético, proposto por Franco (1993), que possui natureza dinâmica.

2.3.1 Cargas Permanentes e Variáveis

Um aerogerador deve ser analisado para diversas condições de carregamento ao longo da sua vida útil, incluindo o comportamento durante situações extremas ou de operação, como paradas bruscas, manutenção e o transporte das peças. Os carregamentos atuantes nas torres eólicas podem se dividir em carregamentos permanentes e variáveis e estão sujeitos a coeficientes e diferentes combinações para que se possa garantir a segurança da estrutura.

Os carregamentos permanentes atuantes na torre eólica são considerados praticamente constantes ao longo de toda a sua vida útil, e são constituídos pelo peso próprio da estrutura, peso da nacelle, e dos elementos não-estruturais, como cabos, escadas, entre outros (GRÜNBERG e GÖHLMANN, 2013). Dentre as cargas permanentes atuantes na torre, apenas o peso próprio será considerado devido ao grande volume de concreto a ser utilizado na construção da torre. Não será levado em consideração o peso de estruturas externas, como escadas, cabos e outros dispositivos que possam estar conectados na torre.

Os carregamentos variáveis são aqueles que podem variar com o tempo e estão relacionados com a operação da turbina. A carga de vento entra na classificação de carregamentos variáveis e é um dos principais condicionantes no dimensionamento de torres eólicas devido a sua atuação na turbina e na própria torre. Para a análise da torre, é necessário determinar o modelo de vento que melhor represente a situação a ser analisada, já que as condições de vento são as condições externas principais que afetam a integridade estrutural da torre (IEC, 2005). A IEC 61400-1 (IEC, 2005) fornece diversos modelos de vento para diferentes situações de carregamento e operação da turbina eólica.

2.4 Classificação das turbinas eólicas

A IEC 61400-1 “Aerogeradores – Parte 1: Requisitos de Projeto” (IEC, 2005) identifica quatro classes de turbinas que variam conforme a localização do aerogerador e são definidas em função das condições externas como a velocidade de vento e a turbulência. A Tabela 1 exibe os parâmetros básicos para definição de carregamentos em aerogeradores.

Tabela 1 – Parâmetros básicos (IEC 61400-1)

Classe de Aerogeradores		I	II	III	S
V_{ref}	(m/s)	50	42,5	37,5	Valores especificados pelo projetista
A	I_{ref} (-)		0,16		
B	I_{ref} (-)		0,14		
C	I_{ref} (-)		0,12		

Onde:

V_{ref} é a velocidade do vento de referência (média no intervalo de 10 min)

A representa a categoria para características de vento de maior turbulência

B representa a categoria para características de vento de turbulência média

C representa a categoria para características de vento de turbulência mais baixa e,

I_{ref} é o valor esperado da intensidade da turbulência a 15 m/s.

A velocidade do vento de referência e a intensidade da turbulência são definidas pelo tipo de turbina na torre e são utilizados como parâmetros para descrever as condições de vento a que serão submetidas.

É importante ressaltar que as condições apresentadas na Tabela 1 são referentes apenas a aerogeradores localizados *onshore*, e não aquelas torres instaladas em ambientes marinhos. Além disso, não se aborda condições de ventos provenientes de furacões, ciclones e tufões. Nesses casos, o projeto da torre deve ser da classe S e os parâmetros básicos de vento devem ser especificados pelos próprios fabricantes.

2.5 Modelos de Vento da IEC 61400-1

A IEC 61400-1 (2005) especifica 8 modelos de vento atuantes na turbina eólica, conforme Tabela 2. Os carregamentos sugeridos tentam abordar uma grande gama de condições possíveis para a qual a torre e a turbina podem estar sujeitas, as quais se dividem em condições consideradas normais e condições extremas, que são definidas com período de recorrência de 1 ano ou de 50 anos.

As condições normais estão associadas às situações de carregamento recorrentes, enquanto as condições extremas representam as condições raras de projeto. Para análise da estrutura, os casos de carregamento devem combinar situações que sejam potencialmente críticas com os modos de operação do aerogerador e outras situações de projeto (IEC, 2005).

Dentre os diversos modelos de vento que são utilizados para o dimensionamento das torres eólicas, a maioria deles é tratado como estático, devido à dificuldade de se

implementar um modelo mais realista que leve em conta a sua característica dinâmica. O modelo normal de vento e dois extremos foram usados neste trabalho e são discutidos.

Tabela 2 - Modelos de vento

Condições normais de vento
- Modelo do Perfil Normal de Velocidade do Vento (NWP)
- Modelo de turbulência normal (NTM)
Condições extremas do vento
- Modelo de velocidade extrema do vento (EWM)
- Rajada extrema de operação (EOG)
- Modelo de turbulência extrema (ETM)
- Mudança extrema de direção (EDC)
- Rajada extrema coerente com mudança de direção (ECD)
- Perfil Extremo de velocidade do vento (EWS)

Fonte: (IEC, 2005).

Os modelos de vento citados a seguir são os mais comumente utilizados para determinar os esforços da turbina atuantes no topo da torre para fins de estudos, justamente por se tratar de condições extremas. Atualmente, se tem disponível carregamentos para alguns tipos de turbina utilizando os modelos EWM e EOG, pois são uns dos que mais tem impacto no dimensionamento das torres, por considerar situações extremas.

Modelo Normal de Vento

O modelo normal de vento (NWP – Normal Wind Profile) adotado pela IEC 61400-1 (2005) serve de base para a maioria dos outros modelos e estão exibidos nas Eqs. (1) e (2), os quais descrevem a variação da velocidade do vento em função da altura acima do solo.

$$V(z) = V(z_r) \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (1)$$

$$V(z) = V(z_r) \cdot \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2)$$

onde

$V(z)$ é a velocidade do vento na altura z ;

$V(z_r)$ é a velocidade média de 10 minutos na altura de referência z_r

z é a altura acima do solo;

z_r é a altura de referência acima do solo utilizando para ajustar o perfil (de velocidade do vento);

z_0 é o comprimento de rugosidade;

α é o expoente da lei de potência.

Modelo Extremo de Vento (EWM)

O modelo de vento EWM caracteriza uma condição não-operacional da turbina, onde o vento atua diretamente quando o aerogerador não está em funcionamento. Este modelo de vento é definido em função da velocidade de referência V_{ref} e da altura z . A velocidade V_{e50} do vento é correspondente a um período de recorrência de 50 anos e é definida pela expressão:

$$V_{e50} = 1,4V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0,11} \quad (3)$$

onde

z é a altura de interesse;

z_{hub} é a altura onde a turbina está localizada

Modelo de Rajada de Vento Extrema (EOG)

A expressão de Rajada de Vento Extrema (EOG) sugerida pela IEC61400-1 depende de propriedades como o diâmetro do rotor e o fator de turbulência do vento. Para alturas maiores que 60 m, considera-se que esse fator longitudinal de turbulência é constante e igual a 42 m.

A velocidade da rajada de vento no cubo é definida pela expressão abaixo, conforme IEC 61400-1:

$$V_{gust} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,35(V_{e1} - V_{hub}); \\ 3,3 \frac{\sigma_1}{1 + 0,1 \left(\frac{D}{\wedge_1} \right)} \end{array} \right. \quad (4)$$

onde:

$$\sigma_1 = I_{ref} (0,75V_{hub} + b) \quad \text{onde } b = 5,6 \text{ m/s}$$

\wedge_1 é o parâmetro da escala de turbulência longitudinal e assume-se que seu valor é igual a 42 m quando $z_{hub} \geq 60$ m;

D é o diâmetro do rotor da turbina.

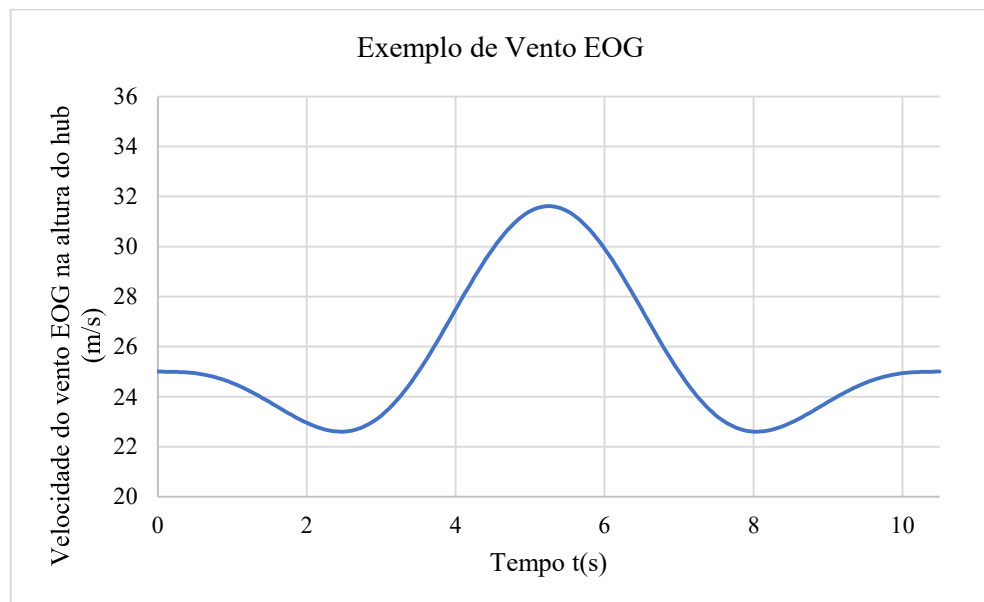
A velocidade do vento é então definida pela equação Eq. (5) e exibida na Figura 3:

$$V(z,t) = \begin{cases} V(z) - 0,37V_{gust} \sin\left(\frac{3\pi}{T}\right) \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right) & \text{para } 0 \leq t \leq T \\ V(z) & t > T \end{cases} \quad (5)$$

$V(z)$ é definido pelo modelo de vento normal (NWP);

$T = 10,5 \text{ s}$.

Figura 3 – Exemplo de Vento EOG



Fonte: Autora.

2.6 Modelos de vento da NBR6123

2.6.1 Vento Estático

O modelo mais comumente utilizado para representar os esforços de vento atuantes em estruturas é o modelo de vento estático. As forças devidas ao vento são determinadas a partir da velocidade básica do vento V_o , a qual corresponde “a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano” (ABNT, 1988).

A velocidade característica V_k do vento é obtida na forma

$$V_k = V_o \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (6)$$

onde o fator S_1 leva em consideração o relevo do terreno, o fator S_3 considera o grau de segurança e ocupação requerido durante a vida útil da estrutura e o fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura e das dimensões da estrutura analisada.

Ao se ter em mãos a velocidade característica, determina-se a pressão dinâmica pela expressão:

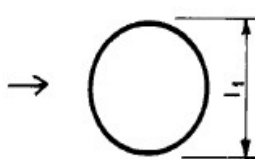
$$q = 0,613V_k^2. \quad (7)$$

A componente da força global na direção do vento, chamada de força de arrasto, é dada por:

$$F = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (8)$$

onde C_a é o coeficiente de arrasto e A_e corresponde à área frontal efetiva, definida pela área da projeção ortogonal da estrutura sobre um plano perpendicular à direção do vento. O cálculo do coeficiente de arrasto conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988) aplicável a torres eólicas são aqueles onde se considera a seção constante ou fracamente variável, conforme Figura 44:

Figura 4 - Determinação do Coeficiente de arrasto C_a para concreto

Planta	$Re^{(A)}$ \times 10^{-5}	h/l_1						
		1/2	1	2	5	10	20	∞
	$\leq 3,5$	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
	$\geq 4,2$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
	Todos valores	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2
	Todos valores	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4

Fonte: NBR6123 (1998).

A determinação do coeficiente de arrasto também depende do número de Reynolds, o qual é determinado pela expressão:

$$Re = 70000V_k d \quad (9)$$

2.6.2 Modelo Simplificado

A frequência natural é um fator de muita importância no dimensionamento de torres eólicas. Conforme a NBR6123 (ABNT, 1988), se a frequência natural de uma dada estrutura for menor que 1 Hz, particularmente se for fracamente amortecida, a resposta flutuante na direção do vento médio pode ser importante. Pela norma, a frequência estimada de torres de concreto entre 100 e 150 m de altura varia de 0,33 Hz a 0,5 Hz, o que sugere a necessidade da investigação do comportamento dinâmico. A resposta dinâmica total, resultante da soma das respostas média e flutuante, pode ser avaliada de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988).

A norma propõe duas formas de levar em consideração o efeito dinâmico do vento: o modelo simplificado e o modelo discreto. O modelo simplificado consiste em adotar como resposta dinâmica aproximada o primeiro modo de vibração da estrutura analisada. A NBR 6123 (ABNT, 1988) sugere a adoção desse modelo para estruturas com características aproximadamente constantes e uniformes ao longo do seu comprimento, como largura e distribuição de massa. Esse método é aplicável a estruturas com até 150 m de altura, sendo que a resposta dinâmica da estrutura está ligada apenas ao seu primeiro modo fundamental. O primeiro modo de vibração pode ser representado pela equação:

$$x = \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma$$

A carga do vento obtida pelo modelo simplificado da NBR 6123 (ABNT, 1988), é dado por:

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi \right], \quad (10)$$

onde

$$\bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2$$

b e p são coeficientes dados pela norma que varia conforme a categoria do problema, z_r é a altura de referência definida como sendo igual a 10 m, h é a altura total da torre eólica, γ é um parâmetro para a determinação dos efeitos dinâmicos e ξ é o fator de amplificação dinâmica.

A carga de vento divide-se em uma parcela estática, devido à velocidade média do vento, e outra dinâmica, devido à flutuação da velocidade do vento. Os efeitos dinâmicos são mais intensos em estruturas altas e esbeltas, como é o caso de torres eólicas de concreto. Entretanto, esse modelo de vento considera uma distribuição de massa aproximadamente constante, o que não acontece no caso de torres eólicas devido à massa concentrada no topo

(massa da turbina). Esse modelo pode, então, não representar o carregamento atuante na estrutura de forma adequada, sendo necessário ter atenção aos resultados obtidos. É necessário estudar mais profundamente este modelo de vento para torres eólicas, já que se pressupõe no modelo que a estrutura seja mais comportada em termos de distribuição de massa. Como se trata de um modelo de vento simples, para a análise na otimização é vantajoso, por isso é importante estudar esse modelo de vento para torres eólicas.

2.6.3 Modelo discreto

O modelo discreto para determinação da resposta dinâmica de uma estrutura consiste em concentrar a massa nos nós do modelo de elementos finitos. Esse modelo é sugerido para estruturas que apresentam grandes variações nas suas propriedades geométricas e na sua distribuição de massa. A carga de vento também é amplificada por um fator dinâmico, e é posteriormente considerada estática na determinação da força total correspondente a cada modo de vibração.

Ao contrário dos modelos de vento estático e dinâmico simplificado, o vento dinâmico discreto leva em consideração a massa do elemento discretizado. Para torres eólicas em geral, tem-se uma massa concentrada no topo devido ao peso da nacelle e do rotor. A massa concentrada no nó é levada em consideração na parcela flutuante da expressão para o cálculo do vento dinâmico discreto.

Conforme a NBR6123, para cada modo de vibração j , a força total X_i é dada por:

$$X_i = \bar{X}_i + \hat{X}_i \quad (11)$$

onde a força média \bar{X}_i vale:

$$\bar{X}_i = q_0 b^2 C_{a,i} A_i \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^{2p} \quad (12)$$

e a componente flutuante é dada por:

$$\hat{X}_i = F_H \psi_i x_i \quad (13)$$

$$F_H = q_0 \cdot b^2 \cdot A_0 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i x_i}{\sum_{i=1}^n \psi_i x_i^2} \cdot \xi \quad (14)$$

$$\beta_i = C_{a,i} \frac{A_i}{A_o} \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^p \quad (15)$$

onde $\psi_i = m_i/m_0$ e m_0 e A_0 denotam uma massa e uma área arbitrárias de referência, respectivamente, e ξ é o coeficiente de amplificação dinâmica, também utilizado na formulação do vento dinâmico simplificado.

2.6.4 Comparação entre os modelos de vento da NBR 6123

A maioria das análises realizadas nas torres eólicas consideram o vento como uma carga estática (Al-Kaimakchi et al., 2017; Bai et al., 2017; LaNier, 2005; Lima, 2011). No modelo dinâmico simplificado e no modelo dinâmico discreto da NBR 6123 (ABNT, 1988), dado pelas Eqs. (10) e (11), as cargas de vento são dinamicamente amplificadas pelo fator ξ para, então, serem tratadas como estáticas equivalentes.

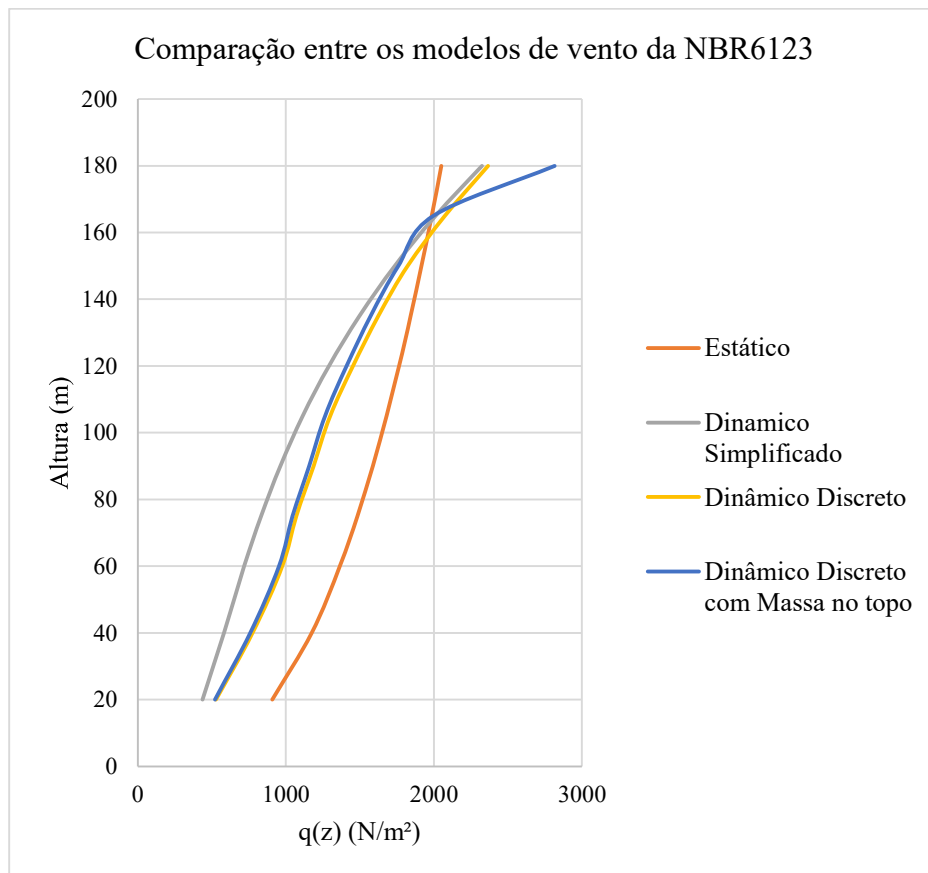
O modelo estático não leva em consideração as propriedades da estrutura ao se definir o perfil de vento nem a parcela dinâmica do vento. Apenas considera as propriedades geométricas ao se calcular a força resultante em uma parcela de área. Desse modo, este é o modelo de vento mais simples dentre os outros.

