

Fundações para Aerogeradores

Ezequiel Breno Rodrigues Reis

UFMG, Belo Horizonte, Brasil, ezequielbreno@yahoo.com.br

Crysthian Purcino Bernardes Azevedo

UFMG, Belo Horizonte, Brasil, purcino@etg.ufmg.br

RESUMO: As constantes crises de água no Brasil, que reduzem o nível nas barragens hidrelétricas, causando uma grave escassez de energia, reafirmam a necessidade do país em continuar investindo na diversificação de suas fontes energéticas. O país dispõe da hidroeletricidade para mais de $\frac{3}{4}$ de sua matriz energética, mas as autoridades estão incentivando as energias de biomassa e eólica como alternativas primárias. Diante disso, o setor de energia eólica tem apresentado constante crescimento. Um problema associado à implantação de usinas eólicas diz respeito ao projeto de fundação, pois não é comum encontramos na bibliografia uma metodologia de cálculo para fundação de aerogeradores. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar um método de cálculo para esse tipo de estrutura, tendo em vista a necessidade de estudos na área em contrapartida à expansão da energia eólica. Para isso será adotado uma fundação superficial assente em solo arenoso. Também será discutido a respeito das investigações geológico-geotécnicas mais comuns nos projetos dessas estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Aerogeradores, Fundações, Método de Cálculo, Dimensionamentos, Sapatas

1 INTRODUÇÃO

A situação atual do setor de energia elétrica vem trazendo investimentos para as fontes alternativas. Devido à crise hídrica, investimentos no setor eólico se tornam cada vez mais em destaque.

O Brasil é um dos países com maior potencial eólico do mundo, e nos últimos anos houve um grande aumento em investimento na geração de energia pelos ventos, que é limpa, renovável e independente de condições climáticas cíclicas, como épocas de chuva.

Um problema associado à implantação de usinas eólicas diz respeito ao projeto de fundação, pois não é comum encontramos na bibliografia uma metodologia de cálculo para fundação de aerogeradores.

Fundações de construção civil são estruturas realizadas em obras com a finalidade de transmitir as cargas de uma edificação para uma camada resistente do solo. Em geral, são

utilizadas várias fundações seguidas para esse fim, levando em consideração a carga que recebem e o tipo de solo onde vão ser construídas.

Um projeto convencional de fundação deve garantir a segurança, quanto à ruptura, do elemento estrutural; o solo de fundação deverá apresentar segurança quanto à ruptura e os recalques apresentados devem ser compatíveis com os movimentos permitidos pela estrutura.

Este trabalho apresentará uma metodologia de cálculo para fundação de aerogeradores, tendo em vista a necessidade de estudos na área em contrapartida à expansão desse tipo de energia.

2 ENERGIA EÓLICA

A demanda energética mundial e a necessidade de reduzir as emissões de carbono, combinadas com as limitações dos recursos energéticos não

renováveis, levaram a um incentivo em outras fontes energéticas, principalmente conhecidas como “limpas”. Uma dessas fontes consiste no aproveitamento do recurso eólico.

A energia eólica (EE) é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento, ou seja, no vento. É possível se aproveitar esta energia de forma que haja uma conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o auxílio de turbinas eólicas (aerogeradores) para a geração de eletricidade (ANEEL, 2008).

Suas vantagens são:

- É uma tecnologia inesgotável;
- Não emite gases poluentes e não gera resíduos;
- Os parques eólicos podem ser utilizados também para outros meios, como a agricultura e a criação de gado;
- É uma das fontes mais baratas de energia, podendo competir em termos de rentabilidade com as fontes de energia tradicionais;
- Não requer uma manutenção frequente, uma vez que sua revisão é semestral;
- Em menos de seis meses o aerogerador recupera a energia que foi gasta para ser fabricado.

Algumas desvantagens são:

- Como é preciso um fenômeno da natureza para funcionar, às vezes a energia não é gerada em momentos necessários, o que torna difícil a integração da produção dessa tecnologia;
- Os parques eólicos geram um grande impacto visual devido aos aerogeradores;
- Causa impacto sonoro, pois o vento bate nas pás produzindo um ruído constante de aproximadamente 43 decibéis, tornando necessário que as habitações mais próximas estejam no mínimo a 200 metros de distância;

- Pode afetar o comportamento habitual de migração das aves.

