

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Otimização do Diâmetro da Base da Fundação de uma Torre de Aerogerador Considerando Parâmetros de Resistência de Areias Compactas

Iálysson da Silva Medeiros

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, UFPE, Caruaru, Brasil, ialysson.medeiros@ufpe.br

Martha Maria Bezerra Santos

Mestranda em Engenharia Civil, UFPE, Recife, Brasil, martha.bezerra@ufpe.br

Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

Professora Doutora em Engenharia Civil, UFPE, Caruaru, Brasil, isabelamcvbello@hotmail.com

RESUMO: Arelado ao grande desenvolvimento do setor de energia eólica, surgem alguns problemas associados aos projetos de fundações, que embora existindo estudos a respeito, existem análises que ainda não foram abordadas. Portanto, o principal objetivo deste trabalho é otimizar o diâmetro da base de uma sapata de uma torre de aerogerador construída em uma região de solos arenosos compactados. As análises são realizadas iniciando a partir das resultantes de cargas, seguindo de um pré-dimensionamento da fundação. Em seguida, serão realizadas correlações para estimar os parâmetros de resistência do solo, e por fim, realizar as verificações da estabilidade geotécnica. Os parâmetros de resistência foram divididos em 6 partes entre $N_{spt} = 30$ a 50, variando o diâmetro da fundação. Para a seção de fundação adotada, foi necessário um diâmetro ótimo inteiro de 14 m, atendendo os critérios de segurança para cargas extremas contra o deslizamento ($FS = 9,204$), tombamento ($FS = 1,801$) e capacidade de carga ($FS = 23,902$). Conclui-se, portanto, que o coeficiente de segurança contra o tombamento é o fator preponderante na otimização, pois depende do momento estabilizante da estrutura, que está relacionado com o peso e consequentemente o diâmetro.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações de torres eólicas, análise de estabilidade, otimização estrutural.

ABSTRACT: Linked to the great development of the wind energy sector, there are some problems associated with the projects of foundations, which although there are studies on the subject, there are analyzes that have not yet been addressed. Therefore, the main objective of this work is to optimize the base diameter of a base of a wind turbine tower built in a region of compacted sandy soils. The analyzes are carried out starting from the resultant loads, followed by a pre-dimensioning of the foundation. Then, correlations will be performed to estimate the soil strength parameters, and finally, carry out the verifications of geotechnical stability. The strength parameters were divided into 6 parts between $N_{spt} = 30$ to 50, varying the foundation diameter. For the adopted foundation section, an optimal entire diameter of 14 m was required, meeting the safety criteria for extreme loads against slipping ($FS = 9.204$), tipping ($FS = 1.801$) and load capacity ($FS = 23.902$). It is concluded, therefore, that the safety factor against overturning is the preponderant factor in the optimization, as it depends on the stabilizing moment of the structure, which is related to the weight and consequently the diameter.

KEYWORDS: Wind tower foundations, stability analysis, structural optimization.

1 Introdução

O desenvolvimento e a geração de energia estão no centro de questões envolvendo o desenvolvimento econômico ao longo da história da humanidade. Existe uma grande tendência para o crescimento na demanda energética mundial devido a melhoria da qualidade de vida da sociedade, aumentando a preocupação com aspectos relacionados aos planejamentos de políticas energéticas (MARTINS, GUARNIERI; PEREIRA, 2008). De acordo com Medeiros (2019), a preocupação com o meio ambiente e os esforços para a redução das



emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), permitiram analisar e buscar alternativas para que pudessem suprir as necessidades econômicas e, paralelamente, gerar menos impacto ambiental.

Levando em consideração todas as possibilidades de fontes de energias renováveis que gerem menos impactos ambientais e que não emitam gases de efeito estufa, as fontes de energia eólicas vem se destacando devido suas características em termos de geração, segurança de fornecimento e sustentabilidade ambiental (GWEC, 2018; EWEA, 2010).

Arelado ao grande desenvolvimento no setor, surgem alguns problemas associados aos projetos de fundação, pois não é comum encontrar na literatura uma metodologia de cálculo que atenda as diversidades atuais. A fundação é o elemento que conecta o aerogerador e o solo (SILVA, 2014), sendo um exemplo entre os constituintes do grupo das fundações especiais.

