



Tipificação das Fundações de Aerogeradores de Parques Eólicos Onshore

José Hugo Pereira do Nascimento
Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Alagoas, Palmeira dos Índios, Brasil,
jhpn1@aluno.ifal.edu.br

Paulo Evson Soares da Silva
Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Alagoas, Palmeira dos Índios, Brasil,
pess3@aluno.ifal.edu.br

Margarete Helen Magalhães Oliveira
Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Alagoas, Palmeira dos Índios, Brasil,
mhmo1@aluno.ifal.edu.br

RESUMO: A energia eólica está cada vez mais presente nas edificações, essa energia sustentável e limpa precisa de parques com esse sistema de geração. Essas grandes instalações podem ser marítimas ou terrestres, mas cada situação necessita de um grande projeto de engenharia, logística de transporte e de instalação. Para que a fixação dessas enormes peças sejam feitas no solo é necessário um estudo geotécnico para que suas fundações sejam as mais coerentes e eficientes. Os aerogeradores podem contar com as mais variadas soluções para as suas instalações nos solos dos parques eólicos. Por conta disto, o objetivo deste artigo é apresentar os resultados de uma pesquisa bibliográfica sobre os principais tipos de fundações usadas para implantar aerogeradores onshore (terrestres). Procurando saber quais os principais tipos de estruturas para implantar torres eólicas e como são executadas. Assim, foi possível concluir que os sistemas de fixação das torres são variados e não usam apenas uma metodologia e modelo de fundação.

PALAVRAS-CHAVE: Parque Eólico, Onshore, Fundação.

ABSTRACT: Wind energy is increasingly present in buildings, this sustainable and clean energy needs parks with this generation system. These large installations can be offshore or onshore, but each situation calls for a major engineering project, transport logistics, and installation. In order for these huge pieces to be fixed to the ground, a geotechnical study is necessary so that their foundations are the most coherent and efficient. Wind turbines can count on the most cheerful solutions for their installations on the grounds of wind farms. Because of this, the objective of this article is to present the results of a bibliographical research on the main types of foundations used for the implantation of onshore wind turbines (terrestrial). Looking to know the main types of structures to deploy wind towers and how they are executed. Thus, it was possible to conclude that the fastening systems of the towers are varied and do not use only one methodology and foundation model.

KEYWORDS: Wind Farm, Onshore, Foundation.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

Quando o assunto é a produção de energia predominante no território brasileiro, esta baseia-se na energia resultante das hidrelétricas. Segundo o governo federal, ela contribui em (63,8%) de toda matriz energética do país, seguida da energia eólica (9,3%), biomassa e biogás (8,9%) e energia solar (1,4%), e em menor concentração outras fontes como a nuclear, se destacando internacionalmente por caracterizar grande parte da matriz energética em fontes renováveis.

Entretanto, a dependência de mais da metade da matriz energética brasileira destinada apenas a um tipo de produção, a hidroelétrica, torna vulnerável o fornecimento de energia devido a um risco de déficit ocasionado pela dependência de fatores climáticos como, a ocorrência de chuvas e temperatura.

No Brasil, os primeiros projetos de parques eólicos se deram no início da década de 1990, como proposta para suprir as necessidades de regiões onde a principal fonte de energia, vinda das usinas hidrelétricas, não atendia. Tornando-se bem frequente na região norte e nordeste, além de ser uma fonte de energia limpa e isenta dos riscos de déficit energético provocados pela seca, dependendo fundamentalmente das forças dos ventos.

Atualmente, no cenário brasileiro de matriz energética a fonte de energia eólica se encontra como a segunda maior do Brasil (SAMPAIO et al., 2021), tomando cada vez mais espaço, contando com cerca de 890 parques eólicos. Devido ao grande potencial e espaço que vem tomando a produção de energia eólica, principalmente em sua maioria dos parques eólicos onshore, ou seja, localizados em terra, torna-se cada vez mais necessário o planejamento dos tipos das fundações que serão implantadas nos aerogeradores. Isso se deve ao fato de serem estruturas de grandes dimensões, visando evitar acidentes como rupturas gerais associadas a uma grande excentricidade.

Figura 1: Ruptura da fundação de um aerogerador.



Fonte: Prontubeam, 2016.

Com base nesse critério torna-se indispensável a realização de uma investigação geotécnica avançada e execução dos ensaios adequados tanto *in situ* como em laboratório para a instalação dos aerogeradores de modo que a prioridade seja prevalecer a segurança e o bom desempenho dos aerogeradores, evitando acidentes que comprometam a integridade estrutural do parque eólico.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2 Realização dos estudos geotécnicos previamente planejados

De acordo com Braja Das (2012), o solo que se encontra depositado de forma natural não são solos homogêneos, elásticos nem isotrópicos. Essas camadas de solos, em distâncias horizontais de 15 a 30 m, apresentam variações. Para realizar obras e projetos de fundações, é de extrema importância conhecer as estratificações de um solo em determinado local onde se deseja implantar uma estrutura. Deve-se realizar ensaios laboratoriais e caracterizar as amostras obtidas nas várias profundidades. Realizar ensaios de campo *in situ*, como o de SPT, palheta, CPT, CPTu, entre outros. Também é crucial a determinação do nível do lençol freático.

