

DESEMPENHO DE FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS

Arthur de Souza do Nascimento
Danilo Silveira Machado
Josafa da Silva Matias
Carolina Fonseca de Farias

RESUMO

O setor eólico no Brasil é um setor em expansão, estando presente no país há pouco mais de 10 anos, este possui um vasto potencial nas costas brasileiras e também em regiões de relevos favoráveis. Tais projetos são guiados e desenvolvidos após amplos estudos de incidências e consistências das rajadas de vento do local, e este mesmo vento juntamente com o peso próprio das estruturas resulta como fator complicante para os projetos. Para resistir aos esforços solicitantes da estrutura somados aos efeitos do vento, demanda-se a execução de fundações que resistam e anulem os esforços transmitidos à mesma. O presente artigo buscou analisar e indicar entre os três tipos de fundações profundas (estacas raiz, microestacas e Hélice contínua), qual a mais vantajosa, visando a implementação na construção de uma torre de turbina eólica no complexo de Maral, situado no município de Areia Branca – RN, sendo esta análise realizada a partir de abordagem técnica sobre os três tipos de fundações profundas trabalhadas. Para possibilitar a comparação dos tipos de estaca, foram tabelados os resultados das pesquisas bibliográficas considerando as características das estacas em virtude dos critérios inerentes a composição do solo da região, identificada através de ensaio SPT; cargas solicitantes; e localização geográfica do projeto, como resultado desta comparação identifica-se o tipo de estaca ideal para o projeto dentre as analisadas.

Palavras-chave: Fundação, torre eólica, microestacas, estaca raiz, hélice contínua.

Rede de Ensino Doctum – Unidade de Cataguases – MG – Arthur de Souza do Nascimento – arthursouzanascimento22@gmail.com – Graduando em Engenharia Civil.

Rede de Ensino Doctum – Unidade de Cataguases – MG – Danilo Silveira Machado – danilosilveiramachado@hotmail.com – Graduando em Engenharia Civil.

Rede de Ensino Doctum – Unidade de Cataguases – MG – Josafa da Silva Matias – josafasilvamatias@gmail.com – Graduando em Engenharia Civil.

Rede de Ensino Doctum – Unidade de Cataguases – MG – Carolina Fonseca de Farias – prof.carolina.farias@doctum.edu.br – Professora Orientadora.

1 Introdução

A energia eólica é a transformação da energia do vento em eletricidade, por meio de torres de turbina eólica ou aerogeradores, como são comumente conhecidas. A humanidade se beneficia do vento antes de sequer pensar em energias renováveis. Muito antes da contemporaneidade, o vento já era utilizado como energia em moinhos de cereais e bombeamento de água que datam mais de três mil anos atrás, e, anterior a isso, já era utilizada como principal força motriz em barcos a vela. (OLIVEIRA, 2012).

Conforme Oliveira (2012), as torres de turbinas eólicas são compostas por pás, rotor (cubo), *nacelle*, torre e fundação. As pás são hélices direcionadas ao encontro do sentido do vento para que o mesmo flua entre elas, são fixadas no rotor, que por sua vez é conectado na *nacelle*, que é um alojamento para a turbina e para todo o sistema de orientação, e, todos os mencionados estão sobrepostos na torre, que tem a função de transmitir todos os esforços solicitados para a fundação.

Considerando as cargas de um aerogerador, independentemente do tipo de rotor e modelo, o solo precisa resistir a cargas elevadas, e, para tanto, a fundação necessita ser construída de modo a desempenhar grande resistência de carga. Essencialmente, a fundação sofre dois efeitos: carga vertical pertencente ao peso próprio das estruturas (da torre e dos componentes do aerogerador) e de momento fletor (momento torsor e força cortante) devido a ação do vento. Todas estas cargas devem ser adequadamente combinadas para se reproduzir as situações críticas do projeto. (FARIA e NORONHA, 2013).

De acordo com Strongylis, Battista e Pfeil (2018), no Brasil as fundações mais utilizadas em turbinas eólicas são as estacas hélice e raiz, sendo ainda o uso de microestacas em algumas ocasiões.

O dimensionamento da fundação de uma torre de turbina eólica varia muito em relação ao terreno imposto e ao seu modelo construtivo. No caso de camadas resistentes (próximas à superfície), adota-se fundações superficiais, do contrário são necessárias fundações profundas. Para fundações profundas, há de salientar o uso do *Standart Penetration Test (SPT)*, também conhecido como Sondagem a Percussão, para a análise do solo. Estas fundações precisarão conter ações permanentes, variáveis e excepcionais, respeitando o Estado Limite Último (ELU), Estado Limite de Serviço (ELS) e normas vigentes, que conduz o dimensionamento

de fundações e de estruturas de concreto armado, se for o caso. Outro fator crítico que se torna um grande desafio para essas estruturas é a ressonância, sendo as estacas responsáveis por transmitir todos esses esforços para o solo, que por sua vez deve ter características para resistir aos mesmos.

O presente estudo teve como objetivo principal, indicar dentre os três tipos de fundações profundas: estaca raiz, microestacas e estaca hélice contínua monitorada, qual a mais vantajosa, visando o desempenho para a construção de uma torre eólica *onshore* de eixo horizontal com três pás, abordando de forma específica os critérios técnicos sobre os três tipos de fundações profundas, condizente com seus métodos construtivos, seus coeficientes de resistência, baseado em pesquisa bibliográfica e identificar qual das estacas possui melhor desempenho para ser empregada no projeto apresentado no estudo de caso.

