

Análise de Deslocamento Horizontal de Torres de Sustentação de Aerogeradores Através de Modelagem Computacional

Rafael Barreto Castelo da Cruz¹

Paulo Santos da Silva²

Philipe Vasconcelos dos Santos³

Wesley de Souza Pires⁴

Gabriel Valezi Raposo Pelegrin⁵

Resumo

Durante anos a obtenção de energia elétrica se limitava a poucas possibilidades e com métodos destrutivos muito poluentes. Esse cenário, porém, vem se alterando cada vez mais com investimentos em alternativas mais limpas de energia, como, por exemplo, a eólica, justificando o surgimento de mais estudos sobre o assunto. Assim, este trabalho consiste em analisar o deslocamento horizontal de torres de sustentação de aerogeradores executadas tanto em concreto protendido quanto em aço, de modo a identificar a opção de material que o minimize, dadas as condições de localização e altura das torres. Para tal, avaliou-se estruturas com três diferentes alturas (60 m, 90 m e 120 m), simulando-as em cidades localizadas nas cinco diferentes regiões do mapa brasileiro de isopletras, considerando-se as velocidades básicas de vento que as delimitam (30 m/s, 35 m/s, 40 m/s, 45 m/s e 50 m/s). Por meio da modelagem estrutural realizada no *software* MIDAS Gen, concluiu-se que as torres de concreto protendido obtiveram desempenho superior para quaisquer que sejam as alturas e velocidades de vento, verificando-se, ainda, que embora o comportamento das torres de 60 m tenha se mostrado bastante similar com ambos materiais, o incremento das alturas e da intensidade dos ventos foi bastante prejudicial para as de aço, cujos deslocamentos mostraram-se grandemente acentuados.

Palavras-chave: Deslocamento Horizontal, Torres, Concreto Protendido, Aço, Desempenho.

1 Introdução

A preocupação com o meio-ambiente e o impacto ecológico tem se tornado um assunto de grande importância nas últimas décadas. Usinas termoelétricas, nucleares e hidrelétricas acabam sendo soluções agressivas à natureza, surgindo, portanto, a necessidade de suprir a demanda elétrica de grandes metrópoles e parques industriais com alternativas sustentáveis. Assim, o foco atual consiste em buscar soluções que permitam ao homem continuar usufruindo da natureza, com o mínimo de impactos negativos (FEIJÓ, 2010).

De modo a atingir tal objetivo, pode-se utilizar a energia eólica, uma vez que se apresenta como uma solução sustentável a médio e longo prazo, já que se trata de uma fonte renovável, limpa e inesgotável (POLÍCIA, 2015).

O emprego da energia dos ventos a favor do

homem se trata de uma descoberta muito remota, sendo amplamente utilizada há milhares de anos na movimentação de barcos em navegações para fluxo de pessoas e mercadorias (ROCHA, 2016).

Embora empregada nessa época para o bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem o uso de energia mecânica, as primeiras tentativas de aproveitar o vento para gerar eletricidade surgiram no final do século XIX, sendo que somente um século depois, nos anos 1980, com a crise internacional do petróleo na década de 1970 e movimentos contra o uso de energia nuclear, é que houve interesse e investimentos suficientes para tornar viável o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial, desenvolvendo-se, portanto, a tecnologia eólica (ANEEL, 2003).

No Brasil, em contrapartida, o interesse surgiu após a grande seca na década de 2000, cuja assolação

1 M. Sc. em Engenharia Civil e Docente do Curso de Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu – USJT – São Paulo – SP, Brasil. Prof.rafaelcruz@usjt.br

2, 3, 4, 5 Graduandos em Engenharia Civil na Universidade São Judas Tadeu – USJT – São Paulo – SP, Brasil.

reduziu o nível d'água das barragens hidrelétricas, causando escassez de energia no país e forçando o uso de racionamento de eletricidade, fato que desencadeou grandes estragos na economia do país.

Embora a primeira turbina eólica brasileira seja de 1992, executada em Fernando de Noronha, o segmento cresceu realmente apenas 10 anos depois, com o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa).

Desde sua criação em 2002 aumentou-se exponencialmente a produção de energia no setor eólico, avançando de aproximados 20 MW em 2003 para 600 MW em 2009 e 2,02 GW em 2013, atingindo 7,63 GW em 2015, quando o país já era o 8º com maior geração de energia eólica (MME, 2016).

Além disso, o crescimento do uso de energia gerada pelos ventos no Brasil tem acompanhado os altos investimentos nessa produção de energia alternativa, que já se soma R\$ 60 bilhões investidos na área (GANNOUN, 2017), tornando o estudo deste campo um objeto de importância, fundamentalmente devido ao grande potencial eólico brasileiro, conforme demonstra a Figura 1.

Com um potencial eólico comprovadamente promissor (FEIJÓ, 2010), cabe ao homem realizar estudos científicos e apropriar-se dos conhecimentos de engenharia adquiridos, tornando possível o desfrute dos

recursos gerados pelos ventos ao se projetar estruturas que sustentem os aerogeradores de maneira segura e eficiente.

As torres, comumente executadas em estrutura metálica e em concreto protendido, têm como objetivo sustentar os componentes responsáveis pela captação e transformação de energia, processo em que o vento será captado nas regiões mais altas, rotacionando as pás acopladas ao rotor conectado ao topo da torre, convertendo a energia mecânica em elétrica através de sistemas de geradores.

Por se tratarem de estruturas robustas, esbeltas e em balanço, a verificação da estabilidade de torres é de suma importância, visto que um dimensionamento inadequado poderá acarretar em colapso, expondo vidas ao risco e causando grandes prejuízos ecológicos e financeiros, como no caso do colapso de 8 torres, de um total de 27, no parque eólico de Santana do Livramento – RS (GAÚCHA ZH, 2016).

Ainda, além de contribuir para a segurança, a análise do comportamento estrutural e das deformações às quais as torres estão sujeitas proporciona a concepção de métodos construtivos mais inteligentes, evitando-se, por conseguinte, desperdícios com estruturas superdimensionadas (YUNES, RIBEIRO; 2014).