Figura 2: Realização ensaio de SPT.



Fonte: Sondagem e monitoramento, 2017.

3 Principais métodos de transmissão de esforços da torre para a fundação

Os aerogeradores são constituídos por grandes estruturas, sendo sustentados por uma base que é responsável por fazer a transferência de todo carregamento ao solo, ou seja, as fundações são elementos estruturais e de extrema importância, que são feitas de acordo com a necessidade de transmissão de cargas ao solo proveniente da estrutura a ser executada.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Diferente da maioria das fundações dimensionadas ao olhar da construção civil e ambiente urbano, as fundações de aerogeradores têm esforços verticais significativamente menores se comparados aos altos momentos fletores, ocasionados pela ação do vento sobre a torre e as pás dos aerogeradores. Segundo Teixeira (2022), para a transmissão dessas cargas gerada pela torre para a fundação são utilizados dois métodos, o método Tower Foundation Section (TFS), referindo-se ao anel de aço como interface entre torre e fundação (TFS) e o anchor cage (AC).

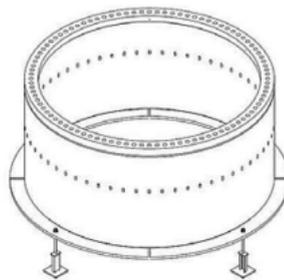
Para a utilização do método TFS para a transmissão das cargas, antes de iniciar a instalação da torre, a fundação de concreto é construída. A seção inferior da torre, que é onde o método TFS será aplicado, é inserida na fundação de concreto. Isso é geralmente feito quando o concreto da fundação ainda está fresco e maleável para permitir uma conexão sólida. Um anel de aço é colocado dentro da seção da torre que está inserida na fundação. Esse anel de aço é uma parte crítica do método TFS, pois desempenha o papel de reforçar a conexão entre a torre e a fundação.

O anel de aço tem orifícios estrategicamente localizados. Esses orifícios são projetados para permitir a passagem de barras de aço, que são conhecidas como vergalhões. Esses vergalhões vêm da parte superior da fundação e são essenciais para fornecer reforço adicional à estrutura. Após a inserção do anel de aço e da seção da torre na fundação, o concreto de regularização é aplicado. Esse concreto é derramado ao redor da seção da torre e do anel de aço. Ele preenche o espaço entre a seção da torre e a fundação, incorporando o anel de aço no processo.

Isso cria uma conexão monolítica, onde o concreto endurecido envolve o anel de aço. O anel de aço é projetado com duas flanges. A flange na região inferior é em forma de 'T' e é mergulhada na fundação de concreto. Essa flange em forma de 'T' ajuda a ancorar a torre na fundação, proporcionando resistência à tração e compressão. A flange na região superior é em forma de 'L' e é projetada para se conectar à torre. Ela fornece uma ligação sólida entre a torre e a estrutura da fundação. As flanges em forma de 'T' e 'L' desempenham um papel crucial na transmissão das forças geradas pela torre para a fundação.

As forças de tração (forças que puxam a estrutura para cima) e as forças de compressão (forças que empurram a estrutura para baixo) são absorvidas e distribuídas através dessa conexão. A técnica TFS é usada em estruturas que precisam de uma ligação sólida e estável entre a torre e sua fundação para garantir a segurança e estabilidade da estrutura. Ela é frequentemente usada em torres de telecomunicações, aerogeradores e outras estruturas que enfrentam forças significativas de vento e outras cargas.

Figura 3: Ligação entre a torre de aço e a fundação de betão usando a solução TFS.



fonte: Teixeira, 2022

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



O método "Anchor Cage" é uma técnica que se concentra nas âncoras que são usadas para fixar as torres dos aerogeradores no solo. As âncoras são cravadas no solo para fornecer estabilidade à torre. O processo geralmente envolve a seleção e projeto das âncoras onde os engenheiros selecionam o tipo de âncoras apropriadas com base nas condições do solo e do projeto.

Isso pode incluir âncoras de parafuso, estacas de ancoragem ou outros tipos. As âncoras são cravadas no solo até uma profundidade adequada, garantindo que elas atinjam camadas de solo que ofereçam a resistência necessária para suportar a torre. Uma gaiola de ancoragem é uma estrutura de suporte que conecta as âncoras à base da torre. A gaiola ajuda a distribuir as cargas da torre de maneira uniforme nas âncoras. Uma vez que as âncoras e a gaiola de ancoragem estejam instaladas, o concreto é derramado em torno delas para formar a base da torre.