O modelo de vento simplificado considera que a estrutura tenha uma distribuição de massa uniforme e seção aproximadamente constante. Na determinação do perfil de vento, esse modelo considera uma parcela média e uma parcela flutuante. Entretanto, por simplificar as considerações geométricas da estrutura, não é levado em consideração na sua formulação a distribuição de massa, o que para uma torre eólica pode ser fundamental, pois, embora a torre possua uma variação aproximadamente constante na sua estrutura, existe uma massa concentrada no topo que gera esforços determinantes para seu dimensionamento. O modelo discreto considera tanto a dinamicidade do vento quanto leva em consideração as propriedades da estrutura ao concentrar em nós parcelas de massa.

Desse modo, com essas discussões apresentadas, a Figura 5 exhibe o perfil obtido para cada modelo de vento da NBR6123 para uma chaminé de concreto armado. Optou-se por escolher essa estrutura por ser similar ao problema que está sendo avaliado. Os dados utilizados para esta análise são os mesmos retirados do Anexo I da NBR6123 (ABNT, 1998). Com a finalidade de mostrar como o modelo de vento discreto se comportaria com uma situação semelhante a torre eólica, optou-se por colocar uma massa concentrada no topo para entender como o perfil de vento pode ser influenciado.

É possível verificar que o vento estático possui um carregamento maior ao longo da altura da torre, exceto no topo, onde os ventos dinâmico simplificado e discreto superam o estático. Isso ocorre devido a parcela flutuante do vento que é considerada no cálculo dos modelos de vento dinâmico. Embora os modelos não sejam efetivamente dinâmicos, pois não tem o tempo como variável, aqui serão denominados dessa forma, pois são descritos com este termo na norma e em outros trabalhos já realizados.

Figura 5 - Pressão do vento atuante na torre de concreto (exemplo da NBR6123).



Fonte: Autora.

O perfil de vento dinâmico discreto com massa concentrada no topo tem um brusco aumento no topo, justamente devido a esse aumento da massa nesse nó. A formulação é dependente diretamente da massa para a determinação da força nos nós. Sendo assim, a presença da turbina no topo da torre, torna a força no seu topo bem maior que todos os outros modelos de vento apresentados anteriormente.

2.7 Vento sintético

O Método do Vento Sintético desenvolvido por Franco (1993) possibilita o estudo do efeito dinâmico em estruturas esbeltas, e utiliza a simulação de Monte Carlo para obtenção do carregamento dinâmico do vento, correspondente à parcela flutuante. A parcela média é a mesma descrita pela NBR6123 (1988).

O método propõe modelar as pressões flutuantes do vento no domínio do tempo através de um conjunto de m funções harmônicas (no mínimo 11) e atribuindo valores aleatórios para os ângulos de fase dessas funções. Uma das funções harmônicas é considerada ressonante com a estrutura. Para a obtenção do espectro de potência, que é o conjunto de parcelas que definem o carregamento do vento flutuante atuante por 600 s, Franco (1993) propôs uma formulação derivada do espectro de Davenport, conforme abaixo:

$$S(f) = \frac{2X_1^2}{3(1+X_1^2)^{4/3}} \cdot \frac{\sigma^2}{f} \quad (16)$$

$$X_1 = \frac{1200f}{\bar{V}_{(10)}} \quad (17)$$

onde:

$S(f)$ é o espectro de potência do vento

f é a frequência das rajadas

$\bar{V}_{(10)}$ é a velocidade do vento

σ é a velocidade de cisalhamento do vento

X_1 é a relação entre a frequência das rajadas e a velocidade do vento.

As funções harmônicas podem ser representadas por:

$$p'(t) \cong \sum_{k=1}^m C_k \cos\left(\frac{2\pi t}{T_R r_k} - \theta_k\right) \quad (18)$$

$$C_k = \sqrt{2 \int_{f_{pk}}^{f_{ak}} S_p(f) df} \quad (19)$$

$$r_k = 2^{k-R} \quad (20)$$

onde:

S_p é o espectro de potência do vento;

R é a frequência do harmônico ressonante com a estrutura;

T_R é o período relacionado ao harmônico ressonante;

r_k é a razão entre o período harmônico k e o período harmônico ressonante;

θ_k é o ângulo de fase do harmônico k .

Conforme Franco (1993), os intervalos de integração f_{ak} e f_{pk} são os intervalos de frequência ao longo dos m harmônicos, e são obtidos conforme abaixo:

$$f_{a_k} = \frac{r}{2^{(k-0,5-R)}} \quad (21)$$

$$f_{p_k} = \frac{r}{2^{(k+0,5-R)}} \quad (22)$$

Para o cálculo de cada harmônico, tem-se;

$$T_k = \frac{1}{f_k} \quad (23)$$

$$f_k = \frac{r}{2^{(k-R)}} \quad (24)$$

O trabalho desenvolvido por Franco (1993) também apresenta considerações quanto à correlação espacial das rajadas de vento e o centro de rajada equivalente que induza o mesmo efeito na estrutura. Essa metodologia tem sido aplicada por diversos autores como Carril Júnior (2000) e Santos (2018) em diversos tipos de estruturas como torres metálicas de telecomunicações, torres em concreto armado, entre outros.

2.8 Fatores de Carga

Os fatores de carga utilizados para majorar ou minorar os carregamentos atuantes nas torres eólicas são necessários para tentar abranger as incertezas e variabilidade referentes aos carregamentos, ao material utilizado na fabricação das torres e ao tipo de análise realizada na estrutura. A equação abaixo determina a carga de projeto a ser utilizada no dimensionamento da estrutura:

$$F_d = \gamma_f F_k, \quad (25)$$

onde F_d é o valor de projeto para a carga agregada proveniente de várias fontes, γ_f é o fator de segurança parcial para cargas, F_k é o valor característico da carga.

Para garantir um nível adequado de segurança, os parâmetros devem ser levados em consideração no projeto. A Tabela 3 exhibe os fatores de segurança para carregamentos utilizados no dimensionamento de turbinas eólicas, conforme IEC 61400-1.

Tabela 3 - Fatores de segurança para cargas

Cargas desfavoráveis			Cargas favoráveis
Tipo de situação de projeto			Todas as situações de projeto
<i>Normal (N)</i>	<i>Anormal (A)</i>	<i>Transporte e montagem (T)</i>	
1,35	1,1	1,5	0,9

Fonte: (ABNT IEC 61400-1)

Os valores de projeto dos materiais utilizados na construção da torre eólica de concreto também são obtidos a partir de um fator de segurança. Porém, esses fatores variam conforme o material e conforme a norma adotada. A equação utilizada para obter o valor de cálculo é a seguinte:

$$f_d = \frac{1}{\gamma_m} f_k \quad (26)$$

onde f_d são os valores de projeto para materiais, γ_m são os fatores de segurança parciais para materiais, f_k são os valores característicos das propriedades dos materiais.

Neste trabalho, adotou-se para o concreto um coeficiente de segurança igual a 1,4 e para o aço um coeficiente igual a 1,15, conforme a NBR6118 (ABNT, 2014).

Os diversos carregamentos atuantes na torre eólica serão majorados conforme os estados limites. A Tabela 4 a seguir exhibe os coeficientes adotados para as análises realizadas neste trabalho no Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS). A escolha destes coeficientes se deu em função, principalmente, ao trabalho desenvolvido por Zyl (2014), onde foram utilizados esses coeficientes de ponderação.

Tabela 4 - Coeficientes de ponderação dos esforços atuantes

Coeficiente de ponderação dos esforços solicitantes	
ELU	
Cargas permanentes	0,9
Cargas de Vento	1,6
Cargas da Turbina	1,35
ELS	
Cargas permanentes	0,6*
Cargas de Vento	0,6*
Cargas da Turbina	0,6*

Fonte: Autora. *Valores definidos por Zyl (2014).

No ELS, o coeficiente 0,6 foi adotado em função de recomendações dos fabricantes da turbina, pois, o modelo de vento EOG adotado superestima as cargas e, na ausência de valores operacionais, 60% da carga extrema característica deve ser utilizada (ZYL, 2014), visando um dimensionamento mais econômico.

2.9 Carregamentos dinâmicos

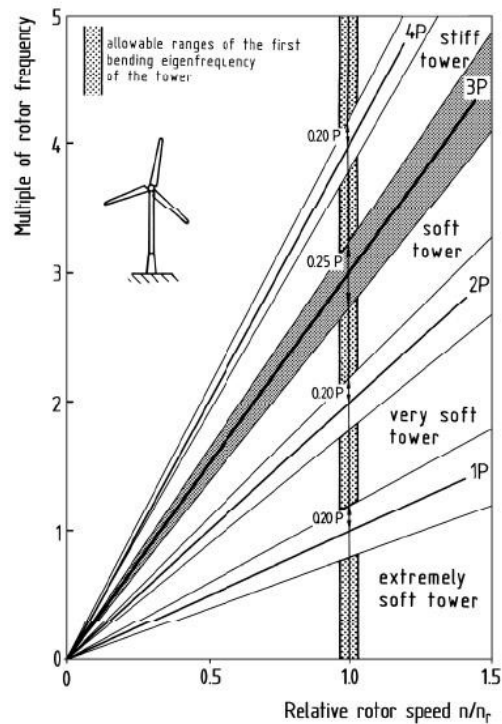
A ação do vento nas estruturas consiste em duas partes, uma estática e outra dinâmica. Embora usualmente os engenheiros não costumem fazer análises dinâmicas devido à complexidade e custo dessas análises em algumas situações, o comportamento dinâmico do vento nas torres eólicas tem impacto no seu dimensionamento.

As principais fontes de carregamento dinâmico que atuam na torre eólica são devido à excitação do rotor e às rajadas de vento. A velocidade de rotação do rotor é a frequência natural primária, denominada usualmente por 1P e a passagem de lâmina é denominada 3P (HAU, 2013). A frequência da turbina é obtida a partir da rotação das pás (rpm).

No dimensionamento usual de torres existe o risco que a primeira frequência da torre entre em ressonância com as forças de vibração do rotor. Para evitar o fenômeno da ressonância, a frequência natural da torre deve respeitar um intervalo de segurança, onde sua frequência natural deve estar o mais distante possível da frequência natural 1P do rotor e da frequência 3P (HAU, 2013). Trabalhos anteriores sugerem que uma faixa de 10% de distância da frequência natural de excitação é suficiente para garantir a sua segurança (HAU, 2013).

As torres eólicas podem ser classificadas de acordo com sua rigidez e frequência dependendo da posição da frequência natural da torre relativa à frequência de excitação do rotor: *soft-soft* (flexível-flexível), *soft-stiff* (flexível-rígida) e *stiff-stiff* (rígida-rígida). O diagrama de Campbell, exibido na Figura 6, descreve o comportamento dinâmico das torres nos intervalos de frequência da turbina. Uma torre considerada rígida possui frequência natural distante tanto do rotor parado, quanto na sua velocidade de parada, eliminando, assim, o risco de ressonância. Ao contrário da torre rígida, existe a torre flexível, onde a sua frequência natural se encontra abaixo da frequência de excitação do rotor, possuindo o risco de ressonância.

Figura 6 – Diagrama de Campbell para uma torre eólica com turbina de 3 pás



Fonte: (HAU, 2013)

O dimensionamento rígido de uma torre foi utilizado largamente no passado, justamente pelo receio do fenômeno da ressonância. Atualmente, muitos fabricantes estão buscando geometrias mais flexíveis, principalmente relacionado a motivos de economia de material. As estruturas mais modernas, independentemente da sua primeira frequência natural, estão entre 1P e 3P (HAU, 2013).

3 ANÁLISE ESTRUTURAL E VERIFICAÇÃO DA TORRE

A análise estrutural fornece respostas para o comportamento da estrutura em termos de tensões, esforços, deslocamentos e deformações, permitindo-se a avaliação do desempenho relativo à resistência, rigidez etc. Neste capítulo são discutidos critérios de resistência do concreto e do aço, e métodos de análise para determinar o comportamento estrutural da torre estudada.

3.1 Modelagem com Elementos Finitos (MEF)

O problema estudado de dimensionamento de torres eólicas foi analisado utilizando o Método dos Elementos Finitos. Todas as análises foram realizadas utilizando modelo clássico de vigas implementado no programa de código aberto FAST (*Finite Element Analysis Tool*). O FAST é um programa de análise estrutural onde utiliza o método dos elementos finitos, e tem sido desenvolvido no Laboratório de Mecânica Computacional e Visualização da UFC. O software é desenvolvido usando linguagem C++ e utiliza a Programação Orientada a Objetos (POO) como base. O modelo foi utilizado para análises estáticas e dinâmica (análise modal). Na análise estática, os deslocamentos, as reações e forças foram calculadas. A análise dinâmica consistiu em uma análise modal. No trabalho desenvolvido por Barroso Filho (2018), verificou-se que o modelo de viga é adequado para a análise de torres de concreto, devido à sua esbelteza.

No modelo de elementos finitos, a torre é considerada como sendo engastada na sua base e livre na sua outra extremidade, e é discretizada em elementos de pórtico. Devido à variação da geometria da torre ao longo da altura, os parâmetros médios de cada segmento da torre serão utilizados para determinar a rigidez de cada elemento. Estratégias para modelagem simplificada de efeitos não lineares serão investigadas tendo como referência o trabalho de Barroso Filho (2018), tais como a consideração da fissuração por meio da redução do módulo de elasticidade.

3.2 Concreto

O concreto é um material utilizado largamente na indústria, e suas propriedades são bem conhecidas. Apesar de ser estudado há muito tempo, existem diversos modelos de diferentes precisões que podem representar o comportamento do concreto armado. Neste trabalho, utiliza-se para o seu comportamento o diagrama de tensão-deformação parábola

retângulo. A NBR6118 (ABNT, 2014) adota o diagrama tensão-deformação parábola-retângulo para análise no estado limite último (ELU) de compressão tanto para cálculo dos esforços resistentes últimos quanto para cálculo de tensões e deformações. A região do concreto submetida à tração é desconsiderada. O diagrama é dado por

$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{para } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (27)$$

$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \quad \text{para } \varepsilon_{c2} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$$

onde para

$$f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \rightarrow n = 2$$

$$f_{ck} > 50 \text{ MPa} \rightarrow n = 1,4 + 23,4 \left[\frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4$$

O parâmetro ε_{c2} representa a deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico e ε_{cu} representa a deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura. Os valores adotados para concretos de classe até C50 são:

$$\varepsilon_{c2} = 2,0\%$$

$$\varepsilon_{cu} = 3,5\%$$

Os valores adotados para concretos de classe C55 até C90 são:

$$\varepsilon_{c2} = 2,0\% + 0,085\% \cdot (f_{ck} - 50)^{0,53}$$

$$\varepsilon_{cu} = 2,6\% + 35\% \cdot \left[\frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4$$

O módulo de elasticidade é estabelecido através de uma formulação estimada:

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad \text{para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa;}$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right) \quad \text{para } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa.}$$

sendo:

$$\alpha_E = 1,2 \quad \text{para basalto e diabásio}$$

$$\alpha_E = 1,0 \quad \text{para granito e gnaisse}$$

$$\alpha_E = 0,9 \quad \text{para calcário}$$

$$\alpha_E = 0,7 \quad \text{para arenito}$$

Para o módulo de elasticidade pode ser adotado um valor único para a tração e para a compressão, igual ao módulo de deformação secante, dado por:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (28)$$

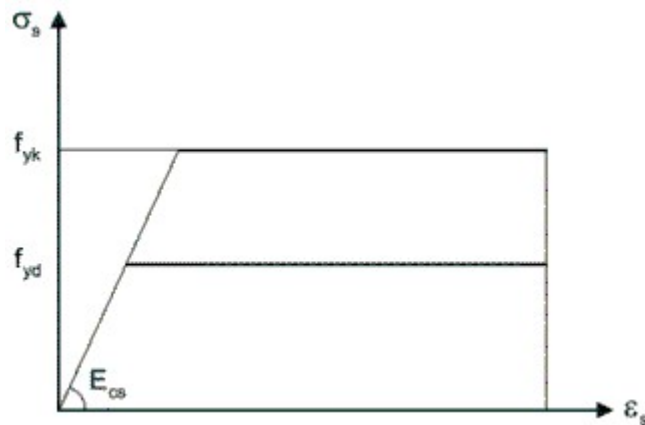
sendo:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0$$

3.3 Aço de armadura passiva

O diagrama tensão-deformação do aço adotado para o cálculo dos estados limites último e de serviço é o diagrama simplificado proposto pela NBR6118 (2014), onde, conforme Figura 7, o diagrama é bi-linear e pode ser utilizado tanto para tração quanto para compressão.