Torres eólicas são sujeitas aos mais variados tipos de carregamentos, sendo eles o peso próprio e peso do

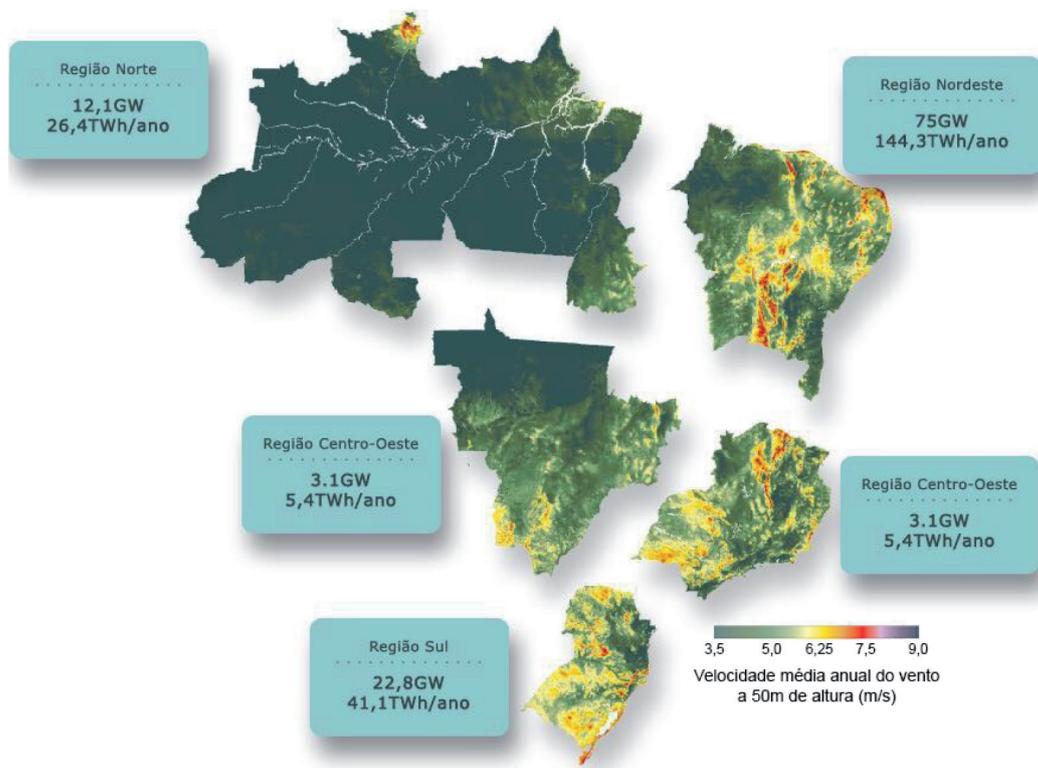


Figura 1 – Potencial eólico estimado brasileiro para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s.

Fonte: CRESESB (2001).

sistema de turbinas, cargas acidentais devido à manutenção e uso, e, principalmente, os esforços decorrentes dos ventos, que, além de fletirem a estrutura, rotacionam as pás, gerando esforços dinâmicos de vibração e torção. Devido à variedade de cargas e situações de uso, a torre deve ser projetada em função de sua altura e das características topográficas do local em questão, utilizando-se de um material que obtenha melhor resposta às solicitações externas.

Face a esse problema será escopo deste trabalho a análise dos deslocamentos horizontais em torres executadas, tanto em concreto protendido quanto em aço, nas mais variadas condições de uso, pretendendo-se com os resultados apontar o desempenho dos materiais e as melhores soluções a serem adotadas em função da localização e altura das torres.

2 Metodologia e Premissas

A metodologia considerada para a definição das características geométricas e cargas nas torres foi baseada em pesquisa exploratória de base bibliográfica buscando o estado da arte acerca dos modelos de torres de sustentação de aeroeradores utilizados. A escolha do *software*, por sua vez, foi definida em função dos materiais contemplados em sua biblioteca e de utilização pregressa em grandes obras, ao passo que a modelagem estrutural foi realizada considerando-se premissas que visam viabilizar a análises em o comprometimento da essência dos resultados.

Para a utilização dos resultados de deslocamento definiu-se o carregamento crítico nas torres realizando-se a combinação de ações crítica em função dos parâmetros prescritos pela EN 1990:2002 (Eurocode: bases para o projeto de estruturas). Além disso, para a interpretação dos valores de deslocamento obtidos utilizou-se a Eurocode 3, parte 3-2 (EN 1993-3-2:2006) e os padrões de desempenho nela especificados.

2.1 Definição do *software* de análise estrutural pelo método de elementos finitos

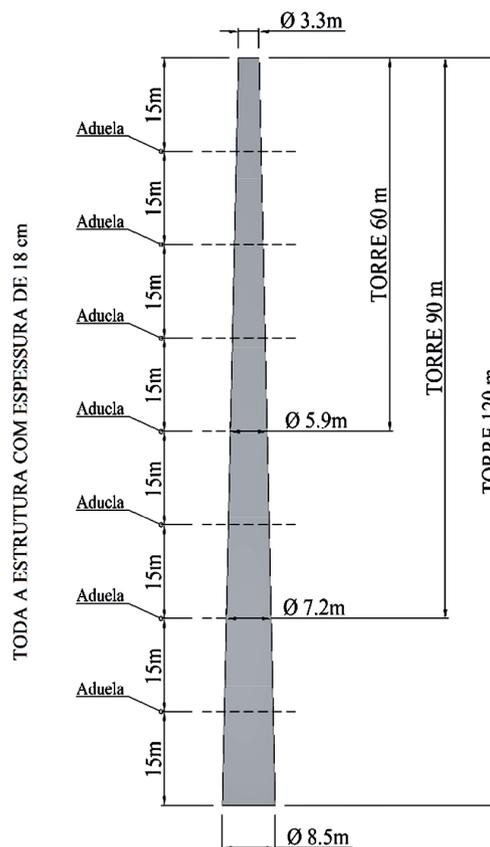
O *software* utilizado para a análise do modelo foi o Midas Gen 2015. Trata-se de um programa com aplicação comprovada em outros estudos de caso pesquisados, o qual possibilita análise de diferentes tipos de estruturas e materiais, apresentando facilidade na obtenção de resultados e simples interpretação, justificando seu uso no trabalho em questão. Apesar de ainda não ser tão difundido no Brasil, já é consolidado em outros países, sendo, inclusive, objeto de uso em grandes construções, tais como o Edifício Burj Khalifa (Emirados Árabes) e o Estádio Ninho do pássaro (China).

