

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

**PARÂMETROS DE PROJETO PARA FUNDAÇÕES DE TURBINAS EÓLICAS
ONSHORE¹**
**DESIGN PARAMETERS FOR FOUNDATIONS OF ONSHORE WIND
TURBINES**

**Thais Dalenogare², Felipe Gregory Da Rosa³, Marcos Tres⁴, Me. Rafael
Aésio De Oliveira Zaltron⁵**

¹ Adaptação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil apresentado ao Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Unijuí

² Graduada em Engenharia Civil, egressa da Unijuí. thaisdalenogare.eng@gmail.com

³ Graduado em Engenharia Civil, egresso da Unijuí. felipe.gregorydarosa@gmail.com

⁴ Acadêmico do curso de Engenharia Civil da Unijuí. marcos-tres@hotmail.com

⁵ Orientador, Professor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Unijuí.

RESUMO

A utilização de fontes alternativas de energia vem se destacando nos últimos anos em todo o mundo, principalmente, das fontes renováveis. A energia eólica é produzida por uma dessas fontes, sendo considerada uma das mais promissoras e com grande potencial de geração no Brasil. Este tipo de geração de energia consiste na conversão da energia cinética contida no vento em energia elétrica, por meio de turbinas eólicas, conhecidas também, como aerogeradores. Muito embora exista um grande potencial de geração, a energia eólica ainda é pouco utilizada no Brasil, tendo apenas 10% de sua capacidade instalada. O alto custo para a implantação das turbinas eólicas é um dos fatores que influenciam na baixa utilização desta fonte sendo, a infraestrutura, um dos principais componentes deste custo. Isto posto, neste trabalho será apresentado os principais parâmetros a serem considerados no projeto de fundação de uma turbina eólica *onshore*, bem como, os tipos de fundação que podem ser adotados neste sistema, com o intuito de impulsionar o desenvolvimento do setor eólico através da criação de um referencial teórico para auxiliar na elaboração de futuros projetos de fundação para turbinas eólicas *onshore*.

ABSTRACT

The use of alternative sources of energy has been prominent in recent years around the world, mainly from renewable sources. Wind energy is produced by one of these sources, being considered one of the most promising and with great generation potential in Brazil. This type of energy generation consists of the conversion of the kinetic energy contained in the wind into electrical energy by means of wind turbines. Although there is a great generation potential, wind energy is still little used in Brazil, with only 10% of its installed capacity. The high cost for the implementation of wind turbines is one of the factors that influence the low utilization of this source, being the infrastructure, one of the main components of this cost. This paper will present the main parameters to be considered in the founding project of an onshore wind turbine, as well as the types of foundation that can be adopted in this system, with the aim of boosting the development of the wind sector through the creation of a theoretical framework to assist in the

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

elaboration of future foundation projects for onshore wind turbines.

Palavras-chaves: Energia Eólica. Turbina Eólica Onshore. Fundação. Brasil.

Key-words: Wind Energy. Onshore Wind Turbine. Foundation. Brazil.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o encarecimento do mercado de combustíveis fósseis e o aumento da busca pelo desenvolvimento sustentável tem impulsionado a procura por fontes de energia alternativas, mais baratas, que não agridam o meio ambiente e nem afetem os recursos naturais. Segundo Martins et al. (2008), as fontes renováveis de energia se apresentam como a principal alternativa para atender a demanda da sociedade e reduzir os danos ambientais decorrentes do aumento no consumo. Dentre as fontes energéticas renováveis, a energia eólica vem se destacando e demonstra grande potencial para contribuir significativamente no atendimento dos requisitos necessários quanto aos custos de produção, segurança de fornecimento e sustentabilidade ambiental (GWEC, 2006 apud MARTINS et al., 2008).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) denomina energia eólica como sendo “[...] a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores.” (ANEEL, 2002).

O Brasil possui um grande potencial de geração de energia eólica. Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (BRASIL, 2001), estima-se que o território brasileiro possui um potencial instalável na ordem de 143 GW, sendo 75 GW na região Nordeste de país, cerca de 30 GW na região Sudoeste, 23 GW na região Sul e o restante nas demais regiões. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA), o Brasil dispõe de 15 GW de capacidade instalada, distribuídos em 601 usinas eólicas, o que corresponde a cerca de 10% do potencial instalável no país. Este baixo aproveitamento está relacionado a vários fatores, dentre eles, o alto custo de implantação das turbinas eólicas no Brasil, no entanto, este cenário vem mudando significativamente nos últimos anos.

De acordo com o Boletim Anual de Geração Eólica, publicado pela ABEEÓLICA, em 2018 foram adicionadas à matriz energética brasileira cerca de 2 GW de energia eólica em 75 novos parques. Isso representou um investimento de 4,67 bilhões de reais, que equivalem à 35% dos investimentos realizados em energias renováveis no país. Além de ser uma fonte com baixíssimo impacto de implantação, a energia eólica não emite CO₂ em sua operação, substituindo, portanto, outras fontes de geração de energia elétrica poluentes. Somente em 2018, foram evitadas a emissão de aproximadamente 20 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera (ABEEÓLICA, 2018).

A diversificação da matriz energética, provocada pelo crescimento da geração de energia eólica, proporciona ganhos fundamentais, principalmente para o Brasil, que é fortemente dependente das opções hídricas, sendo muito afetado em períodos de estiagem. Além disso, devido às restrições ambientais, não há projetos para implantação de novas hidrelétricas, de modo que, os parques eólicos surgem como opção para expandir a capacidade instalada da matriz elétrica, evitando os altos custos oriundos do acionamento de termelétricas (ABEEÓLICA, 2016).

O modelo atual de exploração comercial da geração de energia elétrica no Brasil consiste no

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

desenvolvimento de Sociedades de Propósito Específico (SPE) criadas com a finalidade de participar das chamadas públicas (leilões), como concorrentes, de modo que, a SPE que apresentar menor custo de kWh é a vencedora do leilão e estará apta a investir e comercializar a energia gerada, durante o tempo de concessão previsto (RODRIGUES; SILVA FILHO, 2016). De acordo com o Boletim Anual de Geração Eólica, no ano de 2018, foram comercializados, através de chamadas públicas, apenas 1,25 GW de energia eólica (ABEEÓLICA, 2018). Dentre os elementos que constituem uma turbina, um dos itens que compõe o valor do kWh apresentado nos leilões é o custo da obra civil de implantação, dentro deste, a infraestrutura representa o maior peso no custo final (RODRIGUES; SILVA FILHO, 2016).