Desde a criação do Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), o governo federal adotou diversas medidas orientadas a aumentar a participação das fontes alternativas renováveis complementares na produção nacional de eletricidade igualmente dividida entre as Tecnologias de Biomassa, Energia Eólica e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN).

3 AEROGERADORES

Conforme mencionado na definição da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de 2008, para que haja conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, utilizam-se turbinas eólicas, chamados de aerogeradores.

Existem inúmeros modelos desses equipamentos, podendo existir turbinas eólicas de eixo vertical ou horizontal, com alturas de torres e quantidade de pás variadas.

No presente trabalho, utilizou-se um aerogerador de eixo horizontal e turbinas de três pás, que é o tipo mais comumente usado.

4 FUNDAÇÕES PARA AEROGERADORES

Denomina-se fundação o ou os elementos de uma construção que transmitem as cargas da mesma ao subsolo. Estas são classificadas como Fundações Diretas ou Fundações Profundas.

Uma fundação é dita direta ou superficial quando se apoia em camada de solo em pequena profundidade. Segundo a NBR 6122 uma fundação superficial é aquela cuja profundidade de apoio não excede a duas vezes sua menor dimensão (largura).

Uma fundação é dita profunda quando seu apoio é provido por camadas de solo em maiores profundidades.

A escolha do tipo adequado de fundação depende de vários fatores como, por exemplo: a intensidade das cargas a se transmitir, o tipo e

estratigrafia do solo, o nível d'água e o processo de execução.



Figura 1. Fundação superficial para aerogeradores.



Figura 2. Fundação superficial para aerogeradores.

Eventos dinâmicos em geotecnia estão, em geral, relacionados a fundações de máquinas, propagação de ondas no solo e cravação de estacas (Martins, 1990). Para Moura et al. (2004) máquinas como turbinas, compressores, motores, geradores e, até mesmo, pequenas máquinas usadas em fábricas podem provocar vibrações importantes nas estruturas das construções. Neste contexto, encontra-se a fundação de aerogeradores.

Moura, A.S. destaca que inicialmente, os ventos da região e o aerogerador estudado são caracterizados. Para estimar os esforços atuantes nas fundações do aerogerador realiza-se, em campo, um monitoramento estrutural e um modelo reduzido é ensaiado em túnel de vento. O solo de apoio das fundações é caracterizado, em laboratório, por meio de ensaios básicos de caracterização, de ensaios endométricos e de cisalhamento direto. Em

campo, realizam-se sondagens à percussão, com medida de energia e torque, ensaios pressiométricos, entre outros. Os tipos de solos mais comuns nas bases de aerogeradores são arenosos e siltosos, mais constantes nas regiões costeiras, onde se localizam a maioria desses equipamentos.

Com base nas cargas estáticas e dinâmicas oriundas, respectivamente, do peso próprio e da operação das máquinas e, também, nas características do solo na localização de cada torre, determinam-se as especificações executivas para as fundações.

5 INVESTIGAÇÕES PARA FUNDAÇÕES DE AEROGERADORES

São de grande importância as investigações geológico-geotécnicas dos solos. Seu estudo consiste na caracterização da geologia e estrutura dos solos e rochas de maneira a se obter o conhecimento de suas influências nas obras de engenharia. Através dessas investigações se conhece a estratigrafia, nível de água e demais parâmetros de resistência (Fernandes et. al., 2011, p. 91).

Existem vários tipos de ensaios para se fazer essas investigações, ao se optar por um deles, algumas considerações devem ser tomadas, tais como: aspectos de custos; nível d'água; características das obras e as condicionantes geológicas geotécnicas.

5.1 Objetivos das Investigações

Ainda segundo Fernandes et. al. (2014, p. 91), os ensaios de campo tem como finalidade:

- Determinação da extensão, profundidade e espessura de cada horizonte de solo dentro de uma determinada profundidade que vai depender da dimensão e natureza da estrutura, além de uma descrição do solo, que inclua a sua compacidade se o solo não for coesivo e estado de consistência se o solo for coesivo.
- Profundidade da superfície da rocha e sua classificação, incluindo informações

sobre: extensão, profundidade e espessura de cada estrato rochoso, direção, mergulho e espaçamento de juntas e planos de acamamento, presença de zonas de falhas e o estado de alteração e decomposição.