Figura 7 – Diagrama tensão-deformação para o aço



Fonte: NBR 6118 (2014)

Para os aços da classe A, tem-se

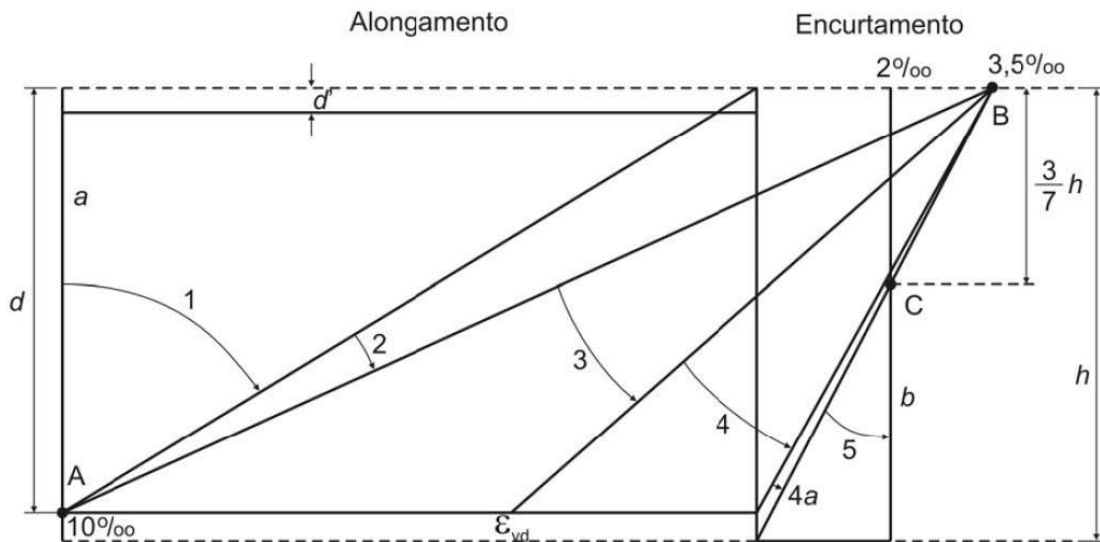
$$\begin{aligned} \sigma_s &= E_s \varepsilon_s & \text{se } |\varepsilon_s| \leq \varepsilon_{yd} \\ \sigma_s &= \text{sign}(\varepsilon_s) f_{yd} & \text{se } |\varepsilon_s| > \varepsilon_{yd} \end{aligned} \quad (29)$$

onde σ_s é a tensão no aço e ε_s é a correspondente deformação, $\text{sign}(\varepsilon_s)$ é o sinal de ε_s , positivo quando tração e negativo quando compressão, e E_s é o módulo de elasticidade longitudinal do aço utilizado.

As hipóteses básicas admitidas para o dimensionamento de seções de concreto armado, submetidas a flexão simples ou composta são:

- a) Hipótese das seções planas: é admitido que uma seção, inicialmente plana e normal ao eixo considerado, permanece plana e perpendicular ao eixo após as deformações do elemento. Em consequência da hipótese das seções planas, a deformação ao longo da seção possui comportamento linear e é diretamente proporcional à sua distância até a linha neutra (ARAÚJO, 2010).
- b) Aderência perfeita: Considera-se a existência de uma aderência perfeita entre o concreto e o aço, ou seja, nenhum escorregamento da armadura é admitido. Com isso, as armaduras vão estar sujeitas às mesmas deformações do concreto que as envolve. Logo, a deformação em um ponto da seção transversal será calculada de acordo com a hipótese (a), independentemente de este ponto corresponder ao aço ou ao concreto (ARAÚJO, 2010)
- c) Concreto em tração: A resistência à tração do concreto é totalmente desprezada. Dessa forma, todo o esforço de tração será resistido pelas armaduras (ARAÚJO, 2010).
- d) A distribuição de tensões no concreto é feita de acordo com o diagrama parábola-retângulo.

Figura 8 - Domínios do estado-limite último de uma seção transversal



O critério de resistência é então definido em termos de deformações limites na seção para o concreto e as armaduras, representando configurações deformadas em situações de ruína, configurando-se vários domínios de deformação. Os domínios definidos para cálculo no ELU, ilustrados na Figura 8, são (ABNT, 2014):

- Reta *a*: tração uniforme
- Domínio 1: tração não uniforme, sem compressão
- Domínio 2: flexão simples ou composta sem ruptura à compressão do concreto e com o máximo alongamento do aço possível.
- Domínio 3: flexão simples ou composta com ruptura do concreto e com escoamento do aço
- Domínio 4: flexão simples ou composta com ruptura à compressão do concreto e aço no regime elástico
- Domínio 4a: flexão simples com armaduras comprimidas
- Domínio 5: compressão não uniforme, sem tração
- Reta *b*: compressão uniforme

3.4 Resistência das seções de concreto armado

3.4.1 Normal e Momento Resistentes

O principal tipo de solicitação nas torres eólicas é a flexão composta, onde há a atuação conjunta de força normal e momento fletor, referente ao peso próprio da torre e da turbina, e pela ação do vento. Quando a flexão se dá em um plano contendo os eixos de simetria das seções transversais do elemento estrutural, a solicitação é denominada flexocompressão normal (ARAÚJO, 2010). Devido a simetria que as torres geralmente apresentam, pode-se considerar que o esforço aplicado na seção circular vazada da torre é flexão composta normal, pois, independente do eixo a que esta força está atuando, sempre haverá simetria.

Na flexo-compressão normal, a profundidade da linha neutra, medida em relação a uma borda da seção transversal, é uma incógnita do problema. Entretanto, a orientação da linha neutra é conhecida, já que ela será sempre perpendicular ao plano de aplicação do momento fletor (ARAÚJO, 2010).

Uma forma de verificar estruturas submetidas a esses tipos de esforços é pelo diagrama de interação. Um par solicitante (M_{sd}, N_{sd}) obedece aos critérios de resistência quando esse ponto está localizado no contorno ou no interior da curva de interação $M_{rd} \times N_{rd}$, que representam, respectivamente, o momento e a normal resistentes de cálculo. A curva de interação é obtida avaliando-se estes esforços para a configuração deformada variando desde a reta *a* até *b*, com curvatura positiva e negativa.

Algumas formulações aproximadas para o dimensionamento à flexo-compressão normal tem sido propostas na literatura, e, em geral, procura-se representar o diagrama de interação através de uma equação simples (ARAÚJO, 2010). Entretanto, algumas formulações ainda são iterativas, o que tornaria um processo de otimização ainda mais oneroso. A maioria das formulações são pensadas para seções retangulares de concreto armado. Entretanto, quando se trata de torres eólicas, o formato das seções é circular vazado.

Para a análise de resistência das seções transversais da torre eólica, a formulação aproximada proposta por Quaranta et al. (2017) para determinação do diagrama foi considerada. Essas formulações mais simples podem tornar o processo de otimização menos oneroso.

Quaranta et al. (2017) desenvolveram uma forma aproximada para determinação do diagrama de interação do momento fletor e força axial para seções de concreto armado circulares vazadas, com um número arbitrário de camadas de armaduras longitudinais. O modelo não-linear do concreto seguiu o modelo da NBR 6118 (ABNT, 2014), onde o diagrama parábola-retângulo foi considerado para o concreto comprimido, e para o aço, considerou-se o modelo elástico-linear, ambos citados nos tópicos 3.2 e 3.3.

O diagrama de interação para uma determinada seção de concreto armado circular vazada é dada por:

$$M_{Rd}(N_{Rd}) \approx \psi(N_{Rd}) M_{Rd}^{\max} \quad (30)$$

para

$$-\pi R_{ce}^2 f_{cd} (1 + \omega)(1 - \rho_c^2) \leq N_{Rd} \leq \pi R_{ce}^2 f_{cd} \omega (1 - \rho_c^2) \quad (31)$$

onde o limite inferior corresponde à maior força axial de compressão atuante no centro, e o limite superior corresponde a força de tração. A taxa mecânica de armadura ω é dada por:

$$\omega = \sum_{j=1}^{N_s} \omega_j = \sum_{j=1}^{N_s} \frac{2R_{s,j} t_{s,j} f_{yd}}{R_{ce}^2 f_{cd} (1 - \rho_c^2)} \quad (32)$$

O coeficiente ψ adotado por Quaranta et al. (2017) multiplica o valor máximo M_{Rd}^{\max} para se obter o momento máximo para uma determinada força axial. Esse coeficiente é obtido em função da força axial a ser aplicada:

$$\psi(N_{Rd}) = 1 - \left| \frac{2 \frac{N_{Rd}}{\pi R_{ce}^2 f_{cd} (1 - \rho_c^2)} + 1}{2\omega + 1} \right|^\alpha \quad (33)$$

onde α é um coeficiente desconhecido, obtido pela equação:

$$\alpha = \begin{cases} 0,7464 + 0,7886\omega^{-0,0889} \rightarrow \text{para } N_{Rd} \leq -\frac{\pi R_{ce}^2 (1 - \rho_c^2) f_{cd}}{2} \\ 1,6657 + 0,3681\omega^{-0,1125} \rightarrow \text{para } N_{Rd} > -\frac{\pi R_{ce}^2 (1 - \rho_c^2) f_{cd}}{2} \end{cases}$$

A formulação fornece a contribuição do aço e do concreto para o cálculo do momento resistente de cálculo máximo M_{Rd}^{\max} , a partir da equação:

$$M_{Rd}^{\max} = M_{cRd}^{\max} + \sum_{j=1}^{N_s} M_{sRd,j}^{\max}$$

onde $M_{sRd,j}^{\max}$ é a contribuição de cada camada de armadura longitudinal para o momento máximo resistente de cada seção. A formulação considera que a resistência máxima à flexão corresponde à posição da linha neutra no eixo da seção.

A contribuição do concreto é dada por:

$$M_{cRd}^{\max} = F(\mu_c, \rho_c) R_{ce}^3 f_{cd}$$

Como se adota o diagrama tensão-deformação parábola-retângulo para o concreto, tem-se então:

$$F(\mu_c, \rho_c) = \begin{cases} \frac{2}{3} \left(1 - \frac{1}{\mu_c^2}\right)^{3/2} - \frac{2}{3} \left(\rho_c^2 - \frac{1}{\mu_c^2}\right)^{3/2} + \varphi_1(\mu_c, \rho_c) & \text{para } \rho_c \geq \frac{1}{\mu_c} \\ \frac{2}{3} \left(1 - \frac{1}{\mu_c^2}\right)^{3/2} + \varphi_2(\mu_c, \rho_c) & \text{para } 0 \leq \rho_c < \frac{1}{\mu_c} \end{cases}$$

A contribuição de cada camada de armadura na seção é determinada por:

$$M_{sRd,j}^{\max} = \begin{cases} \frac{R_{s,j}^3}{R_{ce}} t_{s,j} E_s \varepsilon_{cu} \left[2\beta_j - \sin(2\beta_j) \right] + 4R_{s,j}^2 t_{s,j} f_{yd} \cos(\beta_j) & \frac{R_{s,j}}{R_{ce}} \geq \frac{\varepsilon_{yd}}{\varepsilon_{cu}} \\ \pi \frac{R_{s,j}^3}{R_{ce}} t_{s,j} E_s \varepsilon_{cu} & \frac{R_{s,j}}{R_{ce}} < \frac{\varepsilon_{yd}}{\varepsilon_{cu}} \end{cases} \quad (34)$$

onde

$$\beta_j = \arcsin\left(\frac{\varepsilon_{yd}}{\varepsilon_{cu}} \frac{R_{ce}}{R_{s,j}}\right)$$

A formulação completa pode ser encontrada em Quaranta et al. (2017).

3.4.2 Cisalhamento resistente

A seção das torres eólicas é circular vazada, tornando-as mais críticas em relação à sua resistência ao cisalhamento. A maioria das formulações disponíveis trata do cisalhamento em seções retangulares, mas Queiroz Junior e Horowitz (2016) propuseram uma formulação para determinação da resistência ao cisalhamento que leva em conta a ausência de concreto no centro da seção circular.

A tensão máxima de cisalhamento é dada por:

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot \alpha_{cw} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (35)$$

onde:

$$\alpha_{cw} = 1 \text{ se } 0,6 < v < 1$$

$$\alpha_{cw} = 2,5 \cdot (1 - v) \text{ se } 0,6 < v < 1$$

$$v = \frac{N_d}{A_c \cdot f_{cd}} \quad (36)$$

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$$

V_{Rd3} corresponde à resistência relacionada ao colapso da diagonal de tensão, e V_{Rd2} corresponde à ruptura pela diagonal comprimida do concreto.

A resistência ao cisalhamento relacionado às tensões diagonais V_{Rd3} é igual à soma entre a resistência ao cisalhamento das parcelas da armadura V_s e do concreto V_c .

$$b_w = 2 \cdot t$$

$$d = 0,8D$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_s \quad (37)$$

Quando se tem apenas flexão, adota-se $V_c = V_{c0} = 0,6 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$. Para flexão e compressão axial em conjunto, tem-se:

$$V_c = V_{c0} \cdot \left(1 + \frac{M_0}{M_{Sd,max}} \right) \leq 2V_{c0} \quad (38)$$

Tensão ao cisalhamento correspondente à parcela de aço:

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot 0,9d \cdot f_{ywd} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \text{ onde } f_{ywd} \leq 435 \text{ MPa} . \quad (39)$$

O trabalho também mostra que o aumento das tensões axiais resulta em uma resistência maior ao cisalhamento (QUEIROZ JUNIOR e HOROWITZ, 2016).

Embora não se trate de um problema recorrente relacionado às torres eólicas, o critério de resistência ao cisalhamento deve ser verificado. Como o cisalhamento não é predominante no dimensionamento de torres eólicas, apenas o critério V_{Rd2} será verificado, pois o critério V_{Rd3} verifica-se a tensão com a presença do aço, e no caso analisado, será considerado que esse aço necessário para o cisalhamento será calculado em função dos esforços obtidos, e não por tentativa e erro como é geralmente o processo adotado.

3.5 Análise não-linear física

A consideração das não-linearidades tanto física quanto geométrica implica em um custo computacional elevado, principalmente para estruturas submetidos a esforços complexos como as torres eólicas. Para modelos de análise de torres de concreto mais precisos e realistas, esses efeitos devem ser levados em consideração, pois a rigidez muda continuamente devido ao comportamento não-linear do material e da intensidade do carregamento. A torre eólica pode ser considerada um pilar com elevado índice de esbeltez, portanto, está sujeita a deslocamentos excessivos e há necessidade de considerar esses efeitos de modo a garantir sua segurança.

Visando a viabilidade computacional da consideração desses efeitos, estudos têm sido conduzidos sobre a influência das não-linearidades no caso de torres eólicas (BARROSO FILHO, 2018) e os resultados têm mostrado que a não-linearidade física pode ser considerada por meio de uma redução na inércia bruta da seção e a não-linearidade geométrica com o uso do método P-delta. Esses métodos propõem incorporar os efeitos das não-linearidades de forma simples, sem exigir grande esforço computacional.

No trabalho de Barroso Filho (2018) foi mostrado que o erro entre a adoção de um coeficiente de redução do módulo de elasticidade do concreto e um modelo de análise não-linear do concreto mostraram bons resultados, onde os erros entre os modelos de viga e casca ficaram menores que 8%. Os coeficientes de redução do módulo de elasticidade foram obtidos a partir da curva do módulo de elasticidade do concreto em estudo, onde, para uma análise linear, o deslocamento do topo obtido pela análise não-linear do exemplo estudado, a redução é da ordem de 0,41 do módulo de elasticidade na origem no ELS e 0,31 no ELU, para o elemento de barra (BARROSO FILHO, 2018). Desse modo, por possuir vantagens para a otimização, a simplicidade de adoção do coeficiente de redução do módulo de elasticidade do concreto foi considerada visando a vantagem computacional a ser proporcionada.

Embora os efeitos da não-linearidade do concreto armado tenham sido levados em consideração de forma simplificada, os efeitos de segunda ordem foram negligenciados durante as análises, justamente por possuir uma natureza mais iterativa, podendo até mesmo inviabilizar a otimização do problema. Além disso, restrição relativa ao deslocamento máximo no topo é imposta na otimização.

4 OTIMIZAÇÃO DE TORRES EÓLICAS DE CONCRETO ARMADO

A otimização representa um meio muito atrativo para o dimensionamento de torres eólicas de concreto, não só durante o processo criativo, mas também na redução substancial da quantidade de esforço e tempo necessários. Embora tradicionalmente o processo de dimensionamento das torres eólicas esteja baseado na experiência do engenheiro, métodos de otimização foram desenvolvidos para determinação de soluções mais vantajosas. Essas técnicas permitem a realização de inúmeros testes e possibilidades visando obter a estrutura que melhor satisfaça uma série de requisitos geométricos, físicos e dinâmicos.

A otimização auxilia no processo de determinação de uma solução ótima e é uma das ferramentas mais importantes da atualidade para resolução de problemas em diversas áreas da Engenharia (VANDERPLAATS, 1984). Métodos de otimização vem sendo desenvolvidos há bastante tempo e possuem um grande acervo de aplicações de sucesso em diversas áreas de estudo. Desse modo, serão discutidos apenas os princípios fundamentais da otimização e algumas particularidades que se tornam necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa.

4.1 Forma padrão de um problema de otimização

A otimização tem como problema geral a minimização ou maximização de uma função objetivo, composta por uma série de parâmetros, denominadas variáveis de projeto. Os valores dessas variáveis, ou uma solução candidata, devem satisfazer uma série de exigências, denominadas restrições.

O problema geral de otimização pode ser definido num modelo matemático padrão, na forma:

Encontrar o vetor de variáveis de projeto $f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ que

$$\text{Minimiza} \rightarrow f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (40)$$

sujeito a um número p de restrições de igualdade

$$h_j(\mathbf{x}) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad j = 1 \text{ a } p, \quad (41)$$

e um número m de restrições de desigualdade

$$g_i(\mathbf{x}) = g_i(x_1, \dots, x_n) \leq 0, \quad i = 1 \text{ a } m, \quad (42)$$

e restrições laterais

$$x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU} \quad i = 1 \text{ a } n. \quad (43)$$

O modelo geral trata apenas problemas de minimização, então, caso se deseje maximizar uma função $F(\mathbf{x})$, é necessário transformar a função objetivo na sua negativa $f(\mathbf{x}) = -F(\mathbf{x})$.