A relevância desta pesquisa justifica - se em razão ao crescimento significativo dos projetos eólicos no país. Deste modo, torna-se necessário para os profissionais da área realizarem a escolha das fundações ideais a serem utilizadas nos próximos projetos eólicos, servindo esta pesquisa de base no referencial teórico deste tema, facilitando a tomada de decisão.

2 Referencial Teórico

O presente referencial abordou as principais normativas, termos e conceitos vinculados a fundações profundas como alicerce para o entendimento e desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Reconhecimento do subsolo

Conforme a ABNT NBR 6122 (2019), em função do esgotamento do porte da obra, ou de condicionantes específicas, deve ser realizada vistoria geológica de campo por profissional especializado, eventualmente, complementada por estudos geológicos adicionais.

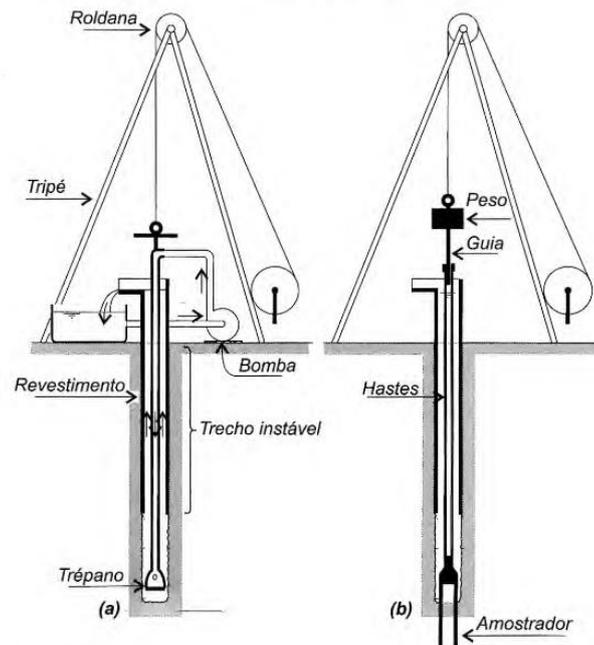
De acordo com a ABNT NBR 6484 (2001, p. 22)

Para qualquer edificação deve ser feita uma campanha de investigação geotécnica preliminar, constituída no mínimo por sondagens e percussão (com SPT), visando a determinação da estratigrafia e classificação dos solos, a posição do nível d'água e a medida do índice de resistência à penetração NSPT.

Ainda, segundo a ABNT NBR 6484 (2001, p. 2)

O SPT (*Standard Penetration Test*): Abreviatura do nome do ensaio pelo qual se determina o índice de resistência à penetração (N). Abreviatura do índice de resistência à penetração do SPT, cuja determinação se dá pelo número de golpes correspondente à cravação de 30 cm do amostrador-padrão, após a cravação inicial de 15 cm, utilizando-se corda de sisal para levantamento do martelo padronizado.

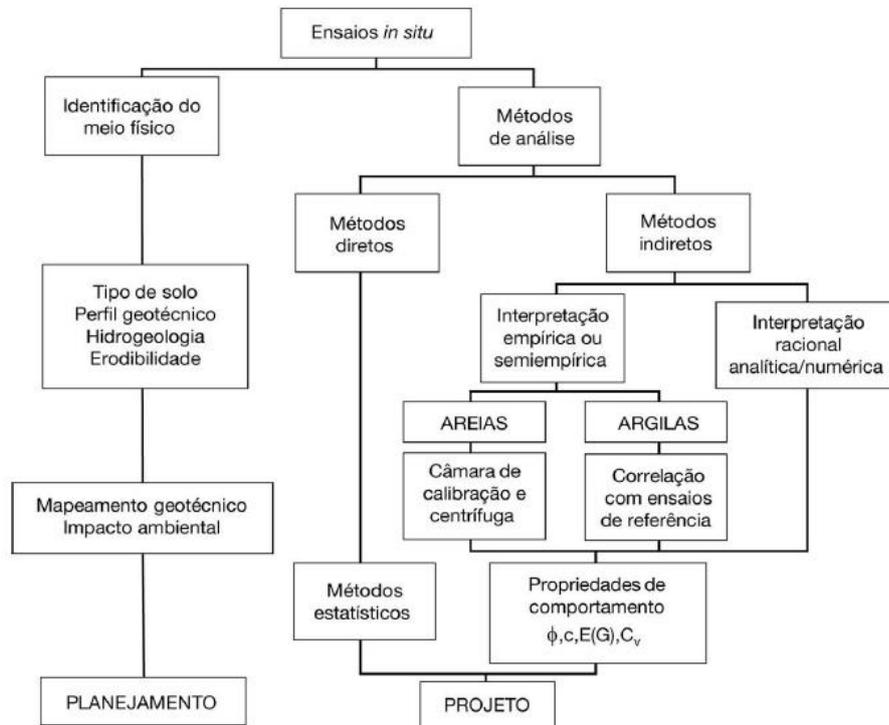
Figura 1 - Ensaio do SPT



Fonte: Velloso e Lopes, p. 38, 2011.

O fluxograma abaixo descreve a campanha de investigação geotécnica com base na sondagem do solo e subsolo através do método SPT (*Standard Penetration Test*), a fim de auxiliar os profissionais da área na orientação aos melhores resultados possíveis através das escolhas utilizadas e os impactos quanto aos resultados obtidos.

Figura 2 - Interpretação de campo



Fonte: Schnaid e Odebrecht, p. 17, 2012.

Velloso e Lopes (2011), descreve o SPT como importante equipamento capaz de avançar em solos relativamente compactos e duros ou com lençol freático alto, seu ensaio consegue indicar a compactação de solos granulares e a consistência de solos argilosos, além de fornecer o nível d'água no solo.