Figura 4: Método Anchor Cage



Fonte: CTE WIND International Civil Structural Engineering.

4. Tipificação de fundações para aerogeradores

As fundações para os aerogeradores de parques onshore possuem dois tipos: superficiais e as profundas, sendo o primeiro tipo dependente apenas sobre a capacidade de suporte na cota de assentamento, e o segundo necessita de um estaqueamento, visto que, as condições do solo não permitem o assentamento de uma fundação rasa. A fundação do tipo superficial é a solução sempre mais buscada, por se tratar de um método economicamente mais vantajoso em termos de custo e tempo de execução, pois não é necessário estaqueamentos no bloco de fundação e de grandes equipamentos especializados para a execução da estrutura.

4.1 Fundações superficiais (rasas)

Segundo a NBR 6122, fundações superficiais são elementos de fundação em que a carga é transmitida ao terreno, predominantemente pelas pressões distribuídas sob a base de fundação, e em que a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





A transmissão das cargas acontecem através da base do elemento estrutural da fundação, leva em conta somente o apoio da fundação o solo, são desprezadas qualquer outra forma de transmissão de carga da estrutura para a fundação, Brito (1987). São alguns exemplos de fundações superficiais: sapatas, radiers, blocos e alicerces, entre outros.

4.1.1 Fundações superficiais (sapatas) - ancoradas

A fundação ancorada é utilizada principalmente quando se encontra uma camada de rocha em uma parte mais superficial do terreno, possibilitando fundações com diâmetros menores devido à resistência ocasionada pelas rochas e menores profundidades, o que permite economia em material. As fundações ancoradas tem como princípio o envolvimento de tirantes em seu dimensionamento, neste caso, inseridos em uma camada rochosa, onde os tirantes são tensionados, ocasionando um esforço de tração que comprime a fundação com o solo, dando resistência ao terreno. Estes são projetados para resistir a cargas laterais e verticais garantindo estabilidade a estrutura.

4.1.2 Fundações superficiais (sapatas) - gravidade

O funcionamento básico de uma fundação superficial por gravidade baseia-se no princípio da distribuição de carga. Ao projetar a fundação, são considerados fatores como o tipo de solo, o peso da estrutura, as cargas atuantes e a distribuição das mesmas. A partir dessas informações, dimensiona-se o elemento de fundação de maneira que ele seja capaz de suportar as cargas sem causar recalques excessivos no solo. No contexto de aerogeradores onshore, a fundação por gravidade é uma das opções disponíveis para sustentar a torre e a turbina, garantindo sua estabilidade e operação segura.

Segundo Teixeira (2022), a fundação gravítica (sapata), vista na Figura 4, é a mais utilizada em aerogeradores onshore, apresentando vantagem uma vez que estas se opõem aos momentos de derrube através do seu próprio peso. As fundações de base gravítica normalmente contêm um pedestal cilíndrico assentado numa base de grandes dimensões constituídas por betão armado com a forma octogonal ou cilíndrica. Neste caso, é necessário recorrer à escavação apenas do solo superficial sem capacidade de suporte sendo a sua construção um processo sem grandes dificuldades. Uma observação sobre o aterro é que seu peso é considerado como uma ação estabilizadora.

Além do material utilizado, outras características importantes incluem a geometria da fundação (área e espessura), a distribuição de carga ao longo da fundação e a relação entre a carga aplicada e o peso da fundação. A interação solo-estrutura desempenha um papel fundamental na eficácia da fundação, pois influencia diretamente a capacidade de carga e a estabilidade do sistema.

A escolha do tipo de fundação para um aerogerador depende de vários fatores, como as condições geológicas e do solo, o tamanho da turbina, os requisitos de carregamento, os custos e as considerações ambientais. As fundações superficiais por gravidade são uma opção viável em áreas onde o solo apresenta características favoráveis, como resistência suficiente para suportar o peso do aerogerador e da fundação, além de baixo risco de instabilidade.

4.2 Fundações profundas

Quando as camadas de solos não possuem boas características para que seja implantada uma fundação do tipo superficial, se recorre às fundações profundas, também chamadas de

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



profundas. Esse tipo de estrutura se dá geralmente por estacas, onde as cargas da edificação são transmitidas até o estrato mais resistente e/ou menos deformável por efeito do atrito lateral do elemento com o solo e por efeito da ponta.