Assim sendo, em vista do evidente potencial de geração de energia eólica no Brasil, motivada pelas vantagens provenientes da utilização desta fonte e, considerando a influência da fundação no custo de implantação de uma turbina, esta pesquisa tem por objetivo apresentar os principais parâmetros a serem considerados no projeto de fundações de turbinas eólicas onshore, bem como, os tipos de fundação que podem ser empregados neste sistema, com o intuito de impulsionar o desenvolvimento do setor eólico através da criação de um referencial teórico para auxiliar na elaboração de futuros projetos de fundações de turbinas eólicas.

Para atingir este objetivo, o trabalho aborda, em seu capítulo 3, os preceitos da geração de energia eólica, dados estatísticos e características das turbinas eólicas, no capítulo 4, os princípios básicos sobre fundações e noções sobre a mecânica dos solos, no capítulo 5, os parâmetros gerais de projeto de fundações, bem com, as recomendações e exigências normativas e por fim, no capítulo 6, apresenta os principais parâmetros de projeto de fundações de turbinas eólicas e os tipos de fundação que podem ser adotados.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido através do método dedutivo que, de acordo com Prodanov e Freitas (2013), consiste em uma cadeia de raciocínio de ordem descendente, que parte de uma análise geral para o particular, chegando a uma conclusão. Dessa forma, o trabalho abordará os sistemas de fundação em sua totalidade, para então aprofundar-se nos sistemas adotados em turbinas eólicas onshore.

Os estudos foram realizados com base em uma pesquisa exploratória e descritiva. Onde a exploratória tem como finalidade proporcionar mais informação sobre o assunto, possibilitando sua definição e seu delineamento (PRODANOV; FREITAS, 2013). De acordo com Gil (2002) as pesquisas exploratórias têm o intuito de proporcionar conhecimento do problema, com vistas a torná-lo mais visível, tendo como objetivo o aprimoramento de novas ideias. Já na pesquisa descritiva, de acordo com Prodanov (2013) “[...] os fatos são observados, registrados, analisados, classificados e interpretados, sem que o pesquisador interfira sobre eles”.

A origem das informações incide por meio de documentação indireta através de pesquisa bibliográfica relacionada à geração de energia eólica, às fundações e aos seus respectivos parâmetros de projeto, bem como, através da análise das normas regulamentadoras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e demais legislações específicas.

3 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é utilizada pelo homem a milhares de anos. Estima-se que, a partir Idade Média, o

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

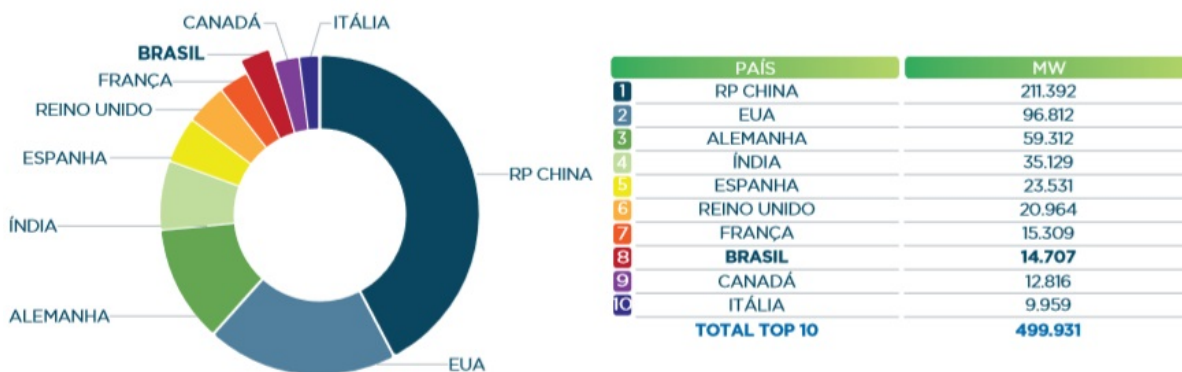
homem passou a utilizar as forças aerodinâmicas em maior escala, nas grandes navegações. No século XIV, máquinas eólicas conhecidas como moinhos de vento, que convertiam a energia cinética contida no vento em energia mecânica, já apresentavam ampla aplicação na Europa, principalmente, na moagem de grãos e bombeamento de água (BRASIL, 2001). A utilização da energia eólica para geração de energia elétrica iniciou-se a partir da década de 1930, nos Estados Unidos, com o uso de pequenos aerogeradores empregados no carregamento de baterias que forneciam eletricidade aos habitantes do meio rural (BRASIL, 2001). As primeiras tentativas de produzir eletricidade em maior escala, com turbinas eólicas de grande porte, foram durante as décadas de 1940 e 1950, nos Estados Unidos, Alemanha e Dinamarca (BRASIL, 2001). No entanto, foi apenas na década de 1970, com a crise internacional do petróleo, que houve investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial (ANEEL, 2002).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica, para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que a sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m², a uma altura de 50 metros, o que requer uma velocidade mínima do vento entre 7 e 8 m/s. Estima-se que, o potencial eólico mundial seja da ordem de 500.000 TWh por ano, contudo, levando em consideração as restrições socioambientais, apenas 10% deste potencial é tecnicamente aproveitável (ANEEL, 2005)

3.1 A geração eólica no Brasil e no mundo

De acordo com o Global Wind Report Annual Market Update 2018, publicado pelo Global Wind Energy Council, em 2018 a capacidade total instalada mundialmente atingiu a marca de 500 GW, graças à instalação de cerca de 43,8 GW de capacidade no ano (GWEC, 2018). A Figura 1 apresenta o ranking mundial dos países com maior capacidade eólica instalada, ao final de 2018:

Figura 1 - TOP 10 de capacidade eólica acumulada 2018



Fonte: Adaptado do Global Wind Report Annual Market Update 2018 (GWEC, 2018).