As variáveis de projeto podem assumir valores compreendidos dentro de um conjunto discreto de valores, ie,

$$x_i \in [x_{i1} \quad x_{i2} \quad \dots \quad x_{iq}]. \quad (44)$$

4.2 Algoritmos Genéticos

Algoritmos bio-inspirados, como os algoritmos genéticos vêm sendo utilizados e tem se obtido sucesso nas suas aplicações. Esse é um método de busca heurístico que é aplicável a diversos tipos e classes de problemas de otimização. Essa flexibilidade e facilidade de uso faz com que os algoritmos genéticos se tornem uma ferramenta altamente utilizada (KRAMER, 2017).

Os algoritmos genéticos possuem a vantagem de não necessitarem que as funções sejam contínuas ou diferenciáveis. O único requisito é que sejam capazes de avaliar funções em qualquer ponto dentro dos limites admissíveis para as variáveis de projeto (ARORA, 2017). Esses métodos utilizam números aleatórios e procedimentos estocásticos para determinação do ponto ótimo. As decisões feitas durante o procedimento do algoritmo são baseadas em uma geração de números aleatórios. Desse modo, se executados em diferentes pontos, os algoritmos podem levar a uma sequência diferente de soluções, mesmo sob as mesmas condições iniciais. Eles tendem a convergir a um ponto da função correspondente ao mínimo global, mas não se pode garantir a convergência ou otimalidade global da solução encontrada (ARORA, 2017).

Esses métodos também apresentam algumas desvantagens. A maior delas é que requerem uma grande quantidade de avaliação das funções mesmo para problemas reduzidos. Para problemas onde requerem um maior número de avaliações, o esforço computacional pode ser até mesmo restritivo. Esses problemas podem ser contornados ao se utilizar computadores mais potentes e ao verificar diversas vezes os resultados obtidos.

Nos algoritmos genéticos, a busca se inicia com a geração aleatória de uma população inicial de indivíduos ou soluções, obtidas atribuindo-se valores às variáveis de projeto. Os indivíduos são avaliados de acordo com uma função aptidão, que depende da função objetivo e das restrições. Uma percentagem de indivíduos, definida pela taxa de cruzamento, é

selecionada para o cruzamento. Os indivíduos mais aptos têm maior possibilidade de serem selecionados e de transmitirem suas características para a próxima geração.

No cruzamento, em geral aos pares, há troca de informação entre os indivíduos pais, gerando descendentes ou filhos que, em geral, substituem os pais, mas pode também ser uma combinação desses. Os indivíduos resultantes são submetidos ao operador de mutação e podem, com dada probabilidade, sofrer alterações aleatórias nos valores das suas variáveis. Uma nova população é então formada com esses indivíduos e os melhores da geração anterior, estratégia que é chamada de elitismo e que visa garantir a preservação dos melhores indivíduos.

A nova população é avaliada e o processo continua até que um critério de convergência seja atingido, o qual geralmente é definido por um número predefinido de gerações. Uma outra possibilidade é a convergência relativa do melhor indivíduo ao longo de um dado número de iterações. Quando se aproxima do ótimo, o progresso da função aptidão da melhor solução pode decrescer significativamente. Se nenhuma melhora significativa é observada, o processo de evolução para.

Para solução do problema de otimização utilizou-se Algoritmos Genéticos implementados no software BIOS (*Biologically Inspired Optimization Tool*), desenvolvido no Laboratório de Mecânica Computacional da UFC (LMCV). O software tem sido desenvolvido em linguagem C++ e utiliza a Programação Orientada a Objetos (POO) como base.

Os motivos pelos quais optou-se pela utilização dos algoritmos genéticos foram as vantagens que os mesmos apresentam em relação aos métodos clássicos. É um método de busca de ordem zero (não usa informações de gradientes), e vêm obtendo êxito em suas diferentes aplicações como ferramenta de otimização na área de estruturas.

Um outro ponto favorável à escolha dos algoritmos genéticos é a sua facilidade no tratamento das variáveis de um problema de natureza discreta, o que possibilita a determinação de uma solução ótima que seja executável na prática. Além disso, na bibliografia pesquisada, não se encontrou trabalhos utilizando algoritmos genéticos para a otimização de torres eólicas de concreto armado, desse modo, é uma boa oportunidade para fazê-lo.

4.3 Modelo de otimização de torres eólicas

O problema de otimização de torres eólicas de concreto armado adotado neste estudo consiste em minimizar o custo total da torre considerando as parcelas do concreto e do aço utilizados na construção da torre.

Uma torre de concreto típica possui formato de tronco de cone com espessura e diâmetro variando conforme a altura da torre. Este formato é mais utilizado por possuir maior resistência na base, onde ocorrem os maiores esforços, como momento fletor, força axial e esforço cortante. O método construtivo não foi levado em consideração na otimização, pois o estudo foi focado para verificar como a geometria da torre se comporta com as análises realizadas.

Para deixar o modelo de otimização mais flexível em termos de geometria, optou-se por dividir a torre em segmentos de mesma altura, permitindo variações na inclinação do tronco de cone ao longo da sua altura (ver. Figura 9). Analisou-se torres divididas entre 1 e 4 segmentos, onde cada segmento possui três variáveis de projeto que são o diâmetro inferior externo, a espessura da parede e quantidade de armadura longitudinal, esta última sendo uniformemente distribuída.

4.3.1 Função objetivo

A função objetivo a ser minimizada é o custo total da torre, representado pelas parcelas do concreto e da armadura, definida na forma:

$$f_{obj}(x) = \frac{(V_c C_c + M_s C_s)}{F_N} \quad (45)$$

onde V_c é o volume líquido de concreto e M_s é a massa de aço, e C_c e C_s correspondem aos custos unitários do concreto e da armadura, respectivamente. O coeficiente F_N foi adotado para normalizar os custos da função objetivo e adotou-se seu valor igual $1,5 \times 10^6$. A partir da primeira otimização realizada foi possível definir a ordem de grandeza do problema, e, portanto, adotou-se este valor para a normalização.

Para as torres tubulares metálicas, a determinação da sua massa total é suficiente para a obtenção do custo total. Entretanto, para as torres de concreto armado é necessário definir o custo dos materiais. O coeficiente utilizado para determinar o valor do concreto inclui os custos de operação, montagem e fôrmas. Optou-se por utilizar um coeficiente desse modo pois a estimativa dos custos da torre é difícil, e uma grande quantidade de informações relativas ao processo construtivo e logística do processo são necessárias. As empresas de construção de torres eólicas detêm esses dados, porém, são informações importante e sigilosas e dificilmente se tem acesso a esses dados. Desse modo, algumas suposições são necessárias para estimar os custos de cada material.

Os custos do concreto e do aço foram retirados da tabela da SEINFRA-CE (2018), devido à dificuldade de acesso a informações mais precisas. Os valores adotados serviram para fins de estudo e análise dos resultados, pois o custo de construções em concreto depende diretamente dos métodos construtivos adotados (LANIER, 2005) e não se pode considerar que esses são os custos obtidos por empresas que constroem as torres. A definição dos custos de implantação de torres eólicas é complexa e leva em conta diversos outros fatores, como serviços, transporte, montagem, método construtivos, mão-de-obra, e, dessa forma, será adotado apenas o custo aproximado dos materiais para fins de comparação dos dimensionamentos obtidos, exibidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Custos adotados para o concreto e para o aço

<i>Material</i>	<i>Custo</i>	<i>Unidade</i>
Concreto	580,04	R\$/m ³
Aço	7,62	R\$/kg

Fonte: SEINFRA (2018)

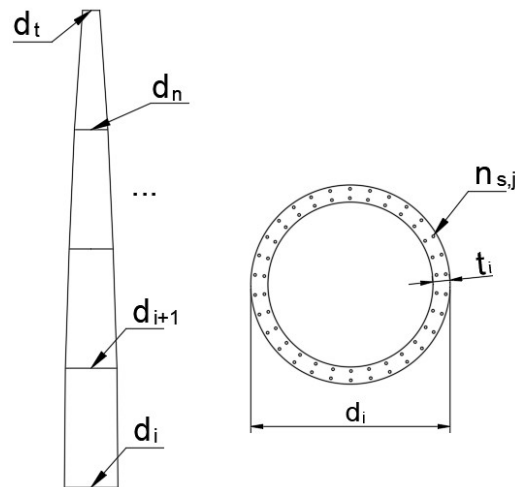
4.3.2 Variáveis de Projeto

A utilização dos algoritmos genéticos como ferramenta de otimização se torna mais adequada para o modelo estudado quando se utiliza variáveis de projeto discretas. As variáveis de projeto escolhidas para o modelo foram:

- diâmetro externo da base de cada segmento, d_i ;
- espessura da seção, t_i ;
- quantidade de barras de aço (armadura) longitudinal, $n_{s,i}$;

No modelo de otimização considerou-se que a espessura da parede de cada segmento é constante e que cada seção possui duas camadas de armadura longitudinal com mesma quantidade de barras, uma interna e outra externa, constantes ao longo de um mesmo segmento. Para garantir a simetria da seção, usou-se quantidades pares de barras. O diâmetro externo do topo da torre possui valor fixado pelas dimensões da turbina e do adaptador metálico e é geralmente especificado pelo fabricante, mas na análise realizada considerou-se o valor de 3,6 m de diâmetro no topo. No modelo de otimização também foi garantida a continuidade entre os segmentos, de forma que o diâmetro externo inferior de cada segmento é definido como sendo igual ao diâmetro exterior do topo do segmento abaixo a ele, mas a espessura dos segmentos podem ser diferentes, conforme Figura 9.

Figura 9 - Esquema das torres eólicas e suas variáveis de projeto.



Fonte: Autora.

Para as variáveis de projeto, adotaram-se os limites mínimos e máximos, respectivamente, de 3,6 m e 12 m para o diâmetro externo, 0,15 m e 0,25 m para a espessura e de 52 e 200 barras para a armadura longitudinal total no segmento. Todos esses valores foram calibrados conforme a necessidade do problema. O incremento para a construção do espaço de busca de cada variável foi de 0,02 m para o diâmetro externo, 0,01 m para a espessura e 2 barras para as armaduras.

A distância entre o eixo das barras para as faces, tanto da camada interna quanto da externa, foi determinada como sendo igual a 5 cm. O diâmetro das barras a serem utilizadas foi fixado com o valor de 25 mm de diâmetro, visando a diminuição do espaço de busca para o problema de otimização.

4.3.3 Restrições

As restrições adotadas para o problema proposto são relativas a parâmetros da geometria, ao critério de resistência (ELU), ao comportamento em serviço (ELS), à frequência natural da torre e às taxas máximas e mínimas de armadura longitudinal.

4.3.3.1 Parâmetros Geométricos

Por se tratar de uma torre de concreto armado, o diâmetro da base d_1 não possui nenhuma restrição com relação ao seu tamanho máximo. Porém, visando a diminuição do espaço de busca e do tempo de otimização, optou-se por restringir o diâmetro máximo a um

valor superior d_{\max} . Ma e Meng (2014) optaram por limitar o diâmetro máximo a 12 m para diminuir o tempo de otimização, e nesse trabalho também se adotou este valor.

O menor diâmetro possível da base ficou restrito ao diâmetro do topo d_i , o qual, como já mencionado anteriormente tem valor fixado devido às dimensões do adaptador metálico, com valor igual a 3,6 m (LANIER, 2005). Sendo assim, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{d_i}{d_{\max}} - 1 &\leq 0 \\ \frac{d_i}{d_1} - 1 &\leq 0 \end{aligned} \quad (46)$$

Uma outra restrição geométrica importante evita que a torre possua formato de cone reverso em qualquer dos segmentos, como mostra a equação:

$$\frac{d_{i+1}}{d_i} - 1 \leq 0 \quad \text{para } i = 1 \dots n \quad (47)$$

onde n é a quantidade de segmentos da torre.

A espessura mínima da parede da torre é definida respeitando-se critérios normativos, como cobrimentos e espaçamentos mínimos, na forma:

$$\frac{t_{\min}}{t_n} - 1 \leq 0 \quad (48)$$

onde t_n corresponde à espessura do segmento do topo da torre. Para evitar que a espessura de um dado segmento seja maior que a dos segmentos abaixo dele, impõe-se que:

$$\frac{t_{i+1}}{t_i} - 1 \leq 0, \quad \text{para } i = 1 \dots n \quad (49)$$

Como já mencionado anteriormente, a espessura de cada segmento foi considerada constante no modelo de otimização. Os valores variam de 15 cm a 25 cm visando diminuir o espaço de projeto, já que ótimos locais não possuíam espessuras maiores que as especificadas, e por se tratar de torres em concreto armado, que permite espessuras nesse valor. Do ponto de vista construtivo, a espessura mínima é de 15 cm, para que haja uma boa disposição das armaduras nas seções de concreto.

4.3.3.2 Critério de Resistência

A capacidade resistente última à flexão da seção em cada nó deve obedecer às seguintes condições:

$$\frac{M_{Sd,j}}{M_{Rd,j}(N_{Rd,j})} - 1 \leq 0 \text{ para } j = 1..m \quad (50)$$

onde m é a quantidade de elementos na qual a torre está discretizada, representando uma seção da torre. $M_{Sd,j}$ é o momento solicitante em cada seção devido aos esforços aplicados na torre e $M_{Rd,j}(N_{Rd,j})$ é o momento resistente de cada seção analisada, onde este valor é obtido em função da normal resistente da seção correspondente, a partir da formulação de Quaranta *et al.* (2017).

A resistência às tensões normais é determinada por:

$$\frac{N_{Rd\ min,j}}{N_{Sd,j}} - 1 \leq 0 \text{ para } j = 1..m$$

$$\frac{N_{Sd,j}}{N_{Rd\ max,j}} - 1 \leq 0 \text{ para } j = 1..m$$

onde N_{Sd} corresponde à força axial solicitante e $N_{Rd\ max}$ e $N_{Rd\ min}$ correspondem às tensões axiais de tração e compressão limites de cada seção analisada.

Os valores de resistência de cada seção foram obtidos a partir da formulação proposta por Quaranta *et al.* (2017). Essa formulação aproximada já garante que esse critério seja obedecido, pois, para um determinado valor de força axial, ele encontra um momento resistente máximo.

A resistência ao cisalhamento é definida como:

$$\frac{Q_{Sd,j}}{Q_{Rd,j}} - 1 \leq 0 \text{ para } j = 1..m \quad (51)$$

onde $Q_{Sd,j}$ é o esforço cortante solicitante e $Q_{Rd,j}$ é o valor do esforço de cisalhamento resistente em seções tubulares vazadas calculado de acordo com a formulação proposta por Queiroz Junior e Horowitz (2016). Embora tenha se verificado que o esforço cortante não é condicionante no dimensionamento da torre, é necessário realizar essa verificação para posterior definição de armadura transversal.

4.3.3.3 Limite na frequência natural da torre

A restrição da frequência natural da torre eólica é de fundamental importância para evitar a ressonância da estrutura com os carregamentos atuantes e da turbina (VAN ZYL e VAN ZIJL, 2015).

Para evitar a ressonância, a frequência natural da torre deve ser completamente separada da frequência da turbina. A frequência da turbina é definida a partir da rotação por minuto indicado pelo fabricante. As principais frequências da turbina são a frequência da rotação das pás e da passagem das pás, correspondentes à 1P e 3P (HAU, 2013). Se os valores da frequência forem abaixo de 1P, a torre será muito flexível, podendo inviabilizar para o concreto armado. Acima de 3P, existe um gasto muito alto e desnecessário de material. Sendo assim, é usual se dimensionar as torres com frequências no intervalo entre 1P e 3P. Uma margem de segurança de 10% deve ser aplicada à frequência natural da turbina para garantir a segurança da estrutura contra à ressonância (MA e MENG, 2014). Desse modo, se tem:

$$\frac{1.1P}{f_{\min}} - 1 \leq 0 \quad (52)$$

$$\frac{f_{\min}}{2.7P} - 1 \leq 0 \quad (53)$$

O modelo estrutural adotado considera que as fundações são rígidas e não interferem nas frequências naturais de vibração das estruturas.

4.3.3.4 Armaduras longitudinais

A área mínima e máxima de aço longitudinais são restritos conforme critérios normativos. Como o formato do segmento de concreto pode ser cônico e a quantidade de armadura é considerada constante ao longo do seu comprimento, a área mínima de armadura é condicionada pelo diâmetro inferior (da base) e a área máxima é condicionada pelo diâmetro superior (do topo do segmento). Tem-se, portanto:

$$\frac{A_{s,i}}{\rho_{\max} A_{c,j}} - 1 \leq 0 \quad \text{para } i=1..n \text{ e } j=1..m \quad (54)$$

$$\frac{\rho_{\min} A_{c,j}}{A_{s,i}} - 1 \leq 0 \quad \text{para } i=1..n \text{ e } j=1..m \quad (55)$$

onde ρ_{\min} e ρ_{\max} são as respectivas taxas mínima e máxima da armadura longitudinal determinadas em conformidade com a NBR 6118 (ABNT, 2014), exibida na Figura 10, e $A_{c,j}$ é a área de concreto correspondente à cada seção analisada.

Figura 10 - Taxas mínimas de armaduras de flexão.

Forma da seção	Valores de $\rho_{\text{mín}}^a$ ($A_{s,\text{mín}}/A_c$) %														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

^a Os valores de $\rho_{\text{mín}}$ estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$ e $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, $\rho_{\text{mín}}$ deve ser recalculado.

Fonte: NBR 6118 (2014).

4.3.3.5 Comportamento em serviço

O deslocamento no topo Δ_{topo} deve ser limitado para evitar o Estado de Deformação Excessiva e por questões operacionais. Entretanto, o valor limite Δ_{max} específico para torres eólicas de concreto armado ou similares não é definido por normas e muitas vezes é definido pelo próprio fabricante da turbina. Devido à dificuldade de acesso a esta informação, tem-se adotado (ZYL, 2014) o valor limite $\Delta_{\text{max}} = H/300$ com base no ACI 307 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008). Desse modo, tem-se:

$$\frac{\Delta_{\text{topo}}}{\Delta_{\text{max}}} - 1 \leq 0 \quad (56)$$

É importante ressaltar que, devido à limitada disponibilidade de dados sobre as condições de carregamento, essa verificação tem sido realizada para uma condição de operação extrema, e, a fim de buscar deslocamentos mais adequados para uma condição de operação normal, Zyl (2010), seguindo uma recomendação dos próprios fabricantes, adota um coeficiente de redução dos deslocamentos obtidos.