2.2 Definição dos materiais e da geometria das torres

Ao selecionar informações referentes ao pré-dimensionamento de torres de sustentação de aeroeradores na literatura científica, verificou-se que as estruturas mais usuais são executadas em aço e concreto protendido, sendo compreendidas em sua maioria entre alturas de 60 m a 120 m (BRUGHUIS, 2003; LOUREIRO, 2014; ROCHA, 2016). Assim, por critérios de análise, optou-se por desenvolver modelos de torres para 60 m, 90 m e 120 m, tanto em aço quanto em concreto protendido, de modo a se obter a maior quantidade de dados possível.

2.2.1 Características das torres de concreto protendido

Utilizou-se como referência para as torres de concreto protendido as dimensões da torre Cassol, de 120 m, cuja empresa responsável pela certificação é a alemã GL (Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH). Trata-se de uma estrutura com formato de tronco-de-cone de espessura constante, a qual apresenta variação linear de diâmetro entre o topo e a base.



Fonte: Os autores (2017).

Figura 2 – Características geométricas das torres de concreto protendido modeladas no Midas Gen 2015.

Assim, o modelo foi adaptado proporcionalmente para as demais alturas, mantendo-se o diâmetro do topo e utilizando-se aduelas de 15 m para modelagem no *software*, simulando-se o processo de montagem. A representação das características geométricas das torres de concreto protendido para cada altura é dada conforme mostrado na Figura 2.

Para todas as torres em questão optou-se por utilizar o concreto C50/60 (f_{ck} de corpos de prova cilíndricos e cúbicos equivalente a 50 MPa e 60 MPa, respectivamente), cujas características são predefinidas no *software*, baseadas na norma Eurocode 2, parte 1-1 (EN 1992-1-1:2004), conforme mostra a Tabela 1:

Tabela 1 – Características do concreto C50/60 utilizado no Midas Gen 2015.

Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Peso Específico (kN/m^3)
37,277	0,2	25

Fonte: os autores (2017).

Adotou-se um concreto de alto desempenho para a análise visto que se trata de um material viável técnica e economicamente devido aos benefícios da protensão. (RÜSCH, 1980; ISHITANI; FRANÇA, 2002; BASTOS, 2006; RAJU, 2007).

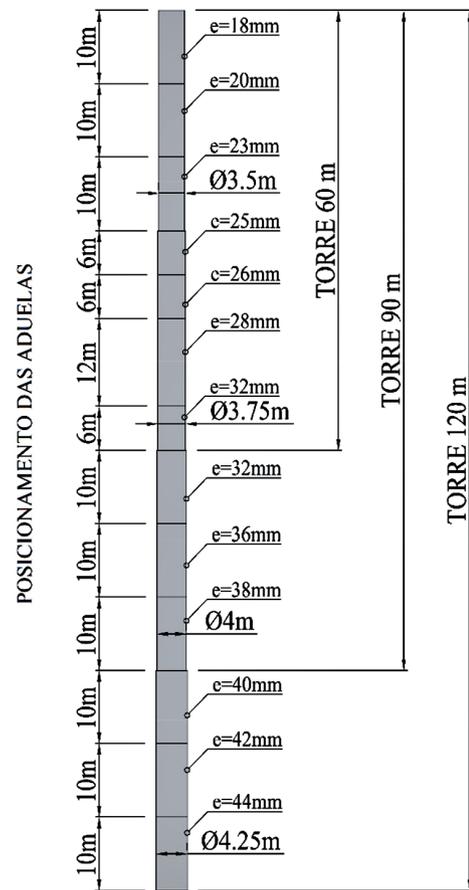
2.2.2 Características das torres de aço

Para as torres de aço optou-se por utilizar como padrão o modelo dimensionado e simulado por Loureiro (2014), o qual compreende uma torre de aço tubular de 90 m de altura, com três segmentos cilíndricos de diferentes diâmetros dispostos um sobre o outro com eixos alinhados e ligações rígidas por meio de flanges. Cada segmento possui diferentes chapas com variadas espessuras.

Analogamente ao realizado com as torres de concreto, manteve-se o diâmetro do topo e adaptou-se proporcionalmente as dimensões utilizadas para as demais torres. Por questões de logística de transporte, respeitou-se o critério de diâmetro máximo de 4,30 m no Brasil (LÚCIO; CHASTRE, 2014).

Além disso, variou-se o número de segmentos e espessuras das chapas de aço em função da variação da altura, o que não ocorreu nas torres de concreto, por serem dimensionadas com espessura constante.

Segue, na Figura 3, a representação dos modelos das torres de aço tubular.



Fonte: os autores (2017).

Figura 3 – Características geométricas das torres de aço modeladas no Midas Gen 2015.

A torre simulada por Loureiro (2014) foi dimensionada com o aço S355, o qual será utilizado para as demais estruturas aqui modeladas. Suas características são definidas pelo *software* baseando-se na Eurocode 3, parte 1-1 (EN 1993-1-1:2005), conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Características do aço S355 utilizado no Midas Gen.

Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Peso Específico (kN/m^3)
210	0,3	76,89

Fonte: os autores (2017).

2.3 Definição das características da nacele e do número de pás acopladas ao rotor

De acordo com Silva (2013), apesar de possível utilização de rotores com duas pás em turbinas de maior potência, o mecanismo se torna mais propenso a

turbulências e instabilidade devido à alta produção de rotação, tornando-se menos eficiente.

Tal fenômeno não ocorre no rotor de três pás, o qual foi escolhido para modelagem. Por ser mais estável, gera mais economia na geração de energia, viabilizando seu emprego, além de ser esteticamente mais agradável.

Para a definição das características geométricas da nacele utilizou-se como base o modelo proposto por Müller (2015) em seu projeto de aerogerador de eixo horizontal, adaptando-se suas dimensões de forma proporcional aos modelos aqui simulados. Para efeito de análise, padronizou-se a geometria para todas as torres simuladas.

2.4 Definição dos carregamentos

As torres eólicas estão sujeitas aos mais variados carregamentos, os quais serão abordados a seguir.

2.4.1 Peso próprio da torre

O cálculo do peso próprio das estruturas foi definido pelo próprio Midas Gen 2015, o qual contabilizou as cargas em sua análise após a inserção das características geométricas e materiais utilizados.

