

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

Análise da Influência da Geometria da Fundação na Interação Solo-Estrutura de um Aerogerador Assente em Solo Tropical

Alexia Regine Costa Silva

Mestranda, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, alexiaregine2@gmail.com

Juan Félix Rodriguez Rebolledo

Doutor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jrodriguezr72@hotmail.com

Márcio Muniz de Farias

Doutor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mmuniz94@gmail.com

Marlos José Ribeiro Guimarães

Engenheiro Civil, Eletrobras Furnas, Aparecida de Goiânia, Brasil, marlos@furnas.com.br

RESUMO: Um dos maiores desafios associados à construção de um aerogerador está relacionado a compreensão do comportamento mecânico do sistema solo-estrutura, submetido a carregamentos horizontais, estáticos e dinâmicos. Ferreira & Futai (2016) citam que a consideração do solo e da fundação exercem grande influência no comportamento dinâmico da estrutura, o que enfatiza a importância em se avaliar o aspecto geométrico da fundação. Deste modo, tem-se como objetivo a análise da geometria, por meio de modelagem numérica, da fundação de um aerogerador assente em um perfil de solo tropical e submetido a solicitações estáticas. Para análise foi considerado um aerogerador com fundação do tipo radier com estaca única, assente em um perfil de solo tropical de Brasília (DF). A estaca foi modelada com diferentes medidas de diâmetro e comprimento. Quanto ao bloco, foram analisadas seções circulares e quadradas, também com diferentes dimensões. Os resultados mostraram que o comprimento relativo da estaca interfere de forma significativa, na distribuição de esforços, ao longo da estaca. Para a distribuição de deslocamentos, o diâmetro da estaca e do bloco e as propriedades do solo se mostraram mais significativos. Quanto ao deslocamento máximo da torre, sua magnitude é influenciada pelo comprimento relativo e diâmetro da estaca.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas, Plaxis 3D, Carregamento horizontal, Aerogerador, Modelagem Numérica.

ABSTRACT: One of the biggest challenges associated with the construction of a wind turbine is related to understanding the mechanical behavior of the soil-structure system under horizontal, static and dynamic loads. Ferreira e Futai (2016) mention that the consideration of the soil and foundation exert great influence on the dynamic behavior of the structure, which emphasizes the importance of evaluating the geometric aspect of the foundation. Thus, the objective of this study is to analyze the geometry, through numerical modeling, of the foundation of a wind turbine set on a tropical soil profile and subjected to static loads. For the analysis it was considered a wind turbine with a pile raft foundation with a single pile, set on a tropical soil profile of Brasilia (DF). The pile was modeled with different diameter and length measurements. As for the pile cap, circular and square sections were analyzed, also with different dimensions. The results showed that the relative length of the pile interferes significantly in the distribution of stresses along the pile. For the distribution of displacements, the diameter, of the pile and the block, and soil properties were more significant. As for the maximum tower displacement, its magnitude is influenced by the relative length and diameter of the pile.

KEYWORDS: Piles, Plaxis 3D, Horizontal Load, Wind Turbine, Numerical Model.

1 Introdução

Cerca de 57% das torres eólicas, instaladas no Brasil, foram construídas sobre fundações profundas, no qual destaca-se a utilização de estacas hélice contínua (Nardelli, 2019). A frequente utilização deste tipo de solução se deve as condições geotécnicas do local, visto que grande parte do país está recoberta pelos solos



tropicais, que possuem um comportamento peculiar em relação ao utilizado em grande parte das obras internacionais, favoráveis a utilização das fundações rasas.

De forma geral, os aerogeradores estão sujeitos a ações permanentes, variáveis e excepcionais. A primeira compreende as solicitações verticais devido a subpressão de água, em casos em que a fundação está abaixo do nível freático, e ao peso próprio da superestrutura, da fundação e do aterro. Quanto às ações variáveis, destacam-se os carregamentos horizontais e momentos gerados pela incidência do vento e das ondas (estruturas offshore) e pela rotação das pás (3P) e do rotor (1P), durante funcionamento. Por fim, as ações excepcionais se referem a ocorrência de eventos incomuns e específicos para determinada área, tal como os abalos sísmicos.

