

Influência da Geometria da Fundação Superficial de um Aerogerador Assente em Areia de Duna

Gabriela França Azevedo

Doutoranda, Universidade de Brasília – UNB, Brasília, Brasil, gabrielaazevedotn@hotmail.com

José Cléber do Nascimento Sales

Graduando, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, Brasil, clebersales@alu.ufc.br

Diana Rodrigues de Lima Gonçalves

Doutoranda, Universidade de Brasília – UNB, Brasília, Brasil, diana.lima@ufca.edu.br

Renato Pinto da Cunha

Professor, Universidade de Brasília – UNB, Brasília, Brasil, rpcunha@unb.com.br

Alfran Sampaio Moura

Professor, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, Brasil, alfransampaio@ufc.br

RESUMO: A crescente expansão da energia eólica tem impulsionado a instalação de aerogeradores em diferentes locais e condições do subsolo, incluindo areias de dunas. Nesse cenário, as simulações numéricas emergem como ferramentas capazes de avaliar o desempenho de fundações com uma precisão notável. Essas simulações desempenham um papel crucial na otimização de projetos garantindo que as estruturas sejam projetadas com eficiência e segurança. Dessa forma, este artigo estudou o comportamento do sistema solo-fundação considerando a variação geométrica de fundações superficiais de aerogeradores assentes em areia de duna a partir de simulações numéricas tridimensionais utilizando o software PLAXIS 3D©. Para isso, foi utilizado um estudo de caso da fundação de um aerogerador de uma usina eólica em Taíba-CE, apresentado por Moura (2007). Retroanálises de ensaios pressiométricos (PMT) foram realizados para a calibração dos parâmetros geotécnicos de entrada. As geometrias analisadas: quadrada, circular e octogonal demonstraram pouco impacto nos deslocamentos verticais e horizontais da fundação, com diferenças na ordem de décimos de milímetros. Por outro lado, as previsões da distribuição de tensões demonstraram uma maior semelhança entre as geometrias circular e octogonal, as quais foram determinados recalques diferenciais mais elevados quando comparado à geometria quadrada.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação Superficial, Aerogerador, Análise Numérica, Geometria da Fundação, Retroanálise PMT

ABSTRACT: The growing expansion of wind energy has driven the installation of wind turbines in different locations and subsurface conditions, including dune sands. In this scenario, numerical simulations emerge as tools capable of evaluating the performance of foundations with remarkable accuracy. These simulations play a crucial role in project optimization, ensuring that structures are designed efficiently and safely. Thus, this article studied the behavior of the soil-foundation system considering the geometric variation of shallow foundations of wind turbines placed on dune sand through three-dimensional numerical simulations using PLAXIS 3D© software. For this purpose, a case study of the foundation of a wind turbine from a wind farm in Taíba-CE, presented by Moura (2007), was used. Back-analyses of pressuremeter tests (PMT) were performed for the calibration of input geotechnical parameters. The analyzed geometries: square, circular, and octagonal, showed little impact on the vertical and horizontal displacements of the foundation, with differences on the order of tenths of millimeters. On the other hand, stress distribution predictions showed a greater similarity between circular and octagonal geometries, which resulted in higher differential settlements when compared to the square geometry.

KEYWORDS: Shallow Foundation, Wind Turbine, Numerical Analysis, Foundation Geometry, PMT Retroanalysis

1 INTRODUÇÃO

A busca por diferentes fontes de energia motivada pela consciência das limitações dos recursos não renováveis impulsionou a humanidade a explorar outras alternativas para obtenção de energia mais limpas, renováveis e sustentáveis, com menor impacto ambiental. De acordo com Welch e Venkateswaran (2009), e Terciotte (2002) a energia eólica é uma fonte energética capaz de suprir as demandas de uma sociedade, sem prejudicar gerações futuras, e por isso, o uso deste tipo de energia renovável vem crescendo mundialmente.