Ao longo da torre, contudo, há pisos gradeados de aço em seu interior, espaçados entre si em função da divisão do número de nós ao longo da altura da torre.

Convencionou-se, portanto, uma distância a cada 12 m para as torres de concreto protendido e uma distância de 15 m para as de aço para a aplicação das demais cargas.

O aço adotado para o piso possui altura de 30 mm e malha de 35 mm x 50 mm, com peso específico de 27,2 kg/m². No entanto, por não se encontrar na biblioteca do *software*, aplicou-se manualmente a carga especificada nos trechos mencionados.

2.4.2 Carga acidental de piso ao longo da torre

Tanto para as torres de concreto protendido quanto para as de aço, considerou-se, a favor da segurança, uma carga acidental de piso de 3 kN/m² nos pisos gradeados supracitados. Adotou-se tal procedimento em conformidade com a NBR 6120 (1980), que prescreve o valor em questão em situações de “terraço com acesso ao público”, a qual foi tida como a circunstância de uso mais próxima encontrada na norma brasileira.

2.4.3 Cargas do conjunto nacele e rotor com três pás

Para a obtenção da massa do conjunto compreendido entre a nacele e o rotor optou-se por utilizar o próprio modelo de Loureiro (2014), que quantifica a “massa” em 140 tf. Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (2014), a massa das pás é caracterizada por, aproximadamente, 14% do total do sistema. Assim, estimou-se o seu valor em 19,6 tf, considerando-o, no modelo, como uma carga concentrada.

Utilizou-se, ainda, de maneira análoga aos pisos gradeados, uma carga acidental de 3 kN/m² na superfície de contato entre a nacele e a torre.

2.5 Definição das velocidades básicas de vento e das cidades de simulação das torres

Para a utilização do vento como força estática na modelagem realizada pelo *software* fez-se necessário determinar as velocidades básicas a serem utilizadas, as quais são definidas pela NBR 6123 (1988) como “a velocidade de uma rajada de 3s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto”, procedimento semelhante ao realizado pela Eurocode 1, parte 1-4 (EN 1991-1-4:2005), a qual adota a velocidade média de um vento de 10 min nessa mesma característica de altura e terreno.

Assim, apesar de ser considerada a referida norma de ações em estruturas para o desenvolvimento dos cálculos no *software*, a utilização das velocidades básicas brasileiras não prejudica os resultados obtidos. O objetivo, a propósito, é tornar mais palpável e concreta a interpretação dos resultados à realidade brasileira.

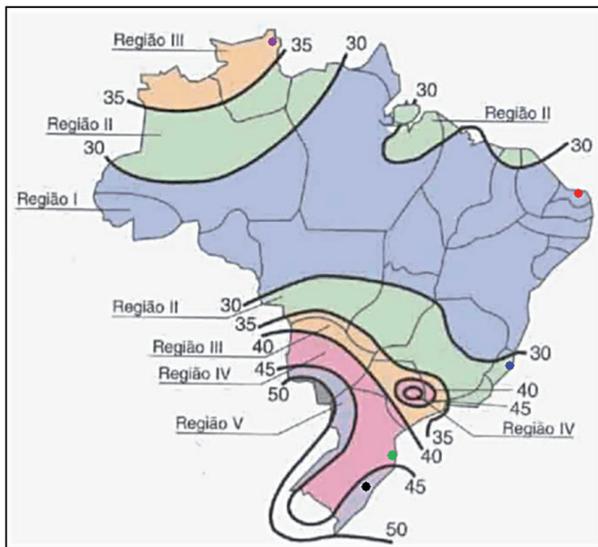
Como ponto de partida, definiu-se, primeiramente, uma cidade para cada uma das cinco regiões delimitadas pelo mapa de isopleias. Considerou-se como pré-requisito de escolha locais em que há parques eólicos instalados ou em projeto para execução.

Na Figura 4 a localização das cidades definidas para simulação das torres de sustentação de aerogeradores.

As cidades estabelecidas para análise e representadas na Figura 4 são as seguintes:

- Guamaré (RN) – Região 1 (ventos até 30 m/s);
- Gargaú (RJ) – Região 2 (ventos a 30-35 m/s);
- Raposa Serra do Sol (RR) – Região 3 (ventos a 35-40 m/s);
- Laguna (SC) – Região 4 (ventos a 40-45 m/s);
- Osório (RS) – Região 5 (ventos a 45-50 m/s).

A favor da segurança, escolheu-se a maior velocidade básica de cada região do Brasil, utilizando-se, portanto, os valores de 30 m/s, 35 m/s, 40 m/s, 45 m/s e 50 m/s.



Fonte: adaptado de PET Engenharia Civil – UFJF (2010).

Figura 4 – Mapa de Isopletas do Brasil e localização das cidades de simulação das torres.

Devido ao fato da velocidade básica de vento europeia ser definida utilizando-se a categoria de terreno prescrita na norma como “2”, classificada como “áreas de vegetação baixa e obstáculos isolados, espaçados entre si de pelo menos 20 vezes o seu próprio tamanho”, padronizou-se essa categoria aos modelos, assemelhando-os à normalização brasileira, a qual se utiliza de parâmetros semelhantes.

Ainda, de modo a homogeneizar as características das normas citadas, definiu-se o valor de “1,0” para o fator de turbulência K_1 e coeficientes de estação C_{season} e direção C_{dir} da norma europeia, os quais representam, basicamente, os coeficientes de fator topográfico S1, fator que leva em consideração características do terreno e edificação S2 e o fator estatístico S3 da norma brasileira, fatores pelos quais o Midas Gen calcula a velocidade estática do vento nos modelos.

2.6 Definição do número de nós do modelo

Para a definição do número de nós buscou-se um equilíbrio entre precisão de resultados e desempenho de análise. Após inúmeros testes constatou-se que um modelo entre 3000 e 5000 nós foi suficiente para que a análise não fosse comprometida.

Para a modelagem das torres de concreto pretendido dividiu-se o modelo radialmente em 30 nós equidistantes. Ao longo de sua altura a divisão foi realizada em 150 nós igualmente espaçados, resultando-se em modelos de 4500 nós.