Deste modo, as solicitações são transmitidas para a fundação por meio de componentes de carga vertical (axial) e horizontal (cortante) e momento fletor e torsor (torque) (Faria e Noronha, 2013; Gavioli, 2018; Milititsky, 2019; Ravichandran e Shrestha, 2019; Zhussupbekov *et al.*, 2016). Para garantir o bom funcionamento do sistema aerogerador, é exigido que o projeto geotécnico atenda alguns requisitos, sendo necessária a verificação: da estabilidade quanto à ruptura do solo, em condições últimas de carregamento (compressão e tração), dos deslocamentos máximos, das rotações que podem afetar as condições de serviço do aerogerador, do comportamento dinâmico do sistema solo-fundação e do efeito de fadiga gerado pelo carregamento cíclico.

Este tipo de problema pode ser solucionado por métodos analíticos ou computacionais. Apesar de necessitarem de uma maior base de dados, os métodos computacionais apresentam resultados mais acurados, principalmente para problemas de alta complexidade. Neste contexto, a utilização do método dos elementos finitos (MEF) tem se destacado por permitir a solução de problemas que devam considerar: o comportamento complexo do solo (rigidez não linear, endurecimento, anisotropia) ou a mudança de comportamento (melhoria do solo, consolidação); as complexas condições hidráulicas; uma geometria não usual; a interação solo-estrutura e análise de forças internas; cargas complexas; e, os efeitos da sequência e método de construção (Lees, 2016).

Atualmente os parques eólicos nacionais se concentram nas regiões nordeste, sul e sudeste, por possuírem um potencial eólico mais elevado (ANEEL, 2008). No entanto, tem-se estudado a possibilidade de expansão para as demais regiões, devido a projeção realizada pela ABEEólica, onde espera-se um crescimento de 33% na capacidade nacional instalada, até 2023. Isto tem gerado uma demanda técnica, no setor da construção civil, devido à complexidade associada a concepção e execução dos aerogeradores. Um dos maiores desafios deste tipo de obra é a boa compreensão do comportamento mecânico do sistema solo-estrutura submetido a carregamentos estáticos e dinâmicos.

Neste contexto, têm-se como objetivo a verificação da influência dos parâmetros geométricos na interação solo-estrutura de um sistema eólico assente no solo tropical de Brasília (DF), por meio da modelagem numérica simplificada, ou seja, considerando as solicitações como estáticas.

2 Definição do Problema

Para verificar a influência da geometria no comportamento do sistema solo-estrutura, será realizada a análise paramétrica de um sistema eólico, variando-se as dimensões da estaca e do bloco. Para isto será utilizado o *software* Plaxis 3D, com licença disponibilizada pelo Laboratório de Infraestrutura da UnB (InfraLab). A seguir estão descritas as características do solo, da estrutura e das solicitações consideradas na análise.

2.1 Solo

As análises deste trabalho serão realizadas considerando as propriedades do solo do Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Brasília (CEGUnB). O primeiro horizonte, denominado como laterítico, é composto por uma camada de areia argilo-siltosa (até 3,5 m), caracterizada com alto índice de vazios, macroporos e muitos agregados, e outra de argila areno-siltosa (até 8,5 m), com índice de vazios decrescente e macroporosidade menor em relação a camada superior. Na camada de transição (de 8,5 a 10 m), o solo assume textura mais siltosa, com distribuição de poros mais homogênea e baixo nível de intemperização.



A camada de solo saprolítico (de 10 a 12 m) é caracterizada pela presença de intercalações de quartzo e silte argiloso vermelho (Guimarães, 2002).

Dentre os diversos modelos elastoplásticos disponíveis no Plaxis 3D, o Hardening Soil (HS) tem se destacado, por ser aplicável a diferentes tipos de solo e problemas geotécnicos. Neste contexto, o mesmo será utilizado para modelagem do solo, considerando os parâmetros já calibrados por Rebolledo *et al.* (2019), para o perfil de solo do CEGUnB (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros do perfil de solo para o modelo *Hardening Soil Model* (Rebolledo *et al.*, 2019).