Conforme o ranking, a China é o país com maior capacidade eólica instalada, representando cerca de 42% do total mundial, equivalente a cerca de 211 GW. Na sequência, Estados Unidos e

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Alemanha que representam, respectivamente, 19% e 12%. O Brasil aparece em oitavo lugar no ranking, com uma representatividade de aproximadamente 3% na escala mundial, correspondentes a cerca de 14,7 GW de capacidade instalada no fim do ano de 2018, ultrapassando o Canadá. Em 2012, o Brasil ocupava a 15ª posição, o que comprova a evolução do setor nos últimos anos (ABEEÓLICA, 2018).

O Brasil possui hoje, 15 GW de capacidade instalada, em 601 parques eólicos. A região com maior concentração de parques eólicos é o Nordeste, com destaque para o estado do Rio Grande do Norte, que possui 151 parques instalados. Destacam-se também os estados da Bahia e do Ceará, que contam com 153 e 79 parques, respectivamente. A região Sul também dispõe de um número considerável de parques eólicos, concentrados principalmente no estado do Rio Grande do Sul, com o equivalente a 80 parques.

3.2 Turbinas Eólicas

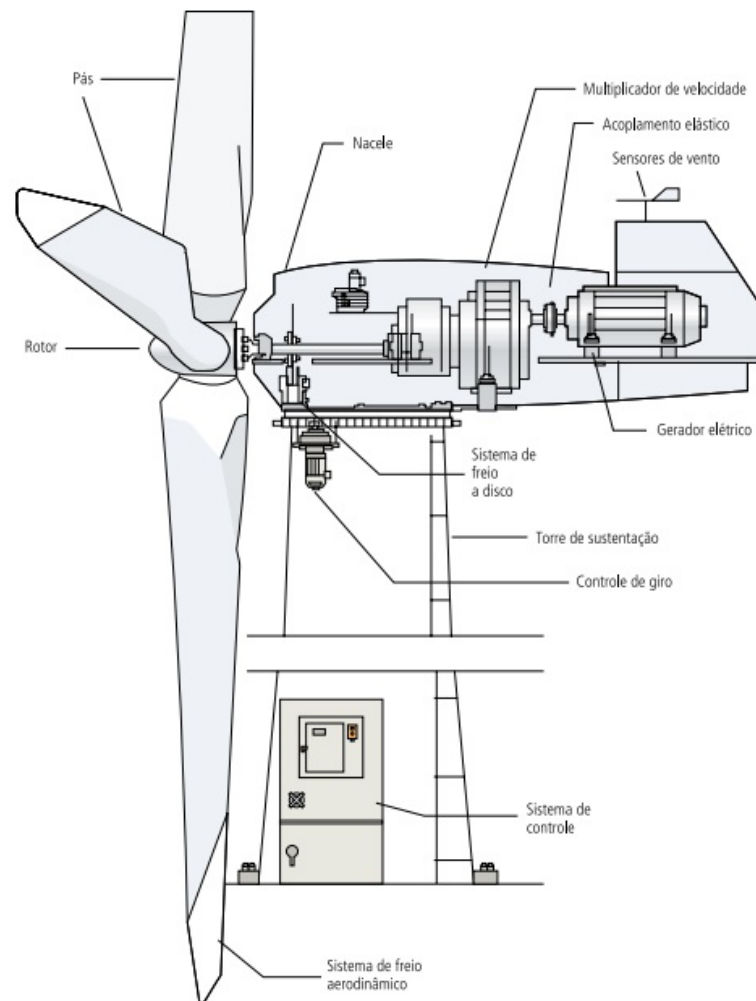
No início da utilização da energia eólica, foram desenvolvidos diversos exemplares de turbinas. A turbina intitulada Gedser, desenvolvida pelo dinamarquês Johannes Jull, em 1958, foi à primeira turbina com aspectos construtivos semelhantes aos utilizados nas turbinas eólicas atuais (YUSEF et al., 2015). No entanto, foi o engenheiro alemão Ulrich Hutter o precursor das atuais turbinas eólicas, desenvolvidas na década de 1950 (BRASIL, 2001). As primeiras turbinas eólicas desenvolvidas em escala comercial apresentavam potências nominais entre 10 e 50 kW. No início da década de 1990, a potência das máquinas aumentou para a faixa de 100 a 300 kW. Em 1995, a maioria dos fabricantes já oferecia modelos com potências nominais entre 300 e 750 kW. As turbinas eólicas de 1 MW e 1,5 MW foram introduzidas no mercado em 1997, iniciando a geração das turbinas de grande porte (ANEEL, 2002).

De acordo com a ANEEL (2002), as turbinas eólicas com potência nominal inferior a 500 kW são consideradas de pequeno porte, as turbinas entre 500 kW e 1000 kW de médio porte e as turbinas com potência nominal superior a 1MW de grande porte. Através das turbinas eólicas a energia cinética contida no vento é captada e convertida em energia mecânica, mediante ao giro das pás do rotor, e, posteriormente, transformada em energia elétrica por intermédio de um gerador (MARTINS et al., 2008).

As turbinas eólicas podem ser implantadas no sistema *onshore*, sobre superfície terrestre, ou *offshore*, sobre superfícies alagadas, como por exemplo, no mar. No Brasil, ainda não existem turbinas eólicas *offshore*, uma vez que, este sistema apresenta elevado custo em comparação ao sistema *onshore* (TRAPP, 2009). Em vista disso, este trabalho abordará apenas o sistema *onshore*. Atualmente, existem dois modelos de turbinas eólicas no mercado: turbinas de eixo vertical e turbinas de eixo horizontal. As turbinas de eixo vertical são pouco utilizadas, a única em produção comercial atualmente é a turbina Darrieus, no Canadá. Para a geração de energia em maior escala, o modelo mais utilizado é a turbina eólica de eixo horizontal que, devido as suas características físicas, apresentam maior aproveitamento eólico, sendo o objeto deste trabalho (NUNES, 2010). A Figura 2 apresenta os principais componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal:

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Figura 2 - Representação Gráfica de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal



Fonte: Atlas de Geração de Energia Elétrica no Brasil (ANEEL, 2005).

