

Pietro José Bertuzzi

**ESTUDOS DE ASPECTOS DE ENGENHARIA PARA
IMPLANTAÇÃO DE TORRES EÓLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Título de Engenheiro
Civil.

Orientadora: Prof.^a Patrícia de Oliveira
Faria, PhD.

Coorientador: Prof. Marcos Aurélio M.
Noronha, Dr.



Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Bertuzzi, Pietro José

Estudos de Aspectos de Engenharia para Implantação de
Torres Eólicas / Pietro José

Bertuzzi ; orientadora, Patrícia de Oliveira Faria ; coorientador,
Marcos Aurélio Marques Noronha. - Florianópolis, SC, 2013.
102 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Fundações. 3. Aerogeradores.
4. Cicatrização de estacas. 5. Fadiga. I. Faria, Patrícia. II.
Noronha, Marcos Aurélio Marques. III. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Pietro José Bertuzzi

**ESTUDOS DE ASPECTOS DE ENGENHARIA PARA
IMPLANTAÇÃO DE TORRES EÓLICAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil, e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 28 de novembro de 2013.

Prof. Luis Alberto Gómez, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof.ª Patrícia de Oliveira Faria, PhD,
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.ª Liseane Padilha Thives, Dr.ª
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Carlos Augusto Cavalheiro
Protensul Pré-Fabricados Ltda.



Este trabalho é dedicado aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

À minha professora orientadora, Professora Patrícia de Oliveira Faria, pela atenção e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu professor coorientador, Professor Marcos Aurélio Marques Noronha, pelo suporte e incentivo à pesquisa de novas tecnologias.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo brilhante ensino da arte da Engenharia Civil.

Aos meus colegas do curso de Engenharia Civil, pela caminhada em conjunto ao longo desses cinco anos de estudo.

À empresa JHP Fundações, por contribuir com conhecimento prático de fundações em estacas pré-moldadas de concreto e hélice contínua.

À empresa Seta Engenharia, na figura do seu corpo técnico, pela oportunidade de visita técnica a uma grande obra em andamento, o Complexo Eólico Corredor do Senandes, no Rio Grande do Sul.

Ao Programa Ciências sem Fronteiras do Governo Federal, por propiciar a experiência de estudo no exterior. Bolsista da CAPES – Proc. N° 14604-12-4.



“Quando os ventos de mudança sopram, umas
pessoas levantam barreiras, outras constroem
moinhos de vento”

Érico Veríssimo, 1961

RESUMO

O potencial eólico da região sul do Brasil passa a ser explorado para geração de eletricidade. O crescimento da demanda por outras fontes de energia justifica os grandes investimentos na construção de parques eólicos. Essas grandes estruturas necessitam de alicerces que as sustentem, portanto soluções específicas de fundações devem ser projetadas. Existem peculiaridades desde o estudo de viabilidade, passando pelas sondagens e execução de estacas, com o intuito de garantir a eficiência da estrutura durante seu período de utilização. Torres eólicas podem ser posicionadas em área continental, onshore, ou no oceano próximas à costa, offshore, e a fundação dessas torres continentais pode ser profunda ou rasa, contudo projetos usuais no sul do País adotam a primeira como solução. A construção de cada base de aerogerador necessita aspectos logísticos de acesso ao canteiro de obras e, em muitos casos, estradas de acesso precisam ser construídas e devidamente compactadas para passagem de materiais e equipamentos. A locação das estacas em planta e a conexão com o bloco de fundação devem seguir determinadas especificações. Nesse contexto, alguns fenômenos, como a cicatrização de estacas, podem prejudicar, ou até beneficiar, o comportamento da estrutura solo-fundação. Portanto, o solo e suas propriedades são relevantes e determinantes para a escolha do tipo, dimensões e quantidades de estacas por base. Alguns dos carregamentos que atuam nos elementos de fundação são cíclicos, devido a incidência de ventos, ou ondas, na torre. Dessa forma, a verificação quanto à fadiga, torna-se de extrema importância na etapa de projeto. Reaterro devidamente compactado sobre o bloco de fundação se faz necessário para suportar as cargas do guindaste e dos elementos da torre armazenados ao lado de sua base. Com isso, o equipamento é capaz de içar as peças e montar a torre eólica por completo. Um exemplo de execução de toda a fundação de um aerogerador ilustra e apresenta todo esse processo.

Palavras-chave: Fundação. Aerogerador. Cicatrização de estacas. Fadiga.



ABSTRACT

The potential of wind energy on the south region of Brazil begins to be explored for electricity production from wind turbines. The increase on the demand for other types of energy source justify the huge investments on the construction of wind farms. These big structures need foundations which can support them, then specific solutions must be designed. There are peculiarities since the process of viability studies, on the underground investigations and pile driving, until the efficiency of the hole structure during the use period. Wind towers can be settled onshore or offshore. The foundation of the onshore towers can be deep or slab, however usually the projects on the south of the country use the first option as solution. The construction of each wind turbine base need logistic planning for the access of the construction site. In many situations roads must be built and properly compacted for the passage of materials and equipments. The position of the pile on plant and its connection with the block must follow certain specifications, so the structure lifetime can be guaranteed. On this context, some phenomenons, as the pile setup, can affect or benefit the behaviour of the soil-foundation structure. That is one of the reasons that the soil and its properties are relevant to indicate the type, dimensions and number of piles per base. Some of the loads which affect the foundation elements are cyclic, due to the wind force, or waves, on the tower. Therefore, the fatigue verification becomes extremely important on the design step. Landfilling must be properly done over the foundation block to support the loads from the cranes and parts of the tower, which are placed by the side of the tower base. Then, the equipment will be capable of lifting the pieces and assembling all the parts of the wind turbine. An example of a wind tower foundation construction illustrate all the process.

Keywords: Foundation. Wind tower. Pile setup. Fatigue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de campanha de sondagem em linha.	31
Figura 2 – Exemplo de campanha de sondagem tridimensional.	31
Figura 3 – Processo de formação dos ventos.....	48
Figura 4 – Moinhos de Kinderdijk (Holanda).	49
Figura 5 – Moinho de pequeno porte (Rocca al Mare, Estônia).....	50
Figura 6 – Corte lateral de um moinho.....	51
Figura 7 – Torres eólicas onshore (Alemanha).	52
Figura 8 – Torres eólicas offshore (Noruega).....	53
Figura 9 – Exemplo de curva de potência (Alstom Eco-122).	54
Figura 10 – Parque eólico de Osório com torres locadas em linha.	55
Figura 11 – Estrutura básica de um aerogerador.	56
Figura 12 – Esforços na fundação.	58
Figura 13 – Estaca única (Monopile).	60
Figura 14 – Base de gravidade (Gravity Base).....	61
Figura 15 – Tripé (Tripod).	62
Figura 16 – Planta de fundação com perfis metálicos.	63
Figura 17 – Corte de fundação de perfis metálicos.	64
Figura 18 – Planta de fundação de aerogerador.	65
Figura 19 – Corte de fundação de aerogerador.	65
Figura 20 – Sequência sugerida de cravação dos perfis metálicos.	66
Figura 21 – Sequência sugerida de cravação de estacas centrifugadas.	67
Figura 22 – Emenda de estaca metálica.	70
Figura 23 – Localização estado do Rio Grande do Sul, Brasil.....	72
Figura 24 – Velocidade básica do vento no Brasil.	73
Figura 25 – Escavação da fundação de um aerogerador.	79
Figura 26 – Execução de estaca hélice contínua.	80
Figura 27 – Sequência de execução das estacas hélice contínua.....	81
Figura 28 – Montagem da armadura do bloco de fundação.	82
Figura 29 – Ligação entre estaca e bloco de fundação armado.	83
Figura 30 – Estribos de transferência nos blocos de fundação.....	83
Figura 31 – Armadura e fôrmas preparadas para a concretagem.	84
Figura 32 – Bloco de fundação.....	85
Figura 33 – Reaterro sobre o bloco de fundação.....	85
Figura 34 – Detalhe da coroa de ancoragem.	86
Figura 35 – Colocação da coroa de ancoragem.....	86
Figura 36 – Detalhe da coroa de ancoragem.	87
Figura 37 – Arranjo usual do canteiro de um aerogerador.	88
Figura 38 – Fundação de aerogerador terminada.	88
Figura 39 – Pás transportadas por caminhões extensíveis.....	89

Figura 40 – Detalhe de encaixe do mastro à fundação do aerogerador.	90
Figura 41 – Içamento das pás.....	91
Figura 42 – Aerogeradores do Complexo Eólico do Bolaxa.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator F_1 e F_2	35
Tabela 2 – Coeficiente K e razão de atrito.....	36



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPT – Cone Penetration Test
DIN – Deutsche Industrie Norm
DNV – Det Norske Veritas: fundação norueguesa que inspeciona e avalia condições técnicas em diversos setores da economia.
ELF – Estado Limite de Fadiga
ELS – Estado Limite de Serviço
ELU – Estado Limite Último
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
EUROCODE – European Committee for Standardization
NA – Nível do lençol freático, ou nível de água
NBR – Norma Brasileira Registrada
PCH – Pequena Central Hidrelétrica
PDA – Pile Driving Analyzer
SPT – Standard Penetration Test

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{ck}	tensão característica de compressão do concreto
i	inclinação
Θ	ângulo
L	comprimento de uma estaca
N_{SPT}	medida do índice de ~ resistência à penetração
\emptyset	diâmetro
m	metro
m^2	metro quadrado
cm	centímetro
Kg	quilograma
KN	quilonewton
Σ	somatório
kW	quilowatt
GW	gigawatt
MW	megawatt
MWh	megawatt hora
m/s	metro por segundo
km/h	quilômetro por hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS	25
1.1.1 Objetivo Geral	25
1.1.2 Objetivos Específicos	26
1.1.3 Estrutura do Trabalho	26
1.2 REFERENCIAL TEÓRICO	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 SOLO	27
2.1.1 Areia	27
2.1.2 Argila	27
2.1.3 Silte	28
2.1.4 Nível de Água e Poropressão	28
2.1.5 Compactação	28
2.2 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO	28
2.2.1 Sondagem à Percussão SPT	28
2.2.2 Ensaio de Cone CPT	30
2.2.3 Campanha de Sondagem	30
2.2.4 Ensaios Complementares	31
2.3 FUNDAÇÕES	32
2.3.1 Fundação Superficial	32
2.3.2 Fundação Profunda	33
2.3.2.1 Estacas	33
2.3.3 Capacidade de Carga	34
2.4 TESTES DE CARGA EM ESTACAS	36
2.4.1 Testes de Carga Dinâmica	37
2.4.1.1 Teste de Análise da Cravação (PDA)	37
2.4.1.2 Teste de Integridade de Estacas (PIT)	38
2.4.2 Testes de Carga Estática	38
2.5 ANÁLISE DE EFEITOS NAS ESTACAS	39
2.5.1 Nega e Repique	39
2.5.2 Efeito de Grupo	39
2.5.3 Recalque	40
2.5.4 Cicatrização De Estacas (Pile Setup)	40
2.5.5 FADIGA (FATIGUE)	44
2.5.6 FLAMBAGEM (BUCKLING)	46
2.5.7 LIQUEFAÇÃO (LIQUEFACTION)	46
2.6 ENERGIA EÓLICA	48
2.6.1 Histórico da Utilização de Energia Eólica	49

2.6.1.1 Fundações de Moinhos de Vento	50
2.6.2 Parque Eólico	52
2.6.2.1 Potência Instalada	54
2.6.2.2 Locação das Torres	55
2.6.3 Estrutura Básica de uma Torre Eólica	56
2.6.4 Esforços na Torre Eólica	57
2.6.4.1 Influência do Número de Pás	59
2.7 FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS	60
2.7.1 Fundação de Torres Eólicas Offshore	60
2.7.2 Fundação de Torres Eólicas Onshore	62
2.7.2.1 Sequência de Cravação	66
2.7.2.2 Bloco de Fundação	68
2.7.2.3 Conexões entre os Elementos da Fundação	69
3 MÉTODO	72
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO ESTUDO	72
3.2 COLETA DE DADOS	73
4 ESTUDO DE CASO	75
4.1 VIABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL	75
4.2 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO	76
4.3 PLANEJAMENTO DA OBRA	76
4.4 TRABALHOS PRELIMINARES	77
4.4.1 Terraplenagem	77
4.4.2 Drenagem	78
4.4.3 Pavimentação	78
4.4.4 Escavações	78
4.5 FUNDAÇÕES	79
4.5.1 Execução das Estacas	79
4.5.2 Liberação das Fundações	81
4.5.3 Bloco de Fundação	82
4.5.4 Execução do Pedestal	85
4.6 MONTAGEM DA TORRE	87
5 CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS	95
GLOSSÁRIO	101

1 INTRODUÇÃO

A geração de eletricidade a partir de fontes alternativas se torna cada vez mais presente no Brasil. Diversos empreendimentos de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) foram construídos nos últimos anos e, atualmente, projetos de complexos eólicos começam a ganhar força. Essa geração de eletricidade através de aerogeradores é considerada limpa e com menor impacto ambiental quando comparadas com outras fontes de energia.

Sob o olhar da engenharia civil, esse estudo pretende explicar acerca do alicerce dessas torres geradoras de energia. O projeto e a execução adequados de suas fundações é importante, de modo a garantir a sustentação e vida-útil dessas gigantes estruturas, que se erguem no céu até alturas de 135 metros. Um estudo de caso ilustrará os passos para construção das torres e suas fundações.

Duas hipóteses podem ser consideradas na concepção de um parque eólico, alocar as torres eólicas em terra ou no mar. Cada uma das situações possui peculiaridades e soluções diferentes quanto a suas fundações. Este trabalho irá abordar aspectos geotécnicos das fundações com menção a especificações estruturais, contudo sem entrar em detalhes em relação ao cálculo das estruturas de fundações. Especificamente fundações profundas alocadas em terra serão abordadas, pois no sul do Brasil projetos usuais escolhem essa opção para atingir a capacidade de carga. Ao contrário dos parques eólicos do nordeste, nos quais soluções em fundações rasas se tornam possíveis.

Diversos efeitos, referentes ao solo e aos elementos de fundação, são relevantes para as fases de projeto e execução e serão apresentados com objetivo de assegurar a estabilidade da torre geradora. Portanto, a investigação do subsolo anterior à construção, além da verificação e manutenção periódica de cada um dos aerogeradores, garante o perfeito funcionamento da estrutura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é descrever as peculiaridades do projeto e execução de fundações de torres eólicas, baseado em um estudo de caso. Assim como avaliar efeitos nas estacas e no solo, de forma a garantir a eficácia e vida útil das fundações de aerogeradores.

1.1.2 Objetivos Específicos

Embasar definições referentes ao tema fundações profundas.

Descrever fenômenos do solo e dos elementos de fundação relevantes ao projeto e execução de aerogeradores.

Fundamentar os cuidados especiais em relação às fundações de torres eólicas.

Apresentar soluções para fundações de aerogeradores.

Detalhar as etapas de execução de fundações de aerogeradores no sul do Brasil, através de um estudo de caso.

1.1.3 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2, referente à Revisão Bibliográfica, serão apresentados conceitos e definições relacionadas à geotecnia, a exemplo de efeitos nas estacas e aerogeradores. O Capítulo 3 explica o Método escolhido para colher os dados e informações para elaboração do Estudo de Caso, descrito no capítulo 4. Este trará informações da concepção e implantação de um Complexo Eólico no Estado do Rio Grande do Sul. Por fim, o capítulo 5 pretende expor as conclusões obtidas a partir da realização deste trabalho, como peculiaridades e constatações sobre o tema.

1.2 REFERENCIAL TEÓRICO

A base teórica para a elaboração deste trabalho levará em consideração obras literárias de autores consagrados, artigos científicos, normas técnicas brasileiras, europeias e norte-americanas. Além disso, estudo de caso, visitas técnicas a obras relevantes, análises de plantas e relatórios técnicos, consultas a especialistas da área geotécnica e estruturas foram também considerados para a elaboração do alicerce teórico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLO

De acordo com Das (2007), o solo é um material não consolidado, formado através de processos geológicos de intemperismo. Esses processos consistem na fragmentação mecânica, ou química, da rocha em partículas menores. Portanto, o solo originado é um sistema trifásico, constituído de três fases em diferentes estados físicos: sólidos, líquidos e gases. A parcela sólida é formada, em sua maior parte, por grãos. A água e o ar, geralmente presentes, ocupam os espaços vazios entre os grãos.

Diferente de outros materiais utilizados na construção civil, como o concreto e o aço, o solo possui uma grande variabilidade de resistência e consistência. Esta diferença entre um solo e outro se dá por conta de diversos parâmetros e propriedades, intrínsecos a sua composição. Dessa forma, torna-se importante sua análise, tendo em vista sua utilização como material de construção e suporte para elementos estruturais de fundações (DAS, 2007).

2.1.1 Areia

Trata-se de um solo sem coesão entre seus grãos, permeável e com plasticidade. Quanto à dimensão de suas partículas, seu diâmetro está compreendido entre os valores de 0,06 e 2,0 mm. Permeabilidade pode ser entendida como a facilidade da água fluir em um meio poroso. A resistência de um solo arenoso é função do atrito entre suas partículas. Devido à sua alta permeabilidade, a execução de escavações nesse solo exige cuidado especial em relação ao nível do lençol freático (DAS, 2007).