As fundações das torres eólicas apresentam uma série de especificidades provenientes da complexidade e magnitude das solicitações como, por exemplo, o elevado carregamento horizontal em comparação com o peso próprio da estrutura, originados da ação do vento, e esforços dinâmicos oriundos da rotação das pás para geração de energia elétrica.

Na etapa inicial da fase de cálculo para fundações de aerogeradores, deve-se realizar primeiramente a caracterização dos ventos na região e o tipo de aerogerador estudado (MOURA, 2007). Além disso, Faria e Noronha (2013) afirmam a importância na consideração das cargas atuantes e principalmente nas condições do solo no local da instalação para a escolha do tipo de fundação a ser empregada.

Os principais esforços atuantes na fundação de uma Torre de Aerogerador *onshore* são resultantes do peso próprio dos elementos constituintes, que geram uma carga vertical, e da ação do vento, gerando um carregamento horizontal. De acordo com Bertuzzi (2013), o vento incidente nas pás da turbina desenvolve uma diferença de pressão entre a parte frontal e posterior da turbina, no qual resulta em um momento fletor e uma força de cisalhamento ao longo da torre até a sua fundação, como a apresentado na Figura 1.

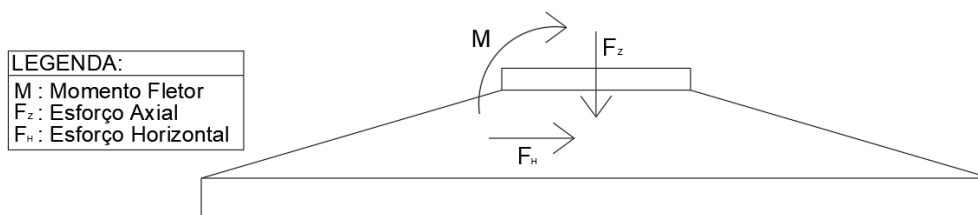


Figura 1. Esforços atuantes na Fundação de uma Torre de Aerogerador. Fonte: Autores (2021).

No intuito de suportar cargas elevadas e normalmente com excentricidade, as fundações dos aerogeradores são do tipo sapatas circulares que foram popularizadas pela distribuição uniforme das forças, independentemente da direção do vento, possuindo dimensões significativamente maiores que as sapatas de edifícios.

Embora existam alguns estudos acerca desse tema, há um vasto campo de análises que ainda não foram abordados de forma clara e satisfatória, além da falta de projetos nacionalizados no Brasil. Portanto, existe uma maior necessidade de estudos que visem um aprimoramento no desempenho dos componentes constituintes das fontes eólicas. Com isso, torna-se necessária a realização de uma série de verificações adicionais, isto é, que não fazem parte do escopo das verificações usuais das fundações de edificações mais frequentes, como as de edificações comerciais e/ou residenciais, presentes na indústria da construção civil.

Dessa forma, esta pesquisa tem como principal objetivo otimizar o diâmetro da base de uma sapata de uma torre de aerogerador construída em uma região predominantemente de solos arenosos compactados, partindo da influência do ângulo de atrito na verificação dos critérios de segurança de um projeto geotécnico. Será avaliado a variação dos fatores de segurança contra tombamento, deslizamento e capacidade de carga a partir da resistência do solo, tendo em vista a necessidade desse tipo de estudo na área para colaborar na expansão do setor.

2 Metodologia

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica acerca dos principais tipos de fundações de torres utilizadas no Brasil e são selecionados os critérios estabelecidos para o início do projeto, no qual é realizado



em etapas divididas em:

- implementação de um código computacional utilizando o *software* MathCad para cálculo do projeto;
- seleção de um modelo para a torre de aerogerador;
- pré-dimensionamento da estrutura de fundação superficial do tipo sapata circular, no qual terá seu diâmetro otimizado;
- análises das resultantes de cargas (axial, cisalhamento e momento) aplicadas na fundação;
- utilização das correlações presentes na literatura para estimar os parâmetros de resistência do solo a partir dos Índices de Resistência à Penetração (N_{SPT}) para um areia compacta, considerando a margem estabelecida por Meyerhof (1956) para a relação da compactidade de solos granulares sem coesão;
- realização das verificações da estabilidade geotécnica da fundação, para avaliar a variação dos fatores de segurança (capacidade de carga, deslizamento, tombamento), que devem respeitar os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6122 (2010).