Cada um dos componentes possui uma finalidade específica para produção de energia de forma efetiva. A nacela é a carcaça que abriga a caixa de engrenagens, o gerador, o controle de giro, o sistema de freios e os equipamentos elétricos. A torre sustenta o rotor, as pás e a nacela, além de ser responsável por elevar todo o conjunto a uma altura segura e de maior aproveitamento eólico (NUNES, 2010).

A infraestrutura da turbina eólica, implantada no sistema *onshore*, é composta, em geral, por um bloco circular de concreto, estaqueado ou em fundação direta, a depender das cargas atuantes e do tipo de solo presente no local (RIBEIRO et al., 2014). Devido às elevadas cargas que deve suportar e transmitir ao terreno, normalmente, os blocos de fundação de turbinas eólicas possuem diâmetros elevados, podendo atingir valor superiores à 20 metros, de acordo com as condições do

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

solo (FARIA; NORONHA, 2013).

4 FUNDAÇÕES

A infraestrutura é a estrutura de sustentação que forma a fundação de um elemento construtivo (CHING, 2016). Por sua vez, a fundação é o componente de transição entre a estrutura e o solo, seu comportamento está diretamente ligado ao que acontece com o solo quando submetido à carregamentos, através dos elementos estruturais da superestrutura (MILITITSKY et al., 2015). As fundações são classificadas em dois grupos, com base na forma de transmissão das cargas ao solo, sendo estes, fundações superficiais e fundações profundas.

De acordo com a NBR 6122, publicada em 2010 pela ABNT, nas fundações superficiais, também denominadas como rasas ou diretas, a carga é transmitida ao terreno pelas tensões distribuídas sob a base da fundação, e a profundidade de assentamento em relação ao terreno é inferior à duas vezes a menor dimensão da estrutura. Em contrapartida, nas fundações profundas, a carga é transmitida ao terreno ou pela base da fundação (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou ainda, por combinação das duas, devendo, sua ponta (base) estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão e, no mínimo, à 3 metros (ABNT, 2010). Não obstante, as fundações podem ser mistas, por meio da combinação de elementos de transmissão superficial e elementos de transmissão profunda.

As condições geotécnicas do solo são determinantes para a escolha do tipo de transmissão de cargas a ser adotado, dado que, as fundações rasas são empregadas quando o perfil do solo possuir alta capacidade de suporte ou for encontrada rocha resistente a uma pequena profundidade, do contrário, caso o perfil do solo apresentar baixa capacidade ou for encontrado camadas de solo mole a profundidades dentro da zona de influência do bloco, deve-se adotar soluções com estacas profundas (FARIA; NORONHA, 2013).

No Brasil, a norma que trata sobre os critérios e padrões para a investigação geotécnica, o projeto e a execução de fundações, bem como, o desempenho e monitoramento das mesmas, é a NBR 6122, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), acima citada.

4.1 Fundações Superficiais

De acordo com o livro Fundações: Teoria e Prática, publicado pela Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS) e Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia (ABEF), as fundações superficiais se distinguem entre fundações isoladas, sendo estas, bloco e sapata, e fundações associadas, sendo estas, sapata associada, radier e viga de fundação, também conhecida como baldrame (ABMS; ABEF, 1998). O bloco é um elemento de concreto, dimensionado de modo que os esforços de tração possam ser resistidos apenas pelo concreto, sem a necessidade de armadura. Em contrapartida, a sapata é um elemento de concreto armado, dimensionado de modo que os esforços de tração sejam resistidos pela armadura (ABNT, 2010).

O radier é um elemento de concreto armado, semelhante à uma laje, que abrange todos, ou parte, dos pilares da superestrutura, distribuindo o carregamento em toda sua extensão de maneira uniforme. A viga de fundação, por sua vez, é um elemento de concreto, geralmente armado, que abrange pilares cujos centro de gravidade, em planta, estejam situados no mesmo alinhamento. Por outro lado, a sapata associada abrange pilares cujos centro de gravidade, em planta, não

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

estejam situados em um mesmo alinhamento (ABNT, 2010).

As fundações isoladas são elementos estruturais mais simples e econômicos, sendo, os blocos mais econômicos que as sapatas, no caso de cargas reduzidas, quando o consumo de concreto é pequeno e justifica a eliminação da armação. Cabe salientar que não há nenhuma restrição ao emprego de blocos para cargas elevadas (ABMS; ABEF, 1998). As fundações associadas são adotadas quando se deseja uniformizar os recalques ou quando as áreas correspondentes às fundações isoladas projetadas para os pilares se aproximam muito umas das outras ou mesmo se sobrepõem, em consequência de cargas elevadas ou tensões de trabalho baixas. Quando uma ou as duas condições supracitadas são satisfeitas em toda a área da obra ou quando a área total de fundação ultrapassa metade da área de construção, o indicado é utilizar radier. Não obstante, quando estas condições são satisfeitas em parte da obra, pode-se adotar fundação isoladas e associadas conjuntamente (ABMS; ABEF, 1998).

4.2 Fundações Profundas

De acordo com o livro Fundações: Teoria e Prática, citado na seção anterior, as fundações profundas se distinguem em três tipos, sendo estes, estaca, tubulão e caixão (ABMS; ABEF, 1998). As estacas podem ser de madeira, aço, concreto pré-moldado ou concreto moldado in situ, sua forma geométrica varia de acordo com a tipologia da mesma. São executadas inteiramente por equipamentos e ferramentas através de cravação à percussão, prensagem, vibração ou escavação, sem que, em qualquer fase da execução, haja descida de um operário para tal (ABNT, 2010).

O tubulão possui forma cilíndrica e é executado com concreto moldado in situ, pode ser escavado a céu aberto ou sob ar comprimido, com ou sem revestimento, sendo este, de aço (camisa metálica) ou de concreto. Durante sua execução, diferentemente das estacas, pelo menos na etapa final, há descida de um operário para escavação ou limpeza do fundo. O caixão possui forma prismática e é concretado ainda na superfície e instalado por escavação interna, sob ar comprimido ou não. Vale salientar que ambos podem ter ou não suas bases alargadas (ABNT, 2010).