Para as torres de aço optou-se por utilizar uma quantidade de nós em função da altura de cada estrutura, visto que os segmentos década torre possuem

espessuras variáveis e diferentes tamanhos, sendo modelados e divididos em nós isoladamente. Assim, mantendo-se a divisão radial fixada em 30 nós, dividiu-se as torres de 60 m, 90 m, e 120 m, ao longo de suas alturas, respectivamente, em 100, 133 e 166 nós, obtendo-se modelos com respectivos 3000, 4000 e 5000 nós, aproximadamente.

2.7 Definição das premissas

As premissas adotadas visaram garantir que a concepção dos modelos e das análises sejam realizadas de maneira prática, porém, sem comprometer a essência dos resultados.

Assim, para atender os objetivos do trabalho, não se considerou efeitos sísmicos e de vibração da estrutura em decorrência dos carregamentos dinâmicos e do movimento das pás, não sendo analisados, portanto, as solicitações e deformações decorrentes desses fatores.

Ainda, não foram dimensionadas as fundações da torre, considerando-se, tão somente, ligação engastada nos nós da base das torres. Por conseguinte, desprezou-se efeitos de recalque e não se analisou os esforços e deformações nessa região.

Considerou-se, também, que as variações de temperatura decorrentes das alterações climáticas, das diferenças de altura e de coeficiente de dilatação térmica dos diferentes materiais não influenciaram no deslocamento horizontal das torres.

2.8 Definição da combinação de ações crítica

Para a geração dos resultados, utilizou-se as combinações de ações prescritas pela EN 1990 (2002), as quais foram automaticamente geradas pelo próprio *software*. Considerando-se ventos não concomitantes nas direções X e Y, verificou-se a seguinte combinação crítica:

$$C_{CRIT} = 1.35D + 1.5(1.0LL) - 1.5(0.6)WX$$

$$C_{CRIT} = 1.35D + 1.5(1.0LL) - 0,9WX$$

onde

D – Dead Load (Peso Próprio);

LL – Live Load (Carga Acidental);

WX – Vento na direção X.

Assim, identificou-se que o carregamento crítico atuou no sentido de X negativo, comportamento que pode ser explicado especialmente devido às dimensões da nacela, uma vez que a torre é simétrica em ambos os eixos.

Apesar de ter sido modelada priorizando-se um comportamento aerodinâmico, verificou-se que no sentido em questão a geometria da nacela é caracterizada por uma maior área de contato perpendicular ao vento, a qual foi responsável por acentuar os deslocamentos horizontais. Na direção Y, em contrapartida, há simetria, não se alterando, portanto, os deslocamentos nessa direção.

2.9 Especificação dos limites de desempenho

Para interpretação dos resultados, definição dos melhores materiais e avaliação daqueles que não atendem critérios aceitáveis de desempenho, utilizou-se os padrões de qualidade definidos pela Eurocode 3, parte 3-2, uma vez que a norma brasileira não especifica o limite permitido de deslocamento horizontal para torres. Para estruturas metálicas, a norma define deslocamento máximo para o estado limite de utilização através da seguinte equação:

$$\delta_{\text{máx}} = h/50 \quad (1)$$

onde

h – altura da torre (cm).

Embora essa norma europeia seja especificada para estruturas metálicas, optou-se por se apropriar do mesmo critério para a análise de desempenho das torres de concreto protendido, uma vez que não se encontrou especificações e parâmetros referentes ao deslocamento horizontal limite em outras normalizações para torres executadas nesse material.

3 Resultados e Discussão

Por meio da metodologia aplicada foi possível gerar os resultados de deslocamento para as torres de concreto protendido e aço tubular na direção X, sentido negativo, em todas as condições de uso, bem como verificar o comportamento de cada material em função das condições de projeto e compará-lo segundo os padrões normativos.

Tabela 3 – Deslocamentos horizontais na direção X, sentido negativo, para torres de 60 m (cm).

Velocidade Básica do Vento (m/s)		30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
Material	Aço	70,0	89,6	112,2	137,8	166,4
	CP	21,9	28,5	36,0	44,6	54,2

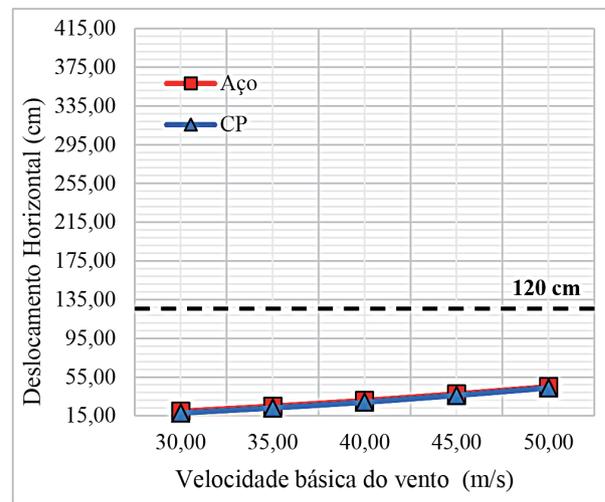
Fonte: os autores (2017).

3.1 Torres de 60 metros

Os resultados obtidos por meio da modelagem computacional das torres de 60 m estão representados na Tabela 3 e na Figura 5.

Percebe-se que o emprego de torres de aço tubular e concreto protendido em menores alturas resultou em comportamentos muito similares, com deslocamentos horizontais bastante próximos, independentemente do valor de velocidade básica do vento.

É interessante mencionar que com o acréscimo de velocidades de vento a torre de aço suavemente tendeu a atingir o mesmo valor de deslocamento obtido pela de concreto, já que as taxas de crescimento de deslocamento para esses materiais foram, respectivamente, de 127% e 130%.



Fonte: os autores (2017).

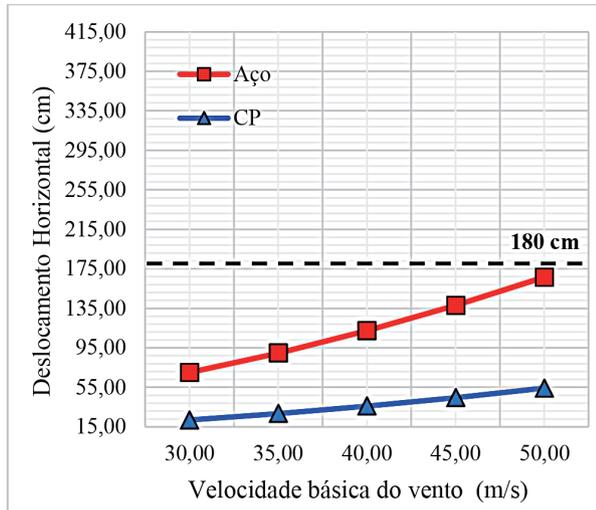
Figura 5 – Comparativo de deslocamento horizontal na direção X, sentido negativo, para torres de 60 m.