2.1 Descrição da Torre

Foi adotado para o presente trabalho uma torre tubular de aço modelo MM92 com 80,00 m de altura (VELJKOVIC *et al.*, 2015), cuja fundação considerada é tipo sapata circular superficial. A torre consiste em três seções montadas com duas conexões intermediárias de flange-L e sua seção transversal é formada por um círculo vazado. O diâmetro externo da torre varia linearmente com a altura, tendo assim, um diâmetro inicial na base e um diâmetro final no topo distintos.

2.2 Descrição da Fundação

Nesta seção, são definidas as características geométricas relacionadas ao projeto de uma fundação superficial em sapata circular, com diâmetro variável e demais dimensões conforme a Figura 2. O projeto de fundação ilustrado abaixo será idêntico para todas as verificações, alterando apenas o seu diâmetro, foco principal deste estudo.

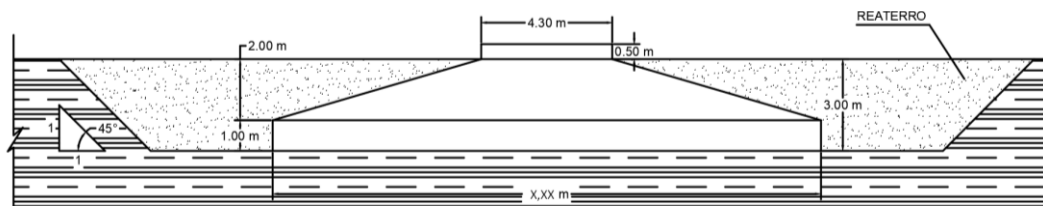


Figura 2. Geometria adotada no dimensionamento da fundação. Fonte: Autores (2021).

2.3 Parâmetros geotécnicos

Na intenção de obter resultados acerca das análises dos critérios de segurança usuais para estruturas de fundações superficiais, foi estabelecida uma variação dos fatores de segurança a partir da adoção de diferentes parâmetros de resistência definidos por meio dos Índices de Resistência à Penetração do Solo (N_{SPT}) para um areia compacta sem coesão conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Relação entre ϕ e N_{SPT} para solos granulares, sem coesão.

Compacidade	N_{SPT}	ϕ
Muito solto	< 4	< 30
Solto	4 – 10	30 – 35
Médio	10 – 30	35 – 40
Denso	30 – 50	40 – 45
Muito denso	> 50	> 45

Fonte: Adaptado de Meyerhof (1956 *apud* Lopes, 2001).



As características dos parâmetros de resistência foram divididas em 6 partes, partindo do valor mínimo até o máximo para uma areia densa ($N_{SPT} = 30$ a 50), variando o diâmetro da fundação a fim de ter como resposta um valor otimizado.

2.3.1 Ângulo de atrito

A estimativa do ângulo de atrito é realizada por meio dos métodos empíricos (Equação 1 e 2) a partir do valor de N_{SPT} .

$$\phi' \approx 15^\circ + \sqrt{24 \times N_{SPT}} \quad \text{Teixeira (1996)} \quad (1)$$

$$\phi' \approx 20^\circ + \sqrt{15,4 \times 1,2 \times N_{SPT}} \quad \text{Hatanaka e Uchida (1996)} \quad (2)$$

Considera-se para o valor do ângulo de atrito que deverá ser utilizado nas verificações, um valor inteiro próximo da média entre estas metodologias.

2.3.2 Módulo de Young

O módulo de Young (módulo de elasticidade “E”) é estimado com base no N_{SPT} utilizando as metodologias propostas por Schnaid (2000) para solos granulares (Equação 3) e Freitas, Pacheco e Danziger (2012) para a estimativa do Módulo de Young de areias sedimentares (Equação 4). Cabe ressaltar que o módulo adotado deve representar uma média dos valores de “E” calculados pelas metodologias abaixo.

$$E = 3,4 \times 1,2 \times N_{SPT} \text{ [MPa]} \quad \text{Schnaid (2000)} \quad (3)$$

$$E = 8 \times (1,2 \times N_{SPT})^{0,8} \text{ [MPa]} \quad \text{Freitas, Pacheco e Danziger (2012)} \quad (4)$$

2.3.3 Módulo de cisalhamento dinâmico

A estimativa do módulo de cisalhamento dinâmico (G) é realizada utilizando inicialmente as determinações da norma Petrobrás N-1848 (2011) (Equação 5) que determina recomendações para Projeto e Execução de fundações de máquinas. Ademais, segundo Borges (2018) este valor é multiplicado por um coeficiente de redução igual a 0,35 como critério de segurança, que vai resultar no módulo de cisalhamento dinâmico de projeto (Equação 6).

$$G_{din} = 12 \times N_{SPT}^{0,8} \text{ [MPa]} \quad \text{Petrobrás N-1848 (2011)} \quad (5)$$

$$G = G_{din} \times 0,35 \text{ [MPa]} \quad \text{Borges (2018)} \quad (6)$$

2.4 Carregamentos considerados

A composição dos esforços solicitantes que serão usados no cálculo das verificações é definida pelos seguintes carregamentos:

- peso próprio do bloco da sapata, cujo volume total varia conforme diâmetro da base é modificado, sendo considerado para o concreto armado um peso específico igual a 25 kN/m³;
- peso do solo do reaterro, que também tem volume variável a medida que o volume do bloco é alterado, em que será considerado peso específico seco igual a 19 kN/m³;
- carregamentos da torre do aerogerador e de todos os componentes da estrutura, sendo os dados da turbina fornecidos pelo próprio fabricante.

3 Resultados e discussão



3.1 Dados do aerogerador

A torre é compatível a um aerogerador no padrão SWT-2.3-93 (SIEMENS, 2018), de características especificadas na Tabela 2.

Tabela 2. Dados do aerogerador.

Tipo de parâmetro	
Altura do cubo do rotor	80,0 m – 101,0 m
Peso da nacele	82 tf
Peso do rotor	60 tf

Fonte: SIEMENS (2018).

Esses valores são utilizados para o cálculo dos valores de carregamentos que devem ser considerados na base da torre, ou seja, no elemento de fundação.

3.2 Carregamentos considerados

As avaliações extremas das cargas atuantes na torre tiveram seus resultados incluindo os fatores de segurança parciais, sendo definidas para a posição investigadas com valores de cargas atuantes (forças e momentos). Esses valores são identificados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de carregamentos considerados em projeto.

Caso normal de carregamento		Caso extremo de carregamento	
F_z	3174,7 kN	F_z	3266,2 kN
F_H	725,2 kN	F_H	873,2 kN
M	$5,498 \times 10^4$ kN.m	M	$6,781 \times 10^4$ kN.m

Fonte: Autores (2021).

em que: F_z , F_H e M são respectivamente o esforço axial causado pela turbina e seus componentes, esforço horizontal causado pela turbina, seus componentes e a ação do vento; e o momento fletor causado pela ação do vento.

No caso do esforço horizontal, a aplicação desta carga representada na Tabela 3 se dá na base da torre, entretanto deve-se calcular um momento adicional referente à transferência da força horizontal exatamente na base da sapata, considerando a altura desta (Tabela 4).

Tabela 4. Momento adicional referente à transferência da força horizontal.

Caso normal de carregamento		Caso extremo de carregamento	
M	$2,538 \times 10^3$ kN.m	M	$-3,056 \times 10^3$ kN.m

Fonte: Autores (2021).

3.3 Parâmetros de resistência

Os valores presupostos que associam o índice de resistência à penetração do solo (N_{SPT}) com o ângulo de atrito (ϕ) a ser considerado na pesquisa foram calculados usando as Equações 1 e 2, e seus valores aproximados estão identificados na Tabela 5. Os valores de N_{SPT} partiram do valor mínimo até o máximo para uma areia densa ($N_{SPT} = 30$ a 50), variando seus valores de 4 em 4.

Tabela 5. Valores estimados do ângulo de atrito associado ao índice de resistência à penetração do solo.

N_{SPT}	30	34	38	42	46	50
ϕ	41°	43°	45°	46°	47°	48°

Fonte: Autores (2021).



3.3 Otimização do diâmetro da sapata

Para a otimização do diâmetro da base da sapata, deve-se considerar as verificações de segurança quanto a estabilidade global da estrutura e tensões na base. São avaliadas a segurança em relação ao tombamento, deslizamento e capacidade de carga, no qual, devem respeitar os valores limites estabelecidos conforme a Tabela 6.

Tabela 6. Valores limites de segurança.

Tombamento	1,5
Deslizamento	1,5
Capacidade de carga	3,0

Fonte: ABNT NBR 6122 (2010).

A verificação de segurança em relação ao tombamento é de extrema importância devido ao grande valor de momento no elemento de fundação, oriundo, tanto da geometria assimétrica da turbina do aerogerador, quanto o carregamento do vento que atua ao longo da altura da torre. Essa verificação é realizada a partir do equilíbrio dos momentos em relação ao centro de excentricidade da fundação, e não leva em conta o ângulo de atrito do material do solo, ou seja, os valores são iguais independente dos valores do índice de resistência à penetração do solo.

De modo semelhante, é muito importante a análise de deslizamento a partir do equilíbrio das forças horizontais. Essa análise leva em consideração a estabilidade da torre quanto a movimentação da base da fundação ocasionada devido à elevada sollicitação horizontal gerada pelas cargas de vento.

Por fim, a análise da segurança em relação a capacidade de carga do solo é necessária para garantir resistência considerável e aceitável para suportar as tensões induzidas, garantindo a segurança estrutural.

Destaca-se que todas as verificações realizadas são considerando o estado limite último de resistência, sendo considerados os carregamentos normais e extremos, e estas verificações são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Verificação dos critérios de segurança estrutural.

N _{SPT}	ϕ	Caso normal de carregamento						Caso extremo de carregamento					
		Diâmetros (m)											
		18	17	16	15	14	13	18	17	16	15	14	13
30	41°	3,2	2,8	2,4	2,0	1,7	1,4	2,9	2,5	2,1	1,8	1,5	1,3
		14,8	13,4	12,2	11,0	9,9	8,9	12,3	11,2	10,2	9,2	8,3	7,4
		38,5	34,9	31,4	27,9	24,6	21,3	33,3	30,1	27,0	23,9	20,9	18,1
34	43°	3,2	2,8	2,4	2,0	1,7	1,4	2,9	2,5	2,1	1,8	1,5	1,3
		15,6	14,2	12,9	11,7	10,5	9,4	13,0	11,9	10,8	9,7	8,8	7,9
		39,2	35,6	32,1	28,6	25,2	21,9	33,9	30,7	27,6	24,5	21,5	18,7
38	45°	3,2	2,8	2,4	2,0	1,7	1,4	2,9	2,5	2,1	1,8	1,5	1,3
		16,5	15,0	13,6	12,3	11,1	9,9	13,8	12,5	11,4	10,3	9,3	8,3
		40,0	36,4	32,8	29,3	25,9	22,6	34,6	31,4	28,2	25,1	22,1	19,2
42	46°	3,2	2,8	2,4	2,0	1,7	1,4	2,9	2,5	2,1	1,8	1,5	1,3
		16,9	15,4	14,0	12,6	11,4	10,2	14,1	12,9	11,7	10,6	9,5	8,5
		40,4	36,8	33,2	29,7	26,3	23,0	35,0	31,8	28,6	25,5	22,5	19,6
46	47°	3,2	2,8	2,4	2,0	1,7	1,4	2,9	2,5	2,1	1,8	1,5	1,3
		17,4	15,8	14,4	13,0	11,7	10,5	14,5	13,2	12,0	10,8	9,8	8,8
		40,8	37,2	33,6	30,1	26,6	23,3	35,4	32,1	29,0	25,8	22,8	19,9
50	48°	3,2	2,8	2,4	2,0	1,7	1,4	2,9	2,5	2,1	1,8	1,5	1,3
		17,8	16,2	14,7	13,3	12,0	10,8	14,9	13,6	12,3	11,1	10,0	9,0
		41,3	37,6	34,0	30,5	27,0	23,7	35,8	32,5	29,3	26,2	23,1	20,2

Fonte: Autores (2021).

em que, cada índice de resistência à penetração do solo (N_{SPT}) e ângulo de atrito (ϕ), apresentam em ordem os resultados para análise de tombamento, deslizamento e capacidade de carga do solo na primeira, segunda e

terceira linha respectivamente. Esses valores estão associados aos diâmetros médios já pré-estabelecidos, a fim de obter-se o diâmetro ótimo mais adequado.

Os valores da Tabela 7 destacados em vermelho são os valores do coeficiente de segurança relacionados ao tombamento da estrutura, no qual, são fatores determinantes para a otimização do diâmetro da sapata. Na Figura 3, verifica-se a curva característica na análise do tombamento da estrutura, onde também é traçada uma reta horizontal que representa o valor do limite máximo para este critério de segurança.

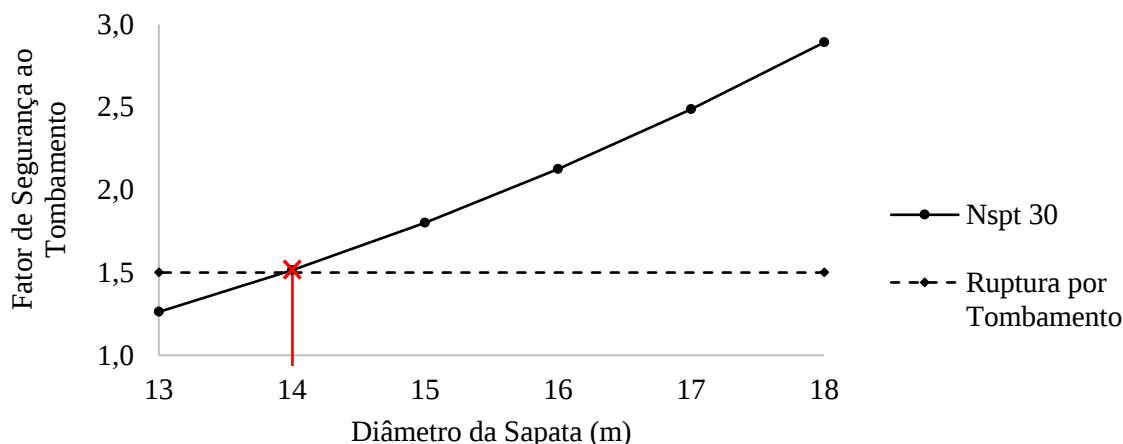


Figura 3. Otimização relacionando os fatores de segurança contra o tombamento para o $N_{SPT} = 30$ com o valor de segurança limite. Fonte: Autores (2021).

A partir da Figura 3, observa-se que o valor de diâmetro otimizado para a situação em estudo, está entre 13 m e 14 m. Para avaliar o valor exato, utiliza-se da equação da curva do fator de segurança, substituindo o valor de y para 1,5 (valor limite admissível), resultando em um valor de diâmetro igual a 13,92. Como se trata de uma obra civil, este valor não é aplicável na prática, então, para o caso especificado utiliza-se uma base com diâmetro de 14 m, atendendo as especificações normativas para segurança estrutural do projeto.

4 Considerações finais

Com o resultado ótimo do diâmetro da base da sapata apresentado nesta pesquisa, afirma-se que os critérios de segurança contra o tombamento, deslizamento e capacidade de carga do solo atendem aos critérios de segurança geotécnica para a torre tubular de aço modelo MM92 com 80,00 m de altura. Para tanto, foi necessário o dimensionamento de uma estrutura de fundação com base circular de concreto armado, com dimensões determinadas conforme a Figura 2.

O fator de segurança contra o deslizamento e capacidade de carga do solo crescem com o aumento do diâmetro da sapata e do N_{spt} . Constata-se então, que a condição determinante para o dimensionamento ótimo do diâmetro da base da sapata em estudo foi a verificação quanto ao Estado Limite Último de tombamento (caso de carga externa). Este fato é justificado devido aos elevados valores de momentos que atuam na base da fundação, que para serem suprimidos, são necessárias elevadas dimensões nas propriedades geométricas da fundação, de maneira que seja garantido um peso próprio de braço de alavanca com valores que sejam capazes de anular os momentos solicitantes para garantir a segurança estrutural.

Sugere-se para trabalhos futuros a avaliação do custo para execução do projeto de fundação determinada nesta pesquisa, na intenção de aliar uma proposta que estabelecesse uma redução significativa, atraindo um interesse econômico. Dessa forma, é necessário a execução de ensaios de campos mais aprimorados *in loco*, na intenção de serem obtidos parâmetros reais do local de implantação do projeto, evitando aumentos significativos nas dimensões do elemento de fundação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e a



Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Bertuzzi, P. J. (2013) *Estudos de Aspectos de Engenharia Para Implantação de Torres Eólicas*. Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina / UFSC, Florianópolis, 102 p.
- Borges, J. B. (2018) *Recomendação para adoção do módulo de cisalhamento dinâmico de projeto*. Centro de Tecnologia / UFRJ, Rio de Janeiro.
- EWEA. (2010) *Powering Europe: wind energy and the electricity grid*. Brussels: EWEA.
- Faria, P. O.; Noronha, M. (2013) *Fundações de Torres Eólicas: Estudo de Caso*. GEOSUL, Criciúma.
- Freitas, A.C.; Pacheco, M.; Danziger, B.R. (2012) Estimating Young Moduli in Sands from the Normalized N60 Blow Count. *Soils & Rocks*, v. 35, p. 89-98.
- GWEC. (2019) *Global Wind Energy Council – GWEC*. Global statistic. Disponível em <<https://gwec.net>>. Acesso em: 27 out. 2021.
- Hatanaka, M.; Uchida, A. (1996) Empirical correlation between penetration resistance and effective friction of sandy soil. *Soils Found*, v. 36 (4), p. 1-9.
- Martins, F.R., Guarnieri, R.A., Pereira, E.B. (2007) *O aproveitamento da energia eólica*. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, São Paulo.
- Medeiros, I. S. (2019) *Dimensionamento da geometria em casca de uma Torre tubular de aço para Aerogerador de eixo horizontal*. Trabalho de Conclusão de Curso, Núcleo de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco / UFPE, 129 p.
- Meyerhof, G. G. (1956) Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 82 (1), p. 1-19.
- Moura, A. S. (2007) *Avaliação de Metodologias de Projeto de Fundações Superficiais de Aerogeradores Assentes em Areia de Duna*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília / UnB, Brasília, 323 p.
- Petrobrás N-1848 (2011) - *Fundações de Máquinas*.
- Schnaid, F., Odebrecht, E. (2012) *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. 2ª edição. Oficina de Texto.
- Siemens. (2018) *Siemens D3 platform – MW direct drive wind turbines: Reduced complexity, increased profitability*. Disponível em: <https://www.thewindpower.net/turbine_en_22_siemens_swt-2.3-93.php>. Acesso em: 25 out. 2021.
- Silva, M. D. (2014) *Tipificação de fundações de torres eólicas em parques industriais, para diversos tipos de solos*. Dissertação de Mestrado, Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 146 p.
- Teixeira, A. H. (1996) *Projeto e execução de fundações*. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 3, São Paulo, *Anais...* ABMS. v.1, p. 33- 50.
- Veljkovic, M., Heistermann, C., Pavlovic, M., Feldmann, M., Pak, D., Richter, C., Rebelo, C., Pinto, P., Matos, R., Baniotopoulos, C., Gkantou, M., Dehan, V., Nüsse, G. (2015) High-strength tower in steel for wind turbines (HISTWIN_Plus). *European Commission*. Istanbul, Turkey, Workshop 17-18.