4.4 Dados da turbina

A turbina a ser estudada nesse trabalho é a adotada por Zyl (2014) e LaNier (2005) e suas especificações estão exibidas na Tabela 6. As cargas provenientes da turbina são de difícil obtenção devido ao sigilo dessas informações pelos fabricantes. Por essa razão, utilizaram-se as cargas obtidas por um estudo realizado por engenheiros da NREL (National Renewable Energy Laboratory) onde são listadas, exibida na Tabela 7. As cargas de turbina são obtidas para dois tipos de condição de vento, EWM a com velocidade de 59,5 m/s e EOG com velocidade de 35 m/s para uma altura do cubo de 100 m (IEC, 2014), conforme LaNier (2005).

Tabela 6 - Especificações da turbina utilizada

Potência da Turbina	3,6 MW
Velocidade de rotação do rotor	13.2 rpm (0,22 Hz)
Diâmetro do Rotor	108,4 m
Massa da cabeça (nacele, cubo e pás)	314912 kg
Altura do Cubo	100 m
Classe da IEC	IIB

Fonte: (LANIER, 2005).

Tabela 7- Carregamentos obtidos para EWM e EOG

	Força de Impulsão (kN)	Momento (kNm)	Força axial de compressão (kN)	Torção em torno do eixo longitudinal (kNm)
EWM	1086	16767	3155	5961
EOG	1199	9913	3129	1597
Fadiga	143	2213	-	2220

Fonte: (LANIER, 2005).

Convertendo a velocidade no topo da torre para a altura de 10 m (altura de referência), utilizou-se as equações definidas pelas Eq. (2) e (5), obtendo-se 46,186 m/s e 22,08 m/s para o ELU e ELS, respectivamente. A partir dessas velocidades é possível utilizar modelos de vento, como vento dinâmico simplificado e vento sintético para obtenção dos esforços na torre analisada.

É importante ressaltar que as cargas utilizadas para a análise são um ponto de partida, mas a torre final deve ser verificada para o tipo específico da turbina utilizada e deve cumprir com todos os casos de carregamento além daqueles EWM e EOG (SCHMITZ, 2013).

5 RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados da otimização e a análise da solução ótima no programa SAP 2000 submetida a ação do vento sintético.

5.1 Parâmetros adotados

O modelo de otimização proposto foi aplicado para uma turbina de 3,6 MW com suas especificações definidas na Tabela 6, e uma torre de 100 m de altura composta de 1 a 4 segmentos. Para a solução do problema utilizou-se o BIOS e o FAST. As propriedades dos materiais são mostradas na Tabela 8:

Tabela 8 - Dados gerais dos materiais utilizados na análise

Concreto (NBR 6118)	
f_{ck} (MPa)	80,00
E_{cs} (GPa)	45,13
Poisson	0,20
Peso Específico (kN/m ³)	25,00
ϵ_{c2}	0,002516
ϵ_{cu}	0,0026035
Aço (NBR 6118)	
f_{yk} (MPa)	450,00
E_s (GPa)	200,00
Peso Específico (kN/m ³)	78,50

Fonte: Autor.

A torre está sujeita aos carregamentos provenientes da turbina, conforme mencionado na Tabela 7, e à ação direta do vento. Na determinação da ação do vento atuante na torre eólica, tomou-se as cargas da turbina obtidas pelos modelos EWM com a velocidade de 59,5 m/s e o modelo EOG com velocidade de 35 m/s para uma altura do cubo de 100 m (LANIER, 2005). A velocidade básica do vento foi obtida a partir dos modelos EWM e EOG aplicada a uma altura de 100 m e convertida para uma altura de 10 m, obtendo-se 46,19 m/s e 22,08 m/s, respectivamente.

As análises realizadas foram conduzidas considerando o material elástico linear. O efeito da não-linearidade do material foi avaliado de forma simplificada, reduzindo-se o módulo de elasticidade da seção por conta da fissuração. Barroso Filho (2018) propôs a adoção dos coeficientes 0,31 para o módulo de elasticidade no ELU, e de 0,41 para o ELS para um concreto de resistência de 80 MPa. Esses coeficientes foram sugeridos considerando o uso de elementos de viga.

Após uma análise de convergência, chegou-se a uma malha de 40 elementos de viga. Como a torre é dividida em segmentos, o número total de elementos pode variar de modo que em cada segmento tenha o mesmo número de elementos, sempre respeitando o limite máximo de 40 elementos.

Tabela 9 - Parâmetros dos Algoritmos Genéticos

Número de Otimizações	10
População	50
Gerações	200
Tolerância às restrições	10^{-16}
Método de Penalidade	Estático
Fator de Penalidade	10^6
Método de Seleção	Ranking
Taxa de Cruzamento	90%
Probabilidade de mutação	10% a 30%

Fonte: Autora.

Os parâmetros adotados para o algoritmo de otimização são mostrados na Tabela 9. Após várias análises, observou-se que o algoritmo apresentou dificuldades de convergência global, devido ao grande espaço de busca adotado inicialmente, principalmente quando o número de segmentos aumentava. Assim, utilizou-se a estratégia de ajustar o espaço de busca conforme os resultados da torre com um segmento fossem encontrados.

Verificou-se, também, que quanto maior a penalidade, melhores eram os resultados obtidos sem comprometer o tempo da otimização. Desse modo, fixou-se a taxa de penalidade igual a 10^6 .

O aumento da população, em geral, trouxe resultados melhores, mas o custo computacional também aumentava consideravelmente, sendo assim, adotou-se uma população de 50. Melhores resultados eram obtidos quando se aumentava o número de gerações em comparação ao aumento da população. O aumento do número de gerações trouxe mais eficiência aos resultados, provavelmente devido à ação da mutação, que contribui para evitar a convergência prematura para mínimos locais. Adotou-se o número de 200 gerações. Devido ao grande espaço de busca, bons resultados foram obtidos para taxas de mutação entre 10% e 30%.

Valores da taxa de cruzamento maiores, em geral, aumentaram pouco o tempo demandado para a otimização, mas em troca trouxeram resultados melhores. Para o problema analisado, a taxa de 90% de cruzamento se mostrou eficaz. Verificou-se também que a elevação no número de otimizações realizadas não necessariamente trazia melhores resultados, e o custo computacional aumentava consideravelmente, desse modo adotou-se 10 otimizações.

5.2 Resultados da Otimização

Na otimização da torre, dois casos foram avaliados com relação a análise estrutural: uma linear com o módulo de elasticidade do concreto íntegro (E_{cs}), e outra com o módulo reduzido (E_{cs-red}), usando o coeficiente proposto por Barroso Filho (2018) para a consideração, de forma simplificada, da não linearidade física do concreto armado devido a fissuração. As Tabelas 10 e 11 exibem as soluções ótimas para cada caso.

Tabela 10 – Solução ótima com E_{cs} íntegro.

E_{cs} íntegro	Diâmetro base (m)	Espessura (m)	Número de barras/camada	As* (cm ²)	Função Objetivo	
Vento Estático	1 segmento					
	1º SEGMENTO	11,4	0,15	62	608,684	0,37431
	2 segmentos					
	1o SEGMENTO	11,4	0,15	62	608,684	0,34968
	2o SEGMENTO	8,2	0,15	46	451,604	
	3 segmentos					
	1o SEGMENTO	10,4	0,15	76	746,128	0,34587
	2o SEGMENTO	9,6	0,15	48	471,239	
	3o SEGMENTO	7,6	0,15	32	314,159	
	4 segmentos					
	1o SEGMENTO	11,2	0,15	64	628,319	0,34010
	2o SEGMENTO	10	0,15	52	510,509	
	3o SEGMENTO	8	0,15	48	471,239	
	4o SEGMENTO	5,6	0,15	44	431,969	
	Vento Dinâmico Simplificado	1 segmento				
		1o SEGMENTO	11,4	0,15	60	589,049
2 segmentos						
1o SEGMENTO		11,2	0,15	62	608,684	0,34876
2o SEGMENTO		8,2	0,15	46	451,604	
3 segmentos						
1o SEGMENTO		10,8	0,15	68	667,588	0,34176
2o SEGMENTO		9	0,15	56	549,779	
3o SEGMENTO		8,6	0,15	26	255,254	
4 segmentos						
1o SEGMENTO		11,4	0,15	62	608,684	0,33850
2o SEGMENTO		9,2	0,15	64	628,319	
3o SEGMENTO		8	0,15	48	471,239	
4o SEGMENTO		6,8	0,15	30	294,524	
Vento Dinâmico Discreto		1 segmento				
		1o SEGMENTO	11,4	0,15	60	608,684
	2 segmentos					
	1o SEGMENTO	11,4	0,15	60	589,049	0,35173
	2o SEGMENTO	8	0,15	50	490,874	
	3 segmentos					
	1o SEGMENTO	11,2	0,15	64	628,319	0,34587
	2o SEGMENTO	8,8	0,15	60	589,049	
	3o SEGMENTO	8	0,15	32	314,159	
	4 segmentos					
	1o SEGMENTO	11	0,15	64	628,319	0,33838
	2o SEGMENTO	9,6	0,15	58	569,414	
	3o SEGMENTO	8,6	0,15	44	431,969	
	4o SEGMENTO	6,4	0,15	36	353,429	

Fonte: Autora. *área total de armadura

Tabela 11 – Solução ótima com E_{cs} reduzido.

E_{cs} reduzido		Diâmetro base (m)	Espessura (m)	Número de barras/camada	As* (cm ²)	Função Objetivo	
Vento Estático	1 segmento						
	1o SEGMENTO	11,4	0,2	52	510,509	0,37897	
	2 segmentos						
	1o SEGMENTO	11,2	0,15	66	647,953	0,34190	
	2o SEGMENTO	10	0,15	30	294,524		
	3 segmentos						
	1o SEGMENTO	11,4	0,15	64	628,319	0,32593	
	2o SEGMENTO	11,2	0,15	36	353,429		
	3o SEGMENTO	8,6	0,15	26	255,254		
	4 segmentos						
	1o SEGMENTO	11,2	0,15	66	647,953	0,32457	
	2o SEGMENTO	10,8	0,15	46	451,604		
	3o SEGMENTO	9,2	0,15	36	353,429		
	4o SEGMENTO	7	0,15	28	274,889		
	Vento Dinâmico Simplificado	1 segmento					
		1o SEGMENTO	11,4	0,2	52	510,509	0,37897
2 segmentos							
1o SEGMENTO		11,4	0,15	60	589,049	0,33303	
2o SEGMENTO		10,2	0,15	30	294,524		
3 segmentos							
1o SEGMENTO		11,4	0,15	62	608,684	0,32334	
2o SEGMENTO		11,2	0,15	36	353,429		
3o SEGMENTO		8,6	0,15	26	255,254		
4 segmentos							
1o SEGMENTO		11,2	0,15	64	628,319	0,32308	
2o SEGMENTO		11,2	0,15	42	412,334		
3o SEGMENTO		9,8	0,15	32	314,159		
4o SEGMENTO		7,8	0,15	28	274,889		
Vento Dinâmico Discreto		1 segmento					
		1o SEGMENTO	11,4	0,2	54	530,144	0,38673
	2 segmentos						
	1o SEGMENTO	11,4	0,15	62	608,684	0,34076	
	2o SEGMENTO	10,2	0,15	32	314,159		
	3 segmentos						
	1o SEGMENTO	11,4	0,15	62	608,684	0,32714	
	2o SEGMENTO	11	0,15	38	373,064		
	3o SEGMENTO	9	0,15	26	255,254		
	4 segmentos						
	1o SEGMENTO	11,4	0,15	62	608,684	0,32570	
	2o SEGMENTO	11,4	0,15	42	412,334		
	3o SEGMENTO	9,6	0,15	36	353,429		
	4o SEGMENTO	7	0,15	32	314,159		

Fonte: Autora. *área total de armadura

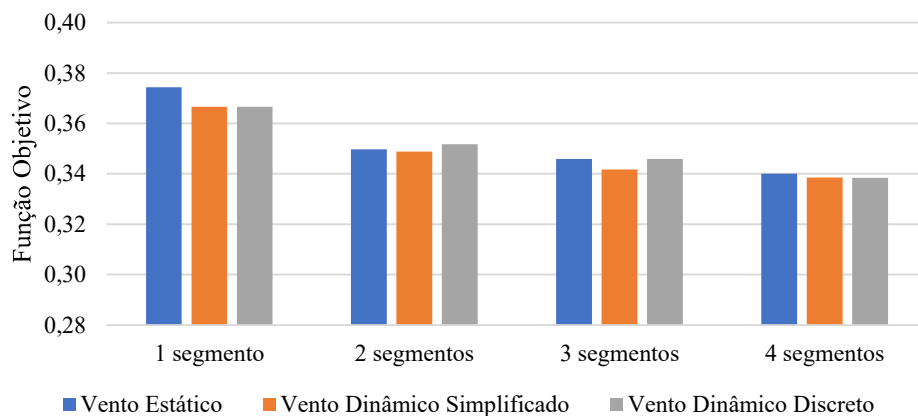
Dentre as torres obtidas, nota-se, no geral, que o otimizador tendeu a uma base com diâmetro bem maior que o topo para se obter menores espessuras e menores quantidades de armadura na seção. Os diâmetros das bases das torres atingiram valores entre 10,8 m e 11,4 m, as quais são dimensões maiores que as torres metálicas podem possuir, que seria até 4,4 m de

diâmetro externo devido a problemas de transporte (LANIER, 2005). Esse aumento no diâmetro da base levou ao valor mínimo da espessura do segmento permitida, igual a 15 cm, em quase todas as análises, exceto naquelas com um único segmento e E_{cs} reduzido. Não se pode garantir que essa tendência de bases mais largas e espessuras mínimas vale para todos os tipos de turbinas e custo de materiais, pois essas características variam, podendo levar a diferentes resultados. De modo geral, a tendência que ocorre é a diminuição dos custos obtidos à medida que a torre é discretizada em um número maior de segmentos.

5.3 Função Objetivo x Modelos de Vento da NBR 6123

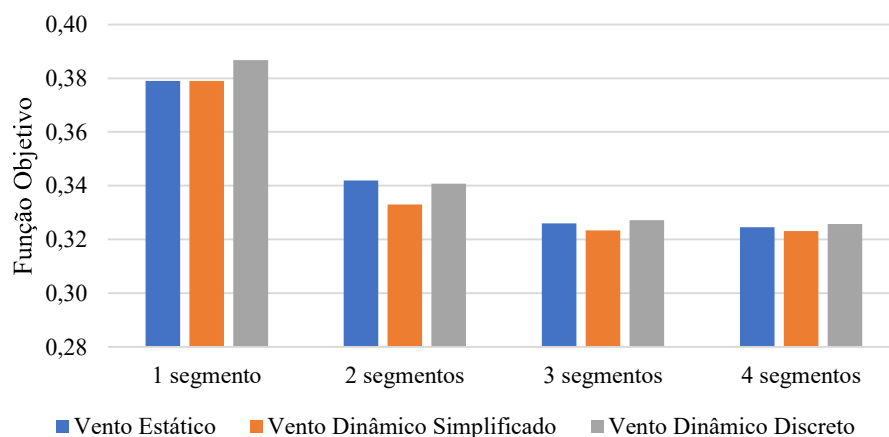
Os valores das funções objetivos ótimas são comparadas nas Figuras 11 e 12, para os casos com E_{cs} íntegro e E_{cs} reduzido, respectivamente. No geral, o vento estático, por ser mais conservador, forneceu resultados com o maior custo.

Figura 11 – Comparação das funções objetivo das análises com E_{cs} íntegro.



Fonte: Autora.

Figura 12 – Comparação das funções objetivo das análises com E_s reduzido.



Fonte: Autora.

Embora o modelo de vento estático tenha gerado custos maiores, principalmente na análise elástica com E_{cs} íntegro, a diferença para os outros modelos de vento foi menor que 0,5%. Essa pequena diferença entre os resultados dos modelos de vento pode ter ocorrido em função da magnitude das forças provocadas pela turbina em relação às forças provocadas pela ação do vento diretamente na torre. Em geral, as cargas da turbina são maiores que as cargas provenientes do vento, principalmente para turbinas de grandes dimensões (SCHMITZ, 2013). Ou seja, embora o vento seja decisivo no dimensionamento, a carga transmitida pela turbina tem um maior impacto na determinação das dimensões da torre.

A Figura 5 (tópico 2.6.4) exibiu que o vento estático possui maior intensidade ao longo da altura da torre. Apenas próximo ao topo, os ventos dinâmicos simplificado e discreto superam a sua magnitude. O modelo de vento dinâmico discreto tem uma atuação mais significativa no topo, principalmente quando existe uma carga concentrada, como é o caso das torres eólicas.

O modelo de vento dinâmico simplificado apresentou funções objetivos com o menor custo. Porém, é preciso ressaltar que este modelo de vento não seria tão adequado para o problema de torres eólicas devido às considerações de uniformidade geométrica e de massa na sua formulação. Desse modo, o modelo de vento simplificado talvez não seja representativo para o problema, podendo até mesmo comprometer a segurança da estrutura por trazer resultados abaixo daqueles obtidos com os outros modelos.

Do ponto de vista da engenharia, o modelo estático, por ser o mais simples de se aplicar e apresentar resultados próximos àqueles obtidos ao modelo mais refinado, se mostra mais vantajoso para se utilizar no pré-dimensionamento de torres eólicas, principalmente na otimização.

5.4 Comportamento das restrições

As Tabela 12 e Tabela 13 exibem, de forma resumida, as restrições mais críticas para as otimizações realizadas. Em todos os casos, o momento fletor resistente (MF) na base dos segmentos foi uma restrição ativa. Na otimização com E_{cs} íntegro, a frequência superior máxima (3P) foi também uma das restrições ativas, pois o otimizador levou a torres mais rígidas para se aproveitar melhor o concreto e reduzir o aço, a fim de reduzir os custos totais.

Na análise com E_{cs} íntegro, conforme Tabela 12, para torres de um único segmento, a armadura máxima no topo ($A_{s,max}$) também foi uma das restrições ativas. Isso ocorreu devido ao fato de se considerar nas análises uma quantidade constante de armadura da base até o topo

da torre. Sendo assim, ocorreu que a quantidade necessária na base era o máximo que a seção do topo poderia ter.