Assim, a caracterização do solo se dá por meio de perfis de sondagens realizados. Schnaid e Odebrecht (2012), descreve que as maiores falhas decorrentes em projetos e no cronograma de execução se dão pela falta da investigação do solo e subsolo e pela má interpretação dos resultados obtidos pela investigação.

Ainda, segundo os próprios autores, Schnaid e Odebrecht (2012), a sondagem à percussão consagrou-se no Brasil como a investigação geotécnica mais difundida. Sua popularidade em relação aos demais ensaios consiste em fatores como: a simplicidade do equipamento, baixo custo de execução e resultados que podem ser interpretados segundo regras empíricas de projeto, ou conforme correlações baseadas em diferentes experiências regionais e internacionais, que traz à existência diferentes tipos de técnicas de perfuração, equipamento e procedimento de ensaio, que resultam em instabilidades dos resultados obtidos.

Os resultados diferentes podem ser pelos muitos fatores de método de perfuração, fluido estabilizante, diâmetro do furo, mecanismo de levantamento e liberação de queda do martelo, rigidez das hastes, geometria do amostrador e método de cravação. Os mesmos autores, Schnaid e Odebrecht (2012), destaca que entre esses fatores, os que apresentam a maior importância são os relacionados à técnica de escavação, com destaque para o método de estabilização, que consiste em:

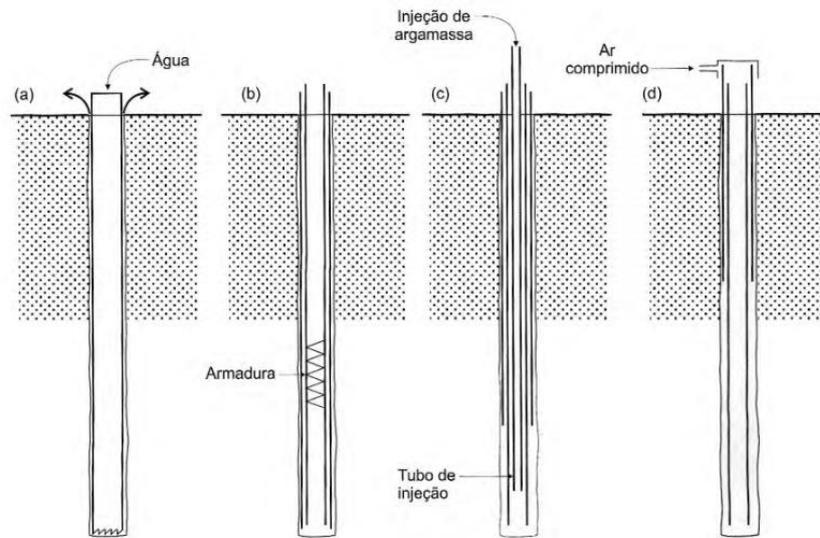
- (a) perfuração revestida e não preenchida totalmente com água;
- (b) uso de bentonita;
- (c) revestimento cravado além do limite de cravação;
- (d) ensaio executado dentro da região revestida.

No Brasil, o custo envolvido nos estudos geotécnicos utilizando sondagem do solo varia entre 0,2% e 0,5% do custo total de obras, podendo elevar os preços dos empreendimentos. (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

2.2 Fundações profundas

Fundação profunda é o elemento de fundação que transmite toda a carga atuante ao solo, por meio da base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por meio de combinação das duas, sendo imprescindível sua ponta ou base estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0m de profundidade. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas e os tubulões. (ABNT NBR 6122, 2019).

Figura 3 - Fundação profunda (Estaca Raiz)



Fonte: Velloso e Lopes, p. 224, 2011.

Ainda, segundo a mesma norma ABNT NBR 6122 (2019), a Estaca se caracteriza por ser um elemento de fundação profunda executada completamente por equipamentos ou ferramentas, sem que em qualquer momento de sua execução, haja descida de pessoas. Os materiais empregados podem ser: concreto pré-moldado, concreto moldado *in loco*, aço, madeira ou por combinação dos mesmos.

2.2.1 Classificação das Estacas

Velloso e Lopes (2011), descrevem que as fundações em estacas podem ser classificadas em dois critérios distintos, o material empregado e o processo executivo. Assim, os materiais constituintes podem ser de madeira, de concreto, de aço e mistas (quando há dois materiais na mesma estaca), e, os processos construtivos sendo de “de deslocamento” e “de substituição”.

De acordo com o processo executivo, as estacas são nomeadas de acordo com seu efeito no solo (ou tipo de deslocamento) que provocam no mesmo ao serem executadas. “De deslocamento” é onde estariam as estacas cravadas em geral, uma vez que o solo no espaço que a estaca vai ocupar é deslocado (horizontalmente). “De substituição” é onde estariam as estacas escavadas em geral, uma vez que o solo no espaço que a estaca vai ocupar é removido, causando algum nível de redução nas tensões horizontais geostáticas. (VELLOSO e LOPES, 2011).

Velloso e Lopes (2011), dizem que em alguns processos de estacas escavadas, em que não há praticamente remoção de solo e/ou, na ocasião da concretagem, são tomadas medidas para restabelecer as tensões geostáticas (ao menos parcialmente), caracterizadas pelo tipo de execução “sem deslocamento”. Essa terminologia segue a norma inglesa de fundações (*Code of Practice CP 2004:1972*) que classifica as estacas em dois grandes grupos: *displacement piles and replacement piles*.