A energia eólica é uma dessas alternativas que ganhou destaque recentemente. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2022), a energia eólica obteve um crescimento de 26,7% em comparativo com o ano de 2020, sendo a segunda fonte de energia renovável com maior desenvolvimento na geração de energia. A evolução crescente, ano após ano, faz com que o Brasil seja um dos países com maior destaque ao que tange a geração de energia eólica. Segundo dados do GWEC - *Global Wind Energy Council*, presentes no relatório anual de 2021 (ABEEólica, 2021), o Brasil foi o terceiro país com maior instalação de eólicas no mundo, o que elevou sua posição no Ranking Global de Capacidade Instalada, passando a ocupar o sexto lugar.

O Brasil ocupa o oitavo lugar dentre os países que mais produzem energia eólica globalmente. A instalação de novos parques, juntamente com o grande aporte financeiro na produção dessa energia, conformou a quarta colocação do Brasil entre os maiores investidores em energia eólica, fazendo-o entrar para o *ranking* mundial das 10 nações com instalações acumuladas (Brasil, 2016; ABEEólica, 2015). O Ceará foi o primeiro estado a se manifestar em relação a essa energia e assim estimulou vários outros estados brasileiros que hoje tem 20,3 MW de capacidade instalada em território nacional conectadas à rede elétrica (ANEEL, 2016; SILVA & BRITO, 2016). Com o aperfeiçoamento e aumento da potência das torres eólicas, os custos de geração de eletricidade a partir dos ventos vêm diminuindo, o que também reflete na propagação dos parques eólicos ao redor do Brasil e do mundo.

A superestrutura de uma torre eólica é considerada complexa devido à combinação de cargas estáticas e dinâmicas. As cargas estáticas incluem àquelas provenientes da fundação e da própria superestrutura, enquanto as cargas dinâmicas adicionais são geradas pela força dos ventos, as vibrações aerodinâmicas do rotor e as cargas na torre devido às vibrações causadas pela rotação das hélices. Assim, para um aerogerador, é crucial selecionar uma fundação adequada às necessidades do equipamento, garantindo uma interação favorável entre o solo e a estrutura.

As fundações de aerogeradores *onshore* (em terra) podem ser rasas, profundas ou mistas. Mendes et. al (2023) realizou, através de análises numéricas, simulações do comportamento de fundação rasa, com geometria circular, em solos arenosos, utilizando parâmetros obtidos pelos ensaios de sondagens a percussão (SPT) e ensaios pressiométricos (PMT), avaliando a interação solo-estrutura com a variação dos parâmetros obtidos.

Freitas et. al (2018) analisou o comportamento de uma fundação em radier estaqueado para um aerogerador, destacando como o avanço tecnológico da superestrutura impacta no desempenho dessas fundações. Utilizando análise numérica, foi possível compreender a distribuição dos esforços entre o radier e as estacas, bem como os recalques diferenciais provocados pelas cargas dinâmicas e estáticas do aerogerador.

Ribeiro (2017) analisou a influência da geometria de contato em fundações superficiais para aerogeradores comparando três diferentes formas: circular, quadrada e octogonal. O autor ressalta que a geometria das fundações superficiais é um fator que influencia significativamente na eficiência da fundação, tanto com relação ao desenvolvimento de esforços internos quanto na rigidez rotacional fornecida à torre. Os resultados indicaram que a fundação quadrada apresentou melhor desempenho com relação aos esforços internos e a rigidez rotacional fornecida à torre. Além disso, o estudo mostrou que a fundação octogonal apresentou maior similaridade com a fundação circular devido à sua geometria semelhante entre as direções de momento fletor analisadas. A fundação quadrada apresentou os menores valores de momentos fletores máximos, indicando que essa geometria favorece a distribuição de esforços ao longo da sapata, atenuando picos de momentos observados na região de ancoragem da torre.

A variação da geometria de contato para fundações estaqueadas (circular, quadrada e octogonal) assentes no solo tropical do Brasil foi abordada por Azevedo e Garcia (2023). Os resultados destacaram que, embora a geometria do contato não afete a curva carga versus recalque, ela desempenha um papel significativo na distribuição de cargas entre os elementos da fundação e na transferência de cargas para o solo circundante.