Tabela 12 - Restrições ativas na análise com E_{cs} íntegro

	Vento Estático	Vento Dinâmico Simplificado	Vento Dinâmico Discreto
1 segmento	MF, 3P, $A_{S_{max}}$	MF, 3P, $A_{S_{max}}$	MF, 3P, $A_{S_{max}}$
2 segmentos	MF, 3P	MF, 3P	MF, 3P
3 segmentos	MF, 3P	MF, 3P	MF, 3P
4 segmentos	MF, 3P	MF, 3P	MF, 3P

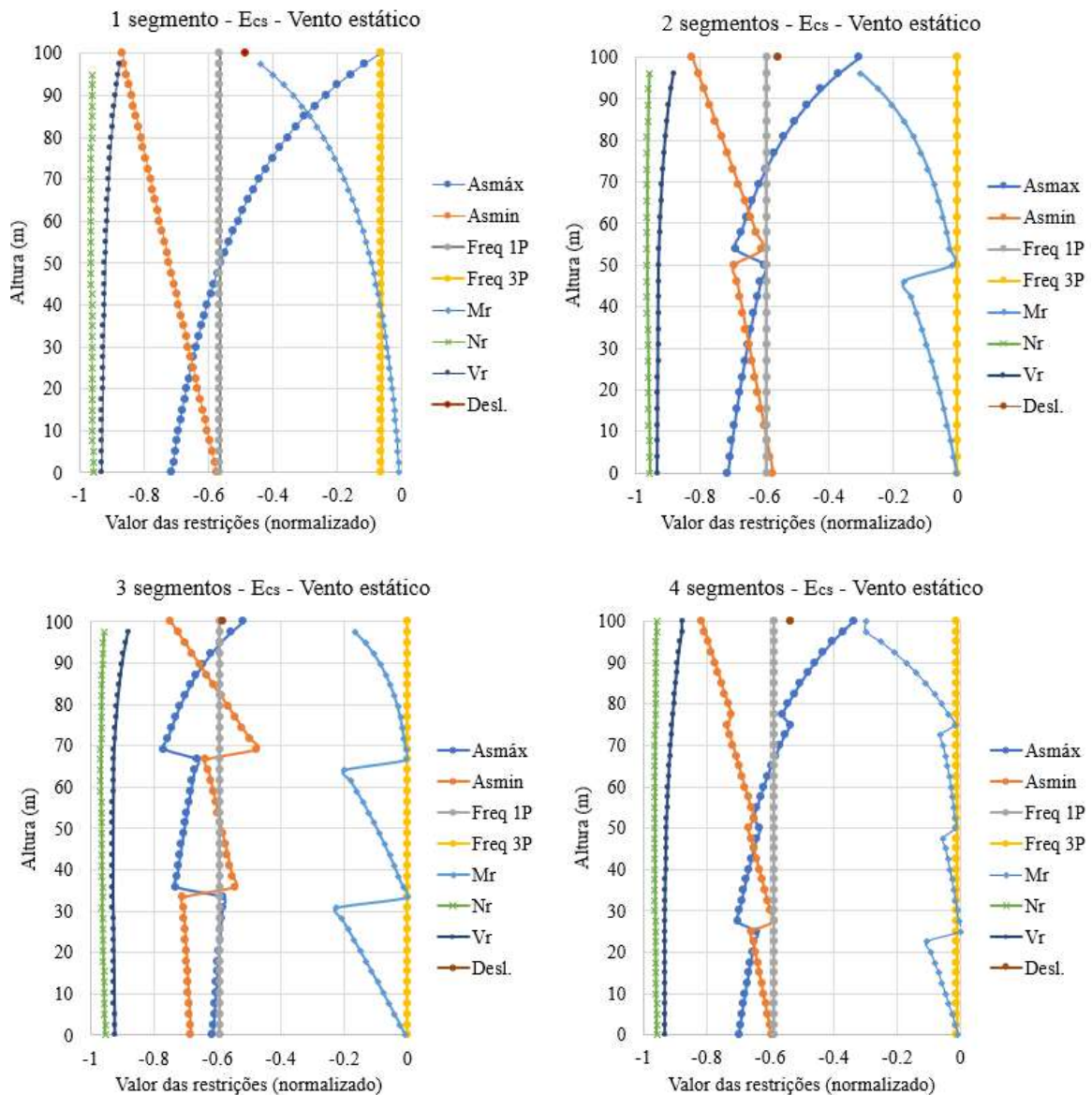
Tabela 13 - Restrições ativas na análise com E_{cs} reduzido

	Vento Estático	Vento Dinâmico Simplificado	Vento Dinâmico Discreto
1 segmento	MF, Desl	MF, Desl	MF, Desl
2 segmentos	MF	MF	MF
3 segmentos	MF	MF	MF
4 segmentos	MF	MF	MF

Na análise com E_{cs} reduzido, para todos os modelos de vento, as torres com um único segmento apresentaram o deslocamento (Desl.) no topo como restrição. Isso ocorreu devido à adoção do coeficiente de redução do módulo de elasticidade, acarretando maiores deslocamentos no topo. Já nas outras análises com mais segmentos, o deslocamento não foi uma restrição ativa pois foi flexibilizada a possibilidade de se aumentar a inércia nessa região de modo a evitar grandes deslocamentos.

Das variáveis de projeto das torres otimizadas, a espessura foi a única que os valores atingiram o limite inferior. Isso pode ter ocorrido por conta do otimizador buscar maximizar a frequência sem aumentar a espessura. A inércia aumenta a um expoente maior quando a base da seção aumenta, sendo assim, como o limite da espessura é 15 cm por questões construtivas, o otimizador levou até esse valor. Caso o valor limite fosse menor, provavelmente a base teria sido aumentada e a espessura diminuída ainda mais, para diminuir a presença do aço, que tem um custo relativo maior que o custo do concreto, e o concreto contribui mais no esforço resistente da seção do que o aço para diâmetros maiores. As Figura 13 e Figura 14 abaixo exibem graficamente como cada restrição se comportou nas análises com E_{cs} íntegro e E_{cs} reduzido, respectivamente.

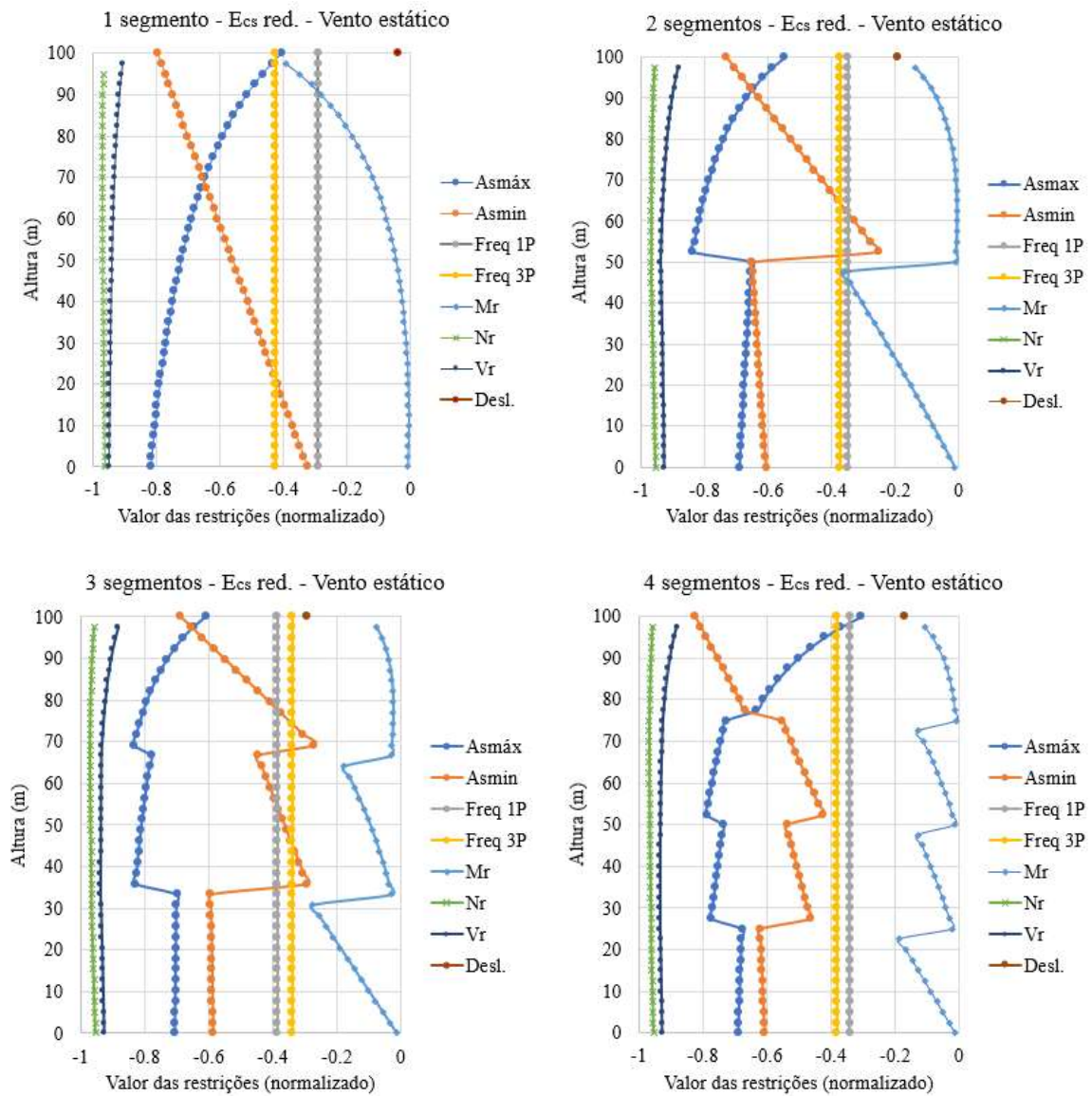
Figura 13 - Comportamento das restrições para vento estático e E_{cs} íntegro.



É possível verificar que o momento resistente de cada segmento tende ao valor limite na base. Isso ocorreu buscando aproveitar ao máximo a seção e os materiais empregados. A divisão da torre em segmentos levou a resultados onde a armadura passiva se tornou escalonada ao longo da torre.

Foi observado também que a restrição de frequência foi a restrição que se tornou mais crítica nos problemas, quando se considerava a integridade do concreto intacta. Entretanto, para a torre fissurada, a restrição ativa se tornava, no geral, o momento resistente da base de cada segmento. Apenas para a torre com um único segmento a restrição do deslocamento se tornou ativa.

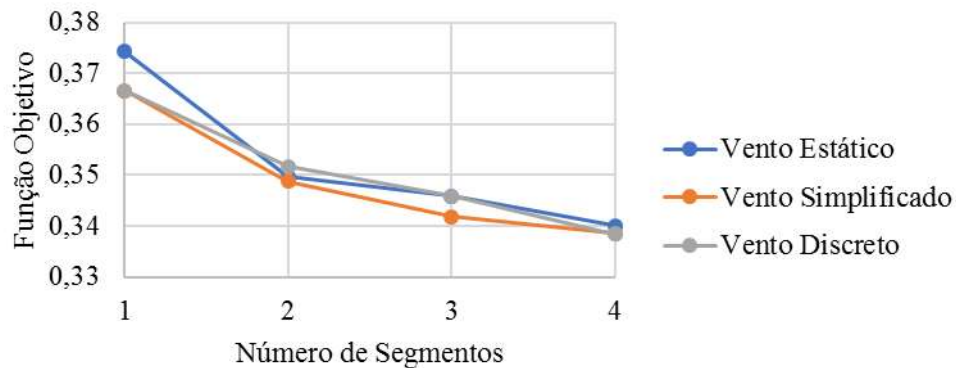
Figura 14 - Comportamento geral das restrições para vento estático e E_{cs} reduzido.



5.5 Função Objetivo x Número de Segmentos

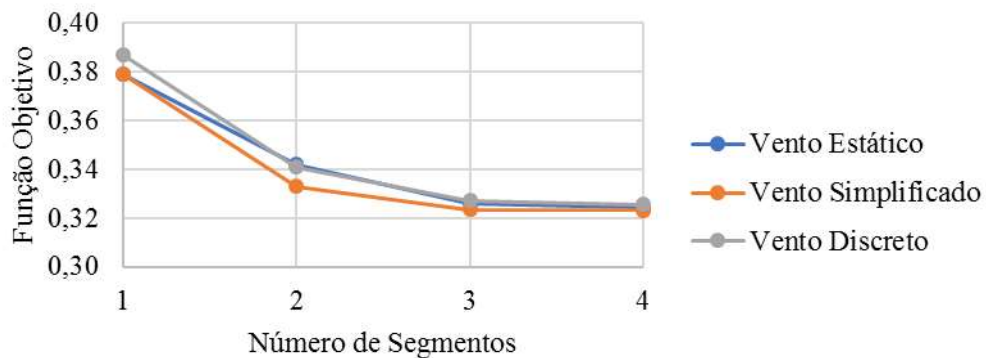
O comportamento da função objetivo em função do número de segmentos está exibido nas Figura 15 e Figura 16. É possível verificar que em quantos mais segmentos a torre é dividida, menor o seu custo, pois existe uma flexibilização no formato da torre, onde se permite variar as propriedades de cada seção e aproveitar melhor o material empregado para os esforços atuantes.

Figura 15 – Função objetivo x Número de Segmentos na análise com E_{cs} íntegro.



Fonte: Autora.

Figura 16 – Função objetivo x Número de Segmentos na análise com E_{cs} reduzido.



Fonte: Autora.

As Tabela 14 e Tabela 15 mostram que a diferença entre as funções objetivos decresce à medida que o número de segmentos aumenta, confirmando, assim, uma tendência à convergência do custo ótimo. Para ambas as análises, com 4 segmentos se chegou a um valor aceitável de convergência, onde os valores variaram menos de 2,21% na análise linear com E_{cs} íntegro, e menos de 0,5% na análise com E_{cs} reduzido. Desse modo, essa informação foi decisiva na divisão da torre em até 4 segmentos, onde, para 5 segmentos o custo já não iria possuir uma diminuição considerável. Além disso, com o aumento do número de segmentos, a quantidade de variáveis de projeto aumentava proporcionalmente, e o espaço de busca exponencialmente, assim como o custo computacional, tornando a otimização menos eficiente.

Tabela 14 – Comportamento da convergência da função objetivo – E_{cs} íntegro

	Vento Estático		Vento Dinâmico Simplificado		Vento Dinâmico Discreto	
	<i>Função Objetivo</i>	<i>Diferença %</i>	<i>Função Objetivo</i>	<i>Diferença %</i>	<i>Função Objetivo</i>	<i>Diferença %</i>
1 segmento	0,37431	-	0,36656	-	0,36656	-
2 segmentos	0,34968	-7,04%	0,34876	-5,10%	0,35173	-4,22%
3 segmentos	0,34587	-1,10%	0,34176	-2,05%	0,34587	-1,69%
4 segmentos	0,34010	-1,70%	0,33850	-0,96%	0,33838	-2,21%

Fonte: Autora.

Tabela 15 - Comportamento da convergência da função objetivo com E_{cs} reduzido

	Vento Estático		Vento Dinâmico Simplificado		Vento discreto	
	<i>Função Objetivo</i>	<i>Diferença %</i>	<i>Função Objetivo</i>	<i>Diferença %</i>	<i>Função Objetivo</i>	<i>Diferença %</i>
1 segmento	0,37897	-	0,37897	-	0,38673	-
2 segmentos	0,34190	-10,84%	0,33303	-13,79%	0,34076	-13,49%
3 segmentos	0,32593	-4,90%	0,32334	-3,00%	0,32714	-4,16%
4 segmentos	0,32457	-0,42%	0,32308	-0,08%	0,32570	-0,44%

Fonte: Autora.

A discretização da torre em segmentos proporcionou uma diminuição do custo de 8,29% a 10,06% na análise com E_{cs} íntegro, e de 16,8% a 18,7% com E_{cs} reduzido, mostrando a vantagem de se permitir essa flexibilização na geometria da torre.

A maior redução no custo aconteceu com E_{cs} reduzido, possivelmente, por conta do deslocamento no topo, que se tornou maior para a torre com um único segmento, onde o custo inicial se deu maior que o custo obtido com E_{cs} íntegro, justamente por considerar o efeito da não-linearidade do material.

Já em termos de custos globais, é possível verificar nas Tabela 16 e Tabela 17 que o custo do aço corresponde a uma parcela maior do custo. Porém, à medida que o número de segmentos aumenta, o custo do aço tende a alcançar 50% dos custos totais, igualando com o custo do concreto. Como o custo do aço em relação ao custo total é maior, a redução da quantidade de aço contribuiria de forma expressiva no custo total, mas a resistência da seção de concreto poderia ser comprometida em contrapartida.

Tabela 16 - Custos do concreto e do aço para análise com E_{cs} íntegro

	Vento Estático		Vento Dinâmico Simplificado		Vento Dinâmico Discreto	
	<i>Custo do aço</i>	<i>Parcela no custo total</i>	<i>Custo do aço</i>	<i>Parcela no custo total</i>	<i>Custo do aço</i>	<i>Parcela no custo total</i>
1 segmento	R\$ 364.096,55	64,8%	R\$ 352.351,09	64,1%	R\$ 352.351,09	64,1%
2 segmentos	R\$ 317.116,21	60,5%	R\$ 317.116,21	60,6%	R\$ 322.988,94	61,2%
3 segmentos	R\$ 305.370,74	58,9%	R\$ 293.626,03	57,3%	R\$ 305.370,74	58,9%
4 segmentos	R\$ 305.370,74	59,9%	R\$ 299.498,77	59,0%	R\$ 296.562,02	58,4%
	<i>Custo do Concreto</i>	<i>Parcela no custo total</i>	<i>Custo do Concreto</i>	<i>Parcela no custo total</i>	<i>Custo do Concreto</i>	<i>Parcela no custo total</i>
1 segmento	R\$ 197.372,53	35,2%	R\$ 197.372,53	35,9%	R\$ 197.486,22	35,9%
2 segmentos	R\$ 207.395,04	39,5%	R\$ 206.027,89	39,4%	R\$ 204.604,47	38,8%
3 segmentos	R\$ 213.430,94	41,1%	R\$ 219.011,50	42,7%	R\$ 213.430,94	41,1%
4 segmentos	R\$ 204.775,00	40,1%	R\$ 208.248,86	41,0%	R\$ 211.011,01	41,6%
	<i>Custo Total</i>		<i>Custo Total</i>		<i>Custo Total</i>	
1 segmento	R\$ 561.469,08		R\$ 549.723,62		R\$ 549.837,30	
2 segmentos	R\$ 524.511,25		R\$ 523.144,09		R\$ 527.593,41	
3 segmentos	R\$ 518.801,68		R\$ 512.637,54		R\$ 518.801,68	
4 segmentos	R\$ 510.145,74		R\$ 507.747,63		R\$ 507.573,03	

Fonte: Autora.