Identificação	Camada 01	Camada 02	Camada 03	Camada 04	Camada 05	Camada 06
Prof. (m)	0-1,5	1,5-3,5	3,5-5,0	5,0-7,0	7,0-8,5	8,5-20,0
Tipo de Drenagem	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado
γ (kN/m ³)	13,1	12,8	13,9	14,3	16,0	18,2
E_{50}^{ref} (MPa)	3,2	2,5	4	12	13,2	12,2
E_{oed}^{ref} (MPa)	4,9	1,45	2,2	6,9	7	5,7
E_{ur}^{ref} (MPa)	14	14	36,9	37,5	54	54
m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7
c' (kPa)	5	5	5	20	75	20
ϕ' (°)	25	25	26	32	20	22
Ψ (°)	0	0	0	0	0	0
v'_{ur}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
P_{ref} (kN/m ²)	100	100	100	100	100	100
K_0^{NC}	0,58	0,58	0,56	0,47	0,66	0,63
R_f	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8
$K_{0,x}=K_{0,y}$	1,37	0,77	0,56	0,56	0,66	0,63
POP (kPa)	65,7	31,8	0	31,4	0	0

2.2 Estrutura

A estrutura adotada é composta por uma torre metálica de 20 m de altura e 0,3 m, de diâmetro médio, com módulo de Young de 210 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e densidade de 78,5 kN/m³. Esta foi modelada como elemento de placa conectado diretamente ao bloco.

Para fundação foi considerada uma solução de radier com estaca única, em concreto. Seus componentes foram modelados como elementos de volume, com comportamento expresso pelo modelo constitutivo elástico linear. Para isto, foram adotadas as seguintes propriedades: módulo de Young (E) de 20 GPa, coeficiente de Poisson (ν) de 0,15 e densidade (γ) de 21,5 kN/m³.

2.3 Solicitações

Primeiramente foi aplicada uma etapa para obtenção do estado de tensão in situ, para o qual foi considerado um cálculo do tipo K_0 (Etapa 01). Em seguida, foram adicionadas duas etapas para representação da construção, sendo estas correspondentes a ativação dos elementos de fundação (estaca e bloco) (Etapa 02) e da superestrutura (Etapa 03). Ressalta-se que o aerogerador foi representado por meio da inserção de seu peso próprio, de 21 kPa, no topo da torre. Por fim, foi definida a etapa de carregamento externo (Etapa 04). A mostra as etapas consideradas.

Neste trabalho, será considerada a condição da torre instalada sem funcionamento, ou seja, apenas com atuação da força do vento. O cálculo do carregamento aerodinâmico foi realizado considerando a metodologia descrita na NBR 6123, para estimativa da mais extrema rajada esperada para uma região. Em seguida, a ação do vento foi considerada por meio da força de arrasto, que atua no gerador e na torre (Equação 1). Ressalta-se que para consideração dos efeitos da interação dinâmica, tais solicitações serão majoradas com um fator de 1,5, valor este recomendado pelo fabricante da torre.