Nota-se, ainda, que as torres executadas em ambos materiais atenderam aos requisitos de deslocamento estabelecidos na norma Eurocode 3, parte 3-2, uma vez que os resultados obtidos através da modelagem foram inferiores a 120 cm. Assim, podem ser empregadas em qualquer região do Brasil.

3.2 Torres de 90 metros

Seguem, na Tabela 4 e Figura 6, os resultados obtidos através da análise do modelo referentes às torres de sustentação de aerogeradores de 90 m.

Diferentemente do comportamento apresentado nas torres de 60 m, percebe-se que o desempenho entre os materiais empregados é bastante diferenciado para o caso de estruturas de 90 m. Como esperado, observou-se que o aumento da velocidade básica do vento de 30 m/s a 50 m/s (167%) implicou em maiores deslocamentos horizontais em ambos os modelos.



Fonte: os autores (2017).

Figura 6 – Comparativo de deslocamento horizontal na direção X, sentido negativo, para torres de 90 m.

No entanto, a inclinação da curva mostrou-se maior para o caso de utilização da estrutura metálica, diferentemente do caso anterior, uma vez que enquanto o deslocamento da torre de concreto protendido cresceu a uma taxa aproximada de 162% teve-se que o crescimento da curva de aço seguiu um padrão de 482%, isto é, três vezes maior.

Assim, em valores absolutos, permite-se estabelecer que os deslocamentos horizontais se acentuaram mais rapidamente com o uso desse material.

Apesar de as torres metálicas terem apresentado inicialmente um deslocamento maior, ressalta-se que,

em valores relativos, percentualmente falando, a variabilidade no deslocamento das torres metálicas com o incremento do vento apresentou-se menor quando comparada com a das torres de concreto protendido.

Na primeira situação os valores variaram de 70,0 cm a 166,4 cm (237,7%), ao passo que, na outra, há variação de deslocamento de 21,9 cm para 54,2 cm (247,5%).

Observou-se, por fim, que apesar das torres de aço apresentarem maiores deslocamentos em valores absolutos, todas atendem aos requisitos estabelecidos por norma, com valores inferiores a 180 cm, viabilizando a utilização em todas as regiões brasileiras, embora no caso de ventos com 50 m/s, especificamente, o deslocamento tenha se mostrado próximo ao limite estabelecido.

3.3 Torres de 120 metros

Semelhantemente ao comportamento das torres de 90m, a utilização de estruturas de 120 m apresentou desempenho bastante distinto entre os materiais analisados. A diferença entre desempenho, contudo, acentuou-se nesse caso, principalmente para as torres de aço tubular.

Com um deslocamento já não muito satisfatório na menor velocidade, o qual representou um acréscimo de 265,6% ao substituir a torre de concreto, percebe-se que nos casos de utilização de estrutura metálica a inclinação da curva seguiu um padrão de crescimento de 1204%, isto é, aproximadamente 3,6 vezes maior quando comparado às torres desenvolvidas em concreto protendido, as quais apresentaram inclinação de 333%.

Observou-se que, apesar de em valores absolutos os deslocamentos terem se acentuado ainda mais em relação às torres de 90 m, em valores relativos percentuais a variabilidade no deslocamento horizontal entre as torres executadas para os diferentes materiais mostrou-se bastante suave, praticamente equivalentes, uma vez que a variação de deslocamento nas torres de concreto protendido e aço tubular foi, respectivamente, de 42,4 cm a 109,0 cm (256,9%) e 155,1 cm a 204,0 cm (255,2%).

Verificou-se, por fim, por meio do Eurocode 3, parte 3-2, que o valor máximo de deslocamento

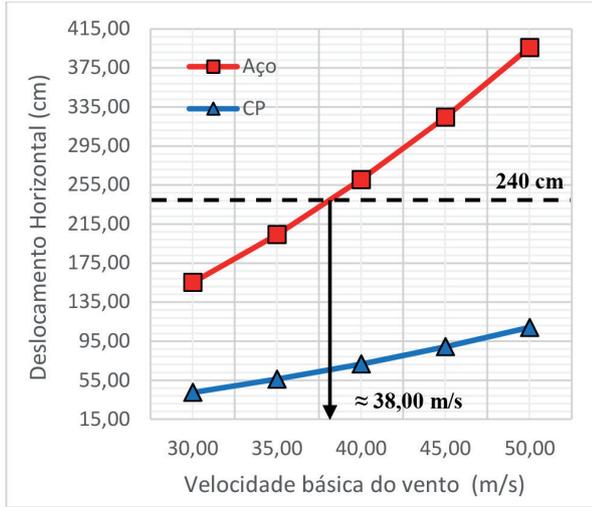
Tabela 4 – Deslocamentos horizontais na direção X, sentido negativo, para torres de 90 m (cm).

Velocidade Básica do Vento (m/s)		30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
Material	Aço	19,6	24,8	30,8	37,5	45,1
	CP	17,7	23,0	29,1	36,0	43,7

Fonte: os autores (2017).

permitido para as torres de 120 m é de 240 cm, constatando-se que, apesar de todas as torres de concreto protendido atenderem à especificação, apenas as torres de aço modeladas no *software* com velocidade básica do vento igual a 30 m/s e 35 m/s atenderam ao estado limite de utilização estabelecido.

Os resultados adquiridos por meio da análise dos modelos referentes às torres de 120 m estão representados na Tabela 5 e Figura 7.



Fonte: os autores (2017).

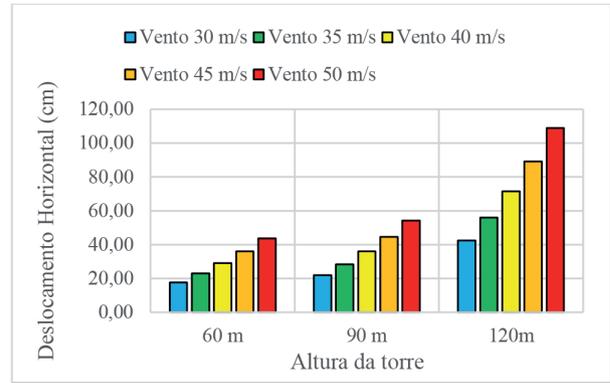
Figura 7 – Comparativo de deslocamento horizontal na direção X, sentido negativo, para torres de 120 m.