Figura 4 - Tipos de estacas

Tipo de execução	Estacas
De deslocamento	Grande (i) Madeira, (ii) pré-moldadas de concreto, (iii) tubos de aço de ponta fechada, (iv) tipo Franki, (v) microestacas injetadas
	Pequeno (i) Perfis de aço, (ii) tubos de aço de ponta aberta (desde que não haja embuchamento na cravação), (iii) estacas hélice especiais (“estacas hélice de deslocamento”)
Sem deslocamento	(i) Escavadas com revestimento metálico perdido que avança à frente da escavação, (ii) estacas raiz
De substituição	(i) Escavadas sem revestimento ou com uso de lama, (ii) tipo Strauss, (iii) estacas hélice contínua em geral

Fonte: Velloso e Lopes, p. 182, 2011.

Contudo, faz-se interessante levantar alguns conceitos, quanto às estacas supracitadas que serão o foco do estudo.

2.2.1.1 Estaca Raiz

Segundo a ABNT NBR 6122 (2019), a estaca raiz se caracteriza pela execução por perfuração rotativa ou roto-percussiva, com uso de revestimento (conjunto de tubos metálicos recuperáveis) integral no trecho em solo, e que é completada por colocação de armação em todo comprimento e preenchimento com argamassa cimento-areia. A argamassa é adensada com o auxílio de pressão, em geral dada por ar comprimido.

De acordo com Guimarães (2003), as vantagens da Estaca Raiz são: Grandes capacidades de cargas; pode ser usada submersa, ou seja, caso tenha lençol freático; há elevado alcance a maiores profundidades; com o uso da lama bentonítica, há

ganhos em solos moles, pois a mesma faz contenção das paredes internas, não deixando desmoronar e misturar com o concreto. Segundo o próprio Guimarães (2003), as desvantagens desta mesma estaca são: Precisa-se de grandes áreas e pé direito elevado para ser construída, pois os equipamentos construtivos são relativamente grandes; sua execução há de ser altamente controlada, porque geralmente são construídas para resistir a cargas muito elevadas.

2.2.1.2 Microestaca

De acordo com Velloso e Lopes (2011), as primeiras microestacas eram tirantes injetados que poderiam trabalhar à compressão. O processo executivo é o seguido pela perfuração que utiliza o processo rotativo, com circulação de água com lama bentonítica. Quando necessário, como no caso de areias fofas e argilas moles, usa-se tubo de revestimento provisório.

Nunes (2013), descreve as vantagens das Microestacas como: Pequenos diâmetros; facilidade em qualquer superfície; elevadas capacidades de cargas; alta produtividade, facilidade de execução e um alto controle sobre o mesmo. E suas desvantagens sendo: Possui um custo maior que outras estacas; comparada com demais estacas, a capacidade de carga não é tão alta. (NUNES, 2013).

2.2.1.3 Estaca hélice contínua monitorada

A estaca hélice contínua monitorada é uma estaca de concreto moldada in loco, tendo sua execução através da introdução no solo de um trado helicoidal contínuo em rotação, e com a injeção de concreto pela própria haste central do trado, simultaneamente à sua retirada. A armação sendo colocada sempre posterior à concretagem da estaca. (ABNT NBR 6122, 2019).

Com a escavação do solo, se utiliza de um trado em hélice de grande comprimento, composto de chapas em espiral que se desenvolvem em torno do tubo central. A extremidade inferior do trado é dotada de garras para facilitar o corte do terreno, e de uma tampa que impede a entrada de solo no tubo central durante a escavação. Os equipamentos mais comuns permitem executar estacas com diâmetros de 30 cm a 100 cm e comprimentos de 15 m até 30 m. (VELLOSO e LOPES, 2011).

A estaca hélice contínua monitorada tem como principais vantagens citadas: Alta produtividade; ausência de vibração e ruídos em sua execução; perfuração sem a necessidade de revestimento; dificilmente terá seu uso restringido pelo lençol freático; melhor aderência no contato solo-estaca, pois o concreto é lançado com alta pressão. (NETO, 2003). Ainda, Neto (2003), destaca suas desvantagens: Sua qualidade está sujeita a experiência e habilidade do operador da perfuratriz; dificuldade na colocação da armadura em profundidades mais elevadas; em solos fracos, podem ocorrer estreitamento ou alargamento do fuste; produz material de descarte.

2.3 Capacidade de cargas nas estacas

Para a análise das utilizações das estacas serão levadas em considerações as normas: ABNT NBR 6120 (2019) – cargas para o cálculo de estruturas de edificações, ABNT NBR 6118 (2014) – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, e, ABNT NBR 6122 (2019) – Projeto e execução de fundações, aplicadas nas concepções das estacas Hélice contínua monitorada, Micro estacas e Estacas Raiz de forma a definir qual obtém melhor resultado estrutural em modo cavalete.

Aoki e Cintra (2010), descreve a capacidade de carga de uma estaca como a mobilização de tensões resistentes provenientes de uma força vertical por meio da base ou ponta da estaca e por meio da adesão (em argila) ou atrito lateral (em areia) entre o fuste da estaca e o solo.

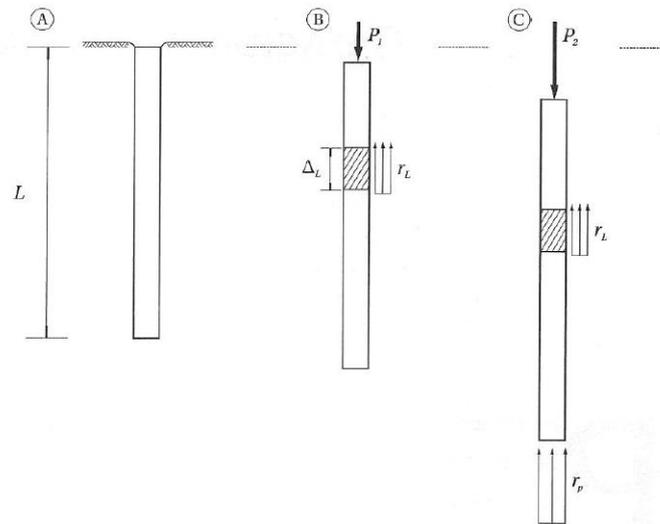
As forças estarão em equilíbrio quando $R=RL+RP$, sendo “R” a resistência total, “RL” resistência lateral (fuste), “RP” resistência da ponta (base). A resistência lateral se dá pelo perímetro do fuste “U” multiplicado com o somatório das forças resistentes por atrito lateral, enquanto a resistência de ponta se dá pela multiplicação da tensão na ponta pela área da seção transversal da mesma. (AOKI e CINTRA, 2010).