2.1.2 Argila

A dimensão das partículas de argila é muito pequena, assumindo valores menores que 0,002 mm, portanto invisíveis ao olho humano. Suas principais características são coesão, plasticidade e baixa permeabilidade. Escavações em solos argilosos são facilitadas por conta dessas propriedades, ocorrendo afloração da água do lençol freático lentamente (DAS, 2007).

2.1.3 Silte

Com propriedades intermediárias entre a areia e a argila, o silte apresenta partículas com dimensões entre 0,002 mm e 0,06 mm. Este tipo de solo possui baixos níveis de plasticidade (DAS, 2007).

2.1.4 Nível de Água e Poropressão

Nível do lençol freático, ou nível de água (NA), refere-se a superfície delimitada pela zona de saturação e pela zona de aeração. Ou seja, abaixo dessa cota, todos os vazios do solo são ocupados por água; e acima dessa cota até a superfície do solo, uma parte dos vazios é preenchida por ar e a outra parte com água (ALONSO, 1999).

Poropressão, pressão de formação, pressão neutra ou pressão de poros, são todos nomes utilizados para definir a tensão exercida pelos fluidos no interior dos poros, ou vazios, dos solos. Quando um fluido é submetido a um carregamento, este reage igualmente em todas as direções. Em solos saturados, ou parcialmente saturados, a aplicação de uma força gera tensões efetivas. Ao subtrair-se a poropressão da tensão total, obtém-se a tensão efetiva (ALONSO, 1999).

2.1.5 Compactação

A aplicação de energia mecânica sobre o solo, de forma a densificá-lo por meio da remoção do ar aprisionado, caracteriza a compactação. A determinação do grau de compactação de um solo pode ser realizada através da medida do seu peso específico (DAS, 2007).

2.2 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

2.2.1 Sondagem à Percussão SPT

Também conhecida como sondagem de simples reconhecimento ou sondagem SPT, sigla em inglês que se refere a Standard Penetration Test, este ensaio de resistência dinâmica e de simples reconhecimento do solo é realizado em campo e serve como indicativo da consistência de solos coesivos e da massa específica de solos granulares (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

O procedimento deste ensaio é simples e o equipamento utilizado possui baixo custo. Um tripé é posicionado sobre o ponto que se deseja realizar o ensaio do solo. A camada superficial de um metro é perfurada

com o auxílio de um trado concha. Em seguida, um amostrador padrão com diâmetro externo de 5 cm é cravado verticalmente no solo. O martelo para essa cravação deve possuir massa padronizada de 65 Kg e cair de uma altura de 75 cm. Um valor chamado de NSPT é determinado pela quantidade de golpes necessários para que o amostrador penetre 30 cm no solo, após uma cravação inicial de 15 cm. É retirada uma amostra do solo para classificação. Os 55 cm restantes para chegar à próxima camada são perfurados com um trado helicoidal. Em seguida, o amostrador padrão é inserido novamente para dar continuidade à sondagem (NBR 6484, 2001).

O processo é repetido até chegar na profundidade solicitada. Em caso de solo com paredes instáveis, revestimento adequado deve ser empregado. E no caso de solo resistente ou com presença de água, uma perfuração com circulação de água pode ser adotada.

O principal parâmetro obtido como resultado deste ensaio é a medida do índice de resistência à penetração, o NSPT. Este pode ser correlacionado com propriedades do solo, além de ser utilizado no cálculo de fundações. Podem ser estimados, com boa precisão, parâmetros de capacidade de carga, espessura e classificação do solo de cada camada, assim como a profundidade do nível de água. Esses resultados apresentados no boletim, ou relatório, de sondagem servem de subsídio para definir o tipo e o dimensionamento das fundações do terreno.

Existem variações deste ensaio, uma delas é a sondagem à percussão com medida de torque (SPT-T). O procedimento para realizar esse ensaio é o mesmo da sondagem tradicional, no entanto com uma única diferença: a introdução da medida de torque. Ao final do ensaio de percussão, verifica-se a medida de torque máximo e torque residual, utilizando-se um torquímetro. Os resultados obtidos no ensaio SPT podem ser correlacionados estatisticamente com os valores de torque, proporcionando melhores parâmetros para a classificação do solo estruturalmente.

No caso de se atingir uma camada de material impenetrável à percussão durante o ensaio, e houver dúvida quanto à natureza deste material, pode ser realizada uma sondagem mista, ou SPT misto. Uma vez que este material impenetrável pode representar, na melhor das hipóteses, rocha sã, ou matacão com solo mole sob ele. Para a realização deste ensaio complementar, deve-se trocar o amostrador padrão por uma broca, a qual será capaz de perfurar esse trecho de rocha para posterior verificação.

2.2.2 Ensaio de Cone CPT

Este ensaio chamado de ensaio de cone, também é conhecido como ensaio CPT, sigla em inglês que remete a Cone Penetration Test. Consiste na cravação vertical de um cone padrão no solo. Com velocidade constante de 2 cm/s, o cone penetra devido à aplicação de pressão, sendo simultaneamente medidos alguns parâmetros de cada camada do solo.

Sensores presentes no cone medem separadamente a resistência à penetração da ponta e a resistência lateral. O primeiro sensor está presente na ponta do cone, e já o segundo consiste em uma camisa de atrito localizada acima da ponteira. As leituras dos parâmetros medidos podem ser visualizadas em tempo real com um intervalo de 1 cm entre uma medição e outra. Isto permite obter um detalhado perfil do solo em profundidade.

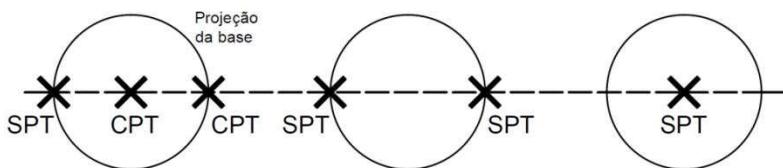
Uma variação deste ensaio de cone, chama-se ensaio de piezocone ou CPT-U. Utilizam-se os mesmos equipamentos e procedimentos, somente com o acréscimo de outro sensor ao cone. Este sensor permite medir a poropressão e a dissipação do excesso de poropressão gerada durante a penetração. Estas medidas são extremamente relevantes para estimar os efeitos do processo de cravação de uma estaca nesse solo. Por conta deste sensor que permite medir a pressão piezométrica das várias camadas do solo, o cone passa a ser chamado de piezocone.

2.2.3 Campanha de Sondagem

Segundo Faria e Noronha (2013), a escolha dos pontos de sondagem deve ser realizada de maneira que permita uma análise tridimensional do solo. Tendo em vista a conformação usual de estruturas de fundações de aerogeradores, em que estacas estão dispostas em uma circunferência, poderiam ser feitas três sondagens por base, formando um ângulo de 120° entre cada sondagem.

As sondagens em uma única linha não são recomendadas, pois fornecem informações do solo em apenas um plano. Se forem realizadas sondagens apenas em linha, estacas podem apresentar grande variação de comprimento de cravação, não previstas em projeto. Uma vez que quando a investigação é realizada apenas em linha reta, não são percebidas variações do subsolo do terreno.

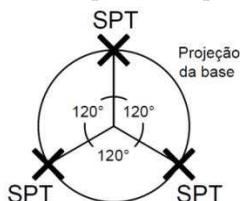
Figura 1 – Exemplo de campanha de sondagem em linha.



Fonte: Elaboração própria (2013), baseado no Estudo de Caso (FARIA; NORONHA, 2013).

No caso de realização de campanha de sondagem em planos diferentes, que não sejam em linha, obtém-se uma análise tridimensional do solo, com melhores informações e parâmetros da conformação do solo.

Figura 2 – Exemplo de campanha de sondagem tridimensional.



Fonte: Elaboração própria (2013), baseado no Estudo de Caso (FARIA; NORONHA, 2013).

2.2.4 Ensaios Complementares

Em grande parte dos projetos de fundações, somente a sondagem à percussão costuma ser realizada, devido à praticidade e rapidez de execução deste ensaio. Portanto uma campanha de sondagens apenas à percussão pode ser chamada de investigação geotécnica preliminar. Porém, a informação solicitada e obtida em uma campanha de sondagem nem sempre é suficiente e conclusiva (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Investigações complementares podem ser necessárias para avaliar o subsolo. De acordo com a NBR 6122 (2010), essas podem ser realizadas através de sondagens à percussão adicionais, instalação de indicadores de nível d'água, piezômetros, ensaio de palheta, assim como outros ensaios de campo e de laboratório. Por sua vez, deve-se avaliar

econômica e tecnicamente a relevância e viabilidade desses ensaios adicionais.

Ensaio de solo mais usuais realizados em laboratório são: ensaio triaxial, de cisalhamento direto, de caracterização, de adensamento e de permeabilidade. O ensaio triaxial determina parâmetros de resistência e deformabilidade do solo; o cisalhamento direto estabelece a coesão e o ângulo de atrito do solo; a caracterização engloba as verificações de granulometria, umidade natural, limite de liquidez, limite de plasticidade e massa específica; o ensaio de adensamento determina características de compressibilidade; e por fim, o ensaio de permeabilidade verifica os coeficientes de permeabilidade vertical e horizontal através do material (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

2.3 FUNDAÇÕES

A fundação é necessária para a transmissão de cargas de uma estrutura construída para o solo. É de extrema importância, na fase de projeto, a escolha do tipo de fundação adequada para cada terreno, de modo a suportar a grandeza das cargas recebidas. O que servirá de insumo para essa decisão são as investigações do subsolo realizadas previamente.

Além de um projeto bem concebido, a execução correta dos procedimentos construtivos da fundação é determinante para assegurar a vida útil da mesma. Contudo, deve-se atentar para patologias após o término da obra, uma vez que a estrutura de fundação pode ter sofrido degradação. Portanto, vistorias periódicas devem ser realizadas buscando fissuras e movimentações do solo.

As fundações podem ser classificadas em dois grupos, fundação superficial ou profunda. O que determinará predominantemente na escolha entre a primeira e a segunda opção: a qualidade e capacidade de carga das camadas superficiais do solo e a profundidade em que o nível de água se encontra.

2.3.1 Fundação Superficial

Também conhecida como fundação rasa ou direta, a fundação superficial é um elemento que transmite cargas da superestrutura para o terreno através de sua base. Esse tipo de fundação pode ser executado a partir dos seguintes elementos: sapata, bloco ou radier. As sapatas ainda podem ser constituídas de forma associada ou corrida.

2.3.2 Fundação Profunda

Fundações que transmitem as cargas da superestrutura para o solo, ou rocha, além de sua base, através da sua superfície lateral. A carga resistida através do contato de sua área lateral com o solo recebe o nome de resistência de fuste ou atrito lateral. Enquanto a carga resistida pela base é conhecida por resistência de ponta. A combinação dessas duas resistências representa a carga total resistida por este elemento (CINTRA; AOKI, 2010).

De modo a ser classificado como elemento de fundação profunda, sua ponta deve estar assentada em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, além de possuir no mínimo três metros de comprimento. As estacas e os tubulões atendem a esses requisitos (CINTRA; AOKI, 2010).

A principal diferença entre as estacas e os tubulões reside na forma de execução. As estacas são executadas inteiramente por equipamentos e ferramentas, enquanto os tubulões necessitam da descida de pessoas às escavações durante alguma etapa de sua construção (CINTRA; AOKI, 2010).

2.3.2.1 Estacas

As estacas se diferem, principalmente, em relação a dois fatores: quanto ao seu material e quanto a sua execução. O material empregado pode ser a madeira, o aço, o concreto, agregados graúdos ou a combinação entre esses materiais. Existem estacas cravadas, escavadas ou até a combinação entre essas duas modalidades. A cravação das estacas pode ser realizada através de percussão, prensagem ou vibração (CINTRA; AOKI, 2010).

Em fundações de aerogeradores, as estacas empregadas devem suportar todos os efeitos aos quais a estrutura estiver submetida. Tendo em vista essa questão, os tipos de estaca indicados são as estacas metálicas e pré-moldadas cravadas (armadas ou protendidas), além das estacas escavadas, em especial a hélice contínua por sua praticidade. Uma solução alternativa com bons resultados de resistência seria a estaca raiz, porém esta apresenta custo elevado (CINTRA; AOKI, 2010).

Estacas podem apresentar diferentes formas de seção transversal e dimensões variadas. Estacas pré-fabricadas são produzidas em fábrica com devido controle tecnológico; enquanto estacas pré-moldadas podem ser produzidas ao lado da obra. Serão consideradas ao longo desse

trabalho como estacas pré-moldadas, termo genérico. E estacas centrifugadas são elementos produzidos por rotação do concreto, portanto possuem seção circular vazada.

Na cravação de estacas por percussão, método amplamente utilizado, devem-se tomar certos cuidados. Um desses cuidados refere-se à altura de queda do martelo: Se a altura de queda for muito abaixo da ideal, obtém-se um valor falso de nega; Se for muito acima, pode ocasionar a quebra da cabeça da estaca, ou até comprometer a estaca inteira. Portanto, além do controle da altura de queda do martelo, a cabeça da estaca deve ser protegida com material adequado. Este material deve ser elástico para receber os impactos provenientes do martelo e não gerar grandes vibrações que possam prejudicar a integridade de toda a estaca (CINTRA; AOKI, 2010).

Outro aspecto referente à cravação, é a recomendação de que seja utilizado somente um tipo de bate estaca por obra (somente à diesel, somente hidráulico ou somente queda livre) e somente um tipo de estaca. Devido à energia de cravação e a experiência do operador que já tem noção de quantos golpes e em qual profundidade, em média, a nega será atingida (CINTRA; AOKI, 2010).

As cabeças das estacas devem estar preparadas para receber o bloco de coroamento. Para tanto, trechos danificados da estaca durante a cravação devem ser cortados e recompostos, assim como o nível da cota de arrasamento deve ser respeitado. O bloco de coroamento é um elemento de concreto armado, que é engastado sobre cada uma das estacas. Este transfere os esforços do pilar, ou mastro do aerogerador, para as estacas, sua base e posteriormente para o solo (CINTRA; AOKI, 2010).

2.3.3 Capacidade de Carga

Segundo Cintra e Aoki (2010), a capacidade de carga de um elemento de fundação por estaca representa a mobilização máxima de tensões resistentes do solo devido a aplicação de um carregamento limite. Acima desse valor de carregamento, a fundação sofreria recalque incessante. A interação entre a estaca e o solo gera tensões resistentes, que são o atrito lateral e a resistência de ponta. O primeiro é mobilizado quase totalmente, antes que a resistência de ponta assuma valores significativos.

Para estacas maciças de concreto armado, ou protendido, a área de cálculo considera a própria seção transversal da peça. Em estacas pré-moldadas de concreto com seção vazada, devido à densificação da ponta

da estaca durante a cravação, esta pode considerar a área de cálculo como se fosse maciça. Já em perfis metálicos, há bastante variação quanto a consideração de sua área de cálculo.

Fórmulas teóricas, empíricas e semiempíricas podem ser empregadas para a previsão da capacidade de carga. No entanto, as fórmulas teóricas e somente da experiência prática não são confiáveis. Por sua vez os métodos semiempíricos são amplamente empregados no meio acadêmico e profissional, sendo utilizados para elaboração de projetos de fundações pelos escritórios de engenharia (CINTRA; AOKI, 2010). O método Aoki-Velloso é o mais utilizado na prática profissional no Brasil.

A fórmula semiempírica pode ser escrita com a utilização dos parâmetros obtidos do ensaio CPT. No entanto, como no Brasil o ensaio mais utilizado para investigação do subsolo é o SPT, há um coeficiente de correlação entre os dois resultados.

$$R = \frac{KN_p}{F_1} A_p + \frac{U}{F_2} \sum_1^n (\alpha KN_L \Delta_L) \quad (2.1)$$

K é um coeficiente definido pelo método;

N_p é a medida N_{SPT} ;

F_1 e F_2 são fatores de correção definidos pelo método;

A_p é a área da ponta.

N_p é a medida N_{SPT} ;

α é a razão de atrito;

Tabela 1 - Fatores de correção F_1 e F_2

Tipo de estaca	F_1	F_2
Franki	2,50	$2 F_1$
Metálica	1,75	$2 F_1$
Pré-moldada	$1+D/0,80$	$2 F_1$
Escavada	3,00	$2 F_1$
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,00	$2 F_1$

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

Tabela 2 - Coeficiente K e razão de atrito α

Solo	K (MPa)	α (%)
Areia	1,00	1,4
Areia siltosa	0,80	2,0
Areia siltoargilosa	0,70	2,4
Areia argilosa	0,60	3,0
Areia argilosiltosa	0,50	2,8
Silte	0,40	3,0
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte arenoargiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,23	3,4
Silte argiloarenoso	0,25	3,0
Argila	0,20	6,0
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila arenosiltosa	0,30	2,8
Argila siltosa	0,22	4,0
Argila siltoarenosa	0,33	3,0

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

Em certos casos, a capacidade de carga exercida pelo solo pode assumir maior valor que a resistência estrutural da estaca à compressão. Deve-se levar em conta o menor desses valores, de modo a garantir a segurança da estrutura. Se ensaios de carga dinâmica, ou estática, não forem realizados nas estacas, não se pode utilizar a capacidade estrutural de carga máxima da estaca. Nesse caso, a norma brasileira de projeto e execução de fundações, NBR 6122 (2010), determina as capacidades, com menor valor, que deverão ser consideradas no projeto.