Em particular, a geometria quadrada do bloco de estacas destacou-se como a mais favorável, provavelmente devido ao seu maior cobrimento da estaca em relação ao bloco.

Para a fundação de um aerogerador, é crucial considerar como diferentes formas e dimensões podem influenciar no comportamento do sistema de fundação. Estudos têm demonstrado que a variação na geometria do elemento superficial pode acarretar mudanças significativas na capacidade de carga, momento fletor, rigidez e deslocamentos verticais do sistema de fundação. Nesse contexto, este artigo tem como objetivo analisar numericamente como a variação da geometria de uma fundação superficial de um aerogerador, assente em areia de duna, pode alterar o comportamento do sistema solo-fundação. O estudo foi efetuado com base no estudo de caso de um aerogerador de uma usina eólica na praia da Taíba-CE, conforme apresentado por Moura et al. (2014).

2 METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotada neste artigo envolve a análise numérica tridimensional de fundações superficiais de aerogerador em três geometrias diferentes (circular, octogonal e quadrada) assentes em areia de duna, utilizando como base o estudo de caso um aerogerador de uma usina eólica na praia de Taíba-CE. Para realizar essas análises, empregou-se o software PLAXIS 3D®, uma ferramenta de modelagem amplamente utilizada para simular o comportamento de problemas geotécnicos. Os parâmetros geotécnicos de entrada foram calibrados com base nos resultados de ensaios pressiométricos (PMT), garantindo a representatividade das propriedades do solo e uma maior precisão nas simulações.

2.1 Estudo de caso

O estudo de caso do aerogerador analisado por Moura et. al (2014) é uma das torres que fazem parte de uma usina eólica localizada na praia de Taíba. Com uma torre de aço de 44 m de altura, três pás com 18,9 m de comprimento, e a nacelle, compartimento que abriga os componentes essenciais do sistema, o aerogerador é instalado sobre uma fundação superficial quadrada de 9 m de lado por 1,5 m de altura, com peso próprio estimado em 3038 kN, que suporta um peso total de 663 kN correspondente à soma dos pesos: da torre (359 kN), da nacelle (129 kN), do gerador (136 kN), e das três pás (39 kN).

2.2 Abordagem estática para o sistema solo-estrutura

Ressalta-se que para o cálculo da fundação de uma torre eólica é necessário levar em consideração os esforços dinâmicos gerados pelo movimento do vento e da rotação das pás do aerogerador. No entanto, para efeito de cálculo, os esforços dinâmicos foram transformados em uma carga horizontal estática equivalente conforme Moura et. al (2014). O sistema solo-estrutura será fundamentado em uma análise estática, de modo que as cargas dinâmicas, oriundas do momento fletor gerado na base e das vibrações das hélices, atuantes no aerogerador serão substituídas por uma carga estática equivalente, conforme os estudos apresentados por Mendes et, al. (2023).

A força de arrasto (F_{arrasto}) foi determinada a partir de ensaios em túneis de vento com modelo reduzido, resultando em 691 kN para a condição de pico. Multiplicando pelo braço de alavanca (46,2 m), ou seja, a distância entre a base do aerogerador e o centro da nacelle tem-se o momento máximo transmitido à fundação de $M = 31924,2$ kNm. Para desempenhar o mesmo comportamento da análise dinâmica, será utilizada a excentricidade, de forma que o local de aplicação das cargas verticais e horizontais atuantes no centro da fundação se desloque em direção ao bordo da fundação. A força vertical majorada se totaliza em 11 MN. No entanto, no software, uma vez que já é considerado o peso estrutural da fundação, a força vertical majorada adotada nas análises foi de 1989 kN. Os esforços adotados nas análises podem ser visualizados na Figura 1.

2.3 Fundações modeladas

Com base na fundação superficial quadrada do estudo de caso de Moura et. al (2014), que possui dimensões de 9x9 m e 1,5 m de altura, similares à situação real em estudo, realizou-se análises numéricas

tridimensionais de fundações superficiais nas diferentes geometrias, incluindo as formas quadrada, circular e octogonal. Para garantir a equivalência das condições de carga sobre o solo, as superfícies das fundações circular e octogonal foram dimensionadas para possuir a mesma área da superfície quadrada original de 81 m² e a mesma altura de 1,5 metros.

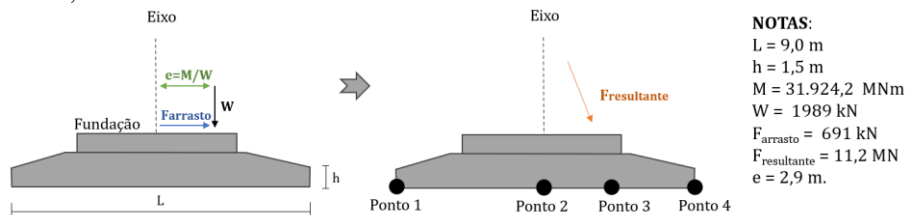


Figura 1. Esforços: (a) excentricidade e ponto de atuação das forças e (b) força resultante e pontos de análise.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

A eficácia de uma análise numérica depende da validação do software, da definição dos parâmetros de entrada dos materiais adotados e, além de tudo, da capacidade de representar o estado geostático do maciço de solo e suas futuras modificações. Para modelagem numérica das fundações analisadas, foram realizadas etapas preliminares de verificação do software, e calibração dos parâmetros geotécnicos a fim de identificar a credibilidade dos resultados obtidos.

3.1 Validação

Para verificar a precisão e confiabilidade da modelagem adotada, foi realizada uma validação numérica baseada na replicação de uma simulação tridimensional de uma fundação superficial, conforme estudada por Azevedo (2021). Utilizando conceitos de simetria, foi analisado um quarto da fundação superficial quadrada, com dimensões de 2,10 x 2,10 m. A carga distribuída foi aplicada em estágios, permitindo a análise do aumento da carga e do recalque resultante. A replicação da simulação (Figura 3) confirmou a consistência da modelagem realizada no software PLAXIS 3D©.

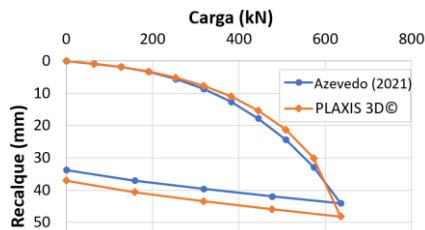


Figura 3 – Curvas carga vs recalque (comparação)

3.2 Calibração dos parâmetros geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos utilizados neste estudo foram obtidos por meio da retroanálise das curvas pressão vs variação volumétrica dos ensaios pressiométricos realizados por Moura et. al (2014) nas dunas da Taíba situada no município de São Gonçalo do Amarante, estado do Ceará. A região é notável por uma extensa faixa de dunas, moldadas sobre os sedimentos da Formação Barreiras, cujas espessuras variam de 15 m, próximo à linha costeira, em até 30 m. Essas dunas são formadas por areias fina, de granulometria uniforme com grau de compactação variando de compacta a muito compacta. Para maiores detalhes sobre os resultados dos ensaios consultar Moura et. al (2014).

O processo de calibração consiste na técnica de ajuste e refinamento dos parâmetros de entrada de modo a reproduzir o comportamento do solo o mais próximo dos resultados observados nos ensaios pressiométricos. Para isso, foi adotada a metodologia de simulação de ensaios de solo “soil test” no software PLAXIS 2D, que permite simular rapidamente alguns tipos de ensaios, incluindo o pressiômetro de Ménard (PMT). Adotou-se, portanto, o modelo “Hardening soil” para representar o comportamento do solo, sendo o único disponível no software para simulação do ensaio do PMT. Esse modelo considera que o solo pode sofrer um endurecimento progressivo com o aumento da deformação, oferecendo uma representação mais realista do comportamento do

solo em comparação com modelos mais simples como o modelo elástico-linear.

No modelo gerado, foram definidas 7 camadas de solo, com profundidade máxima de 30 m. Um comparativo entre as curvas pressão vs variação de volume dos ensaios pressiométricos obtidos experimentalmente e numericamente ao longo da profundidade do perfil de solo (1 a 7m) pode ser visualizado na Figura 4, com os respectivos parâmetros geotécnicos calibrados apresentados na Tabela 1.

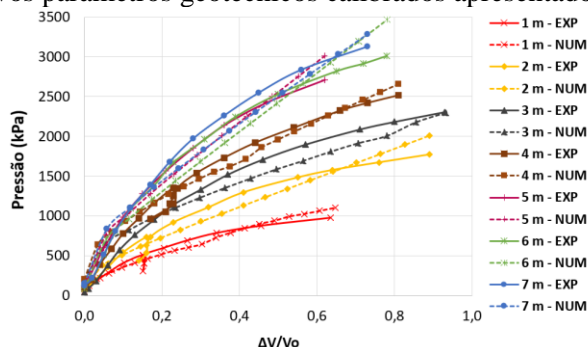


Figura 4. Curvas pressão vs variação de volume do PMT: experimental (EXP) e numérico (NUM)

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos calibrados

Profundidade (m)	(0 - 1)	(1 - 2)	(2 - 3)	(3 - 4)	(4 - 5)	(5 - 6)	(6 - 7)
γ_{unsat} (kN/m ³)	17	17	17	17	17	17	17
γ_{sat} (kN/m ³)	17	17	17	17	17	17	17
E_{50}^{ref} (MN/m ²)	43	30	25	35	100	120	70
E_{oed}^{ref} (MN/m ²)	37	30,33	12,57	18,16	50	55,5	35,38
E_{ur}^{ref} (MN/m ²)	86	80,85	50	77,15	200	300	140
ν_{ur}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Power m	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
p_{ref} (kN/m ²)	100	100	100	100	100	100	100
c' (kN/m ²)	5	5	5	5	5	5	5
ϕ (°)	37	40	40	40	40	40	40
ψ (°)	0	0	0	0	0	0	0
KO^{nc}	0,4475	0,3572	0,3572	0,3572	0,3572	0,3572	0,3572
R_f	0,84	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
KO	1,2	1	1	1	1	1	1

3.3 Verificações preliminares

Além da validação e calibração, foram realizadas verificações preliminares para garantir que não houvesse nenhuma influência decorrente das condições de modelagem. As condições de contorno foram estabelecidas através de uma verificação dos deslocamentos nas extremidades laterais e inferior, adotando um limite de contorno até que um resultado satisfatório fosse atingido, com deslocamentos inferiores a $1 \cdot 10^{-6}$ mm. Para a verificação da densidade da malha, foram realizadas simulações com diferentes níveis de refinamento, com o objetivo de avaliar a qualidade dos resultados obtidos quanto à precisão ou à grosseria. O campo de malha foi configurado com dimensões de 160 m x 160 m de lado por 30m de profundidade.

No PLAXIS 3D®, há cinco opções de malhas, sendo elas: *Very Coarse*, *Coarse*, *Medium*, *Fine* e *Very Fine*, apresentando, cada uma, número de elementos e pontos de tensões diferentes, quantificando melhor a análise conforme a necessidade do problema. Analisando o impacto da fundação sobre o solo, sem o acréscimo de forças externas oriundas do aerogerador, foram coletados os deslocamentos para os cinco tipos de malhas. O ponto 2 (Figura 5) foi utilizado como referência para a obtenção dos dados, sugerindo que não há divergências substanciais entre os valores obtidos. Com isso, a malha foi ajustada para o tipo ‘Medium’, com a configuração preliminar do software, pois além de garantir resultados semelhantes às malhas mais refinadas, apresentou uma maior rapidez na obtenção dos valores.

Para o método dos elementos finitos (MEF), quanto maior o refinamento da malha próximo ao objeto de estudo, mais sofisticados e precisos são os dados obtidos. Para isso, adicionou-se uma maior densidade de elementos ao redor da fundação, com o dobro do grau de refinamento da malha do solo, a partir de um elemento de volume, com dimensões 27 m x 27 m e 5 m de profundidade. As etapas de construção considerados na modelagem são: (1) terreno natural, (2) escavação, (3) construção da fundação e aplicação de carga. Após a

definição e o cálculo de cada fase, são obtidos os resultados correspondentes a cada estágio da construção.

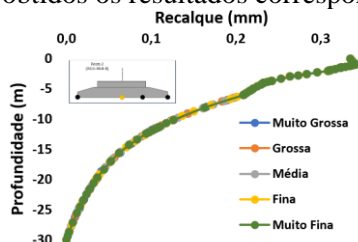


Figura 5. Análise comparativa entre o refinamento das malhas

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em todos os modelos, a ruptura do solo não foi alcançada com os carregamentos aplicados. Na Figura 6, são apresentados os recalques verticais máximos estimados em diferentes pontos das geometrias de fundações estudadas. Estes pontos incluem P1, localizado na extremidade esquerda, P2 no eixo central, P3 na excentricidade e ponto de aplicação da carga resultante, e P4 na extremidade direita da fundação (Figura 1). Como esperado, observa-se recalques mais significativos próximos aos pontos P3 e P4, atribuídos à proximidade e direção das forças aplicadas. A distribuição de tensões abaixo das diferentes geometrias de fundações pode ser visualizada na Figura 7. Ao comparar os deslocamentos obtidos entre as diferentes geometrias, nota-se diferenças na ordem de décimos de milímetros nas condições analisadas. Por outro lado, vale salientar que, essas discrepâncias podem se ampliar sob carregamentos mais elevados. Nesse sentido, é possível calcular os recalques diferenciais obtidos para cada geometria. Considerando os pontos das extremidades P1 e P4, são observados os maiores recalques diferenciais para a geometria circular, com 4,77 mm seguida pela geometria octogonal, com 4,68 mm e a geometria quadrada com o menor recalque diferencial de 4,37 mm.

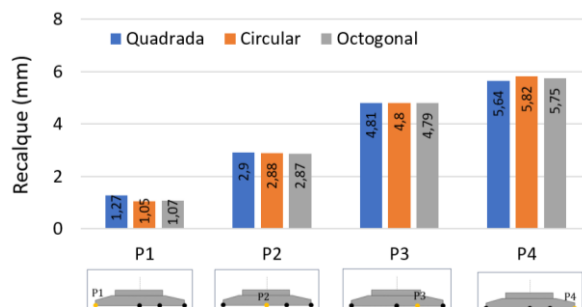


Figura 6. Recalque vertical máximo em pontos distintos para as diferentes geometrias analisadas.

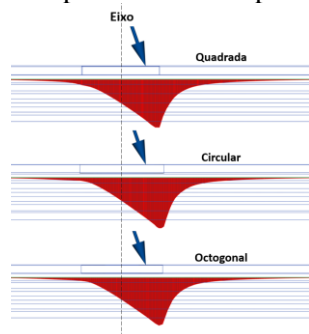
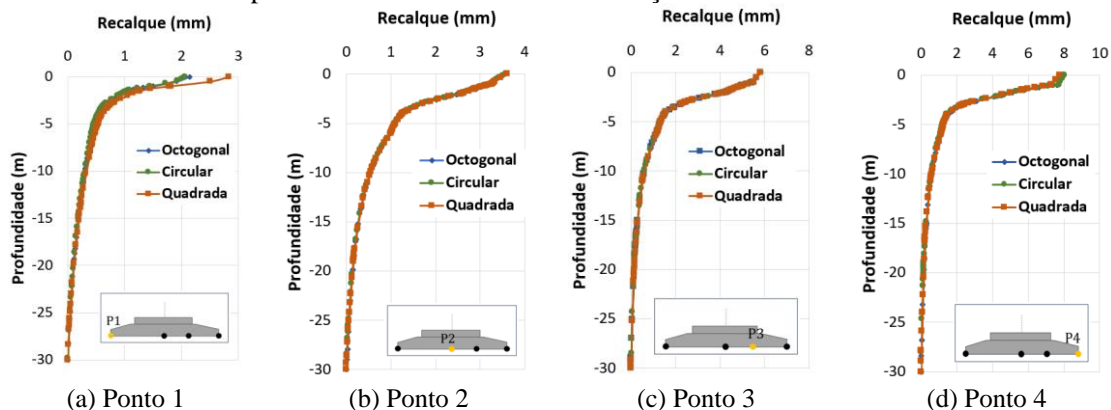


Figura 7. Distribuição de tensões (σ_{zz}) nas fundações: quadrada, circular e octogonal.

Os recalques de cada ponto analisado ao longo da profundidade pode ser visualizado na Figura 8. Observa-se que os gráficos entre as fundações das diferentes formas geométricas se sobrepõem, com exceção da pequena região imediatamente abaixo da fundação, certamente influenciada pela forma geométrica da fundação. De modo geral, é importante ressaltar que a fundação mobiliza o solo até aproximadamente 15 a 20 metros de profundidade, além dos quais os recalques se tornam nulos.

Ao analisar os deslocamentos horizontais na direção de aplicação da carga (no eixo x) nos quatro pontos avaliados, conforme a Figura 9, observa-se que os deslocamentos são mais significativos na extremidade

esquerda, no ponto P1. De maneira geral, a geometria quadrada apresentou os maiores deslocamentos, enquanto as geometrias circular e octogonal demonstraram maior similaridade. Esse comportamento é evidenciado na distribuição dos deslocamentos horizontais, conforme apresentado na Figura 10. Esses resultados ressaltam a importância dos estudos relacionados à forma geométrica da fundação para uma melhor compreensão acerca do comportamento do sistema solo-fundação.



(a) Ponto 1 (b) Ponto 2 (c) Ponto 3 (d) Ponto 4
 Figura 8. Recalque vertical máximo ao longo da profundidade do campo de malha.

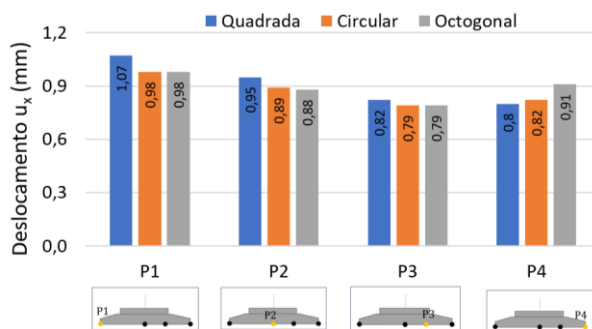


Figura 9. Recalque horizontal (u_x) nos 4 pontos (P1, P2, P3 e P4) nas diferentes geometrias analisadas.

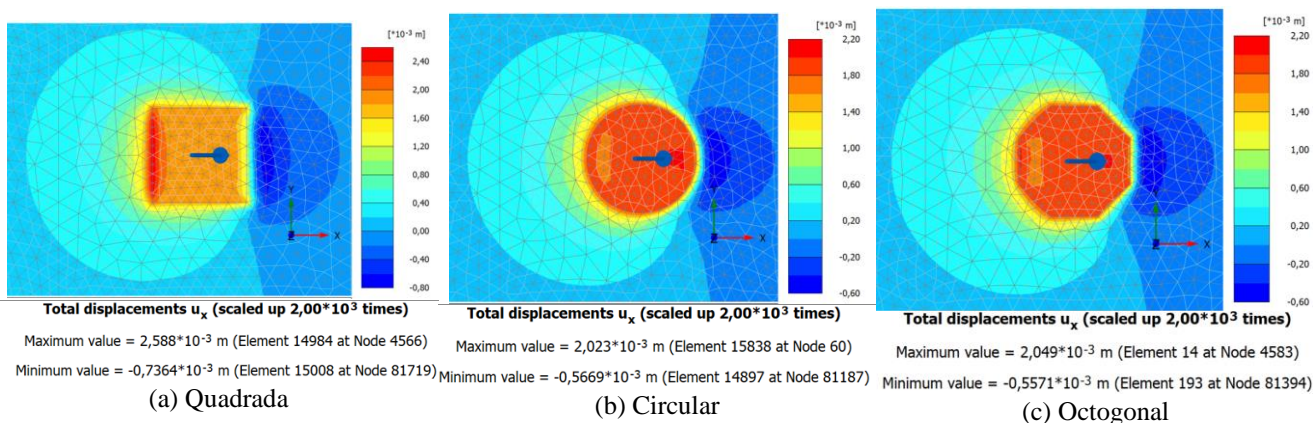


Figura 10. Distribuição dos deslocamentos horizontais (σ_{xx}) nas fundações: quadrada, circular e octogonal.

6 CONCLUSÕES

Este artigo investigou o comportamento de diferentes geometrias de fundações superficiais baseado no estudo de caso de um aerogerador assente em areia de duna na costa Cearense. Os resultados indicam que a variação da geometria (quadrada, circular e octogonal) apresenta pouco impacto nos deslocamentos verticais da fundação, com diferenças na ordem de décimos de milímetros. Diferenças similares foram observadas para os deslocamentos horizontais, no entanto verificou uma maior semelhança na distribuição desses deslocamentos entre as geometrias circular e octogonal, provavelmente devido à forma geométrica. Vale ressaltar que essas conclusões foram observadas para as condições geotécnicas e condições de carregamento

consideradas nesse estudo, portanto, é possível que tais diferenças podem se ampliar para diferentes condições e/ou carregamentos mais elevados.

As análises destacaram que a fundação, de forma geral, mobiliza o solo até aproximadamente 15 a 20 metros de profundidade em todas as geometrias estudadas. Além disso, foram observados recalques diferenciais mais elevados para a geometria circular, seguida pela geometria octogonal, e por fim, para a geometria quadrada apresentando o menor recalque diferencial. Em resumo, embora não demonstrem diferenças substanciais no comportamento, a análise detalhada da geometria das fundações é importante para o projeto e segurança estrutural das edificações, especificamente para estruturas mais sensíveis como os aerogeradores. Isso se deve não apenas aos efeitos nos deslocamentos e recalques diferenciais, mas também à distribuição de cargas e à estabilidade do sistema como um todo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro concedido, e à Universidade de Brasília (UnB), em especial ao Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (InfraLab) pela disponibilização da licença do software PLAXIS para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEEólica (2015). Boletim Anual da Geração de Energia Eólica. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/?ano=2015>>. Acesso em: 12 de fev. 2024.
- ABEEólica (2021). Boletim Anual da Geração de Energia Eólica. Disponível em <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/?ano=2022>>. Acesso em: 12 de fev. 2024.
- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2016). Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>.
- AZEVEDO, Gabriela França (2021). *Análise numérica da influência da geometria do contato bloco-solo no comportamento de fundações estaqueadas*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.
- AZEVEDO, Gabriela França., Garcia, Jean Rodrigo. (2023). *Influence of Pile Cap–Ground Contact Geometry on the Behavior of Piled Foundations*. Arab J Sci Eng 48, 14029–14041. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08091-2>
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2022). Relatório do Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 12 de fev. 2024.
- FREITAS, Ana Paula Sobral (2018). *Comportamento de radiers estaqueados como fundações de aerogeradores de energia eólica*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- MENDES, Giullia Carolina de Melo (2023). *Analysis of geotechnical parameters variation on a numerical modelling of aerogenerators foundations on sandy soils*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará.
- MOURA, Alfran Sampaio; Cunha, Renato Pinto da; Almeida, Maria Cascão Ferreira de. *Contribuição ao projeto de fundações superficiais de aerogeradores assentes nas areias de dunas do litoral cearense*. Geotecnia, Lisboa - Portugal, v. 130, p. 101-129, mar. 2014.
- RIBEIRO, R. (2017) *Análise estática e dinâmica de diferentes geometrias de fundações superficiais de aerogeradores*. Natal- RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- SILVA, M.S.T.; BRITO, S.O. *Impactos ambientais associados á construção de empreendimentos elétricos no setor de distribuição de energia*. Revista Faroeciância, v. 1, n. 1, p. 266-280, 2016.
- TERCIOTE, Ricardo. *Eficiência energética de um sistema eólico isolado*. UNICAMP, Campinas: 2002.
- WELCH, J. B e VENKATESWARAN, A. *The dual sustainability of wind energy*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, p. 1121-1126, 2009.