Aoki e Cintra (2010), destaca que a resistência da ponta é $RP=rp*Ap$, sendo as unidades de tensão da resistência da ponta “rp” multiplicada pela respectiva área “Ap”. Enquanto a resistência lateral é $RL=U*\Sigma(rL*\Delta L)$, sendo “U” o perímetro do fuste multiplicado com o somatório, que é a multiplicação das unidades de tensão da resistência lateral “rL” com segmentos de altura “ ΔL ”, que por sua vez compõem a altura total “L”.

Logo, a resistência total será:

$$R = U \cdot \Sigma(r_L \cdot \Delta L) + r_p \cdot A_p$$

Figura 5 - Estacas atuando em resistência



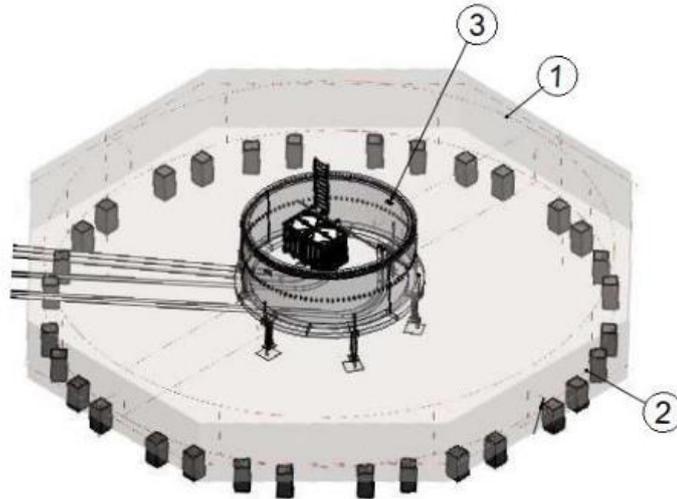
Fonte: Aoki e Cintra, p. 10, 2010.

2.4 Bloco de coroamento

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), os blocos de coroamento, também chamados de blocos sobre estacas, são estruturas de volume usadas para transmitir as cargas da superestrutura aos tubulões ou estacas, podendo ainda serem rígidas ou flexíveis.

Milititsky (2014), salienta que principalmente em casos que o solo superficial não possuir a resistência necessária para resistir aos esforços provenientes da superestrutura em questão é necessário a utilização do bloco de coroamento com as estacas, esses blocos de coroamento geralmente podem ter de 16 a 24 metros de diâmetro suportadas por 16 a 48 unidades de estacas.

Figura 6 - Fundação do tipo bloco de coroamento: (1) o bloco de coroamento.



Fonte: Araújo, p. 6, 2018.

3 Metodologia

3.1 Comparativo dos tipos de estaca

Para possibilitar a comparação dos tipos de estaca, foram tabelados os resultados das pesquisas bibliográficas considerando as características das estacas em virtude de critérios como o nível de água, composição do solo, cargas sujeitas e localização geográfica, provenientes do projeto, estudo geotécnico e geográfico.

Os resultados obtidos foram classificados em uma escala de 1 (um) a 3 (três), sendo os valores respectivamente referentes a:

- 1 – Não atende;
- 2 – Atendimento com ressalvas;
- 3 – Atende.

3.2 Ensaio SPT

O estudo do solo foi realizado com a sondagem à percussão (SPT), também conhecido como sondagem de simples reconhecimento. A execução do SPT se dá por meio de um amostrador padrão, descrito por uma forma prismática ou cilíndrica onde ao final fica armazenado o solo extraído de até 1 m de profundidade para posterior análise, este sendo cravado por um martelo com massa total de 65 kg, o martelo podendo ser vazado ou maciço, tendo como altura de queda de 75 cm, ou

seja, da base inferior do martelo até a base superior da guia-haste que se conecta ao amostrador padrão. O amostrador padrão contém três partes (cabeça, corpo e sapata ou bico), o martelo vai de encontro com a cabeça de bater, que por sua vez através da guia-haste chega ao amostrador padrão e no trado. O procedimento pode conter tanto a utilização de bomba como ser manual e deve conter o máximo de retilineidade e perpendicularidade possível entre a haste e o solo, portanto, é imprescindível o posicionamento correto da estrutura (torre ou tripé) antes de iniciar. Apesar do primeiro 1 m de perfuração não ser de grande valia, há a importância de se retirar uma parte representativa do solo para análise posterior, no entanto, até essa profundidade deve ser escavada por trado-concha ou cavadeira manual e, se necessário, caso o solo se manifeste instável se deve utilizar tubo de revestimento até onde for preciso ou ainda em alguns casos lama de estabilização. As operações subsequentes serão realizadas com trado helicoidal até atingir o nível d'água freático. Caso o avanço do trado helicoidal seja inferior a 50 mm após 10 min de operação é necessário utilizar o método de perfuração por circulação de água, também conhecido como lavagem através do trépano de lavagem que é acompanhado de uma bomba d'água motorizada, neste método a queda é de 30 cm sendo reduzida progressivamente até os 20 cm quando chegar na cota preestabelecida. O ensaio é contado o número de golpes necessários para chegar ou ultrapassar cada 15 cm de solo de um total de 45 cm. Entretanto, os primeiros 15 cm são descartados, contabilizando a segunda e terceira parte dos 45 cm, totalizando 30 cm. Os números de golpes necessários para atingir as duas últimas camadas de 15 cm são somados e resultam na resistência de penetração N e classificada de acordo com a tabela disponibilizada pela norma ABNT NBR 6484 (2001). O limite da profundidade de sondagem é solicitado pela contratante. (ABNT NBR 6484, 2001).