- Informações sobre a ocorrência de água no subsolo: profundidade do lençol freático e suas variações, lençóis artesianos ou empoleirados.
- Propriedades de engenharia dos solos e rochas "in situ", tais como, compressibilidade, resistência ao cisalhamento e permeabilidade.

5.2 Investigações geológico-geotécnicas em fundações para Aerogeradores

As dificuldades na amostragem de solos indeformados em profundidade são bastante conhecidas e apontam para a utilização de ensaios de campo, preferencialmente utilizando técnicas que permitam a determinação em campo do comportamento tensão-deformação do solo e cujos resultados possam ser interpretados racionalmente através de métodos analíticos ou numéricos.

Os ensaios de campo apresentam a vantagem de que as propriedades medidas refletem os efeitos complexos provenientes do estado de tensões e das condições químicas, térmicas e estruturais existentes no local (Almeida, 1997).

Os tipos de solos mais comuns nas bases dos aerogeradores são os solos arenosos e siltosos, típicos das regiões costeiras, onde se localizam a maioria dessas estruturas. Estruturas estas, que transferem ao solo cargas estáticas e dinâmicas.



Figura 3. Ensaio SPT no solo de fundação para aerogerador.

6 CÁLCULO DE FUNDAÇÃO PARA AEROGERADOR

A maioria dos projetos de fundações de torres eólicas empregados no Brasil são desenvolvidos por empresas estrangeiras. Portanto, outras normas como o EUROCODE e DIN (Alemanha) são empregadas na elaboração desses projetos, algumas vezes apresentando grandes diferenças em relação à ABNT. Assim, é necessário estabelecer uma compatibilização entre as condições e normas adotadas no exterior para as condições de obra e normas brasileiras. O presente trabalho tratará dos dimensionamentos geométrico e geotécnico de fundações para aerogeradores, baseado em normas brasileiras. O dimensionamento estrutural não será objeto de estudo.

Como citado anteriormente, fundação é o elemento de uma construção que transmite as cargas da mesma ao subsolo. De acordo com Velloso (2004, p.13), os elementos necessários para o desenvolvimento de um projeto de fundações são:

- Topografia da área;
- Dados geológico-geotécnicos através de investigações do subsolo;
- Dados da estrutura a construir e suas cargas;
- Dados sobre construções vizinhas.

O mesmo autor define os requisitos aos quais um projeto de fundações deverá atender, são eles:

- Segurança adequada ao colapso do solo de fundação ou estabilidade externa;
- Segurança adequada ao colapso dos elementos estruturais ou estabilidade interna;
- Deformações aceitáveis sob as condições de trabalho.

Segundo Velloso (2004, p.23) toda fundação sofre deslocamentos verticais (recalques), horizontais e rotacionais. Esses deslocamentos dependem do solo e da estrutura. Quando os valores desses deslocamentos ultrapassam certos limites, poder-se-á chegar ao colapso da

estrutura suportada devido ao surgimento de esforços para os quais ela não está dimensionada.

Em se tratando do cálculo para fundações de aerogeradores Moura (2007) destaca que os ventos da região e o aerogerador estudado devem ser caracterizados como etapa inicial da fase de cálculo. Para estimar os esforços atuantes nas fundações do aerogerador devem ser realizados monitoramento estrutural em campo e um ensaio de modelo reduzido em túnel de vento. O solo de apoio das fundações é caracterizado, em laboratório, por meio de ensaios básicos de caracterização, de ensaios endométricos e de cisalhamento direto. Em campo, realizam-se sondagens à percussão, com medida de energia e torque, ensaios pressiométricos, entre outros.

Os tipos de solos mais comuns nas bases dos aerogeradores são os solos arenosos e siltosos, típicos das regiões costeiras, onde se localizam a maioria dessas estruturas.

Assim, com base nas cargas estáticas e dinâmicas oriundas, respectivamente, do peso próprio e da operação das máquinas e, também, nas características do solo na localização de cada torre, determinam-se as especificações executivas para as fundações e o tipo de fundação mais adequado.