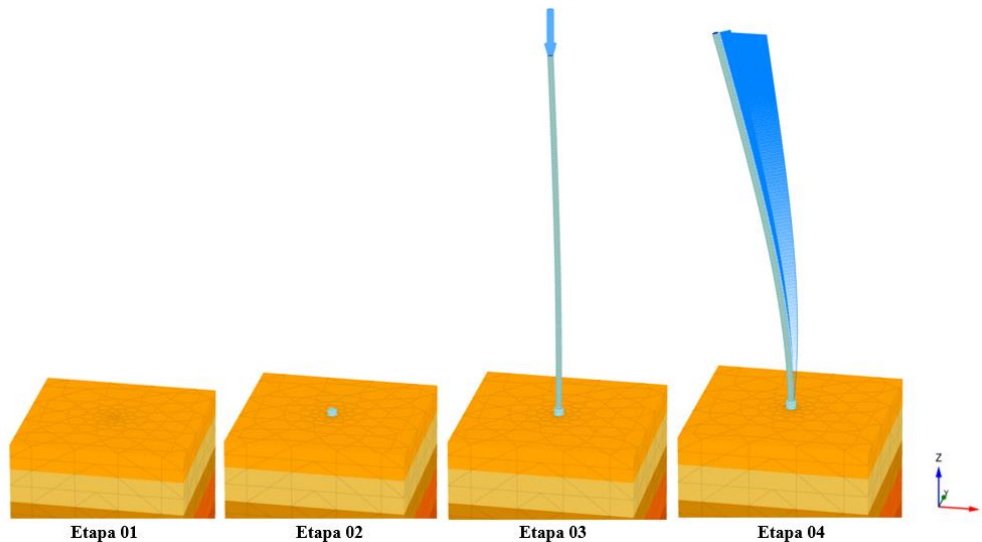


Figura 1. Etapas de cálculo.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (1)$$

Considerar: F_D – Força de arrasto, em N; C_D – Coeficiente de arrasto; ρ – Densidade do fluido, em kg/m^3 ($\rho_{\text{ar}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$); A – Área, em m^2 ; V – Velocidade, em m/s .

Deste modo, foram determinadas duas solicitações horizontais, uma pontual de 1,4kN, atuando no eixo do rotor (20 m de altura), e outra distribuída de forma triangular ao longo da torre, com magnitude máxima de 0,4 kN/m. Ressalta-se que ambas as forças podem atuar em qualquer direção, ou seja, nos 360° em torno do eixo Z. No entanto, estas serão consideradas agindo de forma unidirecional ao longo do eixo X.

3 Análise Paramétrica

Para verificar a influência da geometria da estaca, o sistema foi modelado com comprimento relativo (L/D) de 8, 20 e 28 e diâmetro de 0,5 e 1,0 m. Nesta etapa o bloco foi modelado com diâmetro igual ao da estaca e altura de 0,42 m. Para análise das dimensões do bloco foi considerando um sistema com uma estaca de 14 m de profundidade e 0,5 m de diâmetro, variando apenas as dimensões e formato do bloco. Adotou-se dois tipos de seção e de dimensão, sendo elas circular e quadrada com diâmetro/lado de 1,0 e 1,5 m. A altura do bloco não foi alterada, permanecendo igual a 0,42 m. Os resultados obtidos estão descritos nos tópicos abaixo.

3.1 Influência da Geometria da Estaca

A mostra o comportamento da estaca, quanto a distribuição dos deslocamentos horizontais (u_x) e momentos (M), para diferentes configurações geométricas. Os valores apresentados foram normalizados com as medidas de diâmetro (D) e momento inicial (M_0), respectivamente. A profundidade (z) também foi normalizada, no entanto, em relação ao comprimento da estaca (L). Ressalta-se que os deslocamentos foram determinados na profundidade média de cada camada de solo. A distribuição de momento foi obtida de forma direta, por meio da função *Structural forces in volume piles*, disponível no Plaxis 3D.

Para as curvas de distribuição de momento () nota-se um comportamento diretamente associado ao comprimento da estaca, isto é, um comprimento relativo menor gera os maiores valores de momento. É importante ressaltar que, os resultados indicam que o ponto de engastamento da estaca tende a se aproximar da superfície com o aumento de L/D , exceto para aquelas sujeitas a rotação, nas quais o ponto de engastamento é inexistente. A identificação desse ponto permite definir o limite, a partir do qual, o comportamento da estaca torna-se constante. Em contrapartida, para os diâmetros de 0,5 e 1 m, é observada uma distribuição de momento



semelhante, indicando que a variação do diâmetro não tem influência sobre a distribuição de momentos ao longo da estaca.