3.4 Análise dos Resultados

As torres de sustentação de aerogeradores executadas em concreto protendido, conforme demonstrado, apresentaram excelente desempenho em todas as condições de uso.

Ao se variar as alturas e velocidades básicas do vento, obteve-se comportamento representado pela Figura 8.

Conforme percebe-se, as torres de concreto protendido apresentaram praticamente o mesmo desempenho para as alturas de 60 m e 90 m, independentemente do incremento das velocidades básicas do vento.



Fonte: os autores (2017).

Figura 8 – Deslocamento horizontal em torres de concreto protendido.

Isso demonstra o potencial de utilização do material, o qual, mesmo em sua pior situação de uso, deslocou-se apenas 45,4% do valor máximo permitido para atendimento das condições estabelecidas de estado limite de serviço.

Segue, na Figura 9, ilustração referente ao deslocamento horizontal obtido para cada torre de concreto protendido modelada para a situação de velocidade básica do vento de 50 m/s.

As torres de aço, amplamente utilizadas no cenário nacional, mostraram ótimo desempenho para a altura de 60 m. Mesmo com o acréscimo das velocidades básicas do vento mostraram-se resistir muito bem aos esforços.

Para as demais alturas, em contrapartida, apresentaram maiores deslocamentos, sobretudo no caso de torres de 120 m, situação em que apenas as estruturas modeladas com velocidade básica de vento de 30 m/s e 35 m/s atenderam à normalização europeia vigente.

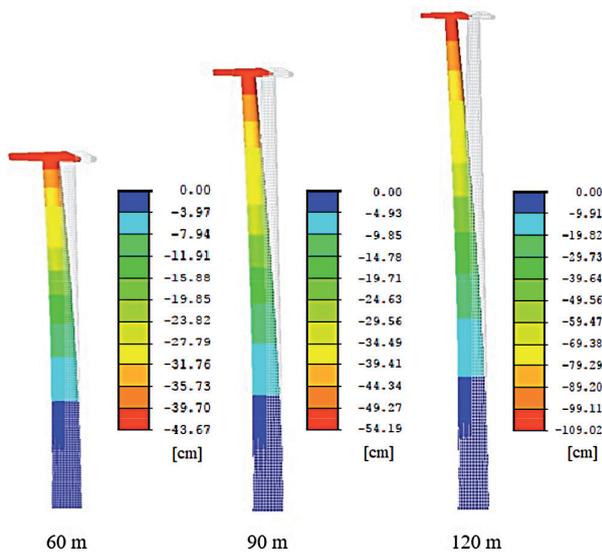
Segue, na Figura 10, representação gráfica referente ao desempenho global do material aço em relação a todas as solicitações e condições de uso analisadas no presente trabalho.

Percebe-se que, apesar do comportamento comprovadamente insatisfatório a uma altura de 120 m nas maiores velocidades, a utilização de torres de 90 m em localidades com velocidades básicas de vento correspondentes a 50 m/s também deve ser analisada.

Tabela 5 – Deslocamentos horizontais na direção X, sentido negativo, para torres de 120 m (cm).

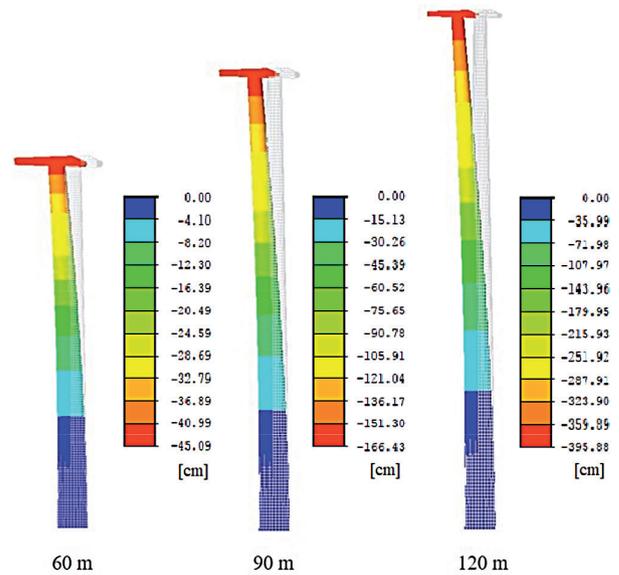
Velocidade Básica do Vento (m/s)		30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
Material	Aço	155,1	204,0	260,5	324,4	395,9
	CP	42,4	56,0	71,6	89,3	109,0

Fonte: os autores (2017).



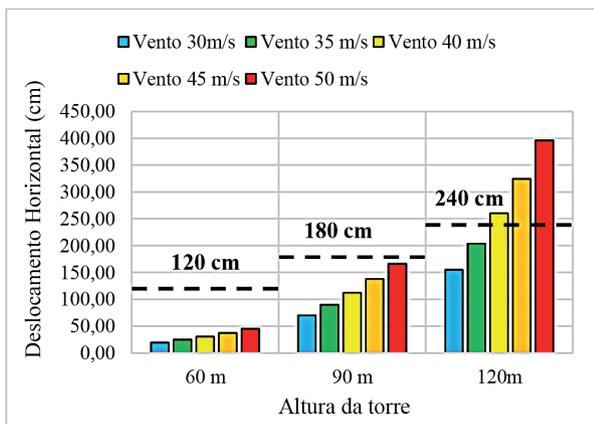
Fonte: os autores (2017).

Figura 9 – Deslocamento horizontal das torres de concreto protendido modeladas no Midas Gen 2015.



Fonte: os autores (2017).

Figura 11 – Deslocamento horizontal das torres de aço modeladas no Midas Gen 2015.



Fonte: os autores (2017).

Figura 10 – Deslocamento horizontal em torres de aço na direção X, sentido negativo.

No caso em questão o deslocamento verificado compreendeu 92,5% do limite máximo permitido por norma, exigindo-se, por consequência, maior cautela quanto ao seu uso.