Existe uma grande variedade de fundações profundas, o que determina a escolha do tipo a ser adotado são as cargas de trabalho e o método de execução (pré-moldadas ou moldadas in loco, cravadas ou escavadas). Por exemplo, solos compostos de argilas muito moles dificultam a execução de estacas de concreto moldadas in situ, assim como, solos com nível do lençol freático elevado, em contrapartida, solos muito resistentes, compactos ou com pedregulhos, dificultam a cravação de estacas de concreto pré-moldadas (ABMS; ABEF, 1998).

Além dos aspectos supracitados, devem ser consideradas as características do local da obra, tendo em vista que, terrenos muito acidentados ou com obstrução de altura dificultam o acesso de determinados equipamentos, como o bate-estacas, por exemplo. Outro aspecto a ser observado são as restrições devido às edificações vizinhas, que podem sofrer danos em caso de vibrações no subsolo (ABMS; ABEF, 1998).

4.3 Fundações Mistas

As fundações mistas são aquelas que associam elementos de fundação superficial e fundação profunda (ABMS; ABEF, 1998). Neste tipo de sistema a transferência de cargas ao solo se faz pela base do elemento horizontal, como nas fundações superficiais, e ao longo do fuste e da ponta do

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

elemento vertical, como em fundações profundas (BACELAR, 2003).

As fundações mistas são adotadas nos casos em que a capacidade de suporte do solo para fundações superficiais é razoável, mas os recalques totais e diferenciais podem ser elevados, diante disso, utiliza-se conjuntamente fundações profundas para reduzir os valores de recalques a níveis aceitáveis (BACELAR, 2003).

5 ANÁLISE E PROJETO DE FUNDAÇÕES

A análise e o projeto de fundação se iniciam a partir da determinação das solicitações, ou cargas de projeto, e da definição das características do subsolo, obtidas por meio de investigação geotécnica. Com base nisso, se define a forma de transmissão das cargas (superficial, profunda ou mista) e realiza-se as verificações de segurança (MILITITSKY et al., 2015).

Todo projeto de fundações contempla as cargas aplicadas pela estrutura e a resposta do solo à estas solicitações. Os solos são muito distintos entre si e, evidentemente, respondem de maneira muito variável (ABMS; ABEF, 1998). Conforme citado no capítulo anterior, a norma que trata dos critérios gerais que regem o projeto e a execução de fundações no Brasil é a NBR 6122, publicada em 2010 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

5.1 Investigações Geotécnicas

A NBR 6122 estabelece que, para todo e qualquer tipo de estrutura, deve ser realizada uma investigação geotécnica preliminar, por meio de sondagem à percussão, visando a determinação da estratigrafia e classificação dos solos, de acordo com a ABNT NBR 6502, bem como, a posição do nível d'água e o índice de resistência à penetração, de acordo com a ABNT NBR 6484. Em função dos resultados obtidos nesta investigação, se necessário, deverá ser realizada investigação complementar (ABNT, 2010).

A sondagem à percussão é um método de investigação que utiliza um amostrador padronizado do tipo Raymond para retirada de amostras do solo, a cada metro perfurado, para determinação da estratigrafia do solo e classificação do solo, além da realização do ensaio de penetração dinâmica SPT (Standard Penetration Test) que determina o índice e resistência à penetração do solo (N) (FILHO, 2016). A determinação deste índice se dá pelo número de golpes correspondente à cravação de 30 cm do amostrador-padrão, após cravação inicial de 15 cm (ABNT, 2001).

5.2 Ações nas Fundações

De acordo com a NBR 6122, as ações atuantes nas fundações são provenientes da superestrutura, assim como, decorrentes do empuxo do solo e das águas superficiais e subterrâneas. Não obstante, devem ser consideradas também, as ações resultantes do peso próprio da fundação e ações excepcionais, causadas por eventos não previstos ou de rara ocorrência, como tráfego de veículos pesados sobre a estrutura, explosões, abalos sísmicos ou vibrações (ABNT, 2010).

No que diz respeito às ações provenientes da superestrutura, conforme disposto na NBR 8681, publicada em 2003 pela ABNT, as ações são classificadas segundo sua variabilidade no tempo em três categorias, sendo estas, ações permanentes, variáveis e excepcionais. As ações permanentes são as que ocorrem com valores constantes, ou de pequena variação, durante praticamente toda a vida da estrutura, em contrapartida, as ações variáveis são as que ocorrem com valores que apresentam variação significativa durante a vida da estrutura. Por outro lado, as ações

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

excepcionais são as que têm duração extremamente curta e muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida da estrutura, mas mesmo assim, devem ser consideradas (ABNT, 2003). As ações supracitadas, devem ser combinadas para a verificação dos estados limites da estrutura, que podem ser estados limites últimos ou estados limites de serviço. Os estados limites últimos são aqueles em que, pela sua simples ocorrência, determinam a paralisação, no todo ou em parte, da estrutura. Os estados limites de serviço são aqueles em que, por sua ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos que não respeitam as condições especificadas para uso normal da estrutura, ou que são indícios de comprometimento da durabilidade da mesma (ABNT, 2003). Assim como as ações provenientes da superestrutura, devem ser considerados os empuxos decorrentes do solo e de sobrecargas atuantes no mesmo. Estes empuxos, quando assimétricos, influenciam na estabilidade da estrutura e devem ser analisados de forma compatível com a deslocabilidade da mesma. No caso das fundações profundas, além do empuxo, deve ser observado o atrito negativo. Do mesmo modo, devem ser considerados os empuxos decorrentes das águas, tanto superficial como subterrânea e, no caso de fluxo de água, deve ser analisada a possibilidade de erosão (ABNT, 2010).

Não obstante, o efeito do vento também deve ser considerado nas combinações das ações solicitantes, sendo analisado como ação variável. Neste caso, os valores de tensão admissível podem ser majorados em até 30% e os valores de tensão resistente em até 10% (ABNT, 2010).

5.3 Segurança nas Fundações

Com base nos estudos geotécnicos, nas ações sobre a fundação, e nos critérios e recomendações da ABNT NBR 6122, o projeto de fundações deve procurar garantir a estabilidade e segurança da estrutura, da fundação e do terreno atendendo as condições dos estados limites últimos (ELU) e estados limites de serviço (ELS) (FARIA; NORONHA, 2013).