Tabela 1 - Tabela dos estados de compactidade e de consistência

Tipo de solo	Índice de resistência à penetração N	Designação
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito Mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	>19	Dura(o)

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6484, p. 17, 2001.

3.2.1 Tipo de sondagem realizada

Foi utilizada a sondagem mista, ou seja, essa sondagem utiliza-se o SPT quando permitir e, em casos de encontrar matações, é utilizada sondagem rotativa, e após ultrapassar o matação volta-se a utilizar a metodologia à percussão.

3.2.2 Quantitativos de furos de sondagem necessários

Para dimensionamento dos furos, utilizou-se a ABNT NBR 8036 (1983), norma que estabelece a programação de sondagens de simples reconhecimento na fase de estudo preliminares e, dependendo da quantidade de furos de sondagens e sua localização em planta das características das estruturas e das condições geotécnicas do subsolo no local.

De acordo com a área do bloco de coroamento, é considerado, até 1200 m² de área se deve realizar 1 furo de sondagem para cada 200 m². Acima de 1200 m² e até 2400 m² além de também necessitar de 1 furo de sondagem a cada 200 m² até os 1200 m², necessita de um furo de sondagem a cada 400 m² de área no que exceder os 1200 m². Acima de 2400 m² de área de projeção da construção se carece de um plano específico da construção para um número ideal de furos. Entretanto, se exige o

mínimo de 2 furos para uma área de até 200 m² e de 3 furos para até 400 m². (ABNT NBR 8036, 1983).

4 Resultados Obtidos

Foram abordados os resultados obtidos a partir do comparativo realizado entre os tipos de estaca para identificação da que mais se adequa às cargas solicitantes, bem como as características do solo.

4.1 Estudo de Caso

A análise teve por local do projeto o complexo de Maral, situado no município de Areia Branca – RN, visto que a região nordeste do Brasil concentra boa parte do potencial eólico do país devido à intensidade e constância dos ventos da região que propiciam maior aproveitamento na produção elétrica, sendo o estado do Rio Grande do Norte, a região do estudo, por possuir a maior potência instalada até o momento.

Figura 7 - Local do projeto



Fonte: Autor, 2020

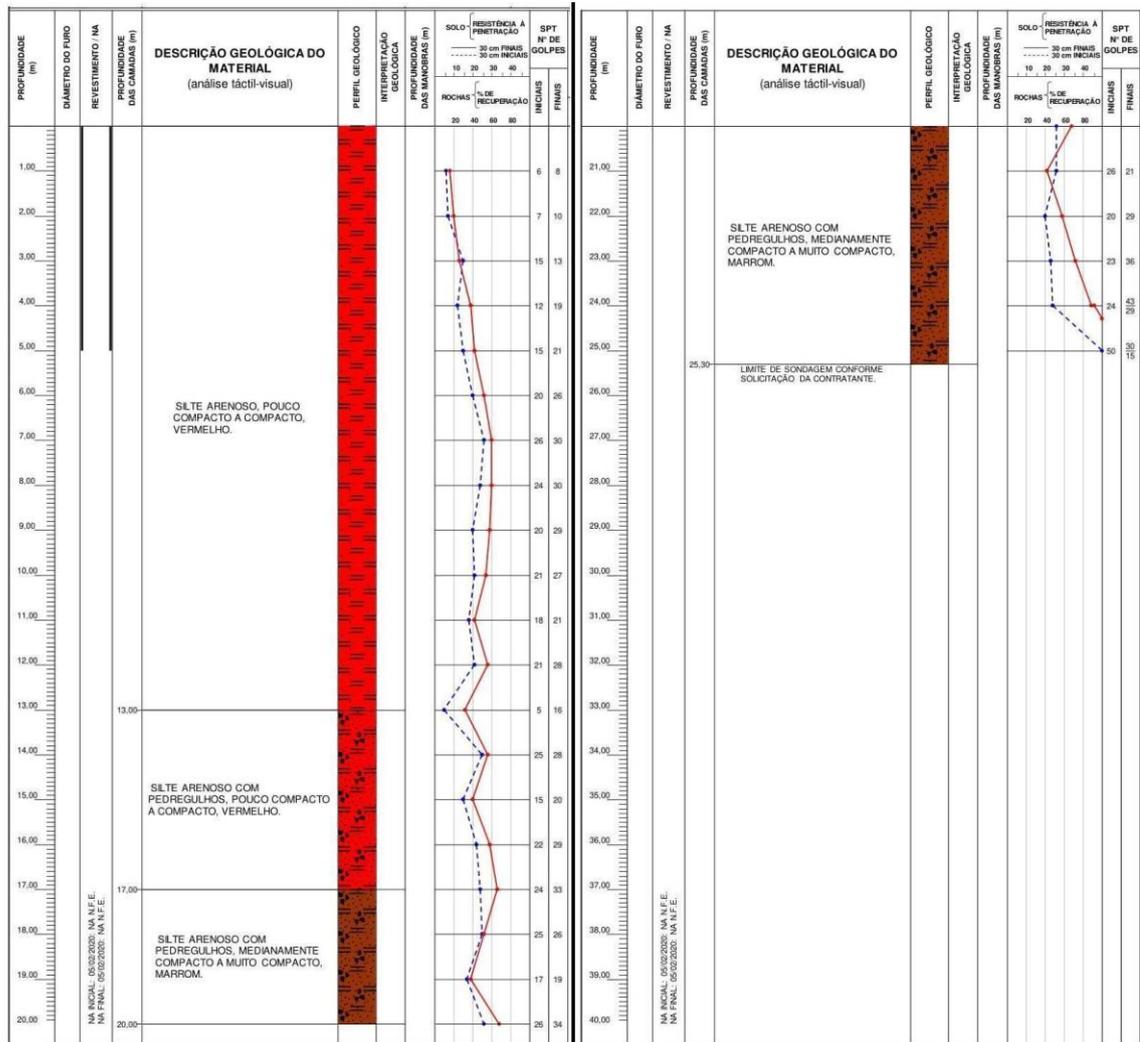
O tipo de solo da região foi caracterizado a partir do SPT do complexo eólico de Maral - RN para que se possa ter informações coesas o suficiente para realizar os comparativos qualitativos e quantitativos dentre as estacas.