Tabela 17 - Custos do aço e concreto com E_{cs} reduzido.

	Vento Estático		Vento Dinâmico Simplificado		Vento Dinâmico Discreto	
	<i>Custo do aço</i>	<i>Parcela no custo total</i>	<i>Custo do aço</i>	<i>Parcela no custo total</i>	<i>Custo do aço</i>	<i>Parcela no custo total</i>
1 segmento	R\$ 305.370,74	53,7%	R\$ 305.370,74	53,7%	R\$ 317.116,21	54,7%
2 segmentos	R\$ 281.881,33	55,0%	R\$ 264.263,12	52,9%	R\$ 276.008,59	54,0%
3 segmentos	R\$ 246.645,68	50,5%	R\$ 242.730,53	50,0%	R\$ 246.645,68	50,3%
4 segmentos	R\$ 258.391,15	53,1%	R\$ 243.709,70	50,3%	R\$ 252.518,42	51,7%
	<i>Custo do Concreto</i>	<i>Parcela no custo total</i>	<i>Custo do Concreto</i>	<i>Parcela no custo total</i>	<i>Custo do Concreto</i>	<i>Parcela no custo total</i>
1 segmento	R\$ 263.087,00	46,3%	R\$ 263.087,00	46,3%	R\$ 262.973,31	45,3%
2 segmentos	R\$ 230.970,19	45,0%	R\$ 235.241,02	47,1%	R\$ 235.127,33	46,0%
3 segmentos	R\$ 242.245,01	49,5%	R\$ 242.283,29	50,0%	R\$ 244.067,49	49,7%
4 segmentos	R\$ 228.464,42	46,9%	R\$ 240.906,85	49,7%	R\$ 236.038,00	48,3%
	<i>Custo Total</i>		<i>Custo Total</i>		<i>Custo Total</i>	
1 segmento	R\$ 568.457,74		R\$ 568.457,74		R\$ 580.089,52	
2 segmentos	R\$ 512.851,51		R\$ 499.504,15		R\$ 511.135,93	
3 segmentos	R\$ 488.890,69		R\$ 485.013,82		R\$ 490.713,18	
4 segmentos	R\$ 486.855,57		R\$ 484.616,55		R\$ 488.556,42	

Fonte: Autora.

Nota-se que houve uma redução no custo total para modelos com mais de dois segmentos quando se realizou a análise com o módulo de elasticidade reduzido. Observando as restrições críticas nas soluções ótimas exibidas nas Tabela 12 e Tabela 13, vê-se que a restrição do critério de resistência à flexão (MF) está sempre ativa em todos os exemplos para os dois casos de análise, com E_{cs} e E_{cs} reduzido. Nas otimizações em que a análise é realizada com o

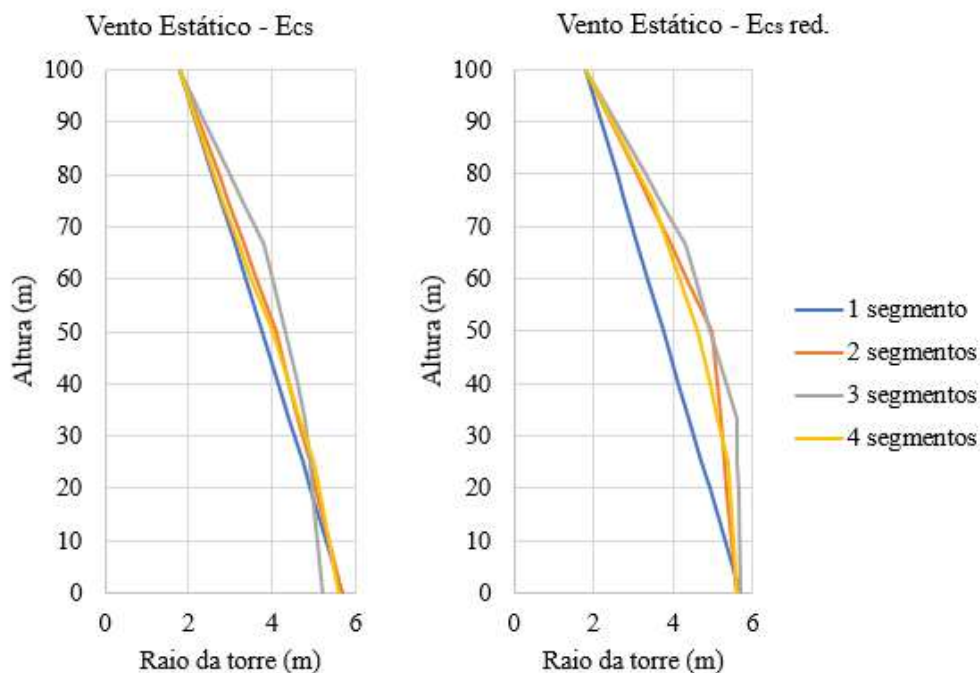
módulo E_{cs} , a restrição no limite superior da frequência natural está ativa para os exemplos com mais de 2 segmentos (Tabela 12). Quando se realizam as otimizações usando na análise o módulo reduzido, um efeito direto é a redução da frequência natural, que deixa de ser ativa, em razão da redução da rigidez da torre sem alteração da massa. Isto permitiu a obtenção de soluções com custos menores.

5.6 Propriedades Geométricas x Número de Segmentos

As Figura 17 a Figura 19 exibem a variação dos diâmetros ao longo da torre em função do número de segmentos em ambas as análises. É possível verificar que, com o aumento do número de segmentos, a torre passou a adotar inclinações diferentes daquela obtida para um único segmento, tendendo à levar a base para seções menos íngremes, e com um formato mais robusto, comparado à torres com um segmento.

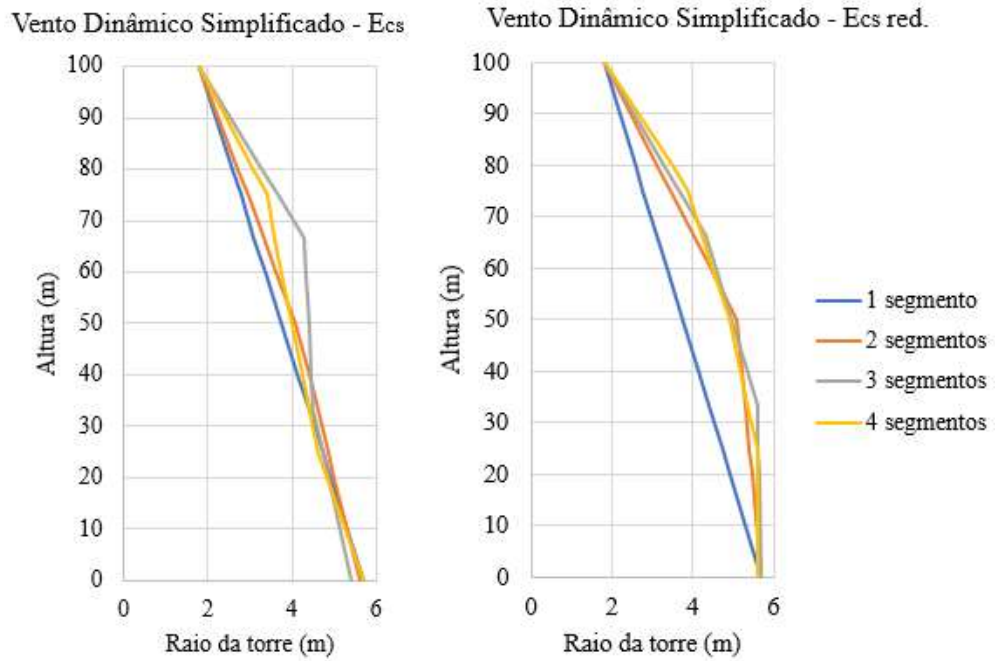
No geral, o otimizador levou ao aumento do concreto e diminuição do aço. Esse aumento do concreto ocorreu pois o seu custo no montante total da torre representa uma menor parcela. Sendo assim, foi mais vantajoso aumentar os diâmetros das seções de modo a se garantir melhor inércia, frequência e menor deslocamento no topo, para, assim, diminuir a quantidade de aço nas seções.

Figura 17 - Geometria da torre obtida para o vento estático.



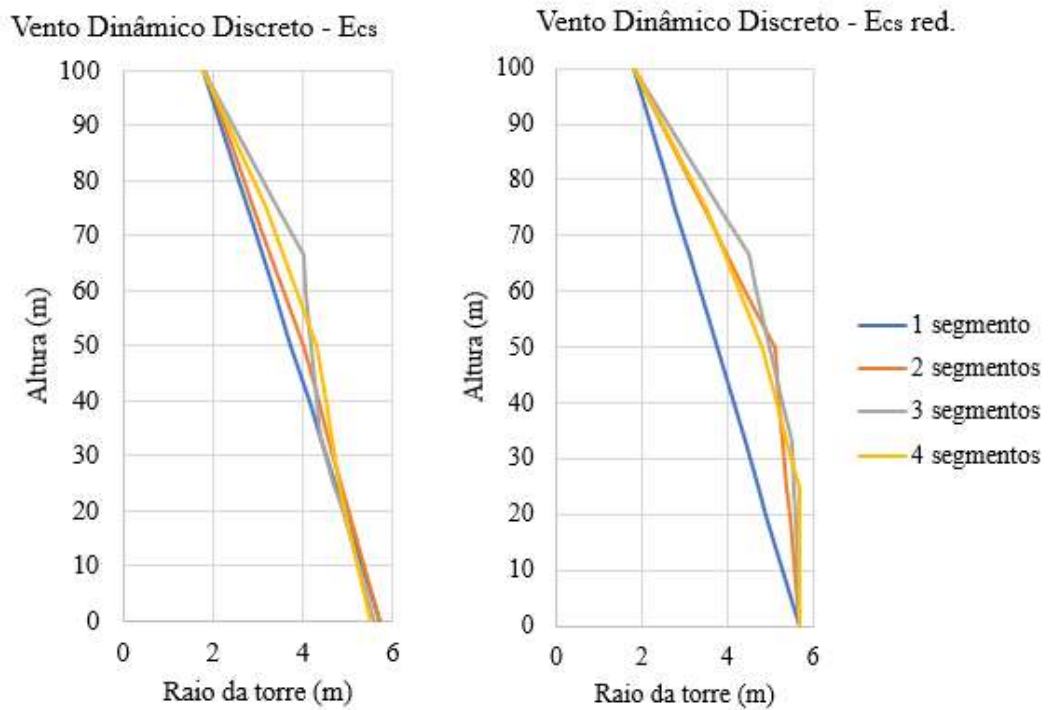
Fonte: Autora

Figura 18 - Geometria da torre obtida para o vento dinâmico simplificado.



Fonte: Autora.

Figura 19 - Geometria da torre obtida para o vento dinâmico discreto.

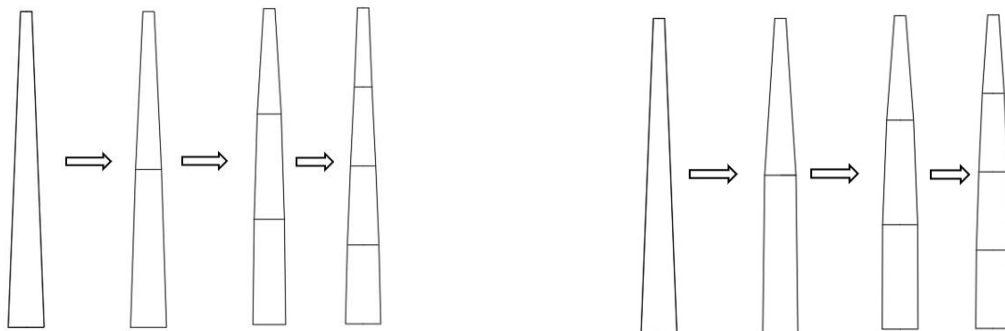


Fonte: Autora.

Para torres com 1 segmento, o formato obtido seguiu o usual, que seria em formato de tronco de cone. As espessuras das seções possuem valores constantes ao longo da base até o topo da torre.

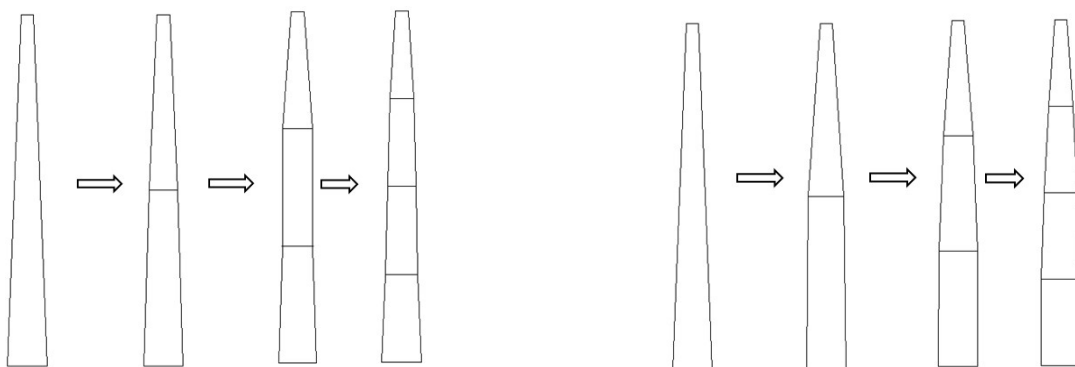
As Figuras 20 a 22 exibem, em escala, o perfil das torres obtidas na otimização. Pode-se ver a sutil mudança do perfil das torres da análise linear para a análise não-linear, principalmente na região inferior, onde a inclinação diminui à medida que a quantidade de segmentos aumenta, em comparação a um único segmento. O aumento dos diâmetros é mais significativo na análise com módulo de elasticidade reduzido, como uma forma de compensar a rigidez perdida justamente pelo fato do concreto ser considerado fissurado. No modelo de análise adotado, a armadura contribui para aumentar a capacidade resistente, mas não participa na rigidez do modelo de elementos finitos. Já o concreto contribui tanto para a capacidade resistente quanto para a rigidez.

Figura 20 - Resultado da otimização para vento estático, em escala. À esquerda E_{cs} íntegro, e à direita E_{cs} reduzido.



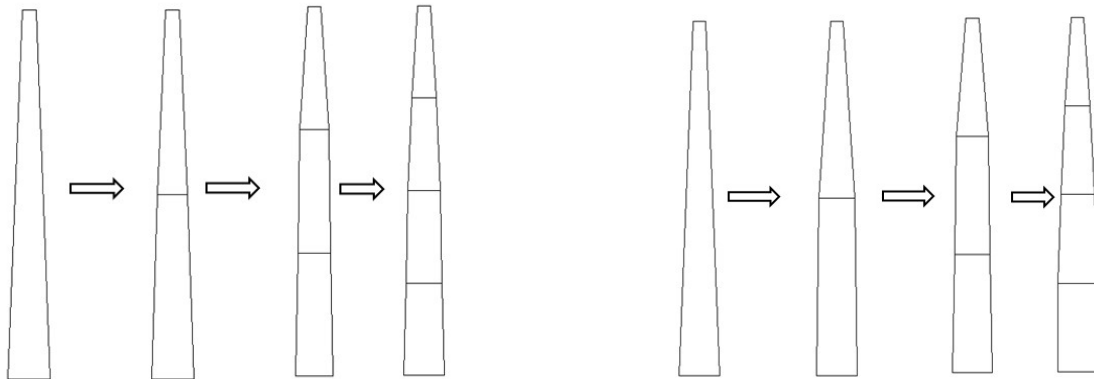
Fonte: Autora.

Figura 21 - Resultado da otimização para vento dinâmico simplificado, em escala. À esquerda E_{cs} íntegro, e à direita E_{cs} reduzido.



Fonte: Autora.

Figura 22 - Resultado da otimização para vento dinâmico discreto, em escala. À esquerda E_{cs} íntegro, e à direita E_{cs} reduzido.



Fonte: Autora.

5.7 Variação do custo dos materiais na otimização

A formulação proposta neste trabalho é geral, ou seja, os valores de cada parâmetro podem ser ajustados conforme a necessidade do problema. Realizou-se, então, otimizações para a torre mudando os custos dos materiais. A Tabela 18 exibe os novos custos fictícios adotados. O concreto teve seu valor acrescido em aproximadamente 39,7% e o aço teve seu valor reduzido em aproximadamente 39,4%, valores estes escolhidos aleatoriamente.