O projeto de fundação deve atender a três requisitos básicos, sendo estes, deformações aceitáveis sob as condições de trabalho, segurança adequada ao colapso do solo e segurança adequada ao colapso dos elementos estruturais. O primeiro requisito corresponde à verificação dos estados limites de serviço e, os demais, correspondem à verificação dos estados limites últimos. Cabe salientar que, nas fundações superficiais submetidas a cargas horizontais, devem ser verificados os requisitos quanto à segurança ao tombamento e ao deslizamento, relacionados estes, ao estado limite último (ABMS; ABEF, 1998).

Os fatores de segurança globais e parciais que devem ser adotados nessas verificações são estabelecidos pela ABNT NBR 6122/2010. Ademais, deve ser respeitada a condição de que o valor equivalente ao efeito das ações, na combinação dos estados limites de serviço, deve ser menor ou igual ao valor-limite de serviço. O valor-limite de serviço, para uma determinada deformação, é o valor correspondente ao comportamento que cause efeitos como, por exemplo, recalques excessivos, trincas inaceitáveis ou comprometimento à funcionalidade da estrutura (ABNT, 2010).

5.4. Parâmetros de Projeto

A grandeza fundamental para realização do projeto de fundação, em se tratando de fundação superficial, é a determinação da tensão admissível, se o projeto considerar o coeficiente de segurança global, ou da tensão resistente, caso o projeto considere, para o coeficiente de segurança, fatores parciais. Essas tensões devem obedecer, simultaneamente, os estados limites

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

últimos e de serviço, para cada elemento de fundação isolado e para o conjunto. A determinação da tensão admissível ou resistente de projeto pode ser realizada a partir do ensaio de prova de carga sobre placa, bem como, por meio de métodos teóricos e métodos semi-empíricos (ABNT, 2010).

No caso de fundação profunda, em se tratando de estacas, a grandeza fundamental para o projeto é a determinação da carga admissível, se o projeto foi feito em termos de valores característicos, ou da carga resistente de projeto, caso o projeto seja feito em termos de valores de projeto. Em se tratando de tubulões, a grandeza fundamental é a tensão admissível ou tensão resistente de projeto. Ambas devem obedecer, simultaneamente, aos estados limites últimos e de serviço, para cada elemento isolado e para o conjunto (ABNT, 2010). A determinação da tensão admissível ou resistente de projeto, no caso de tubulões, segue os mesmos parâmetros das fundações superficiais supracitados. Por outro lado, a determinação da carga admissível ou resistente de projeto das estacas deve ser determinada a partir da carga de ruptura. A carga de ruptura, por sua vez, deve ser determinada a partir do ensaio de prova de carga, bem como, por meio de métodos estáticos e métodos dinâmicos.

6 FUNDAÇÃO DE TURBINA EÓLICA ONSHORE

A fundação é o elemento estrutural responsável pela ligação entre a torre de sustentação da turbina eólica e o solo, devendo suportar cargas estáticas, como o peso próprio, e cargas dinâmicas, como o vento e sismos. Ao passo que, na maioria das estruturas as fundações são projetadas para suportar as cargas verticais, as fundações de turbinas eólicas devem suportar, além destas, forças horizontais impostas pelo vento, que ocasionam valores elevados de momentos fletores na base da torre e na fundação (SILVA, 2014).

Assim como as cargas atuantes, as condições do solo no local de instalação da turbina eólica são igualmente determinantes para a escolha do tipo de fundação a ser empregada (FARIA; NORONHA, 2013). No caso de turbinas eólicas *onshore*, quando a camada de solo próxima à superfície apresenta baixa resistência é necessário transmitir as cargas para as camadas mais profundas do solo e, para tal, opta-se pela fundação profunda com o uso de estacas. Por outro lado, quando a camada do solo próxima à superfície é resistente o suficiente para suportar as cargas transmitidas pela turbina, é preferível optar-se pela fundação superficial com o uso de sapatas (BERTUZZI, 2013).

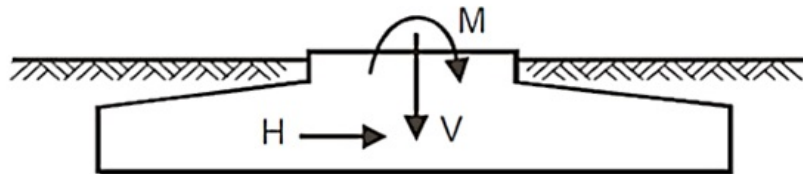
6.1 Ações nas Fundações

As principais cargas que atuam na fundação de uma turbina eólica *onshore* são provenientes do peso próprio dos seus elementos, que gera carga vertical, e da ação do vento, que gera carga horizontal. O peso próprio provoca esforços de compressão, os quais atuam permanentemente na estrutura. Por outro lado, o vento é cíclico, de modo que, produz cargas que oscilam em magnitude e direção (BERTUZZI, 2013).

Quando o vento incide sob as pás da turbina, fazendo com que estas girem, o sistema do gerador retém parte da energia cinética da massa de ar, de modo que, logo atrás das pás, o vento tem sua velocidade reduzida. Por consequência, desenvolve-se uma diferença de pressão entre o lado frontal e o posterior da turbina, gerando, portanto, momento fletor e força cortante ao longo de toda a torre até a sua fundação (BERTUZZI, 2013). A Figura 3 apresenta os esforços supracitados:

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Figura 3 - Esforços atuantes na Fundação de uma Turbina Eólica



Fonte: Adaptado de BERTUZZI (2013).

Além dos esforços apresentados na Figura 3, existem outras cargas de menor intensidade, que atuam em um curto período de tempo, provenientes da própria execução e montagem da torre ou devido à manutenção (BERTUZZI, 2013). Cabe salientar que, todas as cargas atuantes devem ser adequadamente combinadas a fim de gerar as situações críticas de projeto (FARIA; NORONHA, 2013).

Nas situações de projeto, a ação do vento é o fator de maior importância no dimensionamento das fundações de turbinas eólicas, visto que, esta ação é a mais condicionante nestas estruturas (PESTANA, 2016). Sua verificação é imprescindível, por se tratar de uma carga cíclica, sem comportamento linear, a qual provoca fadiga na estrutura (BERTUZZI, 2013). A Figura 4 demonstra a convenção de eixos adotada na determinação dos esforços de uma turbina eólica:

Figura 4 - Sistema de Eixos adotado para Turbinas Eólicas



Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2017).