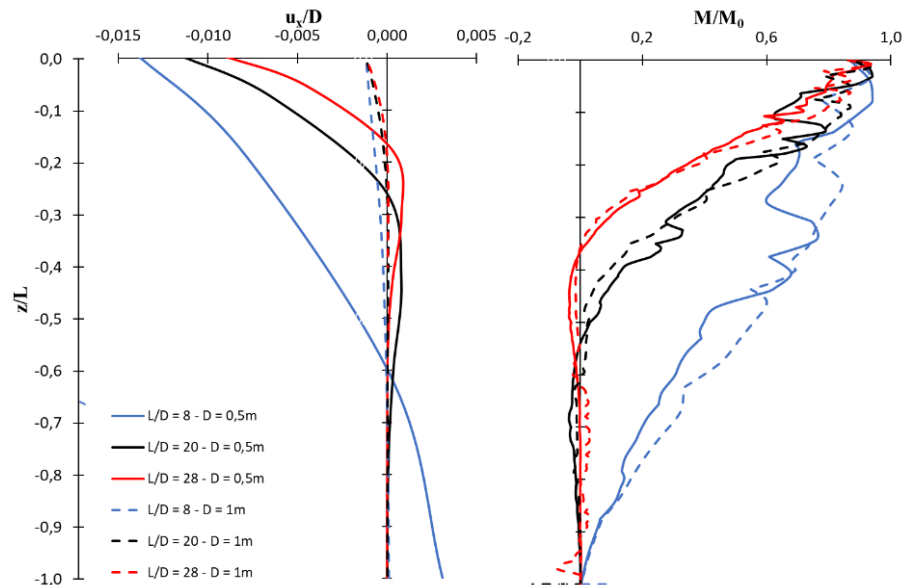


Figura 2. Distribuição de deslocamento e momento, normalizados, para diferentes geometrias.

Na superfície, apenas as estacas de 1 m de diâmetro apresentaram deslocamento similar. Para as estacas de 0,5 m, observa-se que a magnitude dos deslocamentos é mais significativa para baixos valores de comprimento relativo. Deste modo, tona-se razoável considerar a existência um diâmetro máximo a partir do qual, a deflexão no topo da estaca independe da razão L/D .

Pode-se ainda confirmar que estacas de diferentes diâmetros, submetidas as mesmas solicitações e condições de campo, tendem a apresentar comportamento distinto, isto é, diâmetros menores geram maiores deslocamentos horizontais. Isto ocorre devido a baixa rigidez relativa, atribuída a estacas de diâmetro inferior, que facilita a movimentação do elemento estrutural e gera uma maior mobilização do solo.

Deste modo pode-se constatar que os deslocamentos da superfície dependem das propriedades do solo e do diâmetro da estaca. No entanto, esta afirmação só é válida para os comprimentos relativos de 20 e 28 e até z/L igual a 0,7, a partir do qual, os deslocamentos se igualam e tendem a zero, indicando a ocorrência de um mecanismo de ruptura típico de estacas longas com topo livre, com formação de zonas de plastificação. Em contrapartida, para L/D igual a 8, as estacas passam a estar sujeitas à rotação, tal como observado para estacas curtas com topo livre. Na pode-se verificar que a rotação ocorre em torno do ponto de z/L igual a 0,6.

Na Figura 3 tem-se a representação dos deslocamentos do elemento de interface, onde pode-se confirmar a ocorrência de rotação, para as estacas de comprimento relativo igual a 8, e plastificação para as demais.

Conclui-se ainda que a tendencia dos deslocamentos se igualarem a zero e a existência do ponto de engastamento nos fornece um indicativo de existência de um limite, a partir do qual o comprimento real da estaca não afetará os deslocamentos máximos e diagrama de momento.

Por fim, é possível observar que as curvas de deslocamento e momento () apresentam uma maior variação na parte superior da estaca, onde os efeitos do carregamento horizontal são mais significativos. É importante ressaltar que este comportamento também pode estar sendo evidenciado devido a presença da camada de solo de baixa resistência, até aproximadamente 4 m de profundidade.

Conforme já estudado por diferentes autores, o comportamento da torre está diretamente associado a rigidez da fundação, de modo que, quanto mais rígida menor serão os deslocamentos (Novak & Hilfnawy, 1983; Taddei *et al.*, 2015; Ferreira e Futai, 2016). Na Tabela 2 observa-se que, para o diâmetro de 0,5 m, o comprimento da estaca influencia diretamente nos deslocamentos da torre, sendo estes mais elevados quanto mais curta for a estaca. Para D igual a 1 m não houve alteração no deslocamento máximo, indicando que a partir de determinado diâmetro, a comprimento da estaca torna-se irrelevante. O mesmo não pode ser dito para variação de diâmetro, visto que seu aumento pode gerar uma redução de até 12% nos valores de deslocamento máximo da torre. No entanto, para maiores comprimentos essa diferença é reduzida.