Esse tipo de fundação acontece de forma profunda, devido às dimensões das peças estruturais, Brito (1987). São alguns exemplos de fundações profundas: estacas de aço, estacas de concreto pré-moldadas, estacas de concreto moldadas *in loco* (Franki, Strauss, raiz), entre outras.

4.2.1 Fundações profunda - estaqueada

Teixeira (2022) classificam o tipo de fundação profunda para uso em aerogeradores onshore em função do tipo de solo que se encontra à torre, de modo que o desempenho dos aerogeradores e sua estabilidade liga-se diretamente a este fator.

A primeira classe são as estacas construídas sem a extração do terreno, a mesma deverá comprimir o solo envolto, deslocando-o e aumentando as tensões horizontais, modificando as características do solo e criando um espaço no terreno. Comumente esse método é utilizado quando o tipo de fundação refere-se a estacas cravadas pré-fabricadas ou moldadas *in-situ*. A segunda classe de estaca refere-se a estacas construídas após furo e extração do terreno, entrando nesta classe estacas moldadas com ou sem tubo moldador e estacas com trado contínuo com injeção de betão.

Para Gomes (2016), as vantagens das estacas construídas sem extração do terreno são: rapidez, controle de qualidade da estaca, posição do nível freático não afetar o processo construtivo, possibilidade do aumento do grau de compactação de camadas granulares do maciço de fundação, as técnicas de cravação são pouco dependentes das condições *in situ* e para a segunda classe, qual envolve furo e extração do terreno, as vantagens consideráveis são: a grande variedade de diâmetros, não existir risco de levantamento do terreno, possibilidade de recolha de amostras dos solos constituintes do maciço de fundação e grandes profundidades atingidas.

Figura 5: Fundação do tipo profunda para aerogeradores



Fonte: Calter, 2023.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





5 Considerações finais

É fundamental reconhecer que o cenário das energias renováveis está em constante evolução, com avanços tecnológicos e inovações na área de fundações. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de soluções mais eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis são cruciais para o sucesso a longo prazo dos parques eólicos. O presente estudo ofereceu uma visão abrangente das diversas fundações utilizadas para sustentar os aerogeradores em parques eólicos onshore. A variedade de condições geotécnicas, topográficas e ambientais em diferentes locais exige abordagens adaptativas na escolha e projeto das fundações. Com base em dados geotécnicos e considerações técnicas, as opções incluem fundações de sapata, estacas, gravidade, entre outras. A seleção da fundação adequada é um processo complexo que requer uma análise minuciosa das características do solo, das cargas impostas pela turbina e dos aspectos econômicos. Além disso, as fundações devem ser projetadas para garantir estabilidade, durabilidade e segurança operacional ao longo da vida útil da instalação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, p. 2. 1996.

BOHME, Gustavo Silveira et al. *Análise das etapas de desenvolvimento de projetos de energia eólica—estudo de caso*. 2016.

BRITO, José Luis Wey de. *Fundações do edifício*. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 1987.

DAS, Braja. M. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. São Paulo: Thomson, 2012.

Fonte de energias renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira. Governo Federal. Serviços e informações do Brasil. Brasília. 21 de jan. de 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

GOMES, P.S.M. Dimensionamento de fundações por estacas para aerogeradores. 2016. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

MALHOTRA, Sanjeev. (2007). *Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundations*. In *Wind Turbines*, 231 – 235, Parsons Brinckerhoff, United States of America.

MANUELAS, Felipe Álvarez. *Overtuned footing of a wind turbine*. Prontubeam, 2016. Disponível em: <<https://prontubeam.com/Detailed-civil-engineering-in-the-network/95>>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.

NARDELLI, A.; FUTAI, M.M. Assessment of Brazilian onshore wind turbines foundations. *Rev. IBRACON Estrut. Mater*, vol. 15, no. 5, e15508, February, 2022.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



04 a 07
dezembro/2023
São Paulo



Projeto de fundação eólica calter. Calter, 2023. Disponível em:
<<https://www.calterdobrasil.com.br/atuacao-detalhes/6/energia>>. Acesso em: 20 de outubro de 2024

SAMPAIO, Keila Regina Alves; BATISTA, Valmir. *O atual cenário da produção de energia eólica no Brasil: Uma revisão de literatura*. Research, Society and Development, v. 10, n. 1, p. e57710112107-e57710112107, 2021.

Sondagem à percussão (SPT). 2017. Disponível em:
<<https://www.sfsondagens.com.br/servicos/sondagem-a-percussao-spt/>>. Acesso em: 12 ago.2023.

TEIXEIRA, Diana Isabel Varejão. *Soluções de fundação de aerogeradores"onshore"*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto (FEUP), 2022.

The bolt Cage design. 2020. Disponível em:
<https://www.cte-wind.com/solution/anchor-cage-design/>. Acesso em 12 de ago. 2023.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Realização:

Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br