2.4 TESTES DE CARGA EM ESTACAS

Caso em uma obra, ou construção, sejam executadas mais de 100 estacas, a NBR 6122 (2010) determina que em pelo menos 1% das estacas se realize uma prova de carga (estática ou dinâmica). Porém, quando houver mais de 200 estacas na obra, torna-se obrigatória a realização de pelo menos uma prova de carga estática, além de uma outra prova de carga.

2.4.1 Testes de Carga Dinâmica

Tensômetros e acelerômetros devem ser instalados na cabeça da estaca, a dois diâmetros da seção da estaca que será aplicado o golpe, para então ser medida a onda de vibração gerada pelo golpe do martelo (NBR 13208, 2007). De acordo com a empresa Pile Dynamics, o golpe do martelo para a realização desse teste deve possuir em torno de 1% a 5% do valor do peso da estaca. Devido ao uso de poucos equipamentos e a uma montagem rápida do sistema, os testes de carga dinâmica se tornam acessíveis.

2.4.1.1 Teste de Análise da Cravação (PDA)

Segundo a empresa Pile Dynamics, o sistema PDA (Pile Driving Analyzer) pode ser considerado como o sistema mais empregado no mundo para monitoramento de testes de carga dinâmica e cravação de estacas. Este é capaz de determinar a capacidade de carga de diversas estacas em apenas um dia. O PDA avalia e investiga as tensões geradas na estaca a partir da energia aplicada pelo martelo. Se necessário, é possível realizar testes de nega descansada mesmo depois que o martelo não está mais no local, usando um peso de queda para impactar a fundação.

O sistema PDA calcula os resultados de velocidade e força obtidos através dos sensores, acelerômetros e transdutores de tensão, anexados à estaca. Os sensores podem ter transmissão de dados sem fio ou tradicionalmente via cabos. Esse sistema é capaz de obter valores de resistência do solo e sua distribuição ao longo da fundação. Além disso, correlações matemáticas realizadas, apontam a confiança de valores obtidos através do teste PDA para simular um teste de carga estática.

O resultado chamado de Case é obtido após o término do ensaio em campo. Este fornece uma previsão da carga dinâmica resistida pela estaca. Somente após o devido tratamento dos dados do ensaio em software específico, o resultado chamado de CAPWAP é obtido com o processamento dos dados durante algumas horas ou dias. Geralmente esses dois resultados não diferem muito um do outro, no entanto algumas vezes pode existir uma diferença significativa. Em alguns casos, a estaca já foi liberada para execução do bloco de coroamento ao ser verificado o resultado Case, porém alguns dias depois o CAPWAP informa que a estaca não atingiu a carga necessária. Portanto se sugere que seja aguardado o resultado oficial do teste PDA antes da liberação da fundação.

2.4.1.2 Teste de Integridade de Estacas (PIT)

Outro teste de carga dinâmica é o teste de integridade de estacas, também chamado de PIT, sigla em inglês de Pile Integrity Test. Este visa verificar a variação das características da estaca ao longo do seu comprimento de profundidade. Se houver algum dano na estaca, sua localização pode ser indicada por esse teste.

O ensaio consiste em instalar um acelerômetro de alta sensibilidade no topo da estaca e aplicar golpes com um martelo de mão. Os golpes geram uma onda de tensões, a qual oscila ao longo do elemento de fundação. Esta onda de tensão sofre reflexões ao encontrar qualquer variação nas características do material. Alterações do módulo de elasticidade, área da seção e peso específico do elemento de fundação podem ser percebidos pelo sensor através da aceleração medida. Com posse dessas informações, é possível determinar a localização exata dessas variações, que podem representar danos na estaca.

2.4.2 Testes de Carga Estática

Os testes de carga estática são desenvolvidos com a aplicação de uma carga constante durante todo o ensaio de campo (NBR 12131, 1992). Existem basicamente três modalidades de teste de carga estática: teste de carga estática com estacas ancoradas, com uso de peças maciças ou composto.

Para o desenvolvimento do teste de carga estática com uso de estacas ancoradas são necessárias vigas de aço sob a aplicação de cargas. Ao redor da estaca que se deseja testar são posicionadas estacas âncora, as quais são conectadas às vigas, que por sua vez estão apoiadas sobre a estaca a ser testada. O arranjo e a quantidade de vigas e estacas âncora permitem atingir grandezas de carga de 100 kN a 30 MN.

O teste de carga estática com uso de peças maciças de aço ou concreto é um método bastante caro e ineficiente, devido à difícil movimentação desses elementos pesados, que são utilizados para simular as cargas de serviço e cargas limite. Portanto esta técnica é apenas utilizada quando não for possível realizar o método de estacas ancoradas.

Teste de carga dinâmica composto é uma combinação entre os dois métodos acima descritos. Portanto utilizam-se estacas âncora, vigas de aço e cargas maciças sobre esse sistema. Esse método é utilizado para simular cargas elevadas.

2.5 ANÁLISE DE EFEITOS NAS ESTACAS

2.5.1 Nega e Repique

Considerada como efeito imediato, ou clássico, que ocorre nas estacas, a nega é a medida da penetração permanente de uma estaca, devido à aplicação de um golpe do martelo de cravação. No entanto, de maneira prática, a medida da nega considera a profundidade que a estaca penetrou no solo, a partir da aplicação de uma série de dez golpes. Deve-se atentar para as diferenças de valores de nega obtidos, ocasionadas pela variação da altura de queda e do peso do martelo, ou seja, da energia de cravação aplicada. Portanto, essas especificações devem ser devidamente calculadas e registradas nos relatórios de cravação de cada estaca (CINTRA; AOKI, 2010).

O repique se refere à parcela elástica do deslocamento máximo ocasionado pela aplicação de um golpe do martelo em uma seção da estaca. Ao contrário da nega, o repique apresenta resultados com menos dispersões. O registro do repique pode ser feito graficamente através do uso de um papel fixado à estaca e um lápis apoiado em um referencial, durante a aplicação do golpe. O valor obtido por este método representa o deslocamento máximo, porém sem a escala de tempo. É possível, portanto, estimar a carga mobilizada durante o golpe do martelo (CINTRA; AOKI, 2010).

Segundo a NBR 6122 (2010), para o controle, verificação e avaliação dos serviços de cravação, deve-se medir a nega e o repique em todas as estacas ao final da cravação. Além disso, deverão ser elaborados diagramas de cravação em pelo menos 10% da quantidade total de estacas da obra. Recomenda-se ainda, que as estacas sejam alocadas em locais próximos dos furos de sondagem.

2.5.2 Efeito de Grupo

De acordo com Cintra e Aoki (2010), a interação entre os elementos que constituem uma fundação gera uma superposição de tensões ao transmitir as cargas para o solo. De maneira prática, quando há um conjunto de estacas interligadas por um bloco de coroamento, considera-se que a capacidade de carga e o recalque do grupo são diferentes daqueles do elemento isolado. À esta interação, dá-se o nome de efeito de grupo. Em geral, o efeito de grupo acarreta em acréscimo de capacidade de carga e em valores de recalque superiores, em relação ao elemento isolado.

O espaçamento mínimo entre estacas deve considerar a forma de transferência de carga ao solo e o efeito provocado pela execução das estacas adjacentes às já executadas. Os blocos apoiados em estacas com elementos inclinados devem ser tratados de forma especial, em relação ao efeito de grupo (NBR 6122, 2010).

2.5.3 Recalque

Recalque representa o fenômeno de deslocamento vertical, em relação à superfície, sofrido pela base da fundação ao ser submetida a uma carga. Duas deformações causam este efeito: o encurtamento elástico do próprio elemento estrutural e a deformação vertical de compressão das camadas de solo subjacentes à base do elemento (CINTRA; AOKI, 2010).

O principal fator para a ocorrência do recalque é o adensamento do solo sob a fundação, o que pode causar uma variação de altura na base da estrutura. Caso o recalque ocorra com diferente magnitude em outras partes da construção, ocorrerá o recalque diferencial. Este pode causar distorções nas estruturas, desde pequenas fissuras até grandes trincas.

O recalque é considerado uma patologia, portanto é muito importante sua verificação durante a fase de cálculo e projeto da fundação (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2008). Uma das verificações de estado limite de serviço contempla as deformações, na qual o recalque se enquadra. Outro fator que também deve ser levado em conta, é o efeito de grupo. Uma vez que o recalque de um conjunto de estacas unidas por um bloco de coroamento apresenta maior valor que um elemento isolado.

2.5.4 Cicatrização De Estacas (Pile Setup)

A cicatrização de estacas é um fenômeno que representa o acréscimo de resistência de estacas cravadas no solo com o decorrer do tempo. Também é conhecida como cicatrização do solo, cicatrização, ou pelos seguintes termos da língua inglesa: setup ou set-up. Este ocorre devido aos fatores de recuperação do solo reestruturado, aumento das tensões laterais e dissipação da poropressão (NG et al., 2013). O efeito inverso à cicatrização recebe o nome de relaxação do solo, no qual a resistência diminui com o passar do tempo pós cravação.

Existem solos com comportamento de relaxação, e outros de cicatrização. De modo a identificar em qual das duas características o

solo se enquadra, recomenda-se a determinação da nega descansada. Trata-se da medição da nega, utilizando o mesmo martelo da cravação, após determinado tempo do término de execução da estaca. Em solos não coesivos, a cicatrização, ou relaxação, pode ser notada após algumas horas do fim da cravação; enquanto em solos coesivos, esta pode levar até alguns dias para ser percebida.

A NBR 6122 (2010) recomenda os procedimentos a serem adotados após a cravação. Caso a nega descansada (medida alguns dias após o término da cravação) possua valor superior ao obtido no final da cravação, configurando relaxação do solo, as estacas deverão ser recravadas; caso a nova nega for inferior, evidenciando a cicatrização, a quantidade de golpes do martelo deverá ser limitada, de modo a não causar danos à estaca, além disso a nega de projeto deve ser reavaliada. De maneira análoga, os valores obtidos para o repique podem ser avaliados para verificar a ocorrência desse fenômeno.

Apesar da cicatrização ser um fenômeno já conhecido há décadas, não há método analítico eficaz que integre a cicatrização das estacas ao cálculo e projeto de fundações. Testes de campo podem ser realizados para verificar o comportamento do solo em relação à cicatrização. Alguns ensaios como a caracterização do solo, o monitoramento das tensões totais, laterais e de poropressão ou testes de carga dinâmica e estática nas estacas medidos em função do tempo, fornecem parâmetros para a mensuração da cicatrização (KOMURKA; WAGNER; EDIL, 2003).

Testes de carga estática e dinâmica podem ser utilizados para avaliar a cicatrização de estacas, no entanto, não é viável a realização desses testes em todas as obras. Deve-se realizar uma análise econômica para verificar a relevância da determinação dos valores reais da cicatrização em determinado terreno, uma vez que a nega descansada já fornece um bom parâmetro. Porém, dentre os testes de carga, os dinâmicos costumam ser os mais empregados, devido ao menor custo em relação ao teste estático, além da facilidade de instalação dos equipamentos (KOMURKA; WAGNER; EDIL, 2003).

A cicatrização é predominantemente associada com o acréscimo do atrito lateral. Portanto, a resistência de ponta exerce pouca influência nesse fenômeno. A cicatrização é relacionada primeiramente à dissipação do excesso de poropressão, com posterior rearranjo e consolidação do solo, o qual foi deslocado e perturbado durante a cravação da estaca. Ensaios dinâmicos de nega descansada nas estacas confirmam que a cicatrização ocorre como uma função logarítmica ao longo do tempo. Esse desenvolvimento logarítmico se relaciona bem

com a dissipação das medições de poropressão, que apresentam comportamento semelhante (NG et al., 2013).

O efeito de cicatrização pode ocorrer com magnitudes significantes nos seguintes tipos de solo: argila orgânica e inorgânica, silte, areia siltosa e areia muito fina. Em solos coesivos (argilosos), o excesso de poropressão costuma se dissipar lentamente após a cravação da estaca (KOMURKA; WAGNER; EDIL, 2003). A força de atrito do solo perturbado e consolidado pela cravação da estaca apresenta resistência cerca de 50 a 60% mais elevada que o solo não perturbado. Em solos não-coesivos (areia ou silte), o excesso de poropressão costuma se dissipar rapidamente, quase simultaneamente com a cravação. Portanto, em solos arenosos o valor de acréscimo, ou perda, de capacidade de carga do solo após a cravação não sofre grandes alterações com o passar do tempo (NG et al., 2013).

A cicatrização pôde ser observada e documentada em todos os tipos de estacas de deslocamento, com diversos perfis e dimensões. Ou seja, esse fenômeno é observado em estacas metálicas, de madeira, de concreto armado e protendido. A taxa de cicatrização reduz com o aumento do tamanho das estacas. Quanto aos diferentes perfis e materiais, observou-se que uma estaca de concreto armado circular gerou maior excesso de poropressão durante a sua cravação do que uma estaca metálica de perfil H. No entanto, após 43 semanas, ambas as estacas apresentavam aproximadamente a mesma resistência lateral (KOMURKA; WAGNER; EDIL, 2003).

Métodos empíricos para estimar a cicatrização foram propostos por diversos pesquisadores. Contudo, cada um desses métodos empíricos possuem respectivas deficiências, sendo que alguns desses não puderam ser validados por conta de dados experimentais insuficientes. Segundo Ng et al. (2013), estes são alguns dos métodos semiempíricos para estimação da cicatrização de estacas:

Pei e Wang (1986): Método empírico.

$$\frac{R_t}{R_{FC}} = 0,236[\log(t) + 1] \left[\left(\frac{R_{MÁX}}{R_{FC}} \right) - 1 \right] + 1 \quad (2.2)$$

R_{FC} é a resistência ao final da cravação;

$R_{MÁX}$ é a resistência máxima alcançada;

Zhu (1988): Somente prevê a resistência da estaca no 14º dia e nenhum efeito de consolidação é considerado.

$$\frac{R_{14}}{R_{FC}} = 0,375 \times S_t + 1 \quad (2.3)$$

R_{14} é a resistência após 14 dias da cravação;
 S_t é a sensibilidade do solo;

Skov e Denver (1988): Requer verificações constantes de nega descansada.

$$\frac{R_t}{R_o} = A \times \log\left(\frac{t}{t_o}\right) + 1 \quad (2.4)$$

R_o é a resistência inicial;
 t_o é o tempo inicial;

Svinkin e Skov (2000): Não existem muitas determinações sobre os valores assumidos pelo coeficiente B, além de sua relação com as propriedades dos solos.

$$\frac{R_t}{R_{FC}} = B \times [\log(t) + 1] + 1 \quad (2.5)$$

B é um coeficiente de cicatrização definido por Svinkin e Skov;

Karlsruud et al. (2005): O método assume que há dissipação completa do excesso de poropressão após 100 dias da cravação.

$$\frac{R_t}{R_{100}} = A \times \log\left(\frac{t}{t_{100}}\right) + 1 \quad (2.6)$$

$$A = 0,1 + 0,4 \times \left[1 - \left(\frac{PI}{50}\right)\right] \times OCR^{-0,8} \quad (2.7)$$

R_{100} é a resistência após 100 dias da cravação;
 A é um coeficiente de cicatrização definido por Karlsruud;
 PI é o índice de plasticidade.

Caso seja estimado e devidamente verificado em campo o ganho da capacidade de carga pela cicatrização do solo, este poderia ser utilizado no projeto de fundações. No caso específico de fundações de torres eólicas, esse fator poderia ser utilizado no projeto se o solo for caracterizado como cicatrizante. Uma vez que em estacas profundas, a julgar pela quantidade de estacas em uma base de torre, o atrito lateral seria predominante na resistência total, e a resistência de ponta não teria tanta contribuição. A consideração dos efeitos de cicatrização no

processo do projeto de estacas pode levar a redução de custos, pois este fenômeno reduziria a quantidade e comprimento das estacas necessárias.

Fatores diversos podem, eventualmente, interromper os serviços de cravação de estacas em uma obra, como defeito da máquina, fim da jornada diária de trabalho ou quebra e reparo da estaca. Caso alguma dessas eventualidades ocorra antes que a nega de projeto seja atingida, quando se deseja continuar a cravação a estaca pode não descer mais com a queda do martelo. Nesse caso o solo densificou (cicatrizou) e não será mais possível que a estaca desça nesse ponto. Porém isso não deve ser interpretado como a nega especificada em projeto, a estaca será considerada como flutuante. Essa situação deve ser avaliada com cautela, podendo resultar em perda de todo o comprimento da estaca cravada, ou ter de ser realizado reforço.

2.5.5 FADIGA (FATIGUE)

A definição de fadiga é o enfraquecimento de determinado material, causado pela variação repetitiva da tensão (OXFORD DICTIONARIES, 2013). A fadiga representa o dano acumulado pela atuação de cargas cíclicas em um material ou estrutura. No caso de fundações, quando tensões variam de intensidade e sentido, torna-se de extrema importância a verificação da estrutura quanto à fadiga. A fadiga do concreto, aço e das emendas entre os elementos de fundação devem ser analisados separadamente no projeto, de modo a garantir a vida útil da estrutura.

De acordo com a regra de Palmgren-Miner, para a combinação de ações de cargas de determinada estrutura, admite-se que os danos de fadiga são acumulados de forma linear com a quantidade de ciclos aplicados a determinada condição de nível de tensões.