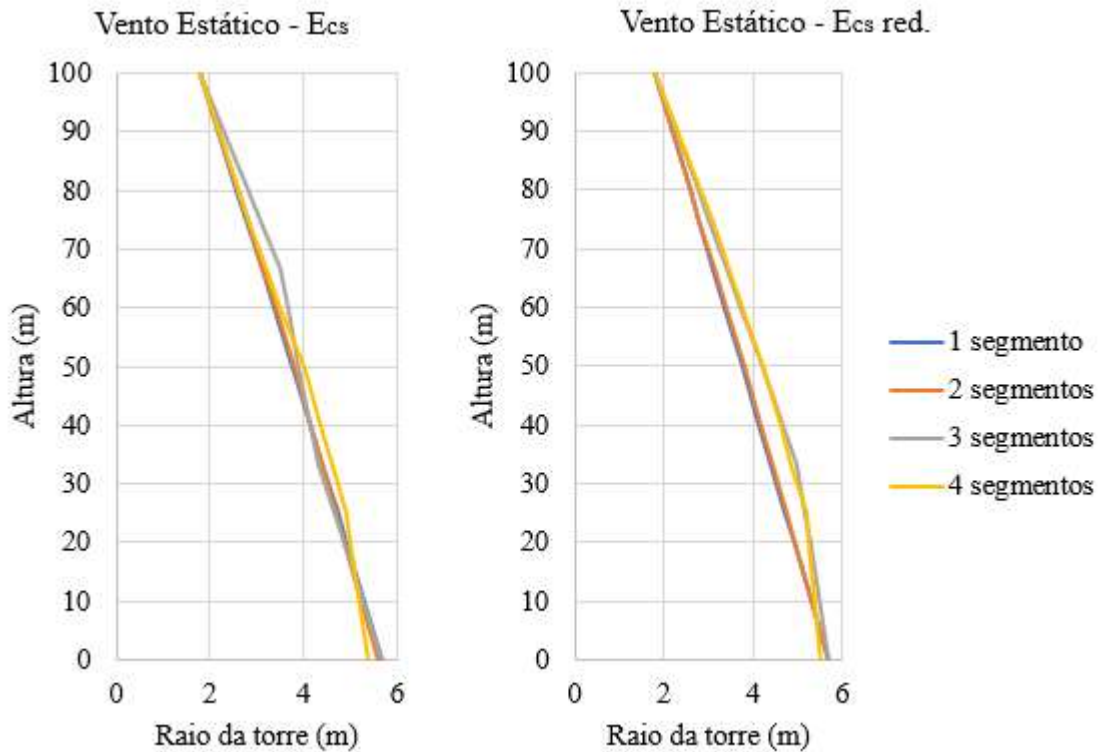
Tabela 18 – Custos fictícios adotados para o concreto e para o aço.

<i>Material</i>	<i>Custo</i>	<i>Novo Custo*</i>	<i>Unidade</i>
Concreto	580,04	810,04	R\$/m ³
Aço	7,62	4,62	R\$/kg

Fonte: SEINFRA (2018). *custos fictícios, escolhidos de forma aleatória.

É possível ver na Figura 23 que, ao adotar novos custos para o concreto e o aço, o otimizador obteve torres tendendo a um formato mais linear em comparação às torres anteriores. Como esperado, a solução ótima foi em função dos custos relativos dos materiais. Ou seja, os custos envolvidos na sua execução, transporte, montagem, materiais e outros fatores podem influenciar na própria geometria da torre, tornando ainda mais importante o uso de ferramentas de otimização, onde todos esses fatores podem ser levados em consideração em busca de um resultado ótimo.

Figura 23 - Geometria da torre obtidos com vento estático e custo fictício



Outro resultado que reforça o que foi dito anteriormente é exibido na Figura 20. Os volumes de concreto e as massas de aço quando os custos fictícios são adotados tiveram valores diferentes daqueles obtidos anteriormente. Para o concreto, devido ao aumento do seu custo, o volume ótimo das torres diminuiu, acarretando em uma geometria menos robusta em comparação com a otimização anterior, exibida na Figura 17. A massa de aço aumentou em comparação às otimizações anteriores por conta da diminuição do seu custo. Sendo assim, a geometria é sensível aos custos dos materiais, e conseqüentemente, outros parâmetros envolvidos na sua execução.

Tabela 19 – Volume de concreto e massa de aço para E_{cs} e E_{cs} red e vento estático

	E_{cs} íntegro		E_{cs} reduzido			
	<i>Custo</i>	<i>Volume de concreto (m^3)</i>	<i>Custo</i>	<i>Volume de concreto (m^3)</i>		
1 segmento	RS 580,04	340,274	453,567	RS810,04	340,274	453,371
2 segmentos		357,553	398,197		340,666	343,121
3 segmentos		367,959	417,635		350,549	369,857
4 segmentos		353,036	393,877		348,03	368,646
		<i>Massa de aço (kg)</i>			<i>Massa de aço (kg)</i>	
1 segmento	RS7,62	47781,7	40074,9	RS4,62	47781,7	41616,3
2 segmentos		41616,3	36992,3		44699,0	43928,3
3 segmentos		40074,9	32368,2		41102,5	37506,0
4 segmentos		40074,9	33909,6		42387	37762,9

Em termos de restrições, também houveram mudanças em comparação às obtidas anteriormente. A Tabela 20 exibe as restrições mais críticas para os custos fictícios adotados.

Tabela 20 – Restrições críticas para otimizações com novo custo fictício

	Ecs íntegro	Ecs reduzido
1 segmento	MF, 3P, Asmax	MF, Desl.
2 segmentos	MF, 3P	MF, 3P
3 segmentos	MF, 3P	MF, Desl.
4 segmentos	MF, 3P	MF, Desl.

Como houve a diminuição do volume de concreto e torres mais lineares foram obtidas, a restrição do deslocamento no topo se tornou mais crítica, pelo fato da rigidez da torre ser menor devido a sua nova geometria.

5.8 Análise com Vento Sintético

A Tabela 21 exibe os resultados obtidos para as torres otimizadas de 4 segmentos com o vento estático. O vento sintético foi aplicado e os deslocamentos no topo das torres foram verificados.

Tabela 21 – Deslocamentos no topo obtidos com o vento sintético

	Ecs íntegro	Ecs red
Desl. Vento Estático (cm)	15,42	27,67
Desl. Vento Sintético (cm)	13,06	23,97
Diferença (%)	15,3%	13,37%

Os resultados obtidos exibem que com o vento sintético, os deslocamentos obtidos para a torre são de 13,4% a 15,3% menores que aqueles provocados pelo vento estático. É importante ressaltar que a análise dinâmica foi realizada apenas considerando o vento atuante na torre. A parcela de deslocamento causada pelo vento sintético na torre foi responsável por menos de 1% no deslocamento, mostrando que o vento tem pouco impacto no dimensionamento da torre, e as cargas provenientes da turbina tem maior responsabilidade. Desse modo, não se pode garantir que a atuação do vento sintético apenas na torre, sem considerar o seu efeito nas pás e na turbina, resultem em deslocamentos realistas. Novas análises devem ser feitas levando todo o conjunto em consideração.

6 CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Neste trabalho uma formulação de otimização utilizando algoritmos genéticos foi proposta para auxiliar na fase preliminar do projeto de torres eólicas de concreto armado. Busca-se a solução de custo mínimo no espaço de projeto definido pelo diâmetro externo, espessura e armaduras em cada segmento da torre, considerando restrições relativas ao comportamento em serviço (ELS) e no estado limite último (ELU), à frequência natural e limites nas variáveis. Foram investigados o impacto da redução do módulo de elasticidade para incluir o efeito da não-linearidade física do concreto de forma simplificada e o uso de uma formulação aproximada para a determinação da capacidade resistente de cada seção da torre. Junto com a utilização do modelo de elementos finitos de viga na análise estrutural, estas estratégias foram fundamentais para viabilizar a otimização em termos de custos computacionais.

Dentre as dificuldades encontradas para a formulação do problema de otimização, a incorporação de análises mais complexas como a não-linearidade geométrica, o comportamento dinâmico do vento e a fadiga, os quais foram desconsideradas a princípio, visando a viabilidade do custo computacional na otimização. Além disso, alguns parâmetros como a resistência do concreto e a bitola das armaduras tiveram que ser fixadas para a diminuição do espaço de busca e aumento na eficiência da otimização. Mesmo com essas considerações, é importante ressaltar que o espaço de busca aumenta à medida que o número de segmentos aumenta, e, com isso, não se pode garantir que os resultados obtidos são a resposta ótima global do problema. Entretanto, foi possível analisar o comportamento geral desses parâmetros para o auxílio do pré-dimensionamento dessas estruturas.

Na concepção do modelo de análise, foi verificada a ausência de normas que tratam exclusivamente desse tipo de estrutura, e, por esse motivo, diferentes normas foram utilizadas para definir os critérios de análise e para formulação do problema de otimização. Embora as normas internacionais como a IEC 61400-1 auxiliem com informações para torres eólicas, as torres de concreto armado ainda possuem pouca atenção em termos de normas, pois não são tão usuais como as torres metálicas. Então, o modelo de análise simplificado aplicado juntamente com as técnicas de otimização propostas mostra que é possível auxiliar consideravelmente o profissional que trabalha com essas estruturas.

Com relação à ação do vento na torre, foi possível verificar que os três modelos propostos pela NBR6123 geraram resultados similares na otimização, pois possuem ordem de grandezas semelhantes entre si ao se comparar com a ordem de grandeza das forças provocadas

pela turbina. Sendo assim, é mais interessante do ponto de vista da engenharia utilizar modelos mais simples, como o de vento estático, por fornecer resultados de maneira eficiente, sem afetar o custo computacional. Entretanto, o modelo com o vento estático se mostrou conservador, produzindo, conseqüentemente, soluções mais caras que os modelos dinâmicos simplificado e discreto. Havendo inclusão de análise de fadiga no modelo, um modelo dinâmico deveria ser considerado.

Embora o modelo de vento estático não leve em consideração a dinamicidade do vento, caso uma análise dinâmica somente para a ação do vento na torre, sem considerar sua ação dinâmica nas pás e na turbina, como realizada no modelo de vento sintético, pode gerar resultados não realistas. As análises considerando a ação dinâmica do vento deveria ser realizadas para todo o conjunto.

Verificou-se que em quantos mais segmentos a torre é dividida, menor é o seu custo, por tornar melhor o aproveitamento das características do aço e do concreto. Entretanto, foi verificado que para torres com mais de 4 segmentos, o custo não diminui em uma taxa significativa, e a eficiência do otimizador pode ser comprometida devido ao maior espaço de busca.

A influência do número de segmentos deve ser investigada à luz de um modelo que considere os custos relacionados às juntas e outros fatores como transporte, montagem e formas, que não foram consideradas no cálculo dos custos e podem influenciar na resposta ótima. Observou-se uma tendência de formas com inclinações mais suaves na base.

Avaliação da sensibilidade das soluções otimizadas em função da variação de parâmetros da função objetivo foram conduzidas. Foi possível concluir que, dependendo dos custos dos materiais, a resposta ótima obtida pode ter diferentes formas, podendo variar também as restrições que se tornam ativas. Nota-se que no caso estudado com os custos iniciais, o volume de concreto das torres tendeu a aumentar à medida que a torre era dividida em mais segmentos devido ao custo menor de concreto na análise. Mas quando o custo de concreto aumentou, o seu volume total diminuiu, mostrando, assim, a relação importante do custo envolvido na determinação da geometria dessas estruturas. Então, é necessário ressaltar que nem sempre o menor volume da torre corresponde ao menor custo. Isso acontece para torres em concreto armado, diferentemente de torres em aço que possuem apenas um material e seu custo pode ser relacionado ao volume ou peso total da estrutura.

As bases das torres atingiram valores de até 11,4 m de diâmetros, valores esses bem maiores que os 4,4 m das torres metálicas. Esse aumento no diâmetro só é possível por conta dessa flexibilidade que o concreto tem para ser moldado no local. Em adição a isso, o aumento

também foi provocado por conta dos maiores esforços na base, onde é preciso ter maior inércia e resistência.

A incorporação do coeficiente de redução do módulo de elasticidade do concreto visando a consideração da fissuração trouxe vantagens para a formulação de otimização por simplificar a análise, que possui custo computacional elevado. É importante ressaltar, entretanto, que é necessário avaliar, para cada material, sua resistência e sua relação constitutiva, pois os coeficientes são calibrados em função dessas propriedades.

Embora algumas análises mais refinadas tenham sido consideradas nesse trabalho, ainda não foram consideradas outras propriedades importantes para o problema estudado. Sendo assim, propõem-se como possíveis linhas para trabalhos futuros:

- A influência do tipo de turbina no formato da torre e nas restrições que possam vir a ficar críticas no problema de otimização.

- A consideração da variação da espessura ao longo dos segmentos. Embora isso possa acarretar um aumento no espaço de busca, as torres atualmente exibem uma variação na espessura ao longo da torre.

- A fadiga é outro parâmetro que deve ser levada em consideração pois a torre é submetida a um número de ciclos muito alto durante sua vida útil. As turbinas eólicas estão sujeitas a carregamentos altamente dinâmicos, com ciclos que podem atingir $N = 10^9$. Desse modo, os efeitos da fadiga têm um impacto na estrutura e devem ser considerados, principalmente se tratando do concreto armado.

- Devido à esbeltez das torres eólicas, os efeitos de 2ª ordem devem ser verificados, considerando então a realização de uma análise não-linear geométrica.

- Atualmente, as torres de concreto contam com a protensão para melhorar as propriedades do concreto. O seu uso pode diminuir os custos das torres e melhorar suas propriedades. No caso de torres protendidas, a fissuração estará menos presente, podendo até mesmo ser desprezada, de modo que na análise e na otimização esse fator seria desconsiderado, favorecendo o problema.

- Analisar as torres com a possibilidade de se variar as resistências do concreto.

- Avaliar a influência da interação da torre com a fundação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEEÓLICA. **Anual Wind Energy Report**. Associação Brasileira de Energia Eólica. p. 15. 2018.
- ABNT. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1988.
- ABNT. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2008.
- ABNT. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2014.
- AL-KAIMAKCHI, A. et al. **Optimization of alternative towers for wind turbines in low wind resource regions**. The 13th Americas Conference on Wind Engineering (13ACWE). Gainesville, Florida. 2017.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI-307: Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys**. 2008.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE-7: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures**. 2010.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 3ª. ed. Rio Grande: Dunas, v. 3, 2010.
- ARORA, J. S. **Introduction to Optimum Design**. 3ª. ed. Iowa: Elsevier, 2017.
- BAI, H. et al. Optimization of a tall wind turbine tower. **S19-Congr s Français de Mécanique**, 2017.
- BARROSO FILHO, N. F. **Estudo comparativo de procedimentos de análise estrutural para torres eólicas de concreto armado (Disserta o de Mestrado)**, Universidade Federal do Ceará, 2018.
- BRASIL, R. M. L. R. F.; SILVA, M. S. D. P. Análise dinâmica não-linear de torres em concreto armado submetidas ao vento sintético. **XXXVII CILAMCE** , Brasília, 2016.
- CARRIL JUNIOR, C. F. **Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunica es (Tese de Doutorado)**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- ENERGY, U.S. DEPARTMENT OF. **20% wind energy by 2030: Increasing wind energy's contribution to U.S. electricity supply**. U.S. Department of Energy. p. 248. 2008.
- FRANCO, M. Direct Along-wind Dynamic Analysis of Tall Structures. **Boletim Técnico da Escola Politécnica**, São Paulo, p. 22, 1993.
- GAMA, P. V. C. N. **Contribui es ao dimensionamento de torres eólicas de concreto**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 231. 2015.

GRÜNBERG, J.; GÖHLMANN, J. **Concrete Structures for Wind Turbine**. 1ª. ed. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2013.

GWEC. Global Wind Energy Council. **Global Statistics**, 2017. Disponível em: <<http://gwec.net/global-figures/graphs/>>. Acesso em: 22 Março 2018.

HAU, E. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 3ª. ed. Munich: Springer, 2013.

HOROWITZ, B. **Estratégia de decomposição para otimização de pilares de concreto**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 1990.

IEC. **61400-1 Wind Turbines - Part 1: Design Requirements**. International Electrotechnical Commission. Geneva. 2005.

JIMENO, J. Concrete towers for multi-megawatt turbines. **Wind Systems Magazine**, 2012. 40-45.

KRAMER, O. **Genetic Algorithm Essentials**. 1. ed. Oldenburg: Springer International Publishing, 2017.

LANIER, M. **LWST Phase I Project Conceptual Design Study: Evaluation of Design and Construction Approaches for Economical Hybrid Steel/Concrete Wind Turbine Towers**. National Renewable Energy Laboratory. Colorado. 2005.

LETCHER, T. M. **Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines**. 1ª. ed. London: Academic Press, Elsevier, 2017.

LIMA, J. B. C. A. **Contribuições para otimização estrutural de torres tubulares de aço para turbinas eólicas (Dissertação de Mestrado)**. Fortaleza. 2011.

MA, H. W.; MENG, R. Optimization of prestressed concrete wind-turbine tower. **Science China Technological Sciences**, v. 57, p. 414-422, 2014.

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

NICHOLSON, J. C. **Design of wind turbine tower and foundation systems: optimization approach (Master of Science)**. University of Iowa, p. 70. 2011.

NICHOLSON, J. C. et al. **Multi-objective structural optimization of wind turbine tower and foundation systems using Isight: A process automation and design exploration software**. 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. Orlando, Florida. 2013.

QUARANTA, G.; TRANTADUE, F.; MARANO, G. C. Closed-form approximation of the axial force-bending moment diagram for hollow circular reinforced concrete cross-sections. **Engineering Structures**, v. 153, p. 516-524, 2017.

QUEIROZ JUNIOR, F. O.; HOROWITZ, B. Shear Strength of hollow circular sections. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 2, p. 214-225, 2016. ISSN 1983-4195.

SANTOS, N. A. A. S. **Otimização de torre de aço para aerogerador eólico (Dissertação de Mestrado)**, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SANTOS, V. H. **Comparação do método discreto da NBR 6123 e do método do vento sintético para edificações em concreto armado de múltiplos pavimentos (Dissertação de Mestrado)**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 126. 2018.

SCHMITZ, G. M. **Design and experimental validation of 328 ft (100m) tall wind turbine towers utilizing high strength and ultra-high performance concrete**. Iowa State University. Iowa. 2013.

SILVA, M. A.; BRASIL, R. M. L. R. F.; ARORA, J. S. Otimização de torres de telecomunicações em concreto armado baseada em resultados experimentais. **International Conference on Engineering Optimization**, Rio de Janeiro, 2008.

UYS, P. E. et al. Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure. **Engineering Structures**, p. 1337-1342, 2007.

VAN ZYL, W. S.; VAN ZIJL, G. P. A. G. Dynamic behaviour of normally reinforced concrete wind turbine support structures. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, v. 57, p. 38-44, 2015.

VANDERPLAATS, G. N. **Numerical Optimization Techniques For Engineering Design**. 1ª. ed. California: McGraw-Hill, 1984.

YILDIRIM, S.; ÖZKOL, I. Wind turbine tower optimization under various requirements by using genetic algorithm. **Scientific Research**, v. 2, p. 641-647, 2010.

YILMAZ, O. C. **The optimization of offshore wind turbine towers using passive tuned mass dampers (Master's Thesis)**. University of Massachussets Amherst. Massachusetts. 2014.

ZYL, W. S. V. **Concrete Wind Turbine Towers in Southern Africa**. Stellenbosch University. Stellenbosch, p. 129. 2014.