7 ESTUDO DE CASO

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma planilha de cálculo para realizar os dimensionamentos geométrico e geotécnico de fundação para aerogerador, e verificar se estes atendem aos requisitos estabelecidos pela norma. A estrutura, suas cargas e os parâmetros do solo adotados serão representativos de situações reais.

Para implantação de um parque eólico, inicialmente realizam-se estudos de incidência e intensidade de ventos na região, sondagens preliminares e verificação de viabilidade econômica e técnica. Após autorização ambiental tem-se início ao empreendimento, com elaboração e detalhamento dos projetos, contratação de empresas e funcionários para

execução das obras e planejamento da logística de materiais e equipamentos.

Após essa etapa realizam-se as investigações geológico-geotécnicas, seguido do planejamento da obra e dos trabalhos preliminares como, terraplenagem, drenagem, pavimentação e escavações.

Finalizado essa etapa inicial e de posse dos resultados das investigações geológico-geotécnicas, defini-se o tipo de fundação a ser realizada. Para o presente trabalho optou por fundação superficial em sapatas isoladas.

7.1 Resultados Apresentados

Foi desenvolvida uma planilha no Excel para se fazer os cálculos necessários para os dimensionamentos geotécnico e geométrico de uma fundação em sapata para o aerogerador adotado.

Os resultados são apresentados abaixo.

- Volume da Sapata (m³): 537,05
- Peso do Concreto (KN): 13.426,20
- Volume de Solo (m³): 139,5
- Peso do Solo (KN): 2.650,5
- Força Vertical total (KN): 16.816,00
- Capacidade de carga:

$$Q_u = c.N_c.Sc.dc.ic + q.N_q.S_q.dq.iq + 0,5.\gamma.B.N_\gamma.S_\gamma.d_\gamma.i_\gamma \quad (1)$$

Tabela 1. Parâmetros do solo adotado.

ϕ°	N_c	N_q	N_γ
35	46,38	33,60	34,50

Tabela 2. Fatores de forma.

Fatores de forma	
S_c	1,84
S_q	1,81
S_γ	0,54

Tabela 3. Fatores de inclinação.

Fatores de Inclinação	
i_c	-0,287
i_q	0,962
i_y	0,947

Tabela 4. Fatores de profundidade.

Fatores de Profundidade ($D \leq B$)	
D_c	1,06
D_q	1,04
D_y	1,00

Tabela 5. Momento do esforço horizontal do aerogerador.

Momento Esforço Horizontal	
M_x (KN.m)	86,0
M_y (KN.m)	654

Tabela 6. Excentricidade da carga.

Excentricidade	
$e_x = e_B$	0,169
$e_y = e_L$	1,283

Tabela 7. Correção das dimensões.

Correção	
$B_{corrigido}$ (m)	16,66
$L_{corrigido}$ (m)	14,43
A_f (m ²)	240,49

Tabela 8. Sobrecarga calculada.

$Sobrecarga$ (KN/m ²)	47,5
-----------------------------------	------

Tabela 9. Capacidade de carga calculada.

$Capacidade\ de\ Carga - q_u$ (KN/m ²)	5664,36
--	---------

7.2 Verificações Necessárias

As seguintes verificações devem ser analisadas

- Compatibilização do esforço horizontal:

Compatibilização do H (KN)		
261,6	≤	7172,63
34,4	≤	7172,63

- Recalque gerado

$Recalque$ (mm)	21,7
-----------------	------

- Tensão admissível

q_{adm} (KN/m ²)	112,60
--------------------------------	--------

- Excentricidades

$e_x = e_B$	0,169	<	2,777
-------------	-------	---	-------

$e_y = e_L$	1,283	<	2,406
-------------	-------	---	-------

- Pressões máxima, média e mínima

$P_{máx}$ (KN/m ²)	111,48	<	146,38
--------------------------------	--------	---	--------

P_{med} (KN/m ²)	69,92	<	112,60
--------------------------------	-------	---	--------

P_{min} (KN/m ²)	28,37
--------------------------------	-------

8 CONCLUSÕES

O grande crescimento do setor da energia eólica é uma realidade brasileira, e isso deve ser incentivado, devido ao Brasil possuir um forte potencial eólico, tanto nas regiões costeiras quanto nas chapadas no interior do país. Além dessa energia ser limpa, renovável e independente da frequência de precipitações, o que a torna ainda mais importante diante da atual crise hídrica, na qual a disponibilidade de água esta cada vez menor.