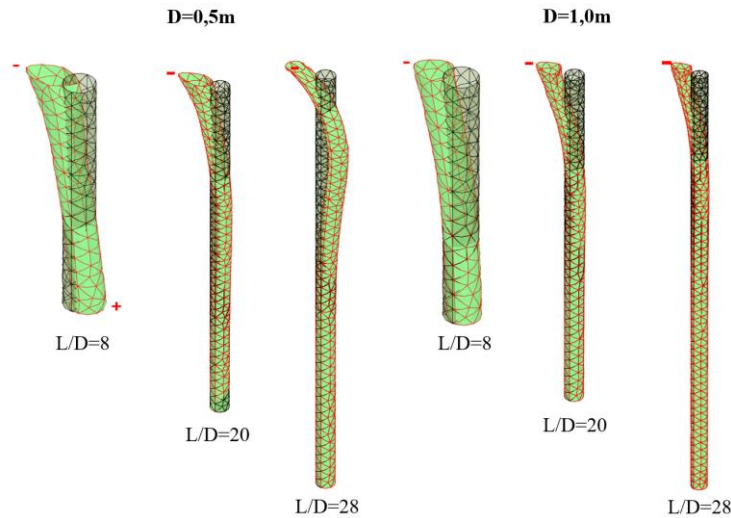


Figura 3. Representação do deslocamento horizontal da interface.

Tabela 2. Deslocamento máximo da torre para diferentes geometrias.

L/D	Deslocamento máximo da torre (m)		Diferença (%)
	D=0,5 m	D=1 m	
8	0,80	0,70	12
20	0,79	0,70	10
28	0,77	0,70	9

3.2 Influência da Geometria do Bloco

Dada a distribuição de deslocamentos horizontais ao longo da estaca (Figura 4), pode-se perceber que a largura/diâmetro do bloco (D_B) tem maior influência nos deslocamentos superficiais, visto que o mesmo tende a reduzir com o aumento de D_B . Isto também ocorre para o formato do bloco, sendo os de seção quadrada responsáveis pela diminuição da magnitude dos deslocamentos. Este comportamento é verificado devido ao aumento da seção transversal do bloco, que por consequência gera um aumento na rigidez do bloco.

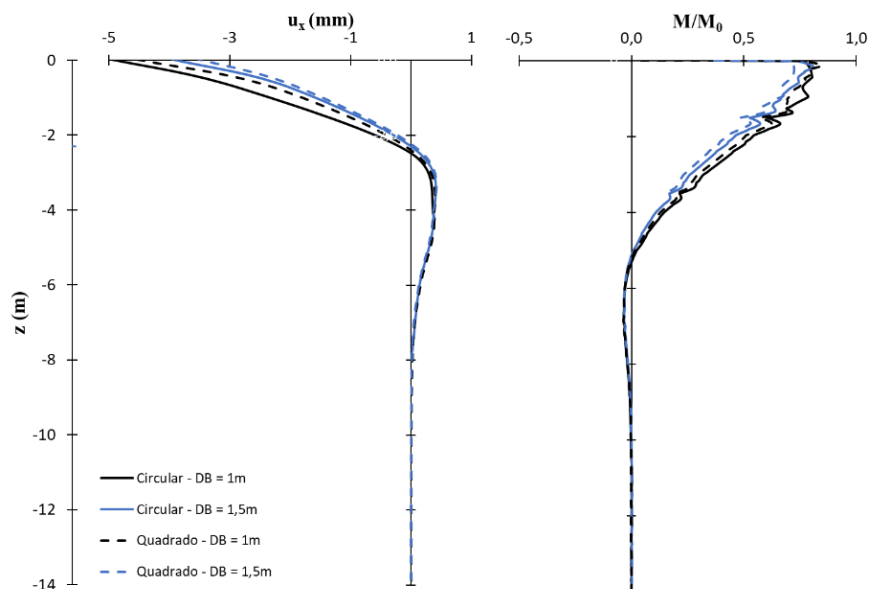


Figura 4. Distribuição de deslocamento horizontal e momento para as diferentes geometrias analisadas.