Para dimensionamento dos furos de sondagem foi considerada a área do bloco de coroamento da fundação, sendo esta de 21 m de diâmetro e respectivos 346,4 m²

de área. Com base na ABNT NBR 8036 (1983), visto que a área construída se enquadra abaixo de 1200 m², necessita-se realizar 1 furação a cada 200 m² de área, que seria 2 furos, porém, como o mínimo de furos para até 400 m² é de 3 furos, se tornou necessário a realização de 3 furos de sondagem SPT.

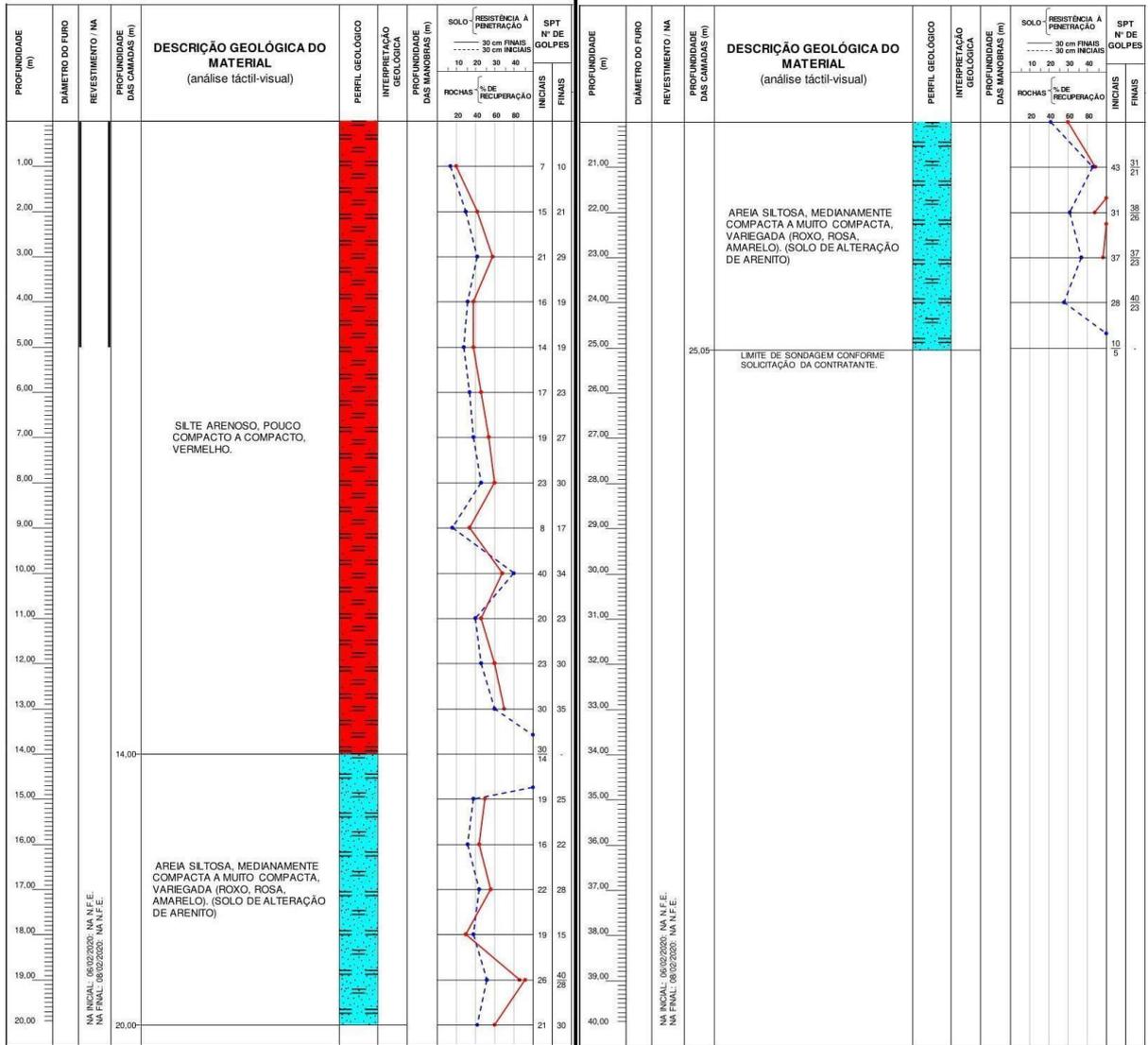
Os furos da sondagem SPT realizados estão representados abaixo, com suas respectivas ponderações:

Figura 8 - Sondagem a SPT - Furo 1



Fonte: Autor, 2020.