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Os esforços resultantes transmitidos pela turbina eólica à fundação correspondem a força F_{xy} , referente à resultante das forças horizontais atuando no plano XY, ao momento fletor M_{xy} , resultante dos momentos agindo entorno dos eixos X e Y, e a força axial F_z resultante das cargas gravitacionais. Conforme apresentado em seções anteriores, para determinação destes esforços são adotadas situações de projeto referentes aos limites últimos (ELU), relacionados a situações de colapso, e os estados limites de serviço (ELS), relacionados as deformações. No caso das fundações de turbinas eólicas, pode ainda, ser considerado o estado limite à fadiga (ELF), provocado pelas cargas dinâmicas (FARIA; NORONHA, 2013).

Os coeficientes de segurança adotados nas situações de projeto devem estar de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 6118 e ABNT NBR 6122, bem como, da norma internacional referência no projeto de estruturas de turbinas eólicas International Standard - Wind Turbines - Part 1: Design requirements (IEC, 2005) (RIBEIRO, 2017).

A direção do momento fletor que é transmitido pela turbina eólica à fundação varia de acordo com a ação do vento na mesma, de modo que, para manter o dimensionamento a favor da segurança, deve ser considerado que a resultante dos momentos atuantes no plano XY pode agir em qualquer direção. No caso de fundação com geometria circular, que possui infinitos planos de simetria, é suficiente a análise em uma única direção de atuação do momento resultante (RIBEIRO, 2017). Devido esta condição de simetria, a maioria das fundações de turbinas eólicas são projetadas em geometria circular. Cabe salientar que, este momento corresponde ao momento de tombamento, que é composto pelo momento fletor M_{xy} e pelo momento causado pela força F_{xy} em relação ao ponto de tombamento da fundação, localizado no centro da face inferior da mesma, correspondendo, ao produto entre a força em questão e a altura do elemento de fundação (RIBEIRO, 2017).

Além das cargas provenientes da turbina eólica, devem ser considerados o peso próprio da fundação e o peso de aterro (RIBEIRO, 2017). Para tal, adota-se um acréscimo de 5 a 10% no esforço axial proveniente da superestrutura (RODRIGUES, 2018).

6.2 Tipos de Fundação

A fundação será responsável por transmitir ao solo as cargas supracitadas. Para garantir a eficiência do projeto, é de extrema importância a escolha do tipo de fundação mais adequada ao solo presente no local de instalação da turbina eólica. Para tal, conforme citado em seções anteriores, se faz necessária a realização investigações geotécnicas no solo (BERTUZZI, 2013). Este procedimento prévio é uma etapa fundamental para a escolha do tipo de fundação a ser adotada, pois possibilita o conhecimento da profundidade que se encontra o lençol freático, da profundidade das camadas mais resistentes e do comportamento do solo ao receber as cargas da estrutura (PIUCCO, 2014).

Nas turbinas eólicas *onshore* são empregados dois tipos principais de fundação, sendo estas, superficiais e profundas. As primeiras, são adotadas em solos com características geotécnicas mais resistentes e correspondem às sapatas, que podem possuir geometria circular, octogonal ou quadrada. Em contrapartida, as fundações profundas são adotadas em solos com características geotécnicas mais fracas e correspondem às estacas (SILVA, 2014). Neste caso, é utilizado um conjunto de estacas, distribuídas em torno da circunferência da turbina eólica e interligadas por um bloco de concreto, normalmente de geometria circular, responsável por distribuir às cargas da

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

turbina às estacas (BERTUZZI, 2013).

A fundação gravitacional (sapata) é a mais utilizada em turbinas eólicas onshore, resistindo aos momentos de tombamento através de seu peso próprio (RIBEIRO, 2017). Em geral, é projetada com geometria circular e, devido às cargas elevadas que deve suportar e transmitir ao solo, apresenta diâmetros de grandes dimensões (FARIA; NORONHA, 2013). A fundação de bloco estaqueado é utilizada em solos que não apresentam camadas superficiais resistentes, sendo necessária à transmissão das cargas para estratos mais profundos. É composta por um conjunto de estacas, normalmente estaca raiz ou hélice contínua, e por bloco de coroamento, responsável por transmitir as cargas provenientes da turbina e solidarizar a ação às estacas (RIBEIRO, 2017).

A maioria das turbinas eólicas é capaz de girar em torno do eixo de sua torre, a fim de buscar a direção mais favorável à incidência do vento e obter maior eficiência na geração de eletricidade. Apesar dessa rotação ser lenta, devido ao peso elevado da nacela do conjunto rotor-pás, ela representa um grande viés para a fundação, uma vez que, a direção dos esforços tende a mudar completamente. Por conta disso, a fundação deve ser dimensionada para resistir a todos os esforços independentemente da sua direção de atuação (BERTUZZI, 2013).

Neste ponto que a fundação com geometria circular apresenta maior eficiência, uma vez que, devido a sua simetria, distribui os carregamentos à fundação de maneira uniforme, independentemente da direção de atuação do momento, não havendo sobrecargas em nenhum ponto da estrutura. Por consequência, as tensões também são transmitidas ao solo de maneira uniforme em torno de sua circunferência, sendo necessário, uma única verificação quanto à tensão máxima. Ademais, a quantidade de aço necessária para sua execução é menor, se comparada às sapatas de outras formas geométricas, resultando em um melhor custo-benefício (SILVA, 2014).

6.3 Parâmetros de Projeto

Os principais parâmetros a serem considerados durante o desenvolvimento do projeto de fundação de turbinas eólicas são relacionados à resistência e estabilidade da fundação e do solo, à rigidez rotacional e aos recalques diferenciais. No que diz respeito à resistência e estabilidade da fundação, deve ser dimensionada uma estrutura capaz de resistir tanto às forças verticais quanto ao momento de tombamento, sem que ocorra ruptura ou deformações do elemento estrutural (RIBEIRO, 2017).