Sob o ponto de vista de estruturas de fundação de concreto armado, de acordo com a NBR 6118 (2003), ações dinâmicas da superestrutura, transmitidas à infraestrutura, podem causar estados limites de serviço (ELS) e estados limites últimos (ELU). Em relação ao ELS, este pode ser afetado pela repetição das solicitações. Estas ações dinâmicas cíclicas podem gerar um aumento progressivo das deformações do material, somado ao efeito de fluência e às deformações do solo, resultando em recalques. Além disso, podem ocasionar fissuras, ou agravar aquelas já existentes. Este efeito cíclico deveria ser avaliado experimentalmente, no entanto se não houver dados conclusivos, este pode ser estimado da seguinte maneira:

$$a_n = a_1[1,5 - 0,5 \times \exp(-0,05 \times n^{0,25})] \quad (2.8)$$

a_n é a deformação no enésimo ciclo devido à carga máxima;

a_1 é a deformação no primeiro ciclo devido à carga máxima;

n é o número de ciclos.

Em relação ao ELU ocasionado por ações dinâmicas, este pode se apresentar de duas formas: estado limite de vibrações excessivas e estado limite último de fadiga. A fadiga é um processo que envolve modificações progressivas e permanentes de um material devido à ações repetitivas de tensões. Essas ações dinâmicas cíclicas alteram a estrutura e conformação interna do material. As ações de fadiga podem ser classificadas da seguinte maneira: baixa, média ou alta intensidade. Esta última, fadiga de alta intensidade, considera ações cíclicas capazes de causar danos à estrutura com a aplicação de menos de 20 mil repetições. Portanto, esta não é relevante para estruturas de engenharia civil.

Conforme o manual da DNV/Riso (2002), a análise de fadiga de estruturas de concreto para turbinas eólicas é importante e não deve ser omitida. Verificações devem ser realizadas tanto nos elementos de concreto quanto no aço e em suas emendas através de solda ou luvas, em análises separadas. Para a verificação da vida útil da estrutura da fundação, somente o maior dos componentes de carga na base (momento fletor ou compressão), deve ser levado em consideração. No que se refere ao concreto, a fadiga deveria ser calculada de acordo com o Eurocode (Eurocode 2, Parte 2-2). Contudo, uma verificação à fadiga mais refinada pode ser necessária, uma vez que este é o principal fenômeno que pode ocorrer nos materiais utilizados nas fundações de aerogeradores.

No contexto de torres eólicas instaladas no mar (offshore), esforços provocados pelas ondas e pelo vento possuem papel importante no projeto das estruturas de fundações de torres eólicas. A fadiga provocada deve ser levada em conta no cálculo. De maneira diferente de outras construções, as estruturas de torres eólicas offshore sofrerão milhões de ciclos de deformações, causando um alto ciclo de fadiga ao longo dos 20 anos de vida útil de projeto. Geralmente, são os carregamentos de fadiga que determinam o dimensionamento final no projeto de fundações dessas torres (JIANKANG; CHEN, 1999).

Fadiga de fricção é o efeito de degradação do atrito lateral de uma estaca sob carga cíclica. Também conhecido como relação h/r, no qual h representa a distância até a ponta da estaca e r refere-se ao raio da

estaca. Este efeito foi observado tanto em modelos quanto em testes de campo. No entanto, ainda há pouco entendimento desse mecanismo de fadiga. Métodos de quantificação existentes para determinação da fadiga de fricção são baseados, em sua maioria, na experiência ao invés da compreensão dos fundamentos de mecânica dos solos. A degradação por fricção consiste na densificação gradual do solo adjacente ao fuste da estaca cravada, sob carga cíclica (D'AGUIAR; DOS SANTOS; LOPEZ-CABALLERO, 2011).

2.5.6 FLAMBAGEM (BUCKLING)

Define-se como flambagem o encurvamento de elementos esbeltos, nos quais a área da seção transversal é muito menor que seu comprimento, devido a ação de esforços de compressão axial. A compressão pode gerar momento fletor na peça e fazer com que esta perca a estabilidade elástica. Dessa forma, estacas mais longas que 10 metros podem ser susceptíveis a esse efeito.

Uma hipótese levantada por Vogt (2012), prevê a ocorrência de flambagem em uma estaca quando existe solo mole em alguma das camadas. Se entre o solo firme (em que esta apoiada a ponta da estaca) e a cabeça da estaca (que está unida ao bloco de coroamento) existir um solo mole, esta região está susceptível a ocorrência de flambagem. Uma vez que a carga aplicada sobre a fundação gera deformações em toda a estaca, possibilitando ocorrência de movimento lateral na região de solo mole.

Segundo a NBR 6122 (2010), quando as estacas forem cravadas em solos sujeitos a erosão, solos muito moles ou que possuem sua cota de arrasamento acima do nível do terreno, deve-se verificar as estacas em relação ao momento de segunda ordem (flambagem). Uma vez que esse pode ocasionar uma ruptura estrutural, portanto deve ser levado em consideração na verificação do Estado Limite Último (ELU).

2.5.7 LIQUEFAÇÃO (LIQUEFACTION)

A liquefação causa uma perda de resistência ao cisalhamento no solo, gerada pela pressão de fluxo ascendente da água no solo por conta de um terremoto ou aplicação de uma carga elevada. Esse fenômeno faz com que o solo se comporte temporariamente como um líquido viscoso. A percolação de água pode causar danos a tubulações, taludes e até fundações. Uma vez que possui elevada carga hidráulica e aflora na superfície sob pressão. Além disso, o solo pode perder parcialmente sua

coesão. O fenômeno ocorre em solos não consolidados com água saturada, afetada principalmente por ondas sísmicas secundárias, que provocam vibrações durante terremotos (HOSSAIN; ANDRUS; CAMP, 2013).

Apesar de choques provocados por terremotos serem a causa mais conhecida de liquefação, certas práticas construtivas, incluindo detonação e compactação do solo e vibroflotation (método que utiliza um equipamento vibrador para mudar a estrutura granular do solo ao seu redor), produzem este fenômeno intencionalmente. Solos como a areia e o silte são mais susceptíveis à liquefação.

No contexto de fundações, este fenômeno de liquefação adquire grande importância em zonas de sismo. Porém, a vibração das máquinas e equipamentos de cravação de estacas, podem também causar pequenos focos de liquefação nas fundações e na sua região adjacente.

Uma abordagem simplificada de avaliação do potencial de liquefação do solo envolve a estimativa de demandas sísmicas em uma camada de solo, expressa em termos de taxas de esforços cíclicos. A capacidade do solo em resistir à liquefação seria expressa em taxa de resistência cíclica. A susceptibilidade à liquefação de um determinado solo depende de diversos fatores, a citar alguns deles: história geológica do local, natureza do tremor do terremoto, além da densidade, permeabilidade, nível de água e índice de vazios do solo (HOSSAIN; ANDRUS; CAMP, 2013).

Ensaio de campo, como o SPT, CPT e o ensaio de palheta são utilizados tipicamente para medir ou avaliar a possibilidade de liquefação. Muitas vezes são preferíveis ensaios de campo por sua praticidade, ao invés de ensaios de laboratório. Além disso, existe uma grande complexidade envolvida na retirada e transporte da amostra de solo até o laboratório. Os resultados dos ensaios e a estratigrafia do local podem ser utilizados em conjunto para estimar o potencial das camadas de solo à liquefação (HOSSAIN; ANDRUS; CAMP, 2013).

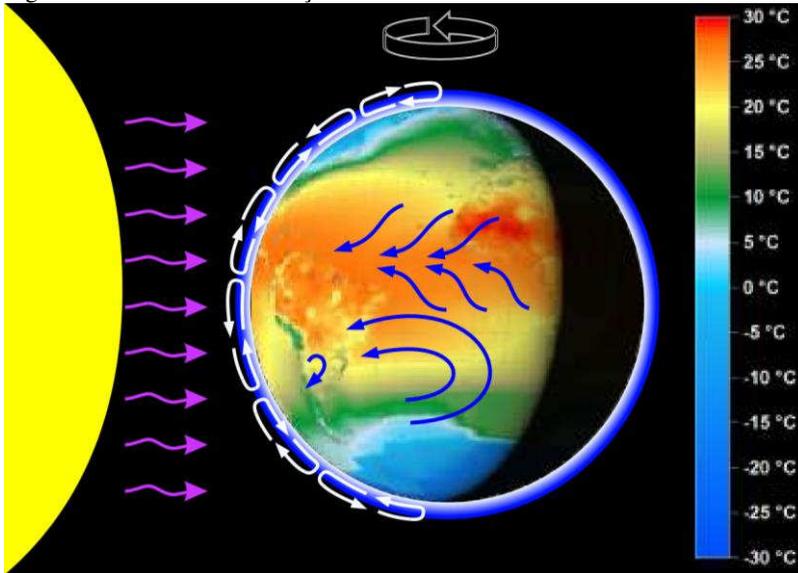
Os resultados após a ocorrência de liquefação no solo por conta de um terremoto são críticas. Os movimentos laterais do solo causados por esse fenômeno podem ser desastrosos. Existem softwares, que analisam e simulam o impacto da liquefação no solo. Em certos casos, a fadiga pode também representar um fator desencadeador de liquefação.

2.6 ENERGIA EÓLICA

A energia solar, ao incidir sobre a Terra, gera um aquecimento irregular da atmosfera, do solo e das massas de água. Conseqüentemente, surgem sistemas de convecção atmosférica: o ar quente, por ser mais leve que o ar frio, sobe a altitudes mais elevadas; enquanto o ar frio desce. Esse movimento natural de corrente de ar que acontece em todo o Planeta é afetado pela superfície terrestre, originando diferentes pressões atmosféricas. O ar se movimenta entre esses sistemas de pressão, de modo a equilibrar essa diferença. Considera-se que energia eólica é a conversão da energia cinética contida nas massas de ar em movimento, ou seja, do vento em energia elétrica (ANEEL, 2013).

Alguns efeitos naturais que influenciam na velocidade e direção dos ventos são a temperatura, precipitação de chuvas, densidade do ar, obstáculos no terreno, continentalidade, maritimidade, latitude e altitude. Outro fator que afeta o movimento do ar é a força de Coriolis. Esta faz com que o vento apresente movimentos tipicamente circulares, provocando deslocamento de massas de ar entre o equador e os polos.

Figura 3 – Processo de formação dos ventos.



Fonte: Atlas eólico (CAMARGO, 2002).

2.6.1 Histórico da Utilização de Energia Eólica

O aproveitamento do recurso eólico provém da energia cinética dos ventos. Os primeiros registros de utilização do vento se referem à realização de trabalhos mecânicos. Os egípcios utilizavam velas, junto da força dos remos dos escravos, para movimentar embarcações. As velas começaram também a ser utilizadas, por outras civilizações, para ajudar o trabalho da força animal. Por volta de 200 a. C., a criação dos moinhos de vento, ou cataventos, é atribuída aos Persas, que construíram moinhos verticais elevados, também chamados de panemones. Suas principais aplicações eram o bombeamento de água e a moagem de grãos.

Os moinhos de eixo horizontal foram criados pelos holandeses, em torno de 1300 d. C. Esses moinhos desempenhavam os mesmos trabalhos, porém com maior rendimento que os de eixo vertical. Foram amplamente utilizados na era medieval em territórios da Europa, como França, Inglaterra e Holanda (KALDELLIS; ZAFIRAKIS, 2011). Este é o princípio da tecnologia que foi aplicada nos aerogeradores. Os moinhos de vento alteraram pouco sua configuração para serem capazes de gerar eletricidade, basicamente um gerador foi acoplado ao sistema.

Figura 4 – Moinhos de Kinderdijk (Holanda).



Fonte: Elaboração própria (2013).

De acordo com o The Guardian (2008), em julho de 1887, James Blyth, professor na Universidade de Glasgow (Escócia), criou o primeiro moinho de vento capaz de gerar eletricidade. No inverno do mesmo ano, Charles F. Brush construiu a primeira turbina eólica para produção automatizada de eletricidade em Ohio, Estados Unidos.

Tratava-se de um rotor com diâmetro de 17 metros e 144 pás de madeira. A turbina gerava apenas 12 kW de eletricidade, a qual era armazenada em 408 baterias. Estas alimentavam as lâmpadas da casa do inventor norte-americano, funcionando durante 20 anos. Brush tornou-se um dos fundadores da indústria elétrica nos Estados Unidos. Após os dois inventores, outros físicos e engenheiros de diversos países aperfeiçoaram o projeto das turbinas eólicas, até os modelos que são empregados atualmente. O primeiro registro de turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi no ano de 1976, na Dinamarca (ANEEL, 2013).

A utilização da energia eólica, ao invés de outras fontes, traz aspectos favoráveis e desfavoráveis ao meio ambiente. As torres eólicas ocupam pouca área do terreno onde são instaladas, não emitindo gases poluentes ou lixo radioativo, além disso não necessitam da água como elemento motriz. Contudo geram impacto sobre a fauna onde se encontram, causando impacto visual e emissão de ruído.

2.6.1.1 Fundações de Moinhos de Vento

Os moinhos de vento foram responsáveis, antigamente, pelo desenvolvimento econômico de diversas regiões do planeta. Essas estruturas, primeiramente constituídas de madeira, eram leves e não exigiam fundações elaboradas. Uma vez que o peso próprio da construção não assumia grandes proporções, suas fundações não precisavam ser muito robustas. Podiam, portanto, ser suportados apenas por blocos de rocha ou estacas de madeira.

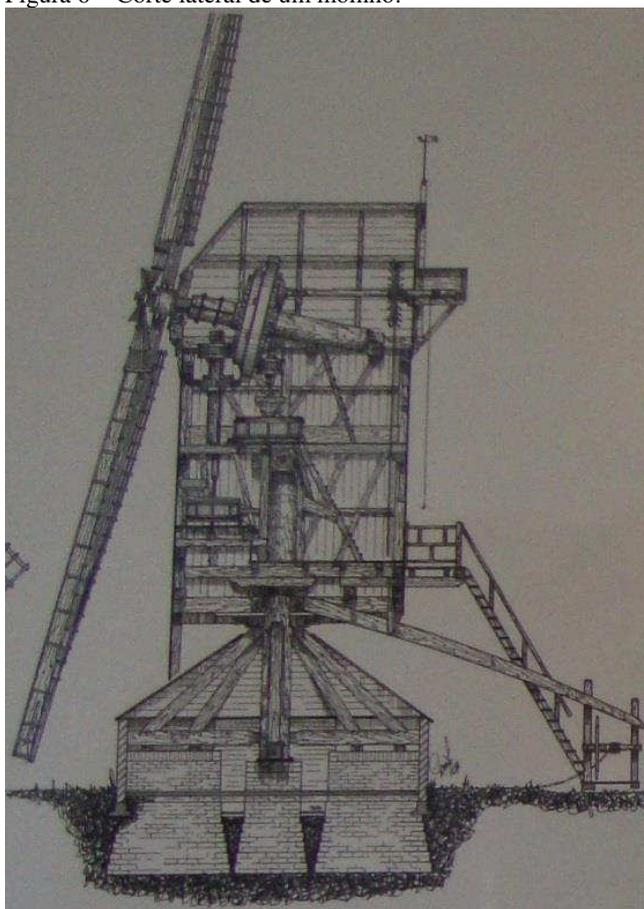
Figura 5 – Moinho de pequeno porte (Rocca al Mare, Estônia).



Fonte: Elaboração própria (2013).

Com o avanço da engenharia dos moinhos de vento, principalmente pelos holandeses, essas máquinas ganharam grande proporção e sua fundação passou a ser elemento importante. Portanto, soluções como a fundação rasa composta por blocos cerâmicos eram utilizadas para resistir aos carregamentos de peso próprio e incidência de ventos. Algumas vezes estacas de madeira eram inseridas sob os blocos para aumentar a capacidade de suporte. Uma comprovação de que essas estruturas foram bem projetadas, é o fato que muitos desses moinhos se encontram de pé até hoje.

Figura 6 – Corte lateral de um moinho.



Fonte: Museu de Kinderdijk, foto do autor (2013).

2.6.2 Parque Eólico

Quando várias torres eólicas são construídas próximas uma das outras, este empreendimento recebe o nome de parque eólico. Cada 1 MW de potência instalada de aerogeradores é capaz de gerar eletricidade para 2 mil residências (DAMAS, 2013).

Geralmente são chamados de parques eólicos os projetos submetidos à aprovação ambiental, técnica e de investimentos. Enquanto Complexo eólico é considerado o conjunto de parques que localizam-se próximos uns aos outros. Baixos impactos ambientais são relacionados aos parques eólicos, comparados com outras fontes geradoras de energia como termoelétricas e hidrelétricas (BURTON et al., 2001).

Figura 7 – Torres eólicas onshore (Alemanha).



Fonte: Elaboração própria (2013).

O Plano Decenal da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) concluiu que a energia eólica cresce mais acentuadamente que as PCHs em potencial instalado. Uma peculiaridade da energia eólica é a oscilação da geração de energia, sendo algumas vezes tratada como energia complementar, e não principal, uma vez que o vento não pode ser armazenado para seu uso posterior. Ao contrário das PCHs, que

podem armazenar volume de água em suas represas para assegurar a geração constante de energia. Contudo, outro fator positivo para o processo de concepção dos parques eólicos é o fato de que a análise do impacto ambiental é mais ágil comparada com as PCHs.

As etapas para a concepção de um parque eólico são: Estudo geológico da região, viabilidade ambiental e técnica, projeto básico e projeto executivo. As estruturas de torres eólicas, costumam apresentar período de vida útil garantida por projeto de 20 anos. Ou seja, até 20 anos é assegurado tecnicamente o funcionamento da estrutura. Após esse período, a empresa projetista e a executora ficam isentas de reparos e da responsabilidade técnica da estrutura. No entanto não significa que o aerogerador precisará cessar seu funcionamento, este pode seguir gerando energia desde que vistorias constantes sejam realizadas.