As curvas também confirmam a existência de uma profundidade crítica de 10 m, tal como observado para análise das dimensões da estaca. Para distribuição dos momentos observa-se que o formato do bloco não representa um fator de grande influência. No entanto, o aumento de D_B resulta em uma menor mobilização do momento transmitido pela torre.

A Figura 5 mostra a distribuição de deslocamento horizontal, no solo, para os blocos circular e quadrado, com 1,5m de diâmetro/lado. Os blocos com D_B igual 1,0 apresentaram comportamento similar, no entanto, com magnitude inferior, da ordem de 10^{-6} m. Observa-se ainda que a região, à montante da solicitação, está sujeita apenas a deslocamentos negativo, ou seja, no sentido de aplicação da carga.

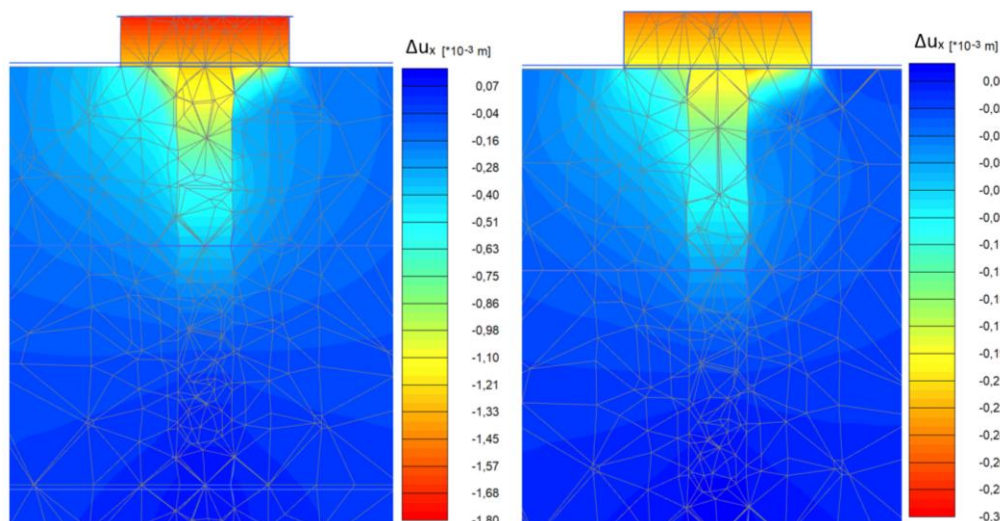


Figura 5. Distribuição de deslocamentos para o bloco circular (esquerda) e quadrado (direita) com $D_B=1,5$ m.

Neste caso pode-se constatar que a consideração do bloco evita a formação do GAP, preservando assim a capacidade de carga lateral da estaca. Ao estudar o comportamento de uma estaca curta sujeita a carregamento lateral, García (2017) observou que para relação h/D_B igual a 0,9, a estaca tende se separar do solo. No modelo proposto, tem-se h/D_B igual a 0,42 e 0,28. Isto sugere que a formação do GAP depende das dimensões do bloco, no entanto, maiores estudos devem ser realizados considerando diferentes razões de h/D_B .

Ainda na Figura 5 observa-se que, próximo à superfície, os deslocamentos apresentam magnitude similar, indicando que o contato estaca-bloco está sujeito ao movimento de translação. Este mecanismo de ruptura reafirma o comportamento proposto por Broms, para estacas longas com topo engastado, no qual indica a formação de uma rótula plástica no contato entre a estaca e o bloco.

Para os deslocamentos da torre, percebe-se que o formato e dimensão do bloco não apresentou influência significativa, tal como mostra a Tabela 3. No entanto, estudos de Ferreira e Futai, (2016) indicam que a geometria da fundação interfere diretamente na frequência natural da torre, de modo que um aumento no diâmetro gera uma elevação da frequência natural, podendo favorecer a ocorrência de ressonância caso este valor se aproxime da frequência de rotação das pás (3P) e do rotor (1P). Neste caso, recomenda-se que maiores estudos sejam feitos considerando a influência na frequência natural.