Em se tratando da resistência do solo, a capacidade de carga deste deve suportar às tensões transmitidas pela fundação, sem que ocorra ruptura do mesmo (RIBEIRO, 2017). Para isso, durante a determinação da tensão admissível, deve ser considerado o critério de segurança à ruptura, satisfeito mediante à aplicação de um coeficiente de segurança adequado (ABMS; ABEF, 1998). Assim como às rupturas, o recalque diferencial deve ser considerado como critério na determinação da tensão admissível (ABMS; ABEF, 1998). Nas turbinas eólicas, este tipo de deformação do solo deve ser evitada ou ser mínima, uma vez que, pode afetar o funcionamento do gerador (BERTUZZI, 2013).

Quanto à rigidez rotacional, deve ser respeitado no desenvolvimento do projeto da fundação de turbinas eólicas um valor mínimo para esta, normalmente definido pelos fabricantes, a fim de assegurar que o sistema, como um todo (torre-fundação-solo), tenha a frequência natural dentro dos valores assumidos no projeto da turbina (MARANHÃO, 2016). Esta rigidez é necessária ao pleno funcionamento da turbina eólica, evitando os recalques diferenciais que geram instabilidade

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

ao conjunto (RIBEIRO, 2017).

Não obstante, nas fundações superficiais, devem ser realizadas verificações relativas ao tombamento e ao deslizamento. A verificação quanto ao tombamento é feita através da determinação de uma área de contato mínima, entre a base da fundação e o solo, de modo que, se a área projetada for menor que a mínima, haverá desprendimento da fundação quanto esta for submetida ao momento de tombamento. Quanto ao deslizamento, a verificação é realizada considerando o atrito entre a fundação e o solo, que é garantido através da simples adoção de coeficientes de segurança (RIBEIRO, 2017).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresentado neste trabalho demonstra como a energia eólica vem se destacando dentre as mais promissoras fontes de energia renovável, com potencial para atender os requisitos quanto ao custo de produção, segurança de fornecimento e sustentabilidade ambiental, garantindo a oferta de energia necessária para o desenvolvimento econômico e social dos países. A diversificação da matriz energética proporciona ganhos fundamentais para o desenvolvimento de um país, principalmente para o Brasil, que é dependente das opções hídricas sendo muito afetado durante os períodos de estiagem.

Conforme retratado nos capítulos iniciais, o Brasil possui um grande potencial de geração de energia eólica, com capacidade instalável acima de 140 GW. No entanto, apenas 10% desta capacidade é utilizada e um dos principais pontos que influenciam no baixo aproveitamento da fonte é o alto custo de implantação das turbinas eólicas no país. De acordo com as pesquisas realizadas, o custo da obra civil e, por conseguinte, da infraestrutura, representa o maior peso no custo final de implantação das turbinas *onshore*, objetos deste trabalho.

Com base nesses fatores e motivado pelas vantagens provenientes do uso da fonte eólica no Brasil, o objetivo deste trabalho foi apresentar os principais parâmetros a serem considerados no projeto de fundações de turbinas eólicas *onshore*, bem como, os tipos de fundação que podem ser empregados neste sistema, com o intuito de impulsionar o desenvolvimento do setor eólico através da criação de um referencial teórico para auxiliar na elaboração de futuros projetos de fundações de turbinas eólicas.

Para atingir esse objetivo o trabalho abordou os preceitos da geração de energia eólica, dados estatísticos e características das turbinas eólicas, os princípios básicos sobre fundações e noções sobre a mecânica dos solos, os parâmetros gerais de projeto de fundações, bem com, as recomendações e exigências normativas e por fim, os principais parâmetros de projeto específicos às fundações de turbinas eólicas e os tipos de fundação que podem ser adotados no sistema *onshore*. Dessa forma, este trabalho visou preencher uma lacuna de conhecimento e abrir novos questionamentos, a fim de instigar futuras pesquisas e estimular a exploração da fonte eólica no Brasil.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica 2018**. São Paulo: 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Base de dados**. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/>> Acesso em: 29/07/2019.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENERGIA GEOTÉCNICA;
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA.
Fundações: Teoria e Prática. 2ª ed., São Paulo: Pini, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações.** Rio de Janeiro: 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento.** Rio de Janeiro: 2003.
- BACELAR, Cleide Jeane Ribeiro. **Análises de Recalque em Radiers Estaqueados.** Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2003.
- BERTUZZI, Pietro José. **Estudos de Aspectos de Engenharia para Implantação de Torres Eólicas.** Monografia de Graduação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: 2013
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.** Brasília: 2002.
- FARIA, P. O.; NORONHA, M. **Fundações de Torres Eólicas - Estudo de Caso.** Criciúma: 2013.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report Annual Market Update 2018.** Bruxelas, Bélgica: 2018.
- MARANHÃO, George Magalhães. **Análise da Rigidez Rotacional de Fundações Estaqueadas de Torres Eólicas.** IX Congresso Brasileiro de Pontes Estruturais. Rio de Janeiro: 2016.
- MARTINS, F.R., GUARNIERI, R.A., PEREIRA, E.B. **O aproveitamento da energia eólica.** São Paulo: Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, 2007.
- MILITITSKY J., CONSOLI N. C., SCHNAID F. **Patologia das Fundações.** 2ª ed. São Paulo: 2015
- PESTANA, Diogo Alexandre Correia. **Sistemas estruturais para torres eólicas.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia - Campus Universitário da Penteada. Funchal, Portugal: 2016.
- PIUCCO, Larissa Tereza. **Estudos e dimensionamento das fundações de uma torre eólica.** Monografia de Graduação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: 2014.
- RIBEIRO, Robson. **Análise estática e dinâmica de diferentes geometrias de fundações superficiais de aerogeradores.** Monografia de Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: 2017.
- RIBEIRO, Marco Antônio et al. **Análise de Fadiga em Estrutura de Fundação de Torre de Turbina Eólica.** VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro: 2014.
- RODRIGUES, Paulo Cesar. **Estruturas de Concreto Armado III. Notas de Aula.** 25 de janeiro - 02 de fevereiro, Ijuí: UNIJUI, 2018.
- SILVA, Manuel Duarte. **Tipificação de fundações de torres eólicas em parques industriais, para diversos tipos de solos.** Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, Portugal: 2014.