Figura 8 – Torres eólicas offshore (Noruega).



Fonte: War History Online (2013).

Costumeiramente, os projetos de complexos eólicos apresentam em torno de 20 a 50 aerogeradores, de forma a tornar o projeto economicamente viável. O terreno escolhido para a execução do parque eólico segue o sistema de arrendamento. É estabelecido um contrato entre os investidores e o dono do terreno, o qual receberá uma porcentagem da receita obtida com a venda da eletricidade gerada, normalmente em torno de 1% a 3%. Outro aspecto importante na

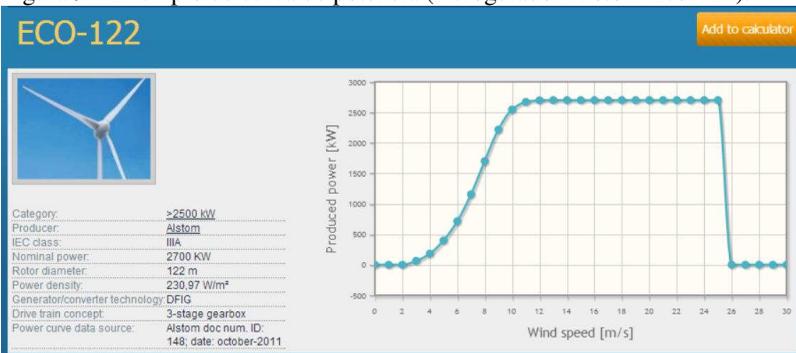
definição do local é a acessibilidade para caminhões, máquinas e a disponibilidade de materiais, como brita e areia.

As torres eólicas podem ser classificadas quanto a sua localização. Considera-se que a torre eólica está instalada em terra firme, onshore, quando não há massa de água superficial entre a torre e a fundação. Torres eólicas instaladas em alto mar ou a pouca distância da costa, são chamadas de offshore. Deve ser levado em consideração que os custos de instalação de torres no mar aumentam proporcionalmente quanto maior for a distância até a costa, assim como o custo de transmissão da energia elétrica também cresce.

2.6.2.1 Potência Instalada

O rotor e as três pás da torre eólica extraem energia cinética do vento, ocorrendo diminuição da velocidade do vento, devido ao princípio de conservação de massa. A turbina eólica não é capaz de extrair toda a energia dos ventos, caso isso ocorresse, a velocidade de saída seria zero. Existe um limite físico para extração da potência do vento. O Limite de Betz determina que 59,3% é o valor máximo que uma turbina pode capturar da energia cinética do vento. Além desse fator limitante, o gerador também apresenta taxa de rendimento. Portanto, pode-se concluir que apenas uma parcela da energia cinética do vento é convertida em eletricidade (SANTOS, 2011).

Figura 9 – Exemplo de curva de potência (Aerogerador Alstom Eco-122).



Fonte: Alstom Eco-122 (Wind Matching, 2011).

O aerogerador não opera com a mesma potência em todas as velocidades de incidência do vento. Para ser verificada a potência real entregue, deve-se associar a curva de potência do aparelho com a

distribuição do vento. Os fabricantes de aerogeradores especificam a potência de cada uma de suas máquinas, fornecendo a potência nominal, ou seja, a máxima potência que o equipamento pode extrair.

A soma das potências nominais dos geradores de um parque, ou complexo eólico, é chamada de potência instalada. Para determinar a eletricidade gerada basta multiplicar a potência instalada pelo fator de capacidade. Portanto, além da quantidade de geradores, a potência gerada varia em função da incidência de ventos na região, altura das torres e a eficiência dos motores geradores. Como há bastante oscilação na produção de eletricidade nos parques eólicos, a energia eólica ainda é tratada como fonte de energia complementar.

2.6.2.2 Locação das Torres

A investigação dos quadrantes e velocidade do vento são importantes para a escolha do local de implantação do empreendimento de energia eólica. De modo a verificar as variações de velocidade, deve-se avaliar a incidência dos ventos por um período superior a doze meses. Dessa forma, obtém-se a oscilação sazonal.

Figura 10 – Parque eólico de Osório com torres locadas em linha.



Fonte: Elaboração própria (2013).

Normalmente, a conformação usual das torres nos parques eólicos se dá em fileiras, baseado nos estudos da posição mais favorável de incidência dos ventos. Além de obter um maior fator de capacidade, essa disposição facilita a construção de vias de acesso e a organização da obra.

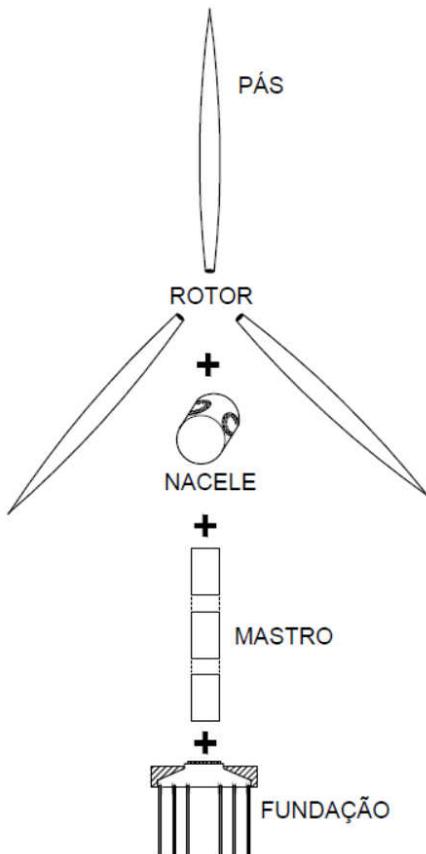
Ultimamente, leis ambientais podem determinar a ordenação das torres não mais em linha reta, e sim dispersas pelo terreno. O argumento pode ser relacionado ao impacto causado à fauna da região. Como por

exemplo, a interferência na migração de pássaros, quando estes se deparam com essas grandiosas estruturas, uma ao lado da outra.

2.6.3 Estrutura Básica de uma Torre Eólica

A turbina eólica, ou aerogerador, é uma máquina utilizada para a geração de eletricidade a partir da energia eólica. Essas torres são compostas, basicamente, por gerador, três pás acopladas, mastro e fundação. Para o perfeito funcionamento dessa estrutura, diversas áreas do conhecimento são necessárias: engenharia mecânica, elétrica, controle e automação, civil, além de meteorologia.

Figura 11 – Estrutura básica de um aerogerador.



Fonte: Elaboração própria (2013).

As três pás são equipamentos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia em trabalho mecânico de rotação do rotor, ao qual estão acopladas. Por sua vez, o rotor gira o eixo, transferindo a energia de rotação para o gerador. Com princípios do magnetismo, o gerador produz eletricidade (a potência do gerador depende da sua eficiência). Posteriormente, essa eletricidade será transmitida através de cabos que descem ao longo do mastro da torre eólica até o solo. Por meio de tubos subterrâneos esses cabos são levados até uma subestação elevadora de tensão. A partir de então, a eletricidade será encaminhada para o sistema elétrico.

Nacele é a carcaça montada sobre a torre, onde são abrigados os componentes do gerador e da caixa de acoplamento. Um anemômetro, medidor da velocidade e sentido do vento, está localizado sobre a nacele. Este indica para qual direção o rotor deve estar de modo a receber a maior incidência de vento. A unidade de controle eletrônico é responsável por alinhar a turbina com o vento, além de monitorar todo o sistema gerador e desliga-lo em caso de falha. Por tanto, caso haja algum acidente ou sobrecarga do sistema, os freios serão responsáveis por deter a rotação do eixo (BURTON et al., 2001).

A torre é uma estrutura que eleva a turbina até uma altura adequada para a incidência do vento, de modo que as pás possam girar a uma distância segura do solo. É responsável por sustentar a nacele e o rotor, com suas três pás. Pode ser constituída de longos segmentos metálicos ou de elementos de concreto pré-moldado. No caso de segmentos de concreto, estes são denominados de dovelas, as quais são produzidas, geralmente, em trechos de cinco a seis metros. Por exemplo, em uma torre de 120 metros de altura, seriam necessárias em média 22 dovelas. A torre ainda pode ser construída por treliças metálicas.

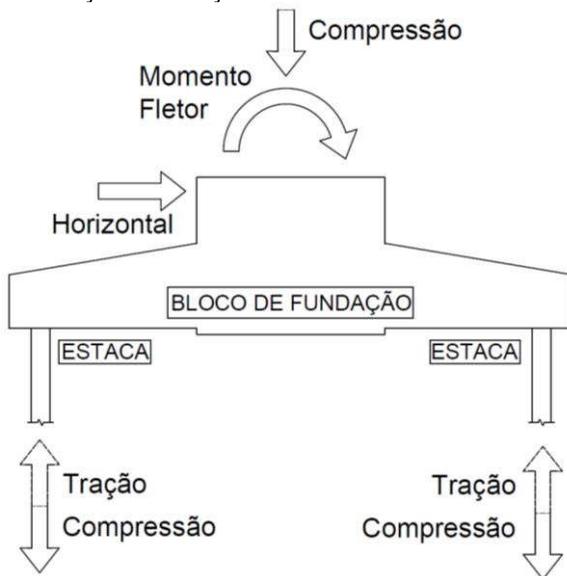
A fundação é responsável por transferir as cargas atuantes em toda a estrutura da torre às estacas e ao solo. Uma característica específica das fundações profundas de torres eólicas, com uso de estacas, é que estas são alocadas ao longo de uma circunferência. Normalmente apresentando alta densidade de estaca por metro quadrado de superfície. De certa forma, há alguma semelhança com a fundação de silos.

2.6.4 Esforços na Torre Eólica

As principais cargas que atuam na estrutura são o peso próprio dos seus elementos (pás, gerador e mastro), o vento e as ondas (no caso de torres eólicas offshore). O peso próprio gera esforços de compressão,

os quais atuam permanentemente. O vento e as ondas são cargas cíclicas, portanto oscilam em magnitude e direção. Essas duas cargas variáveis podem provocar momento fletor, tração e torção, tanto no mastro, quanto na fundação. A composição de cargas deve considerar, portanto, esses três fatores. Outras cargas de menor intensidade, que atuam em um curto período de tempo, são devidas à própria execução e montagem da torre, ou por conta da manutenção.

Figura 12 – Esforços na fundação.



Fonte: Elaboração própria (2013).

Quando o vento incide nas pás, fazendo com que essas girem, o sistema gerador retém parte da energia cinética da massa de ar. Portanto, logo atrás das pás, o vento tem sua velocidade reduzida. Dessa forma, desenvolve-se uma diferença de pressão entre o lado frontal e o posterior da torre. Desenvolve-se, portanto, momento fletor ao longo de todo o mastro até a sua fundação.

O carregamento do vento se torna a principal carga atuante na estrutura. Sua verificação é de extrema importância, por se tratar de uma carga cíclica sem comportamento linear, a qual provoca a fadiga dos materiais. A verificação quanto à fadiga, na maioria das vezes, determinará o dimensionamento do mastro e da fundação. Os estados limites últimos de utilização (ELU) e serviço (ELS), com verificação de

deformações e fissurações, devem ser devidamente considerados no cálculo. Porém, o estado limite de fadiga (ELF) será determinante, solicitando uma estrutura ainda mais robusta.

No caso das torres eólicas, o recalque diferencial não pode existir, ou deve ser mínimo, uma vez que afeta o funcionamento do aerogerador. Visto que a velocidade do vento se altera em diferentes alturas, o giro das pás poderá ser afetado e o gerador pode ter sua eficiência reduzida.

Grande parte dos aerogeradores é capaz de girar em torno do eixo de sua torre, de modo a buscar a direção mais favorável para a incidência do vento. Essa rotação é lenta, por conta da grande massa da estrutura da turbina e das pás. Apesar dessa possibilidade de giro para obter maior eficiência na geração de eletricidade, há um grande viés para a fundação. As estacas que recebiam determinado carregamento na posição anterior da torre, agora podem apresentar carregamentos e esforços completamente diferentes. Portanto todos os elementos da fundação devem ser dimensionados para resistir igualmente a todos esses esforços, principalmente compressão e tração.

As principais verificações a serem realizadas em uma torre eólica são quanto ao tombamento, deslizamento, ruptura do solo, descompressão do solo em serviço, deslocamento diferencial e resistência do concreto na interface com a coroa de ancoragem. As principais variantes na elaboração de um projeto de fundação de torres eólicas são: poropressão, atrito lateral, resistência de ponta, resistência do solo ao cisalhamento, consolidação do solo, resultados da sondagem à percussão, solo coesivo ou não coesivo.

2.6.4.1 Influência do Número de Pás

A utilização de turbinas com três pás e eixo vertical, apresenta-se vantajosa em diversos aspectos. Este modelo representa o conceito mais moderno e eficiente para torres eólicas, além disso tende a se tornar padrão, contra outros conceitos existentes (DNV; RISO, 2002).

Comparando o conceito da turbina de três pás com as turbinas de uma ou duas pás, estas possuem vantagem econômica, devido ao seu menor peso e custo. No entanto, o uso de menor quantidade de pás, implica em precisar alcançar uma maior velocidade de rotação para gerar uma mesma quantidade de energia que uma turbina de três hélices do mesmo tamanho. Caso as pás estejam em posição vertical, ou horizontal, acrescidas da variação da velocidade do vento, o uso dessas turbinas ainda resultará em mais cargas flutuantes e cíclicas, por conta

da variação da inércia. Modelos de turbina com diversas pás mostraram-se ineficientes ao longo do tempo, uma vez que o peso próprio é maior em relação a apenas três pás, contudo com menor geração de energia.

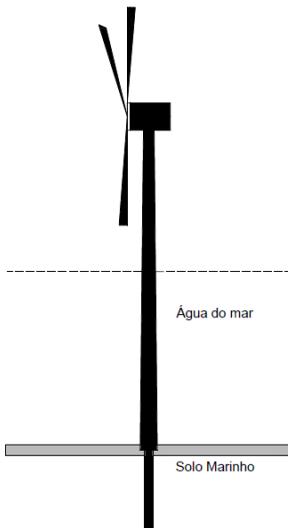
Qualquer opção que se fizer pelo número de pás, a componente da força normal não irá oscilar. Apenas o peso próprio referente a quantidade de pás mudará. Somente irão oscilar as grandezas do momento e da força cortante.

2.7 FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS

2.7.1 Fundação de Torres Eólicas Offshore

No caso de torres eólicas instaladas offshore (em alto mar ou a pouca distância da costa), de acordo com manual da DNV/Riso (2002), a fundação possui uma estrutura bem detalhada. Uma vez que essa deve apresentar uma estrutura capaz de transferir as cargas da turbina eólica, através da água, para o solo resistente. Além das cargas provenientes do peso dos elementos da torre, essa estrutura de fundação irá experimentar cargas resultantes de um ambiente marinho, como ondas e gelo. Algumas opções usuais para fundações de torres offshore são: estaca única, base de gravidade ou tripé.

Figura 13 – Estaca única (Monopile).

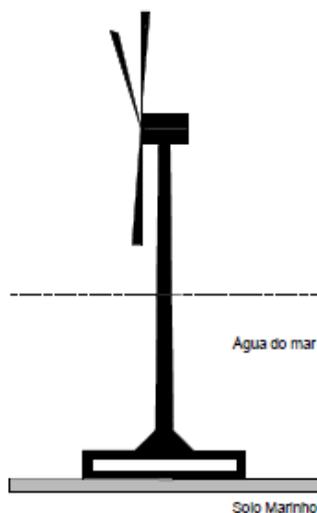


Fonte: Elaboração própria (2013).

Estaca única (Monopile): Consiste em um longo tubo vertical, cravado ou perfurado no solo abaixo do mar como qualquer outra estaca, em cima do qual a torre eólica é montada. Normalmente a cravação é realizada com martelo hidráulico, porém se as condições do solo forem ruins, este pode ser assistido por um trado ou broca.

Base de gravidade (Gravity base): Esta fundação se apoia sobre a superfície do solo marinho, ou se encontra enterrada dentro de uma escavação também em solo marinho. Sua estrutura é suportada pelo próprio peso e é construída geralmente com concreto armado, podendo também ser constituída de aço. No entanto, no caso de aço, é necessário preencher os espaços vazios do perfil com rocha, a fim de obter o peso necessário. Ambas as bases, em concreto ou aço, devem possuir um grande diâmetro.

Figura 14 – Base de gravidade (Gravity Base).



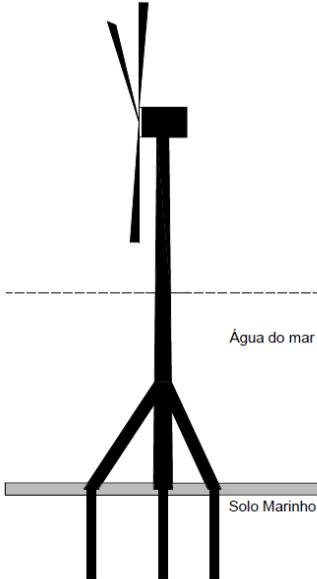
Fonte: Elaboração própria (2013).

Tripé (Tripod): Trata-se de uma estrutura de aço leve (steel frame) com três pernas. A torre eólica é montada no topo dessas três pernas, em seu ponto de intersecção.