Tabela 3. Deslocamento máximo da torre para diferentes geometrias de bloco.

Lado	Deslocamento máximo da torre (m)		Diferença (%)
	Circular	Quadrado	
1,0	0,78	0,77	0,0
1,5	0,77	0,77	0,0

4 Conclusões

Para verificar a influência da geometria no comportamento do sistema solo-estrutura, foi realizada uma análise paramétrica, variando as dimensões do bloco e da fundação. Por meio desta, foi verificado que a distribuição de deslocamentos, ao longo da estaca, é influenciada pelo diâmetro, propriedades do solo e



dimensão do bloco. Para a distribuição de esforços, observou-se que o comprimento relativo (L/D) altera a distribuição de momento fletor, ao longo da profundidade. Quanto a inserção do bloco, foi verificada uma redução da magnitude e do alcance, em profundidade, das tensões cisalhantes mobilizadas na parede da estaca. No entanto, estas passam a ser mais significativas na superfície do terreno, devido ao mecanismo de rotação a que o bloco está submetido, influenciando na dimensão do GAP. Quanto a magnitude do deslocamento máximo da torre, foi observada uma variação, a depender do comprimento relativo e do diâmetro da estaca. Por fim, recomenda-se que maiores estudos sejam feitos, considerando possíveis mudanças na frequência natural, devido a possibilidade de ocorrer ressonância.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do projeto de P&D "Otimização do modelo meteorológico BRAMS, com validação experimental, para subsidiar aperfeiçoamentos de modelagens em sistemas eólicos" - PD-0394-1709/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobras FURNAS e Universidade de Brasília. Os autores também agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (InfraLab) da Universidade de Brasília, pelo auxílio financeiro e de infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). (2008). *Atlas de energia elétrica do Brasil* (3º ed.). Brasília, DF: Aneel.
- Faria, P. O., & Noronha, M. (2013). Fundações de torres eólicas - estudo de caso. *IX Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul (GeoSul)*, (p. 13). Criciúma, SC.
- Ferreira, Y. A., & Futai, M. M. (2016). Análise do comportamento das fundações de torres eólicas. *XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica* (p. 8 p). Belo Horizonte, MG: ABMS.
- García, F. J. (2017). Análise do Comportamento de Radier Estaqueados com Estaca Defeituosa Carregados Horizontalmente em Solo Tropical. *Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília*.
- Gavioli, F. M. (2018). Estudo de caso da fundação de uma unidade aerogeradora. *Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp: Campinas, SP*, p. 120.
- Guimarães, R. C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. *Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília*, p. 207.
- Lees, A. (2016). *Geotechnical Finite Element Analysis*. London - UK: ICE Publishing.
- Milititsky, J. (2019). *Fundações de torres: aerogeradores, linhas de transmissão e telecomunicação*. São Paulo: Oficina de Texto.
- Nardelli, A. (2019). Degradação do atrito lateral de estacas em fundações de torres eólicas submetidas ao carregamento cíclico axial. *Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP: São Paulo, SP*, 182p.
- Novak, M., & Hilfawny, L. E. (1983). Damping of struture due to soil-struture interation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 295-306.
- Ravichandran, N., & Shrestha, S. (2019). Comparison of settlement response of piled-raft foundation subjected to combined loads computed from finite element and analytical models. *Geo-Congress*, pp. 63-73.
- Rebolledo, J. F., León, R. F., & Camapum de Carvalho, J. (2019). Obtaining the mechanical parameters for the hardening soil model of tropical soils in city of Brasília. *Soils and Rocks*, p. 14.
- Taddei, F., Butenweg, C., & Klinkel, S. (2015). Parametric investigation of the soil-struture interaction effect on the dynamic behavior of a shallow foundation supported wind turbine considering a layered soil. *Wind Energy*, pp. 399-417.
- Zhussupbekov, A., Lukpanov, R., Orazova, D., & Sapenova, Z. (2016). Design of foundation for wind turbine with analysis by finite element method. *13th Baltic Sea Geotechnical Conference*, pp. 196-200.