Figura 9 - Sondagem a SPT - Furo 2



Fonte: Autor, 2020.

40 golpes para 23 centímetros, e não sendo avançado a camada de 25 metros. Por fim, no furo 3 foram de 40 golpes para 30 centímetros de penetração, e contendo na camada de 25 metros 36 golpes.

Portanto, ao consultar a Tabela 1 deste artigo, e de acordo com o NSPT de cada furo, se encontram os resultados de designação do estado do solo para os mesmos. Dessa forma, na cota estabelecida, as designações para o solo de todos os furos resultaram em sendo compactos.

A partir dos resultados do NSPT, a comparação entre os tipos de estacas foi realizada na Tabela 2 abaixo, sendo, conforme item 4.1, dado o valor numérico “3” para a estaca que apresentou bom desempenho no critério analisado; “1” para estaca que apresentou desempenho ruim perante o critério analisado; e “2” para desempenhos intermediários. Entretanto, há de salientar que puderam repetir valores para estacas diferentes no mesmo critério, caso tivessem ou não desempenho equiparado. Posterior a isso foram totalizados separadamente todos os critérios de cada estaca através do somatório simples, sendo a estaca com maior somatório considerada a melhor estaca para o projeto em questão.

Tabela 2 - Comparativo das Estacas

Critérios	Estaca Raiz	Microestaca	Hélice Contínua
Sem presença de água	3	3	3
Profundidade: 24 metros	3	3	3
Composição do solo: Arenoso compacto	3	3	3
Cargas altas: 277 toneladas	3	3	3
Localização: mobilização de equipamento	3	3	2
Total	15	15	14

Fonte: Autor, 2020.

5 Conclusão

O presente artigo objetivou identificar o tipo de estaca a ser utilizada na fundação de uma torre eólica no projeto de Maral, situado no município de Areia Branca – RN, analisando a aplicabilidade das estacas hélice contínua, raiz e micro estaca, conforme as características do solo.

Pode-se observar nos comparativos que para o tipo de solo silte arenoso presente no local, sem a presença de nível d'água, permite a utilização de todos os 3 (três) tipos de estacas analisadas. Quanto a capacidade de carga das mesmas, considerando a carga média vertical do aerogerador como 277 toneladas e a utilização de 16 estacas para sustentação dos esforços, ambas as estacas atendem a capacidade de carga exigida para o projeto, bem como a profundidade de assentamento.

Entretanto, a estaca hélice contínua não obtém bom desempenho quando analisada no critério mobilização visto a má qualidade dos acessos ao projeto.

Referências Bibliográficas

AOKI, N.; CINTRA, J. C. A. *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 96p.

ARAUJO, K. Y. M. *Análise do comportamento estrutural de blocos de concreto armado sobre estacas como fundação para aerogerador onshore*. 2018. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/25832/1/KaiqueYuriMarcioAraujo_DISSERT.pdf>. Acesso em: 10 de agosto de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. NBR 6120. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios - Procedimento*. NBR 8036. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Projeto e execução de fundações*. NBR 6122. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. NBR 6484. Rio de Janeiro, 2001.

CERETTA, P. S., SARI, J. F., CERETTA, F. C. C. Relação entre Emissões de CO₂, Crescimento Econômico e Energia Renovável. *Desenvolvimento em Questão*, Ijuí, v. 18, n. 50, p. 268-286, jan. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.21527/2237-6453.2020.50.268-286>>. Acesso em: 18 de abril de 2020.

FARIA, P. O., NORONHA, M. *Fundações de Torres Eólicas – Estudo de Caso*. 2013. 12p. Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/307512613>>. Acesso em: 2 de maio de 2020.

FILHO, W. P. B., AZEVEDO, A. C. S. *Impactos ambientais em usinas eólicas*. 2013. 17p. AGRENER – UNICAMP, Itajubá, 2013. Disponível em:

<<https://www.researchgate.net/publication/318218793>>. Acesso em: 18 de abril de 2020.

GUIMARÃES, G. S. *Fundações em presença de solos moles – Análise de caso*. 2003. 50p. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil com Ênfase Ambiental). Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2003. Disponível em: <<https://www.academia.edu/12336254>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

MILITITSKY, J. Desafios na solução de fundações de aerogeradores. IBRACON. *Concreto & Construções*, São Paulo, Ano XLII, p. 49-61 jul-set. 2014. 2014. Disponível em:

<http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_75.pdf>. Acesso em: 10 de agosto de 2020.

NETO, J. A. A. *Análise do desempenho de estacas hélice contínua e ômega: Aspectos executivos*. 2003. 193p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Solos). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/D.3.2002.tde-27012003-180424>>. Acesso em: 30 de maio de 2020.

NUNES, S. C. O. *Métodos de dimensionamento de reforço e estabilização de taludes com microestacas*. 2013. 83P. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na Especialidade de Geotecnia). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10316/38473>>. Acesso em: 29 de maio de 2020.

OLIVEIRA, L. F. M. P. *Análise Do Comportamento Dinâmico De Torres De Geradores Eólicos*. 2012. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68265/1/000154677.pdf>>. Acesso em: 25 de abril de 2020.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. *Ensaio de campo: e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 254p.

STRONGYLIS, A., BATTISTA, R., PFEIL, M. *Contribuição ao Projeto de Fundações de Torres de Turbinas Eólicas*. 2018. 10p. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://www.abpe.org.br/trabalhos2018/149.pdf>>. Acesso em: 2 de maio de 2020.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 568p.