Estes três conceitos de fundação diferem-se em relação ao modo de transferência de cargas para o solo resistente. Tanto a estrutura de estaca única, quanto a tripé, transferem vertical e axialmente os esforços

para a interface fundação-solo; enquanto a fundação de base de gravidade transfere ao longo de sua base verticalmente.

Figura 15 – Tripé (Tripod).



Fonte: Elaboração própria (2013).

2.7.2 Fundação de Torres Eólicas Onshore

De acordo com DNV/Riso (2002), os tipos de estrutura de fundação para torres instaladas onshore são: fundação profunda com uso de estacas ou fundação rasa, através de sapata.

Geralmente o fator determinante para a escolha da modalidade de fundação é o solo. Investigações realizadas no solo devem providenciar todos os dados necessários para detalhar o projeto da estrutura da fundação em um local específico. As investigações do solo podem ser divididas nas seguintes partes: Estudos geológicos, análises geofísicas e investigações geotécnicas.

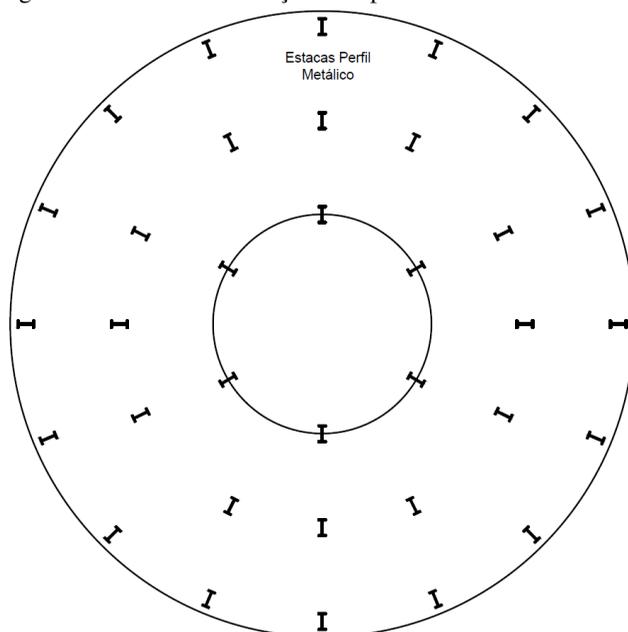
Quando a camada de solo próxima à superfície apresenta baixa resistência, tem-se a necessidade de transmitir as cargas para camadas mais profundas do solo, portanto opta-se pela fundação profunda com uso de estacas. Quando a camada de solo próxima à superfície é resistente o suficiente, normalmente é preferível a utilização de

fundação em sapata. Além disso, deve-se ter em mente a profundidade em que se encontra o nível d'água. No sul do Brasil as fundações apresentam soluções, geralmente, em fundações profundas. Enquanto no nordeste do País, soluções em fundações rasas são empregadas.

A maioria dos projetos de fundações de torres eólicas empregados no Brasil são desenvolvidos por empresas estrangeiras. Portanto, outras normas como o EUROCODE e DIN (Alemanha) são empregadas na elaboração dos projetos, algumas vezes apresentando grandes diferenças em relação à ABNT. Alguns projetos de fundações de aerogeradores, baseados em obras realizadas no sul do Brasil, serão apresentados a seguir.

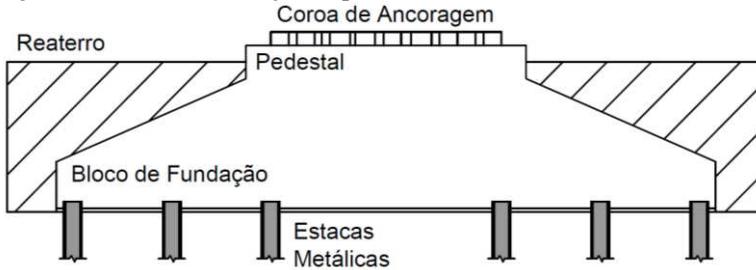
Uma solução baseada nas fundações do Complexo Eólico de Atlântica (RS) é ilustrada na figura a seguir. As estacas de perfil metálico são dispostas em torno de três circunferências, ao todo são 34 estacas.

Figura 16 – Planta de fundação com perfis metálicos.



Fonte: Elaboração própria (2013), baseado no projeto do Complexo Eólico de Atlântica (RS).

Figura 17 – Corte de fundação de perfis metálicos.



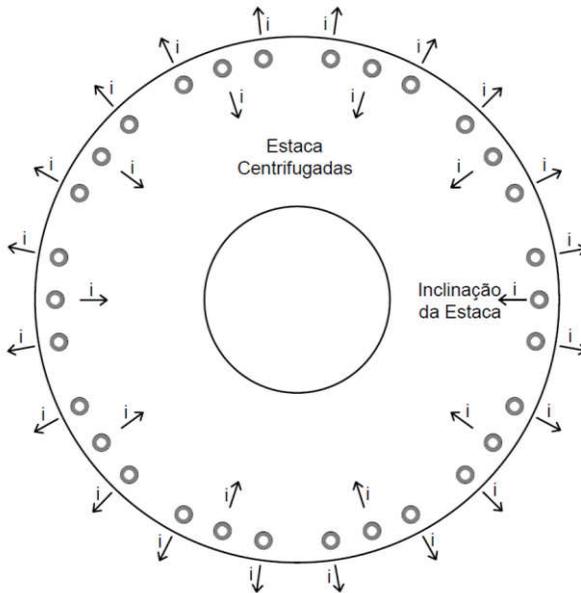
Fonte: Elaboração própria (2013), baseado no projeto do Complexo Eólico de Atlântica (RS).

O corte da estrutura de fundação mostra os elementos que a compõe. Um bloco de fundação, ou coroamento, é executado sobre as estacas. Este bloco é realizado em concreto armado e deixa esperas para a construção do pedestal. O pedestal por sua vez, envolve a coroa de ancoragem, à qual serão engastados os segmentos do mastro. Reaterro deve ser executado sobre o bloco de fundação.

A NBR 6122 (2010) recomenda que ensaios de carregamento dinâmico, ou nega descansada, sejam realizados pelo menos sete dias após a cravação, de forma a confirmar as profundidades das estacas. Esse período irá garantir a mobilização de grande parte da resistência da estaca, no caso de solo cicatrizante. No entanto, se for notada redução da resistência, é possível que o solo apresente características de relaxação.

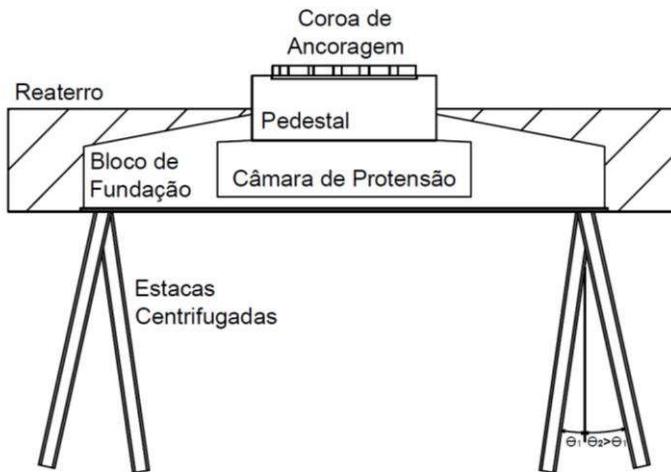
Outra solução de fundação de aerogeradores, dessa vez baseada no projeto do Complexo Eólico de Palmares do Sul (RS), prevê 30 estacas de concreto pré-moldado centrifugado. Todas elas são locadas em uma circunferência, agrupadas de três em três estacas. A estaca do meio desse grupo tem inclinação direcionada ao centro, enquanto as outras duas tem inclinação para fora. Essa inclinação tem por objetivo absorver os esforços de tração e momentos da estrutura.

Figura 18 – Planta de fundação de aerogerador.



Fonte: Elaboração própria (2013), baseado no projeto do Complexo Eólico de Palmares do Sul (RS).

Figura 19 – Corte de fundação de aerogerador.



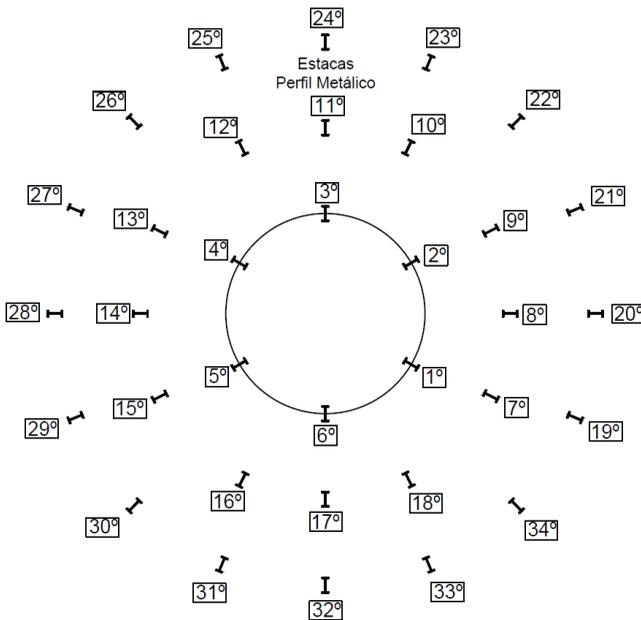
Fonte: Elaboração própria (2013), baseado no projeto do Complexo Eólico de Palmares do Sul (RS).

2.7.2.1 Sequência de Cravação

As estacas seguem uma recomendação quanto ao espaçamento mínimo entre elas: 2,5 vezes o seu diâmetro no caso de estacas pré-moldadas; 3,0 vezes o seu diâmetro no caso de moldadas “in loco”. Sendo que em ambos os casos o valor não deve ser inferior a 60 cm. Outro fator a ser considerado é a distância mínima entre as faces da estaca e a extremidade do bloco (HACHICH, et al., 1998).

No caso de estacas dispostas em circunferências de dimensões diferentes, a sequência de cravação deverá iniciar pelas estacas internas. Essa determinação prevê a melhor movimentação e utilização de equipamentos e máquinas, além de aspectos de densificação do solo ao redor das estacas.

Figura 20 – Sequência sugerida de cravação dos perfis metálicos.



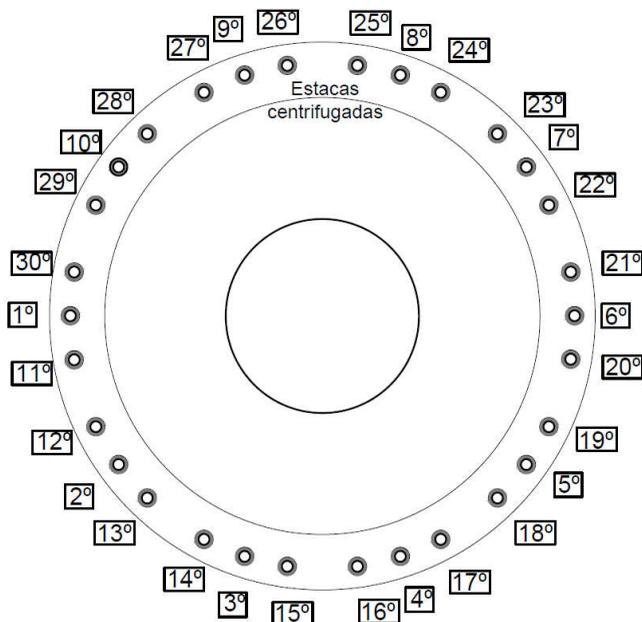
Fonte: Elaboração própria (2013), baseado no projeto do Complexo Eólico de Atlântica (RS).

Esta é uma recomendação para a sequência de cravação das estacas, podendo haver diversas outras soluções. Nesse caso, prevê-se que todas as estacas centrifugadas com inclinação para dentro sejam

cravadas primeiramente. Dessa forma, a máquina bate-estaca não precisa alterar sua inclinação a todo o momento, reduzindo possibilidade de equívocos. Após essas dez estacas serem cravadas, aquelas com inclinação para fora podem ser também cravadas. A cravação pode ter auxílio de jato d'água para facilitar a execução.

As primeiras estacas que serão cravadas em cada bloco são de extrema importância. A cravação das primeiras estacas poderá confirmar o comprimento útil mínimo das estacas do respectivo bloco. Portanto, de forma prática, nas três primeiras estacas executadas de cada bloco o ensaio PDA pode ser realizado, confirmando o comprimento calculado em projeto e medir a resistência mobilizada na execução. Além disso, esses testes PDA já caracterizam as provas de carga necessárias, exigidas pela norma NBR 6122 (2010). As profundidades atingidas e as respectivas negas dessas três primeiras estacas servirão de referência para as demais estacas do bloco. Contudo, esta sugestão apresenta um grande custo envolvido.

Figura 21 – Sequência sugerida de cravação de estacas centrifugadas.



Fonte: Elaboração própria (2013), baseado no projeto do Complexo Eólico de Palmares do Sul (RS).

A distância entre uma estaca cravada e a outra deve respeitar o distanciamento mínimo previsto em norma. No entanto, estacas inclinadas encontram-se em planos diferentes, portanto o solo ao redor densificado por uma das estacas cravadas na direção do centro não afetará uma estaca ao seu lado, porém cravada na direção externa, uma vez que encontram-se em planos diferentes.

Na escolha da sequência de cravação, recomenda-se alternar o lado cravado. Caso contrário, o solo ficaria muito compactado nessa região, o que pode afetar o comportamento ao redor da estaca. Em algumas situações a própria resistência de projeto pode ser afetada.

Após a cravação de todas as estacas, é de extrema importância a elaboração da prancha “Como Construído”, ou As Built em inglês. Dessa forma fica registrado o comprimento real cravado, quando durante a execução a nega não é atingida com o comprimento de projeto. Esse documento permite um maior controle da fundação e fornece parâmetros para o projetista caso algo precise ser alterado.

Quanto ao aspecto executivo da cravação das estacas, o martelo (de queda, hidráulico ou à diesel) deve possuir peso e altura de queda adequados. O choque do martelo deve ser centrado e a cabeça da estaca protegida por capacete com cepo de madeira interno. Toda vez que for percebida a degradação do cepo, este deve ser substituído. O peso mínimo do martelo deve ser de seis toneladas. Além do comprimento útil mínimo de cada estaca estimado em projeto, deve haver pelo menos um metro de complemento de estaca para o arrasamento.

2.7.2.2 Bloco de Fundação

Blocos de fundação, ou coroamento, são estruturas de considerável volume, que distribuem as cargas dos pilares, ou de uma única torre, aos elementos de fundação profunda. O dimensionamento dos blocos se assemelha aos das sapatas, com a diferença de que os blocos recebem cargas concentradas por conta da reação das estacas.

Os blocos podem ser classificados em rígidos ou flexíveis. Em situações que as estacas estão dispostas próximas umas das outras sob o bloco de fundação, este terá uma menor dimensão em planta e poderá ser considerado rígido; caso contrário, será denominado flexível. Essa distinção irá determinar o comportamento estrutural e o dimensionamento do bloco. Considerando a disposição das estacas em um bloco de um aerogerador, estas são localizadas ao redor de uma circunferência. Na maioria dos casos, não existem estacas sob a região central do bloco, tornando-o flexível nesse ponto.

A armação do bloco de fundação não deve ser realizada diretamente no solo. Uma camada de concreto de regularização, em torno de 10 cm de espessura, deve ser produzida na cota de arrasamento das estacas. As esperas das estacas são conectadas à armadura do bloco, de forma a consolidar as duas estruturas. A concretagem é realizada, com o auxílio de fôrmas.

Uma planilha de controle dos serviços de cravação deve conter todos os dados e informações de cada estaca e bloco de fundação. Dados como a locação, inclinação, comprimento real cravado, emendas realizadas, nega obtida, cota de arrasamento, data de execução e eventuais excentricidades devem ser anotados nessa planilha. Esta planilha pode gerar um documento chamado de “as Built”, registrando o comprimento real das estacas e recalques sofridos após a obra. Durante a execução da fundação, se forem necessárias alterações no projeto ou processo construtivo, o engenheiro projetista deve ser informado e sua autorização deve ser obtida.

O reaterro sobre o bloco de fundação deve assumir valor de peso específico determinado pelo projeto, no entanto esse fator não contribui na resistência do bloco de fundação. Uma vez que são as estacas e a base armada que resistem aos esforços solicitantes. A armadura do bloco de fundação e do pedestal apresentam barras de aço com determinadas dobras em sua armadura, com o intuito de resistir a esforços de flexão, tração e esforços horizontais.

2.7.2.3 Conexões entre os Elementos da Fundação

As torres são frequentemente acopladas aos seus alicerces através de parafusos. Contudo, outras técnicas de conexão começam a ganhar espaço, a exemplo da solda. Nesse caso, um segmento inferior da torre deve ser concretado junto a fundação, de modo que os seguimentos superiores seguintes sejam soldados juntos ao inferior. Para executar essas soldas com eficácia e segurança, a torre deve estar equipada com braçadeiras e guias especiais para manter as duas seções da torre em alinhamento. Outros equipamentos ainda são necessários para realizar esse processo de solda: andaimes ou similares, equipamento de soldagem e de raio-X. Esse último com a finalidade de inspecionar as soldagens costura (CE-EÓLICA, 2013).