O setor de energia no Brasil não deve ser dependente de usinas hidrelétricas somente, não sendo possível o uso único de energia eólica, uma boa alternativa seria o trabalho conjunto dessas duas fontes energéticas, pois no Brasil a

predominância de ventos é justamente quando se tem menores precipitações.

A maioria dos projetos de fundações de torres eólicas empregados no Brasil são desenvolvidos por empresas estrangeiras. Assim, as empresas executoras desse tipo de serviço estabelecem uma compatibilização entre as condições e normas adotadas no exterior para as condições de obra e normas brasileiras.

O presente trabalho tratou dos dimensionamentos geométrico e geotécnico de fundações para aerogeradores, baseado nas normas brasileiras. A planilha de cálculo desenvolvida para fundações superficiais em sapatas, mostrou-se satisfatória, uma vez que os dimensionamentos e requisitos atenderam as normas e especificações técnicas.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, U. R. *Dimensionamento de Fundações Profundas*. São Paulo: Blucher, 1989. 169 p
- ALONSO, U. R. *Exercícios de Fundações*. 2º Edição. São Paulo: Blucher, 2010. 51 p.
- ALVA, G. M. S. *Projeto Estrutural de Sapatas*. Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- ANEEL, *Atlas de Energia Eólica*, 2008. Disponível em: < [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)>. Acesso em: 11/09/2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010). NBR 6122/10: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6489/84: Prova de Carga Direta Sobre Terreno de Fundação. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). NBR 6484/01: Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- BARROS, V. C. A.; TRAJANO R. C. *Estudo Preliminar de Parque Gerador Eólico*. Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- BERTUZZI, P. J. *Estudos de Aspectos de Engenharia Para Implantação de Torres Eólicas*. Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55º, 2013. Gramado. *Qualidade de Torres de Concreto para o Parque Eólico de Casa Nova*. Gramado. 2013. 18 p.
- DAS, B. M. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6ª Edição. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 562 p.
- GOUVEIA, Yesmary Carolina da. *Construção de um Parque Eólico Industrial*. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.
- HACHICH, W.; FALCONI, F.F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIAYAMA, S. *Fundações: Teoria e Prática*. 2ª Edição. São Paulo: Pini, 1998. 751 p.
- HUMMEL, Thierry. *Projetos em Fundações de Aerogeradores*. Rio Grande do Sul, 2008. Disponível em: < http://www.pucrs.br/ce-eolica/download/ciclo_palestras_2008_Thierry_Hummel.pdf>. Acesso em: 17/09/2015.
- Investigações Geotécnicas e de Campo*. Fortaleza, 2009. Disponível em: <<http://www.lmsp.ufc.br/arquivos/graduacao/fundacao/apostila/02.pdf>>. Acesso em: 11/09/2015.
- LOPES, G. M. *Aplicação de Monoestacas Cravadas em Turbinas Eólicas Offshore*. 2013. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2013.
- MATOS FERNANDES, M. *Mecânica dos Solos: introdução à Engenharia Geotécnica*. 1ª Edição. Porto, Portugal: FEUP, 2014. 593 p.
- MOURA, A. S. *Avaliação de Metodologias de Projeto de Fundações Superficiais de Aerogeradores Assentes em Areia de Duna*. 2007. 323 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília.
- OLIVEIRA, Alex Duarte de. ***Fundações Superficiais em Aerogeradores: Requisitos de projeto e parâmetros dinâmicos do solo***, 2010. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- Setor de Energia Eólica. Portal Eólica. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/nosso-setor.html>>. Acesso em: 05/09/2015.
- SILVA, Bruno Samuel e. *A Engenharia Civil e a Produção Industrial de Energia Eólica*. 2013. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.
- STAUT, F. *O Processo de Implantação de Parques Eólicos no Nordeste Brasileiro*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica da UFBA, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.
- PINTO, M. G. *Elemento de Concreto de Grandes Dimensões: Estudo de caso parque eólico Osório/RS – bloco de fundação*. Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 226p.