Segue, na Figura 11, representação gráfica dos deslocamentos horizontais das torres de aço obtidos no Midas Gen 2015 para o caso de velocidade básica do vento de 50 m/s.

4 Conclusões

Por meio das análises comparativas concluiu-se que todas as torres de concreto protendido obtiveram menores deslocamentos horizontais quando comparadas às de aço em suas respectivas alturas e velocidades básicas de vento, podendo, inclusive, ser utilizadas sem comprometimento de estabilidade quanto ao deslocamento, visto que foram atendidos os requisitos normatizados pela Eurocode 3, parte 3-2, em todas as situações de uso.

Verificou-se, no entanto, que o emprego de torres de aço tubular necessita ser realizado com restrições para os casos de estruturas com 120 m de altura, uma vez que, considerando-se os padrões de desempenho estabelecidos pela referida norma, a modelagem estrutural comprovou instabilidade na implantação em localidades cuja velocidade básica do vento exceda 38 m/s, ocasião em que constatou-se deslocamentos superiores a 240 cm, valor limitado para a altura em questão.

Conseqüentemente, apenas as torres de aço simuladas com a velocidade básica do vento de 30 m/s e 35 m/s obtiveram valores de deslocamento horizontal aceitáveis nessa situação de uso.

É importante ressaltar que a análise proposta neste trabalho se diz respeito, exclusivamente, à quantificação e interpretação dos deslocamentos horizontais das torres de sustentação de aerogeradores. Teve-se como intuito, apenas, identificar as soluções estruturais

recomendadas para aplicação nesse quesito de desempenho, em atendimento aos requisitos normativos.

Sugere-se, por fim, para trabalhos futuros, a realização de análises de custo-benefício para as torres aqui modeladas. Nos casos das estruturas com altura de 60 m, as quais obtiveram valores de deslocamento horizontal suficientemente próximos, por exemplo, faz-se interessante verificar outros critérios de projeto, tais como custo, disponibilidade de materiais, condições de exposição da estrutura e método construtivo, a fim de que se decida qual é a solução estrutural mais viável. Para as torres de aço de 90 m e 120 m atendidas pela norma, por outro lado, propõe-se o desenvolvimento de estudos referentes às solicitações extras oriundas da excentricidade das cargas causada pelos elevados deslocamentos, os quais poderão gerar impacto nos custos com a concepção estrutural e fundação da torre.

5 Referências

- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil**. Brasília, 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica**. – Brasília: ANEEL, 2002. 153p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações: procedimento. Rio de Janeiro, 1980. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações: procedimento. Rio de Janeiro, 1988. 66p.
- BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru, 2006. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista UNESP – Campus de Bauru/SP. Faculdade de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil. 92p.
- BRUGHUIS, F. J. **Advanced tower solutions for large turbines and extreme tower heights**. Mecal Applied Mechanics BV, 2003.
- CASSOL PRÉ-FABRICADOS. **Aerogerador eólico**. Disponível em: <<http://www.vendascassol.com.br/produtos/aerogerador-eolico1437416569.html>>. Acesso em: 23 abr. 2017.
- CEN, EUROCODE: Basis of structural design. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
- CEN, EUROCODE 1: **Actions on structures – Part 1-4**: General actions – Wind actions. European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- CEN, EUROCODE 2: **Design of Concrete Structures, Part 1-1**: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- CEN, EUROCODE 3: **Design of Steel Structures, Parte 3-2**: Tower, masts, chimneys. European Committee for Standardization, Brussels, 2006.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: CEPTEL, 2001.
- FEIJÓ, B. P. **Otimização de torres de aço para geradores eólicos**. 2010. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- GANNOUM, E. **“Energia Eólica.” New Energy Landscape: Impacts for Latin America**, 6th ELAEE/IAEE Latin American Conference, April 2-5, 2017. International Association for Energy Economics, 2017.
- GAÚCHA ZH. **Em capítulos, os motivos do fracasso de um investimento de R\$ 300 milhões**. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/06/em-capitulos-os-motivos-do-fracasso-de-um-investimento-de-r-300-milhoes-5939096.html>>. Acesso em 21 mar. 2017.
- ISHITANI, H.; FRANÇA, R. L. S. **Concreto Protendido**: fundamentos iniciais. São Paulo: Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, 2002. 30p.
- LOUREIRO, M. A. F. **Design of steel structures for renewable energy systems**: dimensionamento de torre eólica de 90m. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Departamento de Engenharia Civil. Coimbra, Portugal – Janeiro de 2014. 36p.
- LÚCIO, V.; CHASTRE, C. **Precast concrete wind tower structures**: historic evolution, current development and future potential. CPI – Concrete Plant International. 2014. Disponível em: <<http://www.cpi-worldwide.com/flips/2014/3>>. Acesso em: 12 mai. 2017.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica++ano+ref++2015+%283%29.pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2>>. Acesso em 30 abr. 2017.
- MÜLLER, M. N. **Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal**/ Matheus do Nascimento Müller – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015. IX, 93p.:il.; 29,7 cm Orientador: Flávio de Marco Filho, D. Sc. Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2015. IX, 93p.

PET ENGENHARIA CIVIL UFJF. **A ação do vento em edificações – Parte 1.** Disponível em: <<https://blogdopetcivil.com/2010/11/30/a-acao-do-vento-em-edificacoes-parte-1/>>. Acesso em 30 abr. 2017.

POLÍCIA, A. R. **Estudo do efeito da fadiga em torres com aerogeradores.** Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2014/2015 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.

RAJU, N. K. **Prestressed concrete** – 4ª Ed. – New York, The McGraw-Hill Companies, 2007. 783p.

ROCHA, A. B. **Uma avaliação comparativa entre torres para aerogeradores de aço tubulares e de concreto pré-moldado protendido na região de Serra do Mel, Rio Grande do Norte** / André Barroso

Rocha. – 2016. 61 f.: il. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

RUSCH, H. **Concreto armado e protendido:** propriedades dos materiais e dimensionamento. Rio de Janeiro: Campus, 1980. 396p.

SILVA, A. B. **Projeto Aerodinâmico de Turbinas Eólicas/** Amanda Briggs da Silva – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013. ix, 76p.

YUNES, R. C.; RIBEIRO, V. H. H. **Análise de esforços estruturais e vibracionais em torre de suporte para um sistema híbrido de turbina eólica e de corrente marítima.** Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2014.