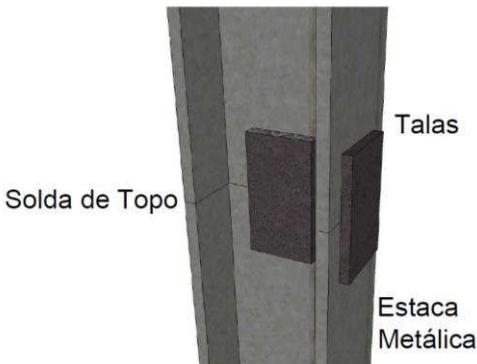
Quanto a emendas e soldas em estacas, a NBR 6122 (2010) determina que é permitida no máximo uma emenda de encaixe (luva) por ponto de cravação. Se mais de uma emenda precisar ser realizada para atingir a cota (profundidade) de projeto, todas as emendas devem

ser em solda (solda é mais cara que luva). Para ser realizada a solda, a estaca precisa apresentar um anel metálico, já concretado junto de sua cabeça durante a produção. Se existe esforço de tração significativo que irá atuar na fundação, a estaca não poderá utilizar a emenda por encaixe (luva). Portanto em estacas de torres eólicas, luvas não poderão ser utilizadas. Todos os elementos de estaca unidos por emenda ou solda devem ser verificados quanto à sua linearidade, garantindo a transferência das solicitações as quais a fundação está submetida.

Após a cravação do primeiro elemento de estaca de um ponto, a sequência de cravação dos elementos de estaca seguintes deve prever que não será permitida emenda nos seis metros imediatamente abaixo da base do bloco. De acordo com a NBR 6122 (2010), em segmentos de elementos de estacas que sobraram da cravação e foram arrasados, caso possuam comprimento mínimo de dois metros, estes possivelmente possam ser utilizados. Além disso, devem obedecer às seguintes determinações: a ortogonalidade da seção cortada deve ser assegurada; apenas um segmento de sobra seja utilizado por ponto de estaca e a sobra seja o primeiro elemento a ser cravado nesse ponto.

No caso de utilização de estacas com perfil metálico, quando for feita a emenda entre os elementos, esta deve ser através de solda. Além da solda de topo, recomenda-se a utilização de talas metálicas que unem as duas pontas. Essas talas também são devidamente soldadas.

Figura 22 – Emenda de estaca metálica.



Fonte: Elaboração própria (2013).

De acordo com a NBR 6122 (2010), no caso de solução de fundação envolvendo estacas metálicas, atenção especial deve ser direcionada à ligação da estaca com o bloco de coroamento. Soldas

unindo chapas ou vergalhões à estaca podem ser previstas no projeto estrutural, com o intuito de assegurar um aumento de aderência e a efetiva transferência dos esforços de compressão, horizontais, de tração e momentos do bloco para a estaca.

Em situações adversas, na qual uma estaca de um bloco não pode ser aproveitada, o bloco poderá ser reformulado. Contudo, este deve atender às seguintes condições: o espaçamento mínimo entre estacas aproveitadas deve ser mantido; procurar manter o centro de gravidade do bloco, ou então verificar a carga atuante na estaca mais carregada; não devem existir diâmetros diferentes de estacas; o espaçamento entre uma estaca não aproveitada e a nova estaca deve ser superior a 1,5 vezes o diâmetro destas e maior que 30 cm. Outra solução consiste na reformulação dos blocos de fundação.

Modelagem numérica utilizando a técnica de elementos finitos pode ser utilizada para estimar as solicitações na fundação. Pode-se inserir em softwares específicos as propriedades de diferentes materiais, como as camadas de solo, aço e concreto, aproximando o modelo do caso real. Existem softwares 3D, contudo o 2D já é suficiente para suprir as necessidades de projeto.

3 MÉTODO

Elaboração de um estudo de caso da construção de um complexo eólico. Pretende-se descrever o processo executivo, com foco nas fundações dos aerogeradores.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO ESTUDO

O sul do Brasil, em especial o estado do Rio Grande do Sul, já possui diversos empreendimentos de geração de energia através de aerogeradores, e muitos outros ainda estão sendo desenvolvidos. Esse estado se caracteriza por apresentar as menores temperaturas do Brasil. O seu litoral apresenta extensas faixas de areia de praia, sem muitos costões ou elevações próximas à costa. Isso possibilita a forte incidência de ventos nessa região, sem enfrentarem grandes obstáculos na sua passagem.

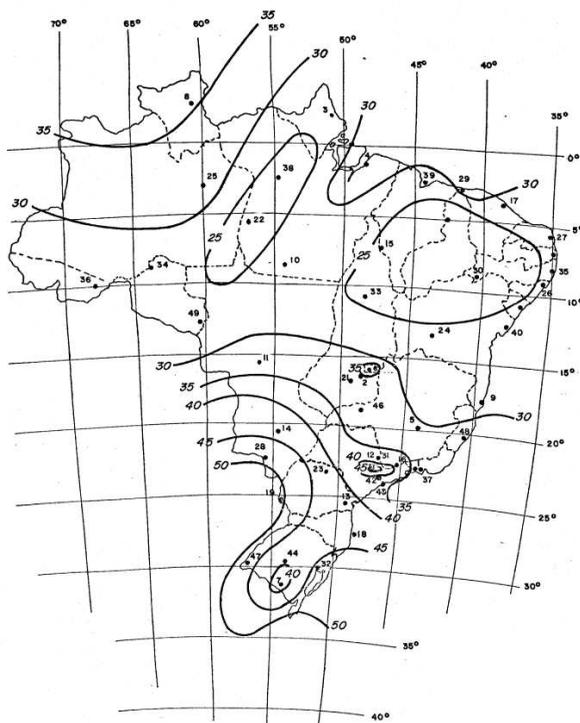
Figura 23 – Localização estado do Rio Grande do Sul, Brasil.



Fonte: Atlas Eólico Rio Grande do Sul (2002).

A velocidade básica dos ventos nessa região assume valores em torno de 40 a 50 m/s. Isso demonstra um potencial eólico relevante. O mapa da velocidade do vento no Brasil, apresentado pela NBR 6123 (1988), indica uma das maiores velocidades do vento exatamente nesse estado.

Figura 24 – Velocidade básica do vento no Brasil.



Fonte: ABNT NBR 6123/1988.

A maior parte dos complexos eólicos já instalados no Rio Grande do Sul, localizam-se próximos ao litoral. E outros em execução também aproveitam essa posição geográfica favorável para a incidência de ventos. O Complexo Eólico Corredor do Senandes está situado no município de Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul, a aproximadamente 40 km do centro da cidade e muito próximo à praia.

3.2 COLETA DE DADOS

Pesquisa a normas brasileiras e internacionais, bibliografia consagrada de geotecnia e artigos científicos relevantes foi realizada. Levantaram-se os principais efeitos e fenômenos atuantes em estacas e no solo da região, relevantes à solução de fundação adotada para as torres eólicas do parque em estudo.

Por meio de contato com a empresa executora das fundações de aerogeradores do empreendimento, visita técnica à obra foi realizada. Através de documentação com imagens, consulta a relatórios e acompanhamento do processo executivo de estacas e blocos de fundação, elaborou-se o presente estudo de caso.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 VIABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL

Após estudos de incidência e intensidade de ventos na região, sondagens preliminares e verificação de viabilidade econômica e técnica do empreendimento, a autorização ambiental pode ser solicitada. Encaminha-se a proposta dos parques eólicos em questão para aprovação ambiental. Os parques Senandes II, Senandes III, Senandes IV e Vento Aragano I foram aprovados perante os órgãos ambientais competentes, compondo a primeira fase do complexo eólico.

O empreendimento do Complexo Eólico do Corredor do Senandes é um investimento da Odebrecht Energia. O fornecimento de energia elétrica será dado por meio de 40 aerogeradores da empresa Alstom (grupo industrial francês que atua na área de infraestrutura de energia e transporte). O modelo dos aerogeradores é o ECO-122, produzido no Polo Industrial de Camaçari, na Bahia. Com seu rotor medindo 122 m, seu mastro composto por elementos cilíndricos metálicos e potência nominal de 2,7 MW. Cada torre mede aproximadamente 95 m de altura e cada pá possui mais de 60 m de comprimento. Além do fornecimento dos aerogeradores, a Alstom também será responsável pela montagem dos sistemas elétricos e subestações.

O investimento para execução do complexo eólico é de R\$ 400 milhões e a previsão para o início de geração é para o primeiro semestre de 2014 (ODEBRECHT ENERGIA, 2013). A potência instalada do complexo totaliza 108 MW, alcançando a média de 50,5 MW comercializada no Leilão de Reserva da ANEEL A-3 2011 (agosto de 2011).

Os projetos originais de cada parque previam a locação de suas torres em segmentos de linha reta, prática usual que facilita o acesso e organização de cada uma das torres. No entanto, devido a aspectos ambientais referentes à fauna local, as torres foram distribuídas ao longo do terreno. Essa escolha foi feita de modo a não prejudicar a migração de aves na região.

Após a aprovação ambiental, dá-se a elaboração e detalhamento dos projetos, contratação de empresas e funcionários para execução das obras e planejamento da logística de materiais e equipamentos. A empresa contratada para execução dos acessos e das fundações das torres é a Seta Engenharia. Durante a implantação do projeto, cerca de

mil empregos diretos e indiretos serão gerados (ODEBRECHT ENERGIA, 2013).

4.2 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

De acordo com o relatório de sondagem, foram disponibilizados dois equipamentos de sondagem à percussão e um caminhão para a execução de investigações geológicas. Os trabalhos tiveram duração de 27 dias. A realização das sondagens respeitou as normas usuais da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e a ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental). Portanto a metodologia atendeu às especificações das normas NBR 8036 e NBR 6484.

A investigação do subsolo do parque eólico foi realizada através de sondagens à percussão, com amostrador bipartido, diâmetro de 2,5 cm e orientação vertical. As profundidades de cada furo variaram entre 30 e 46 m. O perfil do solo da região, verificado através das amostras provenientes do ensaio, caracterizaram o solo com camadas de areia fina e argila siltosa.

4.3 PLANEJAMENTO DA OBRA

Recomenda-se que o canteiro de serviços esteja localizado no centro de gravidade das atividades da obra. Este pode ainda ser dividido em dois canteiros distintos, um central e outro auxiliar. O primeiro abrangendo edificações dos setores técnico, administrativo, almoxarifado, ambulatório, oficinas e alojamento. Por sua vez, o canteiro auxiliar abrangeria o apoio às instalações industriais, como pedreira, britagem, central de concreto e laboratório de controle tecnológico.

Recomenda-se que uma guarita seja construída em cada entrada do empreendimento, assim como na área da subestação elétrica de elevação de tensão. Além da guarita, portões podem ser instalados para bloquear a passagem de veículos não autorizados. Sugere-se que seja contratada mão de obra local, com o intuito de reduzir a quantidade de edificações no canteiro de obras, assim como desenvolver a região.

Equipamentos e máquinas são mobilizados até o local da construção do complexo eólico. Carretas especiais são necessárias, para o transporte de máquinas de esteiras e outras com grandes dimensões. Máquinas com pneus podem trafegar pelas estradas, desde que haja

autorização dos órgãos rodoviários competentes e sinalização adequada seja providenciada.

Uma equipe de topografia é de extrema importância para a construção das fundações dos aerogeradores. Esta será responsável pelas demarcações dos off-sets, locação de cada uma das torres e suas estacas, a partir de pontos de referência estabelecidos. Além disso, um laboratório de controle tecnológico é necessário para analisar concreto, aço, aterro e a qualidade dos materiais recebidos na obra.

4.4 TRABALHOS PRELIMINARES

Serviços que precisam ser realizados antes da construção de edificações e estruturas são chamados de trabalhos preliminares. Dentre eles, a terraplenagem, um dos principais serviços necessários. O desmatamento, destocamento e limpeza do terreno natural também devem ser realizados, de modo a eliminar camadas nocivas ao subleito. O serviço de limpeza ainda prevê a remoção de matacões e blocos de pedra que possam interferir na obra.

4.4.1 Terraplenagem

Nas laterais do aterro dos acessos, valetas trapezoidais são previstas. Todos os serviços são restritos aos limites dos off-sets dos acessos e pátios, acrescidos de uma faixa de operação mínima de 1 m para cada lado. O material escavado na limpeza do terreno pode ser usado para recuperação das caixas de empréstimo. Quando estas caixas estiverem preenchidas, o material poderá ser levado para a área de Bota-Fora, já prevista e aprovada pelo Plano Básico Ambiental. Em todos os serviços da obra, fiscalização qualificada deve acompanhá-los.

Procura-se manter greides próximos ao terreno natural na execução das estradas de acesso. Algumas características técnicas geométricas já foram definidas, como a largura da plataforma de 8 m, superlargura de 4 m, rampa máxima de 35 m e raio da curva de 35 m.

A região do empreendimento eólico é próxima ao litoral do Rio Grande do sul e o solo presente é abundante em areia. Portanto, o material retirado das escavações ao longo do eixo dos acessos e pátios podem ser utilizados para aterro, desde que livres de matéria orgânica. No entanto, a região é pobre em saibro, sendo necessário que fornecedores de regiões distantes sejam contatados.

O procedimento técnico envolvido na construção dos aterros envolve a descarga do material, seu espalhamento em camadas,

homogeneização, umedecimento, aeração e devida compactação. Camadas de material com espessura não superior a 30 cm foram lançadas em extensões que permitam o seu umedecimento e compactação. Nas três últimas camadas do aterro, a espessura máxima passa a ser 20 cm.

Os cortes e aterros foram executados com a utilização de diversos equipamentos: caminhões basculantes, tratores de lâmina, retroscavadeiras, niveladoras, rolos lisos, de pneus e pés-de-carneiro estáticos ou vibratórios.

4.4.2 Drenagem

O serviço de drenagem envolve três modalidades: drenagem de grotas, drenagem superficial e drenagem profunda. Em locais do terreno próximos às estradas e pátios, quando haviam canais, bueiros de concreto de tipo ponta e bolsa foram instalados, de modo a criar este caminho preferencial para as águas. Esses elementos de drenagem devem assegurar a estabilidade de taludes, além de dissipar a energia do escoamento.

As valetas, posicionadas nas laterais dos acessos, serão importantes para evitar a formação de alagados, tendo em vista que o terreno em questão é bastante plano. As águas pluviais são transportadas por essas valas até os bueiros.

No caso da construção do complexo eólico em questão, a drenagem profunda será necessária durante as obras de cada fundação das torres eólicas. Durante a execução destas, as águas subterrâneas não poderão atrapalhar o processo executivo.

4.4.3 Pavimentação

O pavimento construído terá a função de resistir aos esforços solicitantes da passagem de máquinas e caminhões durante a construção, estocagem de materiais, como as pás do aerogerador, e posteriormente por conta da manutenção dos aerogeradores. A estrutura deste pavimento é composta por subleito, sub-base, base e revestimento primário. O comprimento total dos acessos será em torno de 40,80 km.

4.4.4 Escavações

De acordo com Alonso (1999), o sistema de rebaixamento do nível freático que utiliza o sistema de ponteiros filtrantes (well-points)

consiste na disposição de tubos coletores ao longo da periferia da área que se deseja rebaixar. Estes tubos apresentam furos, nos quais são introduzidas luvas. Por sua vez, às luvas são conectadas ponteiros filtrantes, através de mangueiras. O sistema funciona da seguinte maneira: as ponteiros extraem água do solo, conduzindo-a através dos tubos coletores até uma bomba que gera uma câmara de vácuo, de onde será recalçada para longe do canteiro da obra. Quando as bombas estão em plena atividade, o nível de água subterrânea estará em profundidade mais baixa que anteriormente, e trabalhos de escavação se tornarão viáveis até essa cota.

Na execução das 40 fundações dos aerogeradores, em algumas escavações foi necessária apenas uma bomba de recalque para rebaixamento do nível freático. Porém, em outras escavações foram necessárias duas ou até três bombas. Escavação até a cota de projeto para execução das estacas. Uma rampa deve ser devidamente executada para o acesso das máquinas hélice contínua.

Figura 25 – Escavação da fundação de um aerogerador.



Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

4.5 FUNDAÇÕES

O tipo de fundação foi definido a partir do resultado das sondagens realizadas no local. Optou-se, portanto, pela solução de fundação profunda com estacas hélice contínua.

4.5.1 Execução das Estacas

Nessa obra, o projeto opta por estacas hélice contínua dispostas em uma circunferência. Ao todo são 24 estacas, cada uma delas com 60

cm de diâmetro e profundidade média de 12,50 m, espalhadas simetricamente a uma distância de 8 m do centro. A armadura da estaca, colocada posteriormente à escavação e concretagem, possui um comprimento de 10,20 m.

A execução das estacas hélice contínua segue um roteiro básico. Uma haste tubular envolta por um trado helicoidal perfura o terreno. Quando o equipamento atinge a profundidade especificada, o concreto desce por dentro da haste enquanto o trado retorna à superfície. O concreto utilizado para a execução dessas estacas deve ser $f_{ck} \geq 20$ MPa. Em seguida a armadura é inserida dentro do buraco preenchido com concreto, deixando 1 m da armadura exposta (espera).

Normalmente em obras de edificações, nas estacas escavadas hélice contínua, a armadura não possui grande comprimento. Em torno de 4 a 6 metros, uma vez que a grande parte dos esforços é de compressão. Essa armadura possui função quase exclusiva de proporcionar a conexão entre estaca e bloco de fundação, proporcionando engastamento. No entanto, como esforços de tração são previstos na estrutura de fundação da torre eólica, optou-se pela utilização de armadura com maior comprimento, nesse caso com 10,20 m.

Figura 26 – Execução de estaca hélice contínua.



