

Avaliação do desempenho de uma fundação do tipo radier estaqueado de um aerogerador por métodos dos elementos finitos

Performance evaluation of a piled raft foundation of a wind turbine by finite element methods

Evaluación del rendimiento de una cimentación de tipo losa sobre pilotes de una turbina eólica mediante métodos de elementos finitos

Recebido: 26/01/2022 | Revisado: 02/02/2022 | Aceito: 09/03/2022 | Publicado: 16/03/2022

Felipe Carlos de Araújo Leal

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7764-0418>
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: felipe.leal.048@ufrn.edu.br

Ana Paula Sobral de Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9214-6741>
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: apfreitas75@yahoo.com.br

Oswaldo de Freitas Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9488-4123>
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: osvaldo.neto@ufrn.br

Alexandre Duarte Gusmão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7817-6124>
Universidade de Pernambuco, Brasil
E-mail: gusmao.alex@upe.br

Resumo

Este artigo tem o objetivo de avaliar o comportamento da fundação de um aerogerador situado no nordeste do Brasil. O projeto original da fundação da torre não considerou o contato radier-solo no desempenho do sistema. Dessa forma, o presente trabalho propõe considerar o contato radier-solo, ou seja, assumir que a fundação é um radier estaqueado e avaliar o impacto dessa premissa no desempenho da fundação. As análises foram realizadas por meio de dois softwares de elementos finitos: o ABAQUS e o Plaxis 3D Foundation, adotando diferentes critérios de modelagem para os softwares. A caracterização geotécnica do local foi realizada através de sondagens SPT e retroanálise de uma prova de carga. Os resultados obtidos através do ABAQUS e Plaxis 3D foram concordantes, de modo geral, apesar das particularidades de modelagem adotadas em cada software. Os resultados mostraram que o radier suportou mais de 60% da carga vertical aplicada à fundação, atestando a sua importância neste caso. A fundação atendeu aos critérios de rigidez e segurança com certa folga, o que indica a possibilidade de otimização do sistema, com a redução do número de estacas, por exemplo.

Palavras-chave: Radier estaqueado; Fundação de aerogerador; Análise numérica; Método dos elementos finitos.

Abstract

This article aims to evaluate the foundation behavior of a wind turbine located in northeastern Brazil. The original design of the foundation of the tower did not consider the raft-soil contact in the performance of the system. In this way, the present work proposes to consider the raft-soil contact, that is, to assume that the foundation is a piled raft and to evaluate the impact of this premise on the foundation's performance. The analyzes were carried out in two finite element software: ABAQUS and Plaxis 3D Foundation, adopting different modeling criteria for the software. The geotechnical characterization of the site was carried out through SPT soundings and back-calculations of a load test. The results obtained through ABAQUS and Plaxis 3D were in agreement, despite the particularities of modeling adopted in each software. The results showed that the raft supported more than 60% of the vertical load applied on the foundation, attesting to its importance in this case. The foundation met the stiffness and safety criteria with a certain clearance, which indicates the possibility of optimizing the system, with a reduction in the number of piles, for example.

Keywords: Piled raft, Wind turbine foundation, Numerical analysis, Finite element method.

Resumen

Este artículo tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la cimentación de una turbina eólica ubicada en el noreste de Brasil. El diseño original de los cimientos de la torre no consideró el contacto entre la losa y el suelo en el rendimiento del sistema. Así, en el presente trabajo se propone considerar el contacto losa-suelo, es decir, asumir que

la cimentación es una losa sobre pilotes y evaluar el impacto de esta premisa en el desempeño de la cimentación. Los análisis se realizaron utilizando dos softwares de elementos finitos: ABAQUS y Plaxis 3D Foundation, adoptando diferentes criterios de modelado. La caracterización geotécnica del sitio se llevó a cabo mediante sondeos SPT y retroanálisis de una prueba de carga. Los resultados obtenidos a través de ABAQUS y Plaxis 3D coincidieron, en general, a pesar de las particularidades del modelado adoptado en cada software. Los resultados mostraron que la losa soportó más del 60% de la carga vertical aplicada a la cimentación, lo que demuestra su importancia en este caso. La cimentación cumplió con los criterios de rigidez y seguridad con un cierto espacio libre, lo que indica la posibilidad de optimizar el sistema, con una reducción del número de pilotes, por ejemplo.

Palabras clave: Losa sobre pilotes; Cimentación de aerogeneradores; Análisis numérico; Método de elementos finitos.

1. Introdução

A busca mundial pelo desenvolvimento sustentável proporcionou, ao longo dos últimos anos, o advento de novas tecnologias no que diz respeito à geração de energia elétrica. Observa-se um destaque crescente na modalidade de geração de energia através dos ventos. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2021), 10% da matriz energética brasileira é representada pela energia eólica, com 18 GW de capacidade instalada.

Uma maneira de aumentar os ganhos energéticos é construir torres mais altas, já que que em altitudes maiores a velocidade dos ventos também é maior. Segundo Lewin (2010), um aumento na altura de uma torre de 80 m para 100 m pode resultar em um aumento de 14% na produção de energia. Assim, sob uma ótica econômica, aumentar a produção de energia eólica através da construção de torres mais altas é uma alternativa viável.

Por outro lado, do ponto de vista da engenharia geotécnica, aumentar a altura de um aerogerador significa também aumentar as solicitações em sua fundação. Um aerogerador mais alto, além de incrementar carga vertical na fundação, aumenta também o carregamento horizontal e o momento fletor de maneira significativa, em função dos reflexos da ação do vento na torre. O incremento de carregamento, especialmente o de momento fletor, torna o projeto da fundação mais complexo e demanda uma estrutura mais robusta, para atender às questões de segurança. Dessa forma, tendo em vista a importância e a quantidade crescente de aerogeradores na matriz energética brasileira, é essencial o estudo e desenvolvimento de projetos de fundação eficientes e econômicos, de maneira a garantir segurança, adequado desempenho e economia.

Nos projetos de fundação por estacas, uma simplificação recorrente é a não consideração do contato entre o bloco de coroamento da fundação e o solo, ou seja, não se considera a contribuição do bloco no desempenho geotécnico do sistema de fundação. Como as fundações de torres eólicas comumente consistem em grandes blocos (ou radiers) sobre estacas, as mesmas poderiam ser otimizadas ao considerar o contato radier-solo, principalmente no caso de estarem assentes em subsolos com propriedades geotécnicas adequadas. Neste caso, as fundações se comportariam como um radier estaqueado, em que o comportamento final é resultado do desempenho conjunto das estacas e do radier.

Apesar da norma brasileira de fundações (NBR 6122/2019) não contemplar detalhes do uso do radier estaqueado em seu texto, ela permite o seu emprego. Além disso, esse tipo de fundação é objeto de vários estudos nacionais sob diversas condições geotécnicas e de carregamento. Pode-se citar os trabalhos de Sales (2000), Bacelar (2003), Soares (2011), Freitas Neto (2013), Soares et al. (2015), Garcia (2015), Alva (2017), Cordeiro (2017), Freitas (2018), Freitas Neto et al. (2020), Leal (2021), além de outros. De uma forma geral, os estudos atestam para as vantagens de se considerar o contato radier-solo, em termos de ganho de capacidade de carga e rigidez do sistema de fundação.

Apesar das potencialidades de um radier estaqueado como solução de fundação de um aerogerador, o seu projeto demanda uma análise mais complexa do que demandaria uma fundação tradicional do tipo grupo de estacas (onde não há a consideração do contato radier-solo), pois envolve um maior número de interações entre os elementos estruturais da fundação entre si e entre esses e o meio geotécnico. Novak et al. (2005) já estabeleciam que a previsão do comportamento de um radier

estaqueado se mostra como um dos maiores desafios na temática da interação solo-estrutura. Atualmente, os métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos, são ferramentas essenciais para a análise do comportamento e do projeto de radiers estaqueados.

Nessa temática, o presente trabalho propõe avaliar uma fundação de um aerogerador considerando-a como um radier estaqueado, através de dois softwares de elementos finitos. A fundação de análise suporta um aerogerador situado na cidade de Macau, no nordeste do Brasil. O projeto original da fundação da torre foi concebido à luz da metodologia de grupo de estacas, ou seja, não foi considerada a contribuição do radier no desempenho geotécnico do sistema. Dessa forma, este artigo tem o objetivo de avaliar o comportamento da fundação considerando o contato radier-solo, ou seja, assumindo que se trata de um radier estaqueado. As análises foram realizadas por meio de dois softwares de elementos finitos: o ABAQUS e o Plaxis 3D Foundation.

2. Metodologia

2.1 Descrição geral da fundação

A fundação objeto de estudo deste trabalho suporta as solicitações de um aerogerador de 80 m de altura, localizado no município de Macau, no litoral norte do estado do Rio Grande do Norte, no nordeste do Brasil (Figura 1). A estrutura pertence a um parque eólico, no qual foram executadas treze torres Alstom ECO86 de 80 m de altura.

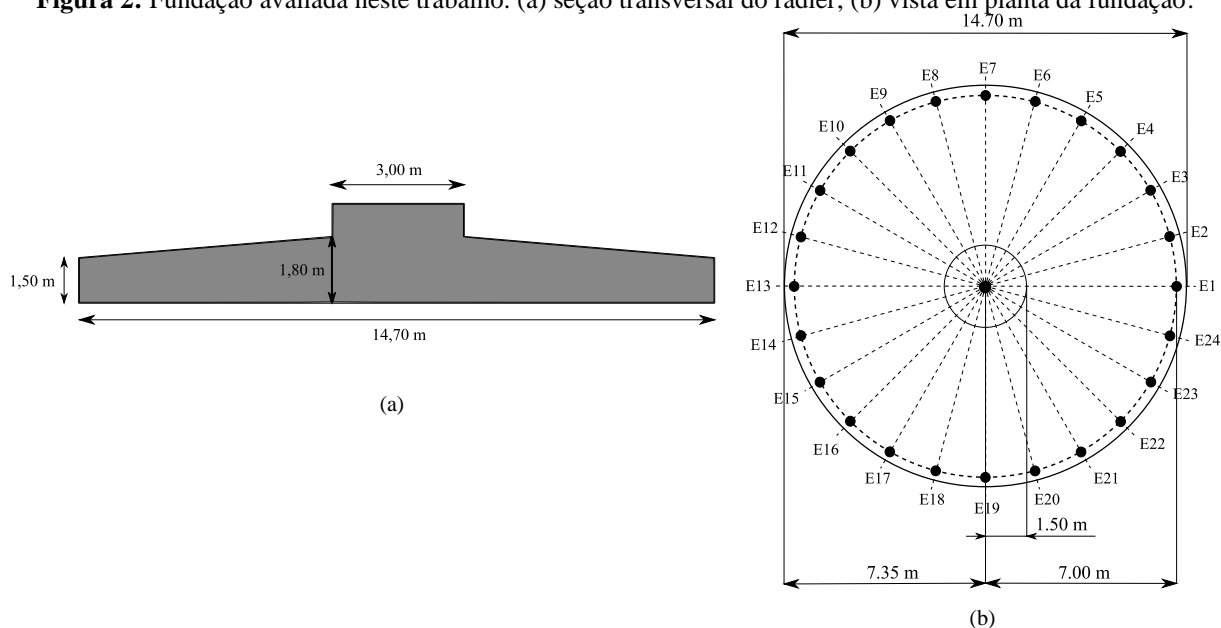
Figura 1: Localização da torre eólica, no município de Macau, no nordeste do Brasil.



Fonte: Leal (2021).

A fundação analisada neste artigo foi concebida originalmente, em projeto, como um grupo de estacas, situação em que não há a consideração do contato radier-solo, ou seja, somente as estacas têm a função de transferir as cargas oriundas da estrutura ao meio geotécnico. Nessa configuração original, o projeto foi composto por um radier de 14,70 m de diâmetro e altura variando de 1,50 m a 1,80 m, assentado sobre 24 estacas do tipo raiz, com 7,0 m de comprimento e 0,35 m de diâmetro, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2: Fundação avaliada neste trabalho. (a) seção transversal do radier; (b) vista em planta da fundação.



Fonte: Autores (2021).

Os esforços atuantes na fundação são decorrentes das solicitações do aerogerador, do peso próprio do radier e do peso de solo de aterro sobre o radier e são mostrados na Tabela 1. Os valores mínimos de rigidez rotacional ($k_{r,min}$) e rigidez translacional ($k_{t,min}$) impostos pela fabricante da torre também são mostrados na Tabela 1. Tais informações foram obtidas do trabalho de Freitas (2018), que realizou um estudo numérico de otimização neste mesmo sistema de fundação, com o software Plaxis 3D Foundation. A rigidez rotacional refere-se à resposta da fundação aos recalques diferenciais e relaciona o momento máximo atuante na fundação com a distorção angular apresentada pelo sistema em decorrência de todos os esforços atuantes. A rigidez translacional, por sua vez, relaciona a força horizontal máxima atuante na fundação com o deslocamento horizontal por ela provocado.

Tabela 1: Esforços atuantes na fundação e valores mínimos de rigidez rotacional e translacional exigidos.

Carga vertical - peso do aerogerador (kN)	Carga vertical - peso do radier + solo (kN)	Carga horizontal do aerogerador (kN)	Momento do aerogerador (kN.m)	$k_{r,min}$ (GNm/rad)	$k_{t,min}$ (GN/m)
2478,0	8940,3	622,0	45066,0	61	1,4

Fonte: Freitas (2018).

2.2 Aspectos gerais das modelagens numéricas

As modelagens numéricas foram realizadas considerando a fundação como um radier estaqueado com 24 estacas, ou seja, admitindo o contato da base do radier com o solo. Para a realização das simulações, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos Tridimensional, através dos softwares ABAQUS e Plaxis 3D Foundation. Em ambos os softwares, o solo foi modelado como um meio contínuo, a partir de um modelo elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb, enquanto que para os elementos de concreto, utilizou-se o modelo elástico-linear.

Embora os dois softwares tenham modelos de cálculo baseados no Método dos Elementos Finitos, cada programa apresenta suas particularidades e potencialidades de uso. Aliado a isto, em cada software as simulações foram realizadas adotando-se diferentes critérios de modelagem. A Tabela 2 sintetiza os diferentes critérios de modelagem adotados no

ABAQUS e Plaxis 3D.

Pela Tabela 2, observa-se que há distintos elementos finitos utilizados nos dois softwares. Além disso, no ABAQUS simulou-se o modelo completo com uma geometria circular, enquanto que no Plaxis 3D simulou-se apenas metade do modelo, tendo em vista a simetria do problema, e considerou-se um domínio de geometria quadrada. Observa-se, conseqüentemente, que o número de elementos finitos/nós modelados no ABAQUS foi consideravelmente superior ao modelado no Plaxis 3D, bem como o tempo de processamento.

Tabela 2: Informações das modelagens numéricas no ABAQUS e no Plaxis 3D.

	Tipos de elemento finito	Geometria do modelo	Modelo simulado	Nº de elementos finitos/Nº de nós	Tempo de processamento
ABAQUS	Prismáticos de 8 nós (para o solo) e de 6 nós (para elementos de fundação)	Circular	Modelo completo	108940/106739	11h55min.
Plaxis 3D	Prismáticos de 15 nós (para o solo e elementos de fundação)	Quadrada	Metade do modelo	18486/52800	30min.

Fonte: Autores (2021).

Os domínios vertical e horizontal dos modelos foram definidos de modo a abranger todas as influências das solicitações aplicadas e eliminar os efeitos de borda no problema. Dessa forma, adotou-se as dimensões mostradas na Tabela 3.

Tabela 3: Domínios vertical e horizontal adotados nas modelagens.

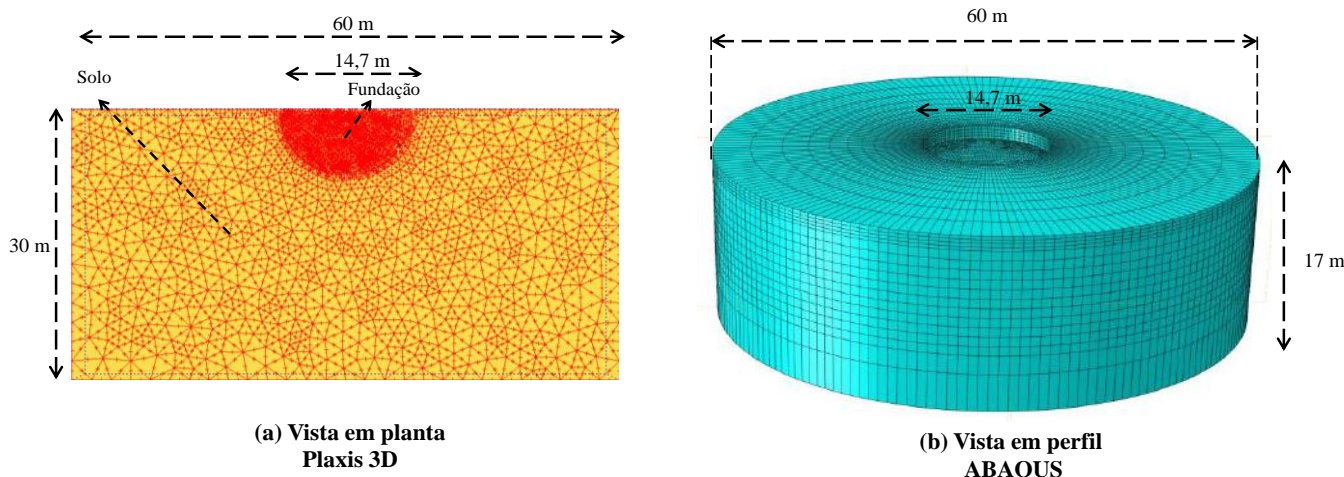
R_R (m)	Domínio Horizontal	Domínio Horizontal (m)	L (m)	Domínio vertical	Domínio Vertical (m)
7,35	$4R_R$	30,0	7,0	$2,4L$	17,0

Nota: R_R : Raio do radier; L: Comprimento da estaca

Fonte: Freitas (2018).

A Figura 3(a) mostra uma vista em planta do modelo simulado no Plaxis 3D. Trata-se da metade do modelo completo, com uma geometria quadrada. A Figura 3(b) mostra uma vista em perfil do modelo simulado no ABAQUS. Trata-se do modelo completo, com uma geometria circular.

Figura 3: Geometria dos modelos simulados. (a) Vista em planta no Plaxis 3D; (b) Vista em perfil no ABAQUS.

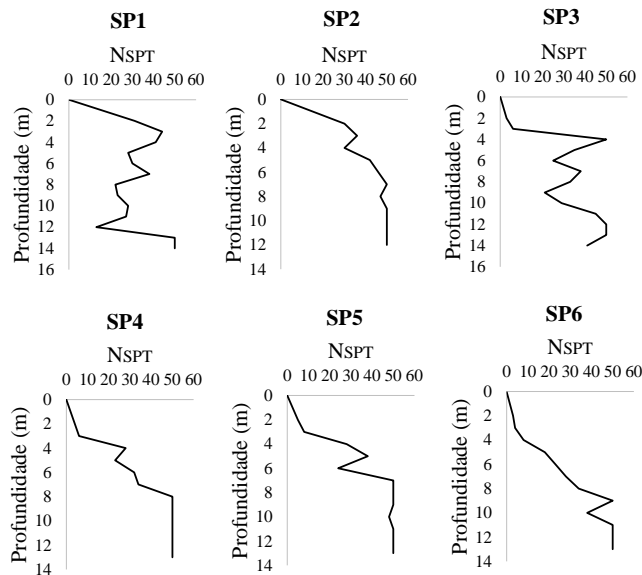


Fonte: Autores (2021).

2.3 Caracterização geotécnica do local

Para a caracterização geotécnica do local da obra, foram realizados seis ensaios de sondagem à percussão do tipo SPT. A Figura 4 mostra os resultados da variação do índice de resistência à penetração (NSPT) com a profundidade para os seis furos de sondagem. Observa-se que, no geral, há um aumento do N_{SPT} com o aumento da profundidade.

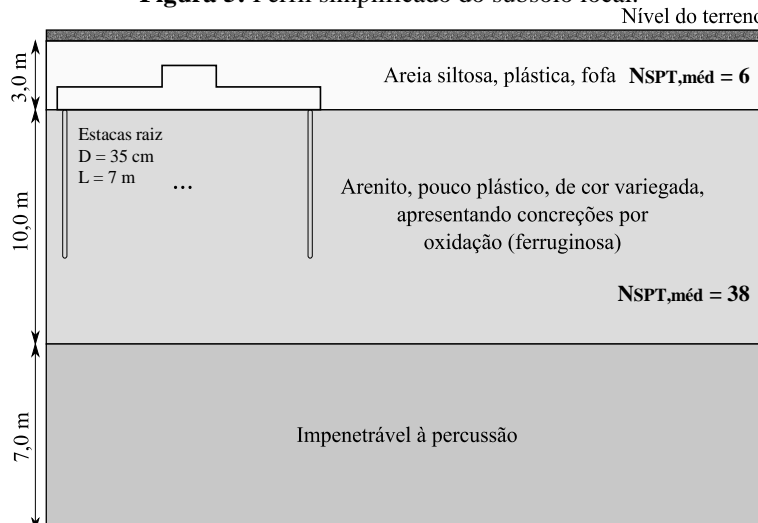
Figura 4: Resultados de ensaios SPT no local da obra.



Fonte: Adaptado de Freitas (2018).

A Figura 5 mostra o perfil médio simplificado do subsolo, com uma camada superficial de areia siltosa, plástica, fofa, com espessura média de 3 m, seguida por uma camada de arenito consolidado, pouco plástico, de cor variegada, muito compacto, apresentando concreções por oxidação (ferruginosa) com espessura média de 10 m. Por fim, em função do limite da sondagem (alcance do impenetrável à percussão), considera-se uma camada de 7 m de material designado impenetrável. Não foi identificado o nível d'água. Observa-se que a fundação foi assentada diretamente sobre a camada de arenito.

Figura 5: Perfil simplificado do subsolo local.

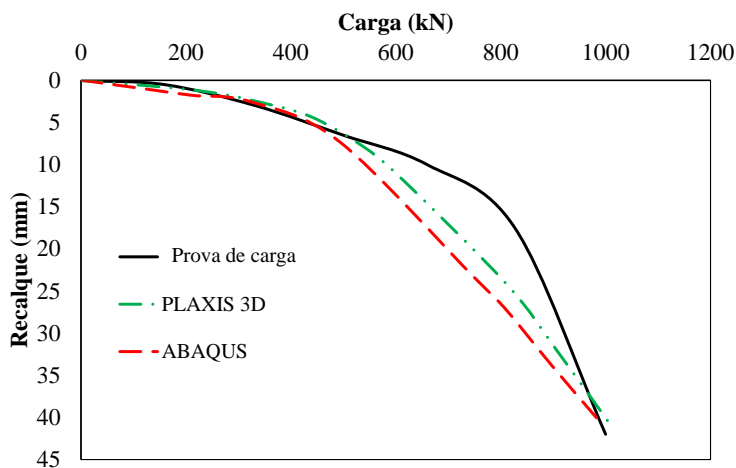


Fonte: Autores (2021).

Para a obtenção dos parâmetros geotécnicos a serem utilizados na modelagem numérica da fundação, foram empregadas, inicialmente, formulações consagradas na literatura para solos, como as propostas por Godoy (1972) para o peso específico do solo (γ) e Godoy (1983) para o ângulo de atrito (ϕ), ambos citados por Cintra et al. (2011); Teixeira e Godoy (1996) para coesão (c), módulo de elasticidade (E_s) e coeficiente de Poisson (ν), além de Bolton (1986) para o ângulo de dilatação (ψ).

A fim de avaliar a representatividade e refinar os parâmetros geotécnicos inicialmente determinados, tomou-se como referência uma prova de carga estática realizada em estaca da obra, cujo resultado é mostrado na Figura 6. Realizou-se a retroanálise da prova de carga nos softwares ABAQUS e Plaxis 3D, adequando os parâmetros de maneira a obter um comportamento concordante entre os softwares e o resultado experimental. Os resultados finais da retroanálise em ambos os softwares são mostrados na Figura 6, evidenciando um comportamento próximo entre as curvas numéricas e experimental.

Figura 6: Resultados da retroanálise da prova de carga no ABAQUS e no Plaxis 3D.



Fonte: Autores (2021).

Os parâmetros geotécnicos finais para as modelagens no ABAQUS e no Plaxis 3D são mostrados na Tabela 4. Observa-se que a retroanálise resultou em valores de módulo de elasticidade (E), ângulo de atrito (ϕ) e ângulo de dilatação (ψ) superiores na camada de arenito quando se usa o ABAQUS em relação a quando se usa o Plaxis 3D. Os demais parâmetros são os mesmos para ambos os softwares.

Tabela 4: Parâmetros finais retroanalizados utilizados nas modelagens com o ABAQUS e o Plaxis 3D.

ABAQUS						
Material	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)	ψ (°)
Areia siltosa	19,0	20,0	0,3	0	35	5
Arenito consolidado	26,0	91,0	0,2	20,0	38	8
Impenetrável	26,0	21000,0	0,1	170,0	40	10
Concreto da fundação	24,0	21000,0	0,2	-	-	-
Plaxis 3D						
Areia siltosa	19,0	20,0	0,3	0	35	5
Arenito consolidado	26,0	65,0	0,2	20,0	36	6
Impenetrável	26,0	21000,0	0,1	170,0	40	10
Concreto da fundação	24,0	21000,0	0,2	-	-	-

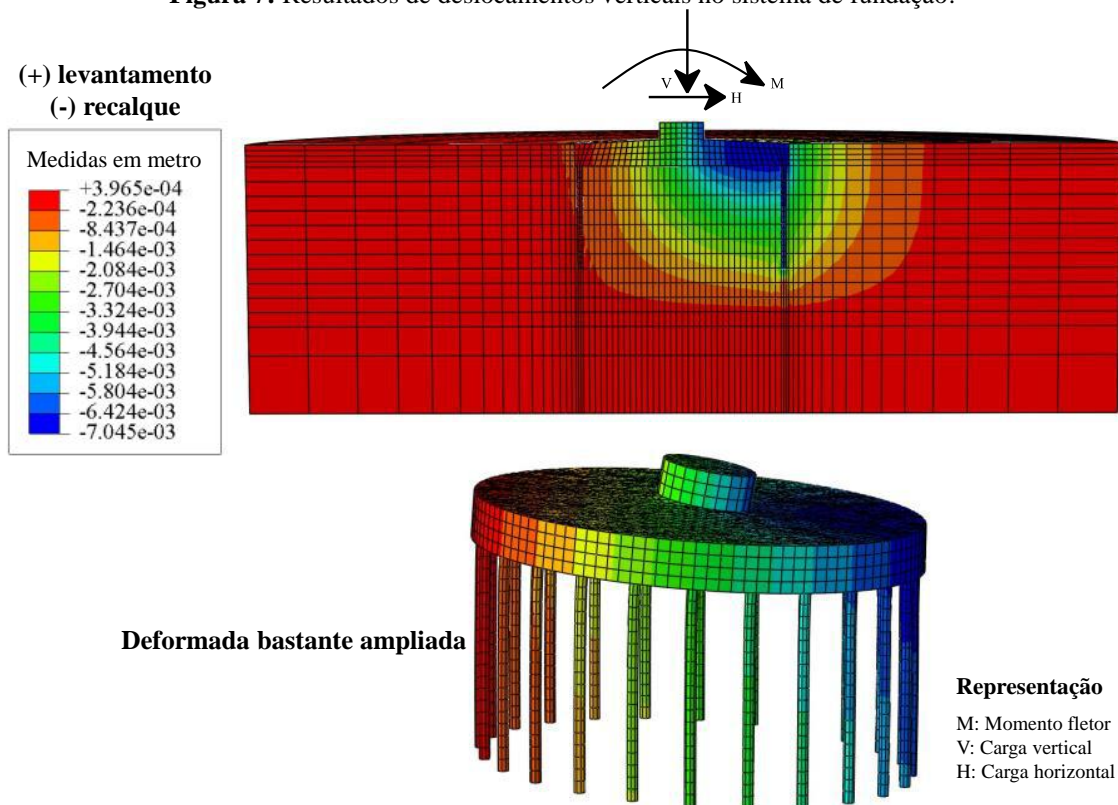
Nota: γ : Peso Específico; E : Módulo de Elasticidade; ν : Coeficiente de Poisson; c : Coesão; ϕ : Ângulo de Atrito; ψ : Ângulo de dilatação

Fonte: Autores (2021).

3. Resultados e Discussão

A partir da aplicação dos carregamentos indicados na Tabela 1, a Figura 7 apresenta os resultados de deslocamentos verticais (recalques e levantamentos) na fundação, de acordo com o obtido através do ABAQUS. Observa-se que, em função do momento aplicado, houve uma rotação da fundação e o recalque máximo foi de 7,05 mm, na extremidade direita do topo do radier. A extremidade esquerda, diametralmente oposta, apresentou um levantamento máximo de aproximadamente 0,40 mm. Com o Plaxis 3D, obteve-se um recalque máximo de 7,10 mm e um levantamento máximo de 0,25 mm, evidenciando uma boa concordância entre os softwares.

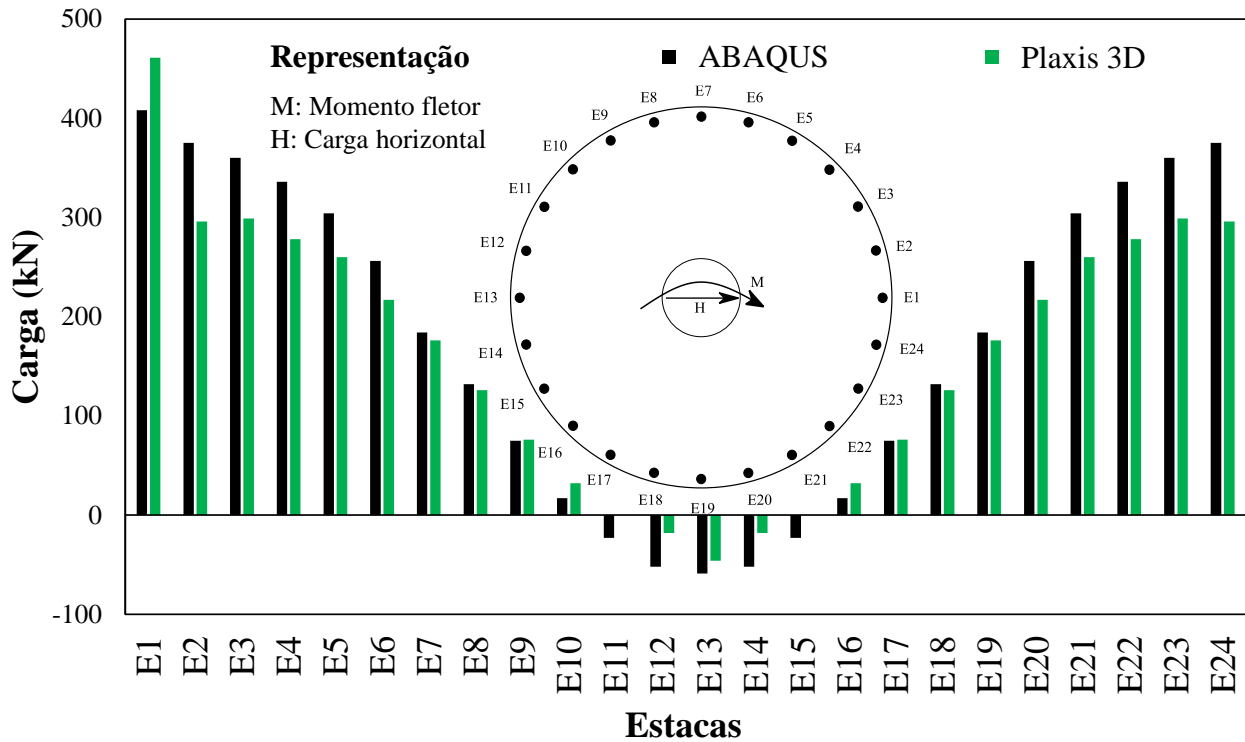
Figura 7: Resultados de deslocamentos verticais no sistema de fundação.



Fonte: Autores (2021).

A Figura 8 mostra as cargas verticais que chegam ao topo das estacas da fundação, conforme o observado no ABAQUS e no Plaxis 3D. Observa-se, novamente, uma boa concordância entre os resultados dos softwares. A carga máxima de compressão ocorre na estaca E1 e equivale a 408 kN (ABAQUS) e 461 kN (Plaxis 3D). As estacas E11, E12, E13, E14 e E15 estão sujeitas à tração e a carga máxima de tração ocorre na estaca E13, diametralmente oposta à E1, e equivale a -59 kN (ABAQUS) e -46 kN (Plaxis 3D). O comportamento observado está de condizente com a deformada da fundação mostrada na Figura 7, a qual está relacionada ao sentido de atuação do momento da torre. Shrestha (2015), em análise de um radier estaqueado como fundação de um aerogerador, também observou que o mecanismo de rotação da fundação, devido à ação do momento aplicado, comprimia mais a estaca localizada na extremidade de maior recalque e tracionava mais a estaca diametralmente oposta.

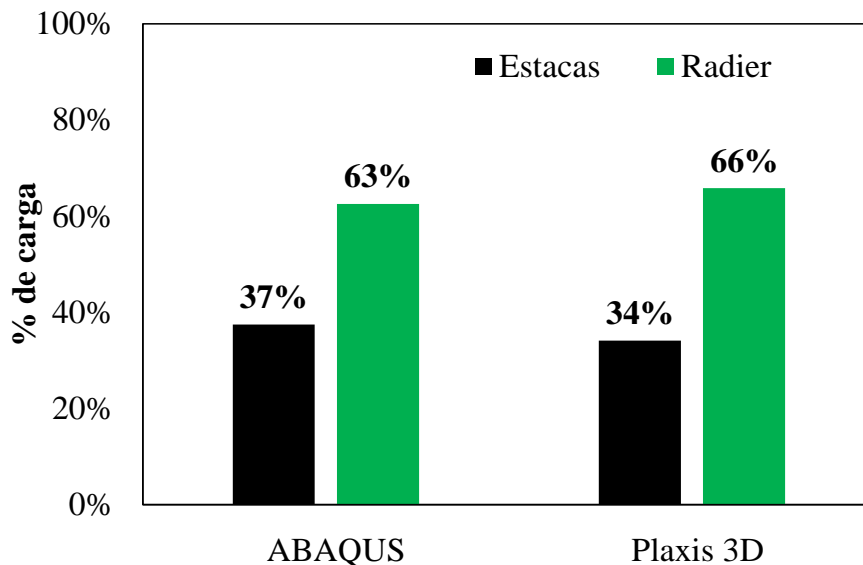
Figura 8: Cargas verticais no topo das estacas.



Fonte: Autores (2021).

A Figura 9 mostra que, para a fundação de análise, o radier, que está assentado numa camada de arenito, foi responsável por resistir a uma parcela superior a 60% da carga vertical aplicada à fundação, de acordo com ambos os softwares. Isso mostra a importância que o radier assume neste problema, em função da elevada resistência mecânica do arenito e da considerável área de contato do radier com tal camada. Poulos (2001) já estabelecia que o radier estaqueado é viável quando se tem solos compactos e rígidos nas proximidades da superfície do terreno.

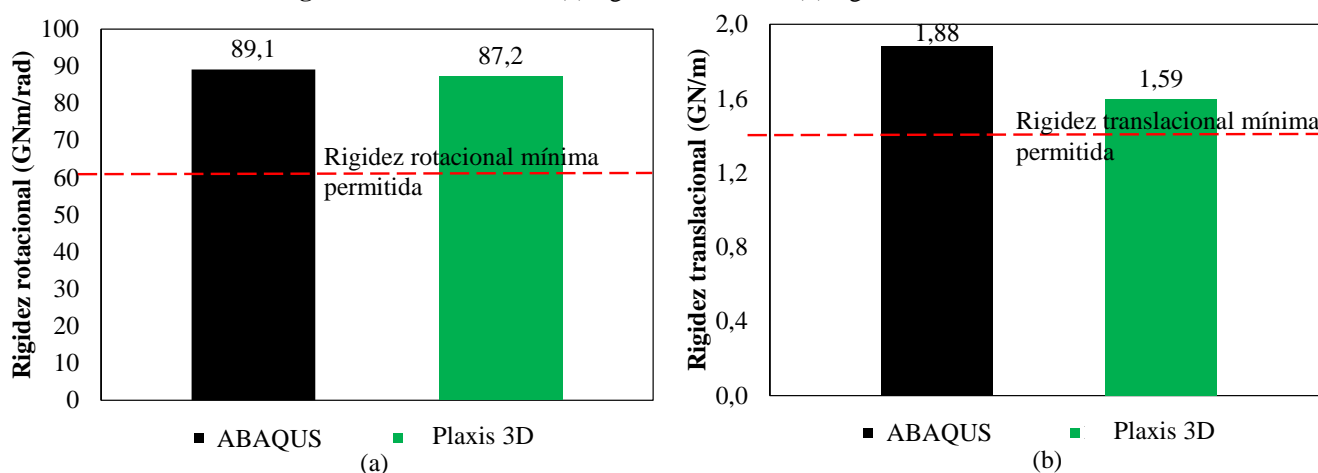
Figura 9: Distribuição de cargas verticais entre estacas e radier.



Fonte: Autores (2021).

Em relação aos critérios de rigidez, a Figura 10 mostra os resultados de rigidez rotacional e translacional obtidos através do ABAQUS e do Plaxis 3D. Novamente, observa-se uma boa concordância entre os resultados, mostrando o atendimento aos limites mínimos exigidos com certa folga. No que se refere à rigidez rotacional, os resultados indicaram os valores de 89,1 GNm/rad (ABAQUS) e 87,2 GNm/rad (Plaxis 3D), que diferem entre si em aproximadamente 2%. Ambos os valores superam com folga a rigidez rotacional mínima exigida pela fabricante da torre, que é de 61 GNm/rad. Em relação à rigidez translacional, observa-se os valores de 1,88 GN/m (ABAQUS) e 1,59 GN/m (Plaxis 3D), que divergem entre si em aproximadamente 15%. Tais valores também superam com folga a rigidez translacional mínima exigida pela fabricante da torre, que é de 1,4 GN/m.

Figura 10: Resultados de (a) rigidez rotacional; (b) rigidez translacional.



Fonte: Autores (2021).

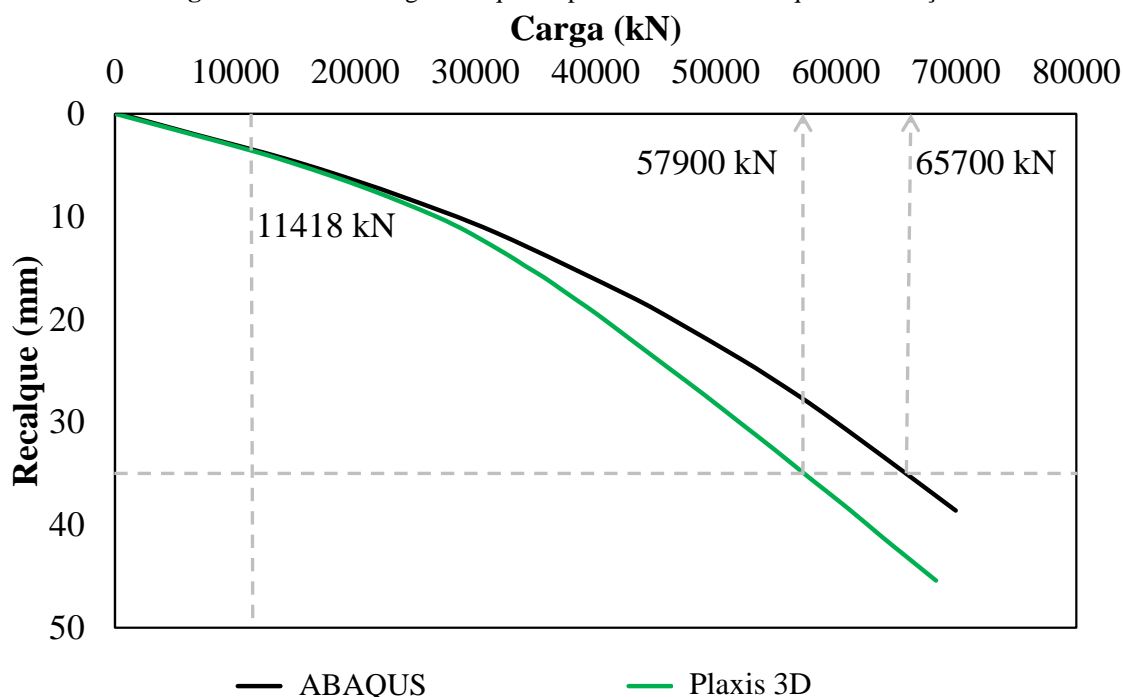
Os resultados mostrados na Figura 10 indicam que a consideração do contato radier-solo nas modelagens da fundação resultou numa elevada rigidez do sistema, em função da contribuição do radier. Tal rigidez certamente não foi observada no projeto original da fundação, tendo em vista que não se considerou o contato radier-solo nas análises. Pela Figura 10, fica evidente que o contato radier-solo possibilita otimizar a fundação, com a redução do número de estacas, por exemplo. Tal fato foi constatado por Freitas (2018) e Leal (2021), que analisaram este mesmo problema e indicaram a possibilidade de redução do número de estacas.

Levando a fundação a uma situação de ruptura, através do incremento de carga vertical, a Figura 11 mostra as curvas carga/recalque obtidas através do ABAQUS e do Plaxis 3D, considerando o ponto de maior recalque na fundação. Observa-se uma boa concordância entre as curvas até um certo nível de carregamento, em torno de 30000 kN. Posteriormente, o ABAQUS resultou em um comportamento mais rígido da fundação. Considerando o critério de ruptura de Décourt (1993) e da norma inglesa BS 8004 (2015), que estabelece que a carga de ruptura da fundação é aquela que provoca o recalque equivalente a 10% do diâmetro das estacas (35 mm, neste caso), obtém-se a carga de ruptura de 65700 kN (ABAQUS) e 57900 kN (Plaxis 3D), resultados que divergem em aproximadamente 12% entre si.

Considerando a soma de todas as cargas verticais que atuam na fundação (11418 kN), pode-se definir um Fator de Segurança Global (FS) do sistema, relacionando a carga de ruptura da fundação com o somatório das cargas verticais atuantes. Chega-se a um FS de 5,8 (ABAQUS) e 5,1 (Plaxis 3D). Tratam-se de valores bem superiores ao valor mínimo de 2,0, estabelecido pela norma brasileira de fundações (NBR 6122/2019) para fundações profundas. Os valores elevados de FS

indicam que a fundação pode estar superdimensionada para resistir aos esforços verticais, o que é esperado, pois em um aerogerador os esforços verticais são, em geral, menos relevantes que os momentos fletores, logo a robustez da fundação está relacionada principalmente aos efeitos dos momentos fletores e não dos esforços verticais. Trabalhos como os de Shrestha (2015), Shrestha et al. (2017), Freitas (2018), Ravichandran et al. (2018) e Leal (2021), que avaliaram fundações de aerogeradores, mostraram que o critério limitante no projeto da fundação de uma torre eólica está relacionado aos recalques diferenciais (rotação da fundação) que, por sua vez, são consequência dos intensos momentos fletores atuantes. Além disso, é evidente que o valor elevado de FS na fundação também é resultado do incremento de resistência gerado pelo contato radier-solo na fundação.

Figura 11: Curvas carga/recalque no ponto de maior recalque na fundação.



Fonte: Autores (2021).

Pelos resultados obtidos neste trabalho, observa-se, no geral, uma boa concordância entre os comportamentos da fundação previstos pelo ABAQUS e pelo Plaxis 3D. Em todos os casos de análise, observou-se que a consideração do contato radier-solo assumiu um importante papel a favor da segurança e bom desempenho da fundação. Os resultados mostraram que é possível otimizar o sistema, com a redução do número de estacas, por exemplo, trazendo economia ao projeto.

4. Conclusão

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- As ferramentas numéricas, desde que calibradas com resultados experimentais, são importantes instrumentos para projetos de fundação, principalmente quando envolvem mecanismos complexos, como no radier estaqueado;
- Os resultados obtidos através do ABAQUS e Plaxis 3D foram concordantes, de modo geral, apesar das particularidades de modelagem adotadas em cada software. Destaca-se que a modelagem da metade do problema no Plaxis 3D resultou em considerável redução de tempo de processamento, sem prejuízo nos resultados finais;

- O radier apresentou um comportamento importante no sistema, suportando mais de 60% da carga vertical aplicada à fundação, o que mostra a viabilidade do radier estaqueado neste caso;
- A fundação atendeu aos critérios de rigidez e segurança com certa folga, o que indica a possibilidade de otimização do sistema, com a redução do número de estacas, por exemplo.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a realização da análise da fundação considerando os efeitos da superestrutura (torre eólica) no modelo, inclusive levando em conta os efeitos dinâmicos decorrentes da operação de um aerogerador.

Agradecimentos

Os autores agradecem o auxílio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRN para o desenvolvimento desse trabalho científico.

Referências

- Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEólica (2021). Energia Eólica: Os bons ventos do Brasil. *Infovento* 19. <http://abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>. Acesso em 02/04/2021.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2019). NBR 6122:2019 – Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro.
- Alva, F. G. (2017). *Análise do comportamento de radier estaqueados com estaca defeituosa carregados horizontalmente em solo tropical*. 2017. 169 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.
- Bacelar, C. J. R. (2003). *Análises de Recalque em Rádiers Estaqueados*. 2003. 193 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- BSI – The British Standard Institution (2015). BS 8004: Code of Practice for Foundations. London, United Kingdom.
- Bolton, M. D. (1986). Strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*. 36(1), 65-78. DOI: 10.1680/geot.1986.36.1.65.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N. & Albiero, J. H. (2011). *Fundações diretas: projeto geotécnico*, Oficina de Textos, São Paulo, 140 p.
- Cordeiro, A. F. B. (2017). *Modelagem Física de Rádiers Estaqueados com e sem Estacas Defeituosas Assentes em Areia*. 188 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.
- Décourt, L. (1983). Prediction of load settlement relationships for foundations on the Basis of the SPT-T. In: *Ciclo de Conferencias Internacionales Leonardo Zeevaert*, p. 87- 104, México.
- Freitas, A. P. S. (2018). *Comportamento de rádiers estaqueados como fundações de aerogeradores de energia eólica*. 2018. 285 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Freitas Neto, O. (2013). *Avaliação Experimental e Numérica de Rádiers Estaqueados com Estacas Defeituosas em Solo Tropical do Brasil*. 2013. 253 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.
- Freitas Neto, O., Cunha, R. P., Albuquerque, P. J. R. & Garcia, J. R. (2020). Experimental and numerical analyses of a deep foundation containing a single defective pile. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 17 (3). DOI: <https://doi.org/10.1590/1679-78255827>.
- Garcia, J. P. (2015). *Análise Experimental e Numérica de Rádiers Estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP*. 2015. 321 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Leal, F. C. A. (2021). *Análise estática e sísmica de fundação de aerogerador em radier estaqueado*. 2021. 286 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Lewin, T. J. (2010). *An investigation of design alternatives for 328-ft (100-m) tall wind turbine towers*. 2010. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Iowa State University, USA.
- Novak, J. L., Reese, L. C. & Wang, S. T. (2005). Analysis of Pile-Raft Foundations with 3D Finite-Element Method. Structures Congress 2005. *American Society of Civil Engineers*. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/40753\(171\)93](http://dx.doi.org/10.1061/40753(171)93).
- Poulos, H. G. (2001). Piled raft foundations: design and applications. *Geotechnique*, 51 (2), 95-113. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2001.51.2.95>.
- Ravichandran, N., Shrestha, S. & Piratla, K. (2018). Robust design and optimization procedure for piled-raft foundation to support tall wind turbine in clay and sand. *Soils and Foundations*. 58 (3), 744-755. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.027>.
- Sales, M. M. (2000). *Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas*. 2000. 229 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.

Shrestha, S. (2015). *Design and Analysis of Foundation for Onshore Tall Wind Turbines*. 2015. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Clemson University, South Carolina, USA.

Shrestha, S., Ravichandran, N. & Rahbari, P. (2017). Geotechnical Design and Design Optimization of a Pile-Raft Foundation for Tall Onshore Wind Turbines in Multilayered Clay. *ASCE - American Society of Civil Engineers*, 18(2). DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001061](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001061).

Soares, W. C. (2011). *Radier Estaqueado com Estacas Hollow Auger em Solo Arenoso*. 2011. 302 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Soares W. C., Coutinho R. Q. & Cunha R. P. (2015). Piled raft with hollow auger piles founded in a Brazilian granular deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 52 (8), 01-18. DOI: dx.doi.org/10.1139/cgj-2014-0087.

Teixeira, A. H., & Godoy, N. S. (1996). *Análise, projeto e execução de fundações rasas*. In W. Hachich (Ed.), *Fundações: teoria e prática*. (2th ed.), 227-264. Pini.