

# Aspectos Geotécnicos de Projeto de Fundação de Aerogerador

Victor Henrique Pereira de Oliveira

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, victor\_13@poli.ufrj.br

Alessandra Conde de Freitas

Professora Adjunta, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, alessandracfreitas@poli.ufrj.br

**RESUMO:** Um dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS 7) é assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos. Uma das metas é, até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso à pesquisa e tecnologias de energia limpa (EL), bem como estimular o investimento em infraestrutura neste segmento (EL). Em alinhamento ao preconizado pelo ODS 7, o Brasil vem obtendo significativo crescimento na produção de energia eólica, ampliando seu potencial energético instalado em 10 vezes no período de 2012 a 2022, com capacidade total instalada de 25,6 GW. Os aerogeradores são as unidades fundamentais desse processo. O dimensionamento de suas fundações, elementos que transmitem as cargas da estrutura para o solo, apresentam uma série de especificidades, oriundas da magnitude e complexidade das solicitações, como, por exemplo, o elevado carregamento horizontal quando comparado ao peso próprio; ação do vento; e esforços dinâmicos, oriundos da rotação das pás, típicos desse tipo de estrutura. No presente trabalho é desenvolvida a análise geotécnica de uma fundação de turbina eólica de 2,1 MW e 80 metros de altura, instalada no norte da Bahia. São apresentadas as verificações relativas aos seguintes critérios: capacidade de carga, tombamento, deslizamento, recalque e análises das rigidezes, necessários ao bom desempenho da estrutura. Estas são realizadas conforme práticas de dimensionamento disponíveis na literatura, e respeitando-se as considerações presentes na norma brasileira de fundações, NBR-6122/2019.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fundação, Fundação Superficial, Turbina Eólica, Fundação de Torre.

**ABSTRACT:** One of the objectives of sustainable development (SDG 7) is to guarantee reliable, sustainable, modern and affordable access to energy for all. One of the goals is, by 2030, to strengthen international cooperation to facilitate access to clean energy (EL) research and technologies, as well as to stimulate investment in infrastructure in this segment (EL). In line with the recommendations of SDG 7, in recent years, Brazil has achieved significant growth in the production of wind energy, having expanded its installed energy potential more than 10 times in the period from 2012 to April 2022, with a total installed capacity of 25,6 GW. The wind turbines are the fundamental units of this energy generation process. The dimensioning of its foundations, elements that transmit loads of the structure to the ground, exhibit a series of specificities, arising from the magnitude and complexity of stresses, such as, for example, the maximum horizontal load when compared to the proper weight, action of the wind, and dynamic, arising from blade rotation, typical of this type of structure. In the present work, a geotechnical analysis of a 2.1 MW, 80 meter high wind turbine foundation, installed in northern Bahia, is published. They are used as selected checks for the following requirements: load capacity, tipping, sliding, settlement and stiffness analysis allowed for the good performance of the structure. These are carried out according to the sizing practices available in the literature, and respecting the considerations present in the Brazilian foundation standard, NBR-6122/2019.

**KEYWORDS:** Foundation, Shallow Foundation, Wind Turbine, Tower Foundation

## 1 INTRODUÇÃO

O mundo iniciou o século XXI com grandes preocupações em relação ao desenvolvimento sustentável, que, segundo estabelecido na Organização das Nações Unidas (ONU) mediante Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, é definido como: “desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações”.

Em setembro de 2015, foi estabelecido, na assembleia geral da ONU, um conjunto de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que possui 169 metas específicas, que visam desenvolvimento social amplo e universal, com objetivo principal de erradicação da pobreza; proteção ao meio ambiente; e combate às intensas mudanças climáticas potencializadas pela ação antrópica.

O objeto de estudo do presente trabalho, as torres eólicas, refere-se especificamente ao assunto tratado no ODS 7, que versa sobre energia limpa e acessível à todos.

Em alinhamento ao preconizado no ODS 7, o Brasil realizou, nos últimos anos, significativos investimentos no setor de energia eólica, tendo ampliado seu potencial energético em mais 10 vezes num período de 10 anos – 2012 a 2022, com capacidade total instalada de 25,6 GW, tornando-se a segunda maior fonte de energia elétrica que compõe a matriz energética brasileira.

## 2 OBJETIVO E METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo a avaliação geotécnica de uma fundação de um aerogerador de 2,1 MW e 80 metros de altura, executada em terreno constituído predominantemente por solos arenosos e rochas brandas do tipo arenito, localizado no nordeste do estado da Bahia, no Parque Eólico Esperança. As características do perfil geotécnico foram observadas através de 14 sondagens mistas. Adicionalmente, objetivando melhorar as estimativas dos parâmetros elásticos do solo, foram realizados, também, ensaios sísmicos, a saber: um ensaio Downhole e um ensaio de Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW), os quais foram executados nas proximidades da investigação que forneceu perfil de  $N_{spt}$  menos competente, ou seja, aquele que apresentou menor resistência à penetração ao longo da profundidade.

Metodologicamente, o trabalho foi realizado a partir de uma série de atividades, as quais foram subdivididas em: análise dos aspectos geológicos-geotécnicos da região, interpretação das investigações geotécnicas, utilização das correlações disponíveis na literatura técnica para estimativa dos parâmetros de resistência e de deformabilidade, e realização das verificações geotécnicas da fundação.

Inicialmente utilizou-se correlações com os valores de  $N_{spt}$ . Dois critérios foram utilizados nessa escolha: adequação da correlação ao tipo de material que compõe o subsolo da região e correlações consideradas consagradas no meio técnico. A partir desses foram estimados os valores de ângulo de atrito ( $\phi'$ ) e peso específico dos solos ( $\gamma$ ). Foram analisados, também, os ensaios sísmicos do tipo Downhole e MASW, tendo sido esses utilizados para a determinação dos Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), módulo de elasticidade (E) e módulo de cisalhamento (G).

Por fim, os parâmetros e demais informações requeridas foram utilizadas nas verificações requeridas (capacidade de carga, recalques, deslizamento, tombamento, rigidezes rotacional e translacional), que devem seguir os critérios estabelecidos na norma brasileira de fundações, ABNT NBR 6122 (2019), e as exigências das empresas fabricantes de torres.

## 3 FUNDAÇÃO DOS AEROGERADORES

Os aerogeradores, também chamados de torres eólicas ou turbinas eólicas, são as unidades fundamentais do processo de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do vento. Esses contam com um rotor com rolamentos que, em funcionamento com todo o sistema de medição (anemômetro) e pás giratórias, que são capazes de gerar uma força mecânica, que é posteriormente convertida em energia elétrica..

A fundação da turbina eólica é o elemento que realiza a conexão entre o aerogerador e o solo, sendo um dos exemplos que constitui o grupo das chamadas fundações especiais. Essas caracterizam-se por apresentar condições de carregamento que as distingue das usuais presentes na construção civil, impondo a necessidade de realizar maior número de verificações geotécnicas para garantia da segurança.

As fundações mais frequentes na indústria da construção civil, caracterizam-se por transferir esforços majoritariamente verticais, estáticos e de compressão, e de tração, em condições específicas, oriundos, principalmente, de peso próprio da estrutura e cargas de uso, que encontram-se, majoritariamente, centrados.

As torres eólicas, por outro lado, apresentam outros importantes tipos de solicitação, a saber: ações dinâmicas, provenientes da própria característica vibracional da estrutura, e carregamento horizontal, proveniente da ação do vento, que desenvolve grande relevância quando comparado com o peso próprio da

estrutura e, quando associados ao elevado comprimento vertical, resultam em momentos de elevada magnitude.

Esses três tipos de solicitações – dinâmica, horizontal e de momento – são de suma importância para análise dessas estruturas, gerando a necessidade de verificação de outros três mecanismos de falha, que fogem do escopo das fundações mais comuns ou usuais, são essas: (i) verificação de deslizamento ou de capacidade de suporte horizontal de estacas, que visa verificar a estabilidade da fundação em relação aos esforços horizontais; (ii) verificação de tombamento, garantindo a estabilidade contra os elevados momentos atuantes na base e (iii) verificação das rigidezes rotacional e translacional do conjunto solo-fundação, analisando, de forma simplificada, o comportamento dinâmico, evitando a ocorrência do mecanismo de ressonância.

#### 4 ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

A região em que encontra-se localizado o Parque Eólico esperança é caracterizada pela presença de duas distintas formações, a saber: planície e planalto. Na área de planície, predomina um perfil estratigráfico formado por espessa camada de solo argiloso, seguido de material rochoso. Já a região do planalto apresenta um perfil estratigráfico tipicamente composto por rochas sedimentares, principalmente os arenitos.

Para a execução de parte do parque eólico foram executados 14 furos de Sondagens Mistas (SM-ES-01 a SM-ES-14) e ensaios sísmicos, sendo os últimos aplicados para melhor detalhamento do furo SM-ES-07, que apresentou menor resistência à penetração ao longo da profundidade, indicando pior comportamento resistente. Os valores de  $N_{spt}$  obtidos mediante ensaios variaram de 7 golpes até 30 golpes para poucos centímetros, prevalecendo os elevados índices de resistência a penetração.

As sondagens executadas, devido à elevada resistência característica do subsolo da região, foram do tipo mista, com realização de ensaio do tipo SPT. Com isso, nas regiões de avanço com a sonda rotativa foram classificados os níveis de alteração, de coerência, de fraturamento, e valor do parâmetro Rock Quality Designation (RQD).

Os perfis de sondagem realizados apresentaram, majoritariamente, arenitos, classificados conforme Manual de Sondagens da ABGE, com grau de faturamento F5, isto é, fragmentado; grau de coerência C5, friável; e grau de alteração A3, medianamente alterados. Os mesmos exibem, para as pequenas profundidades, valores muito variáveis de recuperação, desde 10% até mais de 80% de recuperação, que, de modo geral, ampliam com incremento de profundidade, onde predominam os elevados valores, denotando a melhora da qualidade do maciço; com baixos ou até nenhum valor de RQD ao longo de todo material rochoso.

Todas as sondagens apresentaram estratigrafias similares, apresentando uma camada de areia fina superficial, que possui espessura predominante da ordem de poucas dezenas de centímetros (SM-ES-04, por exemplo), mas podendo se estender até cerca de 7 m (SM-ES-10). Logo abaixo da camada superficial de areia, encontra-se uma espessa camada de Arenito fino, na maior parte dos casos, de matriz siltosa, com origem sedimentar, que se estende até os limites de 25 metros executados na sondagem, Figura 1. Em nenhuma das investigações executadas verificou-se a presença de nível d'água. Mais detalhes em Oliveira (2020).

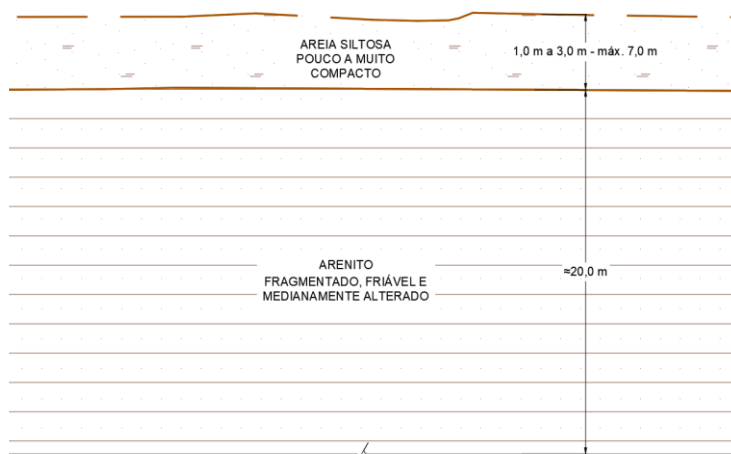


Tabela 1: Correlações utilizadas na parametrização

Os ensaios sísmicos indicaram variação do  $E_0$  (Módulo de Elasticidade para pequenas deformações) de quase três vezes para os primeiros 10 metros, desde de 281 até 819 MPa, e atingiu valor máximo de 1273 MPa a 25 m de profundidade (fim do ensaio). Já o  $G_0$  (Módulo de Cisalhamento para pequenas deformações) variou, também, quase três vezes nos primeiros 10 metros de 107 até 297 MPa, e atingiu o valor máximo de 499 MPa a 21 m de profundidade. Essas características indicam melhoria do comportamento mecânico com aumento da profundidade.

Para estimativa dos parâmetros de resistência e deformabilidade do solo, foram utilizados o conjunto de correlações, associados a sondagem mista SM-ES-07 e aos ensaios sísmicos executados nas proximidades, conforme Tabela 2. Para tanto foram realizadas as seguintes considerações na análise: (i) Limite superior de índice  $N_{spt}$  igual a 30 golpes; (ii) Escavação prévia da região até cota de 3 metros de profundidade, visando retirada do material superficial de resistência inferior apresentado no furo número 07 ( $N_{spt} = 7$  golpes no segundo metro de escavação) e (iii) Região de influência compreendida entre as profundidades de 3 e 11 metros.

Com isso, foram estimados os seguintes parâmetros, cujos detalhes podem ser consultados em Oliveira (2020): Ângulo de Atrito:  $40^\circ$ , Módulo de Elasticidade: 175 MPa, Coeficiente de Poisson: 0,38; Módulo de Cisalhamento: 63,4 GPa e Peso específico:  $18 \text{ kN/m}^3$ , com formulações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Correlações utilizadas na parametrização

	Godoy (1983)	Hatanaka e Uchida (1996)	Teixeira (1996)
$\phi' (^\circ)$	$\phi' = 28 + 0,4 \cdot N_{spt}$	$\phi' = 20 + \sqrt{15,4 \cdot N_{spt}}$	$\phi' = 15 + \sqrt{24 \cdot N_{spt}}$
		Ensaio Sísmicos	
G (MPa)		$G_0 = (\gamma/g) \cdot V_s$	
		Ensaio Sísmicos	
$\nu$		$\nu = \left( (V_p/V_s)^2 - 2 \right) / \left( 2 \cdot (V_p/V_s)^2 - 1 \right)$	
	Freitas et.al (2012)		Elasticidade
E (MPa)	$E = 8 \cdot N_{60}^{0,8}$		$E_0 = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G_0$

## 5 ESTUDO DE CASO - ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS E ESTRATIGRAFIA

Foi estudada a fundação da Torre Eólica de 2,1 MW e 80 m de altura, a partir da adoção de uma sapata circular de 17 m de diâmetro, 3,0 metros de altura, divididas em 1,8 m de base e 1,2 m de comprimento inclinado, estabelecidos pelo dimensionamento (Oliveira, 2020), conforme apresentado na Figura 2.

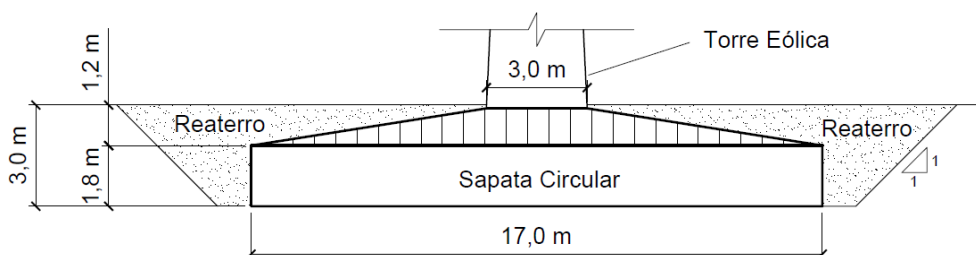


Figura 2: Geometria adotada no dimensionamento da fundação circular da torre eólica

O processo de dimensionamento foi iniciado a partir da análise das rigidezes – rotacional e transversal – que, por dependerem de parâmetros do solo e do raio da fundação, possibilitam uma primeira estimativa da geometria necessária. Em seguida foram realizadas as demais verificações de estado limite último e de serviço, a saber: capacidade de carga, recalque, deslizamento, tombamento e excentricidade de carga, conforme apresentado na Tabela 2.

Após estimativa inicial do raio a partir do valor das rigidezes, procedeu-se a avaliação do diâmetro da estrutura para os demais mecanismos. Ainda não atendidos todos os critérios de dimensionamento, análises de

tombamento e excentricidade de carga, utilizou-se a opção de ampliar a profundidade de assentamento da fundação, ampliando o peso do conjunto. Assim, determinou-se a geometria, com profundidade de assentamento a 3,0 m, e diâmetro de 17 m, dentro dos padrões verificados em projetos conforme Militisky (2019) e Lôbo (2018).

Tabela 2: Verificação dos Estados Limites Últimos e de Serviço

Rigidez Translacional	$K_{\theta,r} = [8 \cdot G \cdot R^3] / [3 \cdot (1 - \nu)]$	
Rigidez Rotacional	$K_{\theta,r} = [32 \cdot G \cdot R \cdot (1 - \nu)] / [7 - 8 \cdot \nu]$	
Capacidade de Carga	$q_{rup} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot i_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \cdot B' \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma$	
Deslizamento	$FS_{deslizamento} = [A_{ef} \cdot c_d + F_v \cdot \tan \phi_d] / [F_h']$	
Tombamento	$FS_{tombamento} = [F_v \cdot d_h] / [M_{xy} + F_h' \cdot d_v]$	
Recalque	$\rho = \sigma \cdot B \cdot I_s [1 - \nu^2] / [E]$	$\tan \theta = I_m \cdot [M_{xy}] / [L \cdot B^2] \cdot [1 - \nu^2] / [E]$
Excentricidade de carga	$e = [M_{xyr}] / [F_v]$	

## 6 SOLICITAÇÕES E DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO

Com exceção dos carregamentos oriundos do próprio dimensionamento, como os pesos de reaterro – realizado posteriormente às etapas de escavação e execução da estrutura de fundação – e da própria estrutura da fundação (sapata), os demais conjuntos de solicitações e suas respectivas magnitudes, apresentadas na Tabela 3, são fornecidos pela fabricante da torre eólica. São informadas, também, as restrições necessárias ao bom funcionamento da estrutura, tais como, limitações de recalques e de valores das rigidezes, por exemplo.

Tabela 3. Resumo dos carregamentos ou solicitações

-	Normal	Extremo
F <sub>x</sub> (kN)	-	877,9
F <sub>y</sub> (kN)	-	19,8
F <sub>xy</sub> (kN)	410	878,2
F <sub>z</sub> (kN)	3022	3015,5
M <sub>x</sub> (kN.m)	-	1930,4
M <sub>y</sub> (kN.m)	-	66591,1
M <sub>xy</sub> (kN.m)	36661	66619,1
M <sub>z</sub> (kN.m)	-	905,5
F <sub>h'</sub> (kN)	410	1045,8

Na Tabela 3, F<sub>x, y, z</sub> e M<sub>x, y, z</sub> são as forças e momentos atuantes segundo a direção dos eixos x, y (horizontais) e z (vertical); F<sub>xy</sub> e M<sub>xy</sub> são as forças e momentos resultante do somatório das componentes horizontais x e y; M<sub>x, y, z</sub>.

O peso próprio da fundação da torre eólica e o reaterro foram estimados no dimensionamento da estrutura de fundação. A partir do dimensionamento – sapata circular e profundidade de assentamento – foram determinados, mediante relações geométricas, os volumes de 531,5 e 149,4 m<sup>3</sup> para a fundação e reaterro, respectivamente. Foram utilizados os valores de 25 e 18 kN/m<sup>3</sup> para os pesos específicos do concreto armado e reaterro, respectivamente, obtendo-se os valores de 13.288 kN para o peso da fundação e de 2.689 kN para o do reaterro.

Além da magnitude das forças solicitantes, faz-se necessário, também, determinar os seus pontos de aplicação. O carregamento vertical fornecido pelo fabricante é considerado centrado pela decomposição de efeitos de carga excêntrica em força vertical, acrescido de uma carga de momento. As forças gravitacionais do reaterro e fundação são consideradas centradas devido à simetria da geometria e homogeneidade dos materiais.

Todavia o conjunto de forças horizontais atuantes na estrutura, segundo informações disponibilizadas fabricante, encontra-se aplicado a 20 cm acima do topo da fundação do tipo sapata, sendo necessário, no dimensionamento, considerar seu efeito de excentricidade a partir de um momento atuante equivalente.

Desse modo, para as verificações são utilizados os seguintes valores de carga para as condições de carregamento normal e extremo:  $M_{xyr}$  refere-se ao momento total resultante da soma do  $M_{xy}$  com o momento gerado pela força horizontal (37.974 kN.m para condição normal e 69.966 kN.m para a extrema);  $A_{ef}$  é a área efetiva da fundação (159,6 m<sup>2</sup> e 105,8 m<sup>2</sup>);  $F_h'$  a força resultante horizontal corrigida pela ação do momento torsor, conforme Milititsky (2019), (410,3 e 1029,8 kN) e, finalmente,  $F_v$  é a força vertical (18.999 kN e 18.993 kN).

## 7 RESULTADOS

Neste item são apresentados os resultados obtidos nas verificações geotécnicas da fundação estudada. Cabe salientar que, com exceção da verificação de recalque, do comportamento dinâmico da estrutura e a excentricidade da carga, as demais verificações serão apenas apresentadas para o carregamento extremo, condições mais críticas, conforme apresentado na Tabela 4, a qual também apresenta os fatores de segurança mínimos requeridos (FS) e demais informações relevantes. Para detalhes ver Oliveira (2020).

Tabela 4: Resumo dos resultados obtidos – Oliveira (2020).

Análise	Dados do solo	Dados das cargas	Resultado	Critério	FS
Capacidade de Carga (Normal)	$\phi' = 40^\circ$	$F_{xy} = 410 \text{ kN}$	$q_{rup} = 11,0$ MPa	$FS \geq 3,0$	FS = 68,0
	$c' = 0 \text{ kPa}$	$F_z = 3022 \text{ kN}$			
Capacidade de Carga (Extremo)	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$M_{xy} = 36661 \text{ kN.m}$	$q_{rup} = 9,1$ MPa	$FS \geq 3,0$	FS = 40,0
	$G = 63,4 \text{ MPa}$	$M_z = 0 \text{ kN.m}$			
Deslizamento (Normal)	$\phi' = 40^\circ$	$F_{xy} = 878 \text{ kN}$	$R_d = 9500$ kN	$FS \geq 1,5$	FS = 23,2
	$c' = 0 \text{ kPa}$	$F_z = 3016 \text{ kN}$			
Deslizamento (Extremo)	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$M_{xy} = 66619 \text{ kN.m}$	$R_d = 9500$ kN	$FS \geq 1,5$	FS = 9,3
	$G = 63,4 \text{ MPa}$	$M_z = 906 \text{ kN.m}$			
Tombamento (Normal)	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$F_{xy} = 410 \text{ kN}$	$M_{est} = 161,5$ MN.m	$FS \geq 1,5$	FS = 4,2
		$F_z = 3022 \text{ kN}$			
Tombamento (Extremo)	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$M_{xy} = 36661 \text{ kN.m}$	$M_{est} = 161,5$ MN.m	$FS \geq 1,5$	FS = 2,3
		$M_z = 0 \text{ kN.m}$			
Recalque (Normal)	$E = 175 \text{ MPa}$	$F_{xy} = 410 \text{ kN}$	$\tan \theta = 0,8$ mm/m	$\tan \theta \leq 3$ mm/m	Não se Aplica
	$\nu = 0,38$	$F_z = 3022 \text{ kN}$			
	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$M_{xy} = 36661 \text{ kN.m}$			
		$M_z = 0 \text{ kN.m}$			

Rigidez Rotacional	$G = 63,4 \text{ MPa}$ $\nu = 0,38$	Não se Aplica	$k_{\theta} = 167,5$ GN.m/rad	$k_{\theta \text{ min}} =$ 79,28 GN.m/rad	FS = 2,1
Rigidez Translacional	$G = 63,4 \text{ MPa}$ $\nu = 0,38$	Não se Aplica	$k_x = 2700$ MN/m	$k_x \text{ min} = 6,1$ MN/m	FS = 442,6
Excentricidade (Normal)	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$F_{xy} = 410 \text{ kN}$ $F_z = 3022 \text{ kN}$ $M_{xy} = 36661 \text{ kN.m}$ $M_z = 0 \text{ kN.m}$	$e = 2,0 \text{ m}$	$e \leq 2,15 \text{ m}$	Não se Aplica
Excentricidade (Extremo)	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$F_{xy} = 878 \text{ kN}$ $F_z = 3016 \text{ kN}$ $M_{xy} = 66619 \text{ kN.m}$ $M_z = 906 \text{ kN.m}$	$e = 3,6 \text{ m}$	$e \leq 5,67 \text{ m}$	Não se Aplica

Na Tabela 4 foram utilizados os símbolos conforme:  $\phi'$  = ângulo de atrito efetivo do solo;  $c'$  = coesão efetiva do solo;  $\gamma$  = peso específico do solo;  $\nu$  = coeficiente de Poisson;  $G$  = módulo de cisalhamento;  $E$  = módulo de elasticidade;  $F_{xy}$  = força horizontal;  $F_z$  = força vertical;  $M_{xy}$  = momento fletor atuante na base;  $M_z$  = momento torsor atuante na base;  $q_{rup}$  = tensão de ruptura do solo;  $R_d$  = resistência ao deslizamento;  $M_{est}$  = momento estabilizante;  $e$  = excentricidade do carregamento;  $\tan \theta$  = tangente do ângulo de rotação da base;  $k_{\theta}$  = rigidez rotacional do conjunto solo-fundação;  $k_x$  = rigidez translacional do conjunto solo-fundação;  $k_{\theta \text{ min}}$  = rigidez rotacional mínima recomendada pela fabricante;  $k_x \text{ min}$  = rigidez translacional mínima recomendada pela fabricante; FS = fator de segurança.

Ressalta-se que, de acordo com Maranhão (2016), uma importante verificação no desenvolvimento de um projeto de torre eólica diz respeito às suas características dinâmicas, de forma que é necessário conhecer as frequências naturais dos conjuntos estruturais (aerogerador, torre e fundação) e manter-se devidamente afastado das frequências de excitação observadas no aerogerador, evitando a ocorrência do fenômeno de ressonância dinâmica. Para tanto, foram estabelecidos pelo fabricante valores mínimos de 79,28 GN.m/rad para a rigidez rotacional e 6,1 MN/m para a rigidez translacional da torre estudada. Outra consideração importante é o recalque distorcional, isto é, a relação entre o recalque diferencial e a distância entre os pontos analisados, que, conforme estabelecido pelo documento da Fabricante, deve ser inferior a 3 mm/m.

## 8 Considerações finais

Tendo em vista todas as verificações geotécnicas de segurança e nível de serviço que foram realizadas no presente trabalho, foi possível verificar efetuar o dimensionamento da fundação da Turbina Eólica Gamesa G114 de 2,1 MW e 80 metros de altura, para as condições supracitadas. Para tanto, fez-se necessário o dimensionamento de uma estrutura de fundação em concreto armado de base circular, com 3,0 metros de altura e 17 metros de diâmetro. Conforme verificado no processo de dimensionamento, o embutimento foi o principal responsável pela ampliação da segurança ao tombamento. Ainda segundo Zamboni (2023), o embutimento foi o fator que mais contribuiu na redução dos recalques e ampliação da segurança da estrutura.

Pode-se constatar que o condicionante no dimensionamento para as características assinaladas, foi a verificação da excentricidade a partir do critério recomendado pelo fabricante, em que, para o carregamento normal, toda base da fundação deve encontrar-se comprimida. Tal fato decorre dos elevados valores de momento que geram grandes excentricidades de carregamento.

De acordo com o verificado também em Zamboni (2023), é importante destacar que duas importantes análises que apresentaram-se próximas ao limite estabelecidos em projeto são: as verificações do tombamento e da rigidez rotacional. A importância da verificação do tombamento advém, assim como a excentricidade, dos elevados valores de momento que atuam na base da fundação, que para serem anulados, geram a necessidade elevadas dimensões de fundação, de modo a garantir, peso próprio e braço de

alavanca suficientes para garantir a segurança do elemento. Já a relevância da rigidez rotacional reside na necessidade de restringir os deslocamentos da fundação da estrutura, de modo a garantir adequado funcionamento.

Para as verificações de deslizamento, rigidez translacional da fundação, e capacidade de carga e, foram obtidos fatores de segurança muito superiores aos limites mínimos estabelecidos, não representando, estes, o caminho crítico do dimensionamento.

A elevada segurança em relação às verificações de deslizamento e rigidez translacional deriva do fato dos carregamentos horizontais, apesar de apresentarem elevadas magnitudes, serem mais relevantes pelos elevados momentos que geram, e, portanto, as dimensões necessárias para combater os momentos, resultam em FS elevados para esses mecanismos. Já o elevado fator de segurança obtido na verificação da capacidade de carga é oriundo, também, da presença de um subsolo de elevada competência, assim como pelas elevadas dimensões do diâmetro da base, utilizadas para garantir o não tombamento e adequação do critério de rigidez rotacional, podendo ser, por outro lado, importante verificação em outros sítios que não apresentem subsolo com bom desempenho em termos de resistência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. Manual de Sondagens / coordenador Ivan José Delatim; comissão coordenadora Elisângela Oliveira [et al.] -- 5. ed. -- São Paulo, 2013
- Associação brasileira de normas técnicas. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.
- Fontes, M.P.F. *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentável*. Viçosa, SBCS-UFV, 1996. 930p
- Freitas, A.C.; Pacheco, M.; Danziger, B.R., 2012, Estimating Young Moduli in Sands from the Normalized  $N_{60}$  Blow Count. *Soils & Rocks*, v. 35, p. 89-98.
- Godoy, N. S. *Fundações*. São Carlos, SP: Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1972. Notas de aula.
- Godoy, N. S. Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1983. Palestra.
- Hatanaka, M.; Uchida, A. Empirical correlation between penetration resistance and effective friction of sandy soil. *Soils Found.*, v.36, n.4, p.1-9, 1996.
- Jacomine, P.K.T. Solos sob caatingas: características e uso agrícola. In: Alvarez V., V.H.; Fontes, L.E.F.; Lôbo, J. R. Estudo do projeto geotécnico de fundação de uma turbina eólica. 2018. Projeto de Graduação (Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- Maranhão, G. M. Análise da Rigidez Rotacional de Fundações Estaqueadas de Torres Eólicas. IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. 2016.
- Milititsky, J. Fundações de Torres: aerogeradores, linhas de transmissão e telecomunicações. Ed. 1. São Paulo: Oficina de Texto, 2019.
- N-1848 – Projeto de Fundações de Máquina, Petrobrás, 2011.
- Oliveira, V. H. P. (2020). Dimensionamento geotécnico da fundação de uma turbina eólica. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 126 p.
- Pinto, C. de S.. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. Ed. 3. São Paulo: Oficina de Texto, 2006.
- Sá, I.B.; silva, P.C.G (Eds). *Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação*. Petrolina, Embrapa Semiárido, 2010. 402p.
- Silva, M. D., Tipificação de fundações de torres eólicas em parques industriais, para diversos tipos de solos. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.
- Teixeira, A. H. *Projeto e execução de fundações*. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE, São Paulo, v.1, p. 33- 50, 1996.
- Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1943.
- Vésic, A. S. *Bearing capacity of shallow foundations*. In: H. F. Winterkorn; H. Y. Fang (Eds.); New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1975.
- Zamboni, M. F. (2023). Avaliação do comportamento geotécnico da fundação de uma torre eólica onshore por meio de modelagem numérica bidimensional e tridimensional. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 153 p.