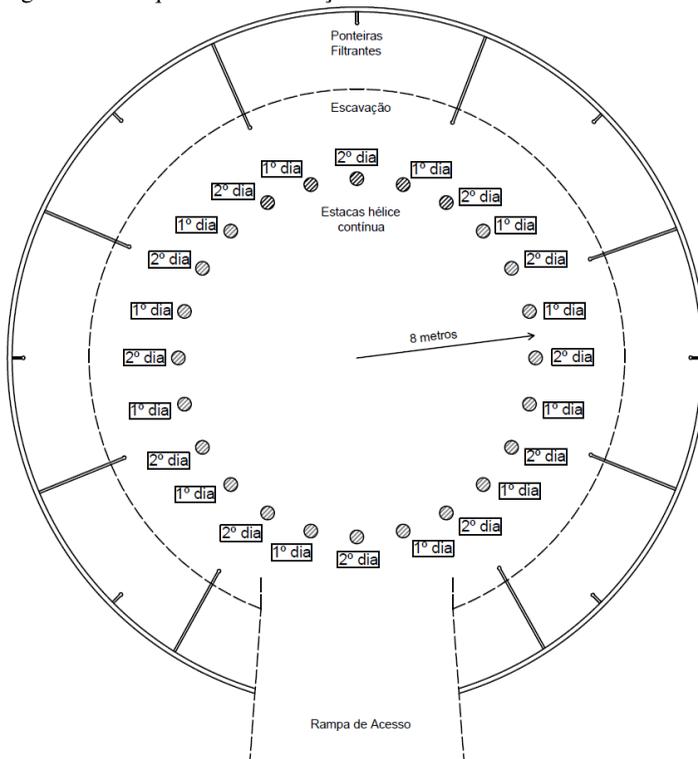
Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

4.5.2 Liberação das Fundações

Antes da execução de cada estaca, deve ser realizada uma verificação da locação e inclinação do trado das máquinas. De acordo com a NBR 6122 (2010), a sequência executiva de estacas hélice contínua deve seguir determinadas recomendações. Em um intervalo inferior a 12 horas, recomenda-se que não sejam executadas estacas com espaçamento menor que cinco vezes a dimensão transversal da estaca de maior diâmetro.

Portanto, doze estacas são executadas em um dia, com um distanciamento entre eixos superior a 4 m, no dia seguinte outras doze são executadas no espaço entre as anteriores. Outro fator a ser considerado é a distância mínima entre as faces da estaca e a extremidade do bloco.

Figura 27 – Sequência de execução das estacas hélice contínua.



Fonte: Elaboração própria (2013).

Deve-se verificar se as estacas atingem a capacidade de suporte necessária e especificada em projeto. Portanto, em duas estacas, de cada conjunto de 24, são realizados testes PDA. Caso estiverem de acordo com a resistência projetada, pode-se liberar para a próxima etapa, a execução do bloco de fundação.

4.5.3 Bloco de Fundação

Uma camada de 10 cm de concreto, chamada de concreto de regularização, deve ser realizada de modo a planificar a superfície em que será montada a armação do bloco. A armação do bloco de coroamento deve estar conectada a cada uma das estacas, com o intuito de transferir adequadamente os esforços da estrutura. As esperas de cada estaca devem ser amarradas à armadura superior do bloco.

Figura 28 – Montagem da armadura do bloco de fundação.



Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

Após posicionamento completo das fôrmas laterais e a montagem da armação, estas devem ser lavadas. Solo e outras impurezas podem estar aderidas ao aço, de modo a interferir na aderência deste com o concreto. Lembrando, no entanto, que logo antes da concretagem do bloco, desmoldante deve ser utilizado sobre a superfície interna das fôrmas.

Figura 29 – Ligação (Travamento) entre estaca e bloco de fundação armado.



Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

As esperas de cada estaca são amarradas à armação do bloco de fundação, de modo a consolidar a estrutura.

Figura 30 – Estribos de transferência nos blocos de fundação.



Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

Armaduras de cisalhamento (estribos) transferem esforços negativos e positivos entre a parte superior e inferior do bloco de fundação armado. Elementos de madeira posicionados sobre a armação garantem a espessura de concreto necessária ao cobrimento de 5 cm.

Figura 31 – Armadura e fôrmas preparadas para a concretagem.



Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

Na concretagem do bloco são lançados 315 m³ de concreto, volume necessário para preencher seus 18 metros de diâmetro. Cuidados devem ser tomados com a temperatura das reações de pega do concreto, de modo a evitar fissuras. Portanto, termômetros monitoram a concretagem durante as 16 horas de duração da concretagem, gelo é adicionado ao concreto e holofotes auxiliam a visibilidade durante os trabalhos noturnos. O cobrimento da armadura deve ser no mínimo de 5 cm. Com o término da concretagem, as fôrmas são retiradas. Porém o processo de cura do concreto continua com a vaporização de água sobre o bloco.

Figura 32 – Bloco de fundação.



Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

4.5.4 Execução do Pedestal

A coroa de ancoragem é posicionada entre as esperas da armadura do bloco de fundação. Posteriormente à esta coroa será engastado o mastro da torre eólica. A coroa de ancoragem deve estar no prumo, uma vez que qualquer inclinação seria crítica para o desempenho do gerador eólico.

Figura 33 – Reaterro sobre o bloco de fundação.



Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

Lembrando que o equipamento de rebaixamento do nível do lençol freático deve permanecer em funcionamento até essa etapa da obra, salvo o desligamento deste para a cura do concreto.

Figura 34 – Detalhe da coroa de ancoragem.



Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

Parafusos com regulagem de altura, ao longo da circunferência da coroa, são responsáveis por garantir o prumo. Além disso, a coroa de ancoragem deve ser travada com barras de aço que a atravessam, consolidadas com alguns pontos de solda.

Figura 35 – Colocação da coroa de ancoragem.



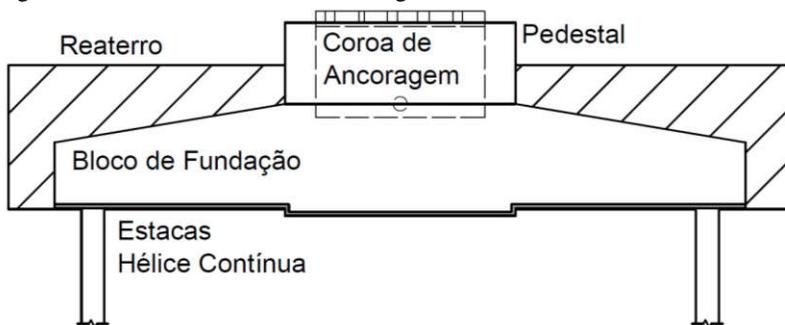
Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

Em algumas soluções de blocos de coroamento, a coroa de ancoragem está dentro do próprio bloco. Nesse caso, o elemento chamado de pedestal é dispensado.

Fôrmas são colocadas ao redor da armação do pedestal e então se dá uma nova concretagem. Dessa vez um volume em torno de 115 m³ de concreto será utilizado, seguida do processo de cura do concreto por vaporização. Por especificações ambientais, a água dos mananciais do terreno da obra não pode ser utilizada para a cura do concreto.

O reaterro do bloco de coroamento pode ser realizado antes ou após a execução do pedestal. No caso da obra do Complexo Eólico do Corredor do Senandes, optou-se pelo reaterro anterior à execução do pedestal. Isso facilitou a movimentação de equipamentos para a colocação da coroa de ancoragem e a concretagem do próprio pedestal.

Figura 36 – Detalhe da coroa de ancoragem.

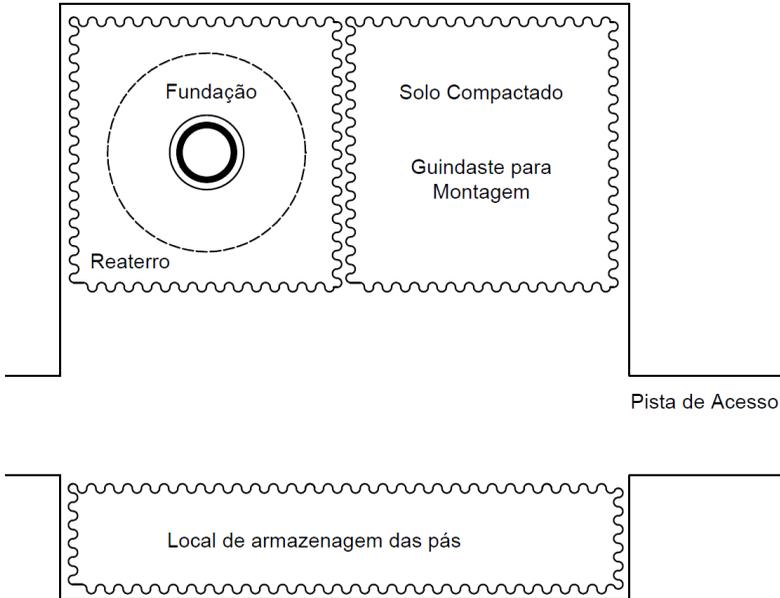


Fonte: Elaboração própria (2013).

4.6 MONTAGEM DA TORRE

Por fim, após o término da execução da fundação e aguardado o período de ganho de resistência do concreto, a montagem da torre pode ser iniciada.

Figura 37 – Arranjo usual do canteiro de um aerogerador.



Fonte: Elaboração própria (2013).

Enquanto essa etapa não se inicia, os segmentos do mastro e a nacele ficam armazenadas ao lado da fundação. Para tanto, o solo nessa área deve estar devidamente compactado para resistir o peso desses elementos.

Figura 38 – Fundação de aerogerador terminada.



Fonte: Elaboração própria (2013), obra do Complexo Eólico Corredor do Senandes.

As pás costumam ser transportadas por meio de caminhão com carga extensível. Cada caminhão carrega duas pás e dois carros

batedores são necessários por caminhão para auxiliar na sua movimentação e alertar sobre sua passagem a outros motoristas. As pás são também posicionadas ao lado da fundação do aerogerador, aguardando a sua instalação.

Figura 39 – Pás transportadas por caminhões extensíveis.



Fonte: Elaboração própria (2013), em Camaquã, RS.

O encaixe do mastro na base se dá através da seção transversal superior da coroa de ancoragem. Os parafusos são presos nos furos distribuídos ao longo da circunferência. A quantidade de furos e as dimensões dos parafusos devem ser calculadas de modo a garantir o engastamento das partes.

Figura 40 – Detalhe de encaixe do mastro à fundação do aerogerador.



Fonte: Elaboração própria (2013), Complexo Eólico do Bolaxa, em Rio Grande, RS.

Os segmentos do mastro são também parafusados uns nos outros, em alguns casos também com solda. As três pás são acopladas ao rotor e levantadas por meio do guindaste para encaixe na nacele.

Figura 41 – Içamento das pás.



Fonte: Saraiva Equipamentos, em Trairi, CE.

Por fim a turbina eólica se encontra pronta para executar seu papel de converter energia cinética em eletricidade. Deve-se apenas assegurar que cada turbina geradora esteja conectada através de cabos elétricos a uma estação de elevação de tensão. Esses cabos são conduzidos primeiramente por dentro da torre e pelo subsolo até uma estação elétrica. Estas podem ser individuais de pequeno porte e próximas a cada torre; ou pode existir uma grande estação elevadora que atende todas as torres do complexo eólico.

Figura 42 – Aerogeradores do Complexo Eólico do Bolaxa.



Fonte: Elaboração própria (2013), Complexo Eólico Bolaxa, em Rio Grande, RS.

A energia elétrica gerada nos quatro parques do Complexo Eólico Corredor do Senandes será transportada através de uma linha de transmissão de 48 km. A previsão de início de geração de energia é no primeiro semestre de 2014 (ODEBRECHT ENERGIA, 2013).

Após o término das obras, deve-se realizar a demolição das instalações provisórias e completa limpeza da área ocupada pelo canteiro. Todos os materiais deverão ser removidos do terreno. A topografia original deverá ser restaurada e o solo restaurado e corrigido, com posterior plantação de vegetação nativa.

5 CONCLUSÃO

Após pesquisa e visitas técnicas a obras de aerogeradores, percebe-se o impacto econômico positivo causado por esses empreendimentos. Trata-se de uma solução de geração de eletricidade sem a queima de combustíveis fósseis, inundação de áreas ou geração de lixo tóxico, portanto sem grande impacto ambiental.

Pelo fato das torres eólicas sofrerem ação de cargas dinâmicas cíclicas, o dimensionamento de suas fundações difere em certos aspectos das estruturas de edificações. Este trabalho demonstrou os principais esforços na estrutura e efeitos no solo e nos elementos de fundação que devem ser considerados.

Foram apresentados projetos usuais de fundações de aerogeradores que estão sendo utilizados no sul do Brasil. Essas soluções variam quanto às dimensões, materiais e arranjo de seus elementos, no entanto se assemelham pela disposição de estacas em circunferência sob um bloco de coroamento. Portanto, aspectos relacionados à fundações profundas também fizeram parte do referencial teórico do trabalho.

A sequência construtiva de uma torre foi apresentada detalhadamente através de um estudo de caso, que aborda através de imagens e especificações técnicas, as práticas que devem ser seguidas durante a construção.

Novos métodos e tecnologias ainda precisam ser desenvolvidas para o mercado brasileiro. Fabricantes como a WEG (empresa sediada no estado de Santa Catarina, especializada na fabricação de motores elétricos e geradores), já tomam parte nessa corrida.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, Urbano Rodriguez. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. 1.ed. São Paulo: Editora Lamara, 1999.
- ANEEL. **Energia Eólica**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica%283%29.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12131**: Prova de carga estática. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13208**: Estacas – Ensaio de carregamento dinâmico. Rio de Janeiro, 2007.
- BURTON, Tony. et al. **Wind Energy: Handbook**. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2001.
- CAMARGO, Odilon A. **Atlas eólico**: Rio Grande do Sul. Editado: Secretaria de Energia, Minas e Comunicações do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: SEMC, 2002.
- CE-EÓLICA (Rio Grande do Sul). PUCRS. **Perguntas Frequentes sobre Energia Eólica**. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=30#>>. Acesso em: 04 jul. 2013.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. **Fundações por estacas:** projeto geotécnico. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; ALBIERO, José Henrique. **Fundações diretas:** projeto geotécnico. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

D'AGUIAR, Arezou Modaressi; DOS SANTOS, Jaime Alberto; LOPEZ-CABALLERO, Fernando. **Piles under cyclic axial loading:** study of the friction fatigue and its importance in pile behavior. Canadá: Canadian Geotechnical Journal, 2011.

DAMAS, L. B. **Análise de geração e aplicação do método MCP em dois parques eólicos em operação no Brasil.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DAS, Braja M. **Fundamentos da engenharia geotécnica.** Trad. da 7. ed. Norte-americana. Tradução: EZ2 Translate. Revisão técnica: Leonardo Fagundes Rosemback Miranda. São Paulo: Cengage Learning, 2007.

DNV (DET NORSKE VERITAS); RISO (RISO NATIONAL LABORATORY). **Guidelines for Design of Wind Turbines.** 2. ed. Dinamarca: DNV, 2002. Disponível em: <http://ns7.freeheberg.com/~mach085/Guidelines_for_Design_of_Wind_Turbines.pdf>. Acesso em: 06 mai. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia.** Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/default.aspx?CategoriaID=345>>. Acesso em 14 set. 2013.

FARIA, Patrícia de Oliveira; NORONHA, Marcos Aurélio Marques. **Fundações de Torres Eólicas:** Estudo de Caso. Criciúma: Geosul, 2013.

PILE DYNAMICS, INC. (Estados Unidos). **Pile Driving Analyzer (PDA).** Disponível em: <<http://www.pile.com/pdi/products/pda/>>. Acesso em: 12 jun. 2013.

HACHICH, W. et al. **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

HOSSAIN, Akhter M.; ANDRUS, Ronald D.; CAMP, William M. III. **Correcting Liquefaction Resistance of Unsaturated Soil Using Wave Velocity**. Geotech. Geoenviron. Eng. Estados Unidos: American Society of Civil Engineers, 2013.

JIANKANG, Sheng; CHEN, Shuifu. **Fatigue Load Simulation for Foundation Design of Offshore Wind Turbines Due to Combined Wind and Wave Loading**. China: Nanjing, 1999.

KALDELLIS, John K.; ZAFIRAKIS, D. **The wind energy (r)evolution: A short review of a long history**. Labor of Soft Energy Applications & Environmental Protection. Grécia: Elsevier, 2011.

KOMURKA, Van E.; WAGNER, Alan B.; EDIL, Tuncer. **Estimating Soil/Pile Set-Up**. Wisconsin, Estados Unidos: Wisconsin Highway Research Program , 2003. Disponível em: <<http://wisdotresearch.wi.gov/whrp/geotechnics>>. Acesso em: 08 out. 2013.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das Fundações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

NG, Kam W. et al. **Pile Setup in Cohesive Soil I: Experimental Investigation**. Estados Unidos: Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 2013. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000751>>. Acesso em: 12 set. 2013.

NG, Kam W. et al. **Pile Setup in Cohesive Soil. II: Analytical Quantifications and Design Recommendations**. Estados Unidos: Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000751>>. Acesso em: 12 set. 2013.

ODEBRECHT ENERGIA. **Nossos investimentos**. Disponível em: <<http://www.odebrechtenergia.com.br/pt-br/nossos-investimentos/complexo-colico-corredor-do-senandes>>. Acesso em: 14 out. 2013.

ODEBRECHT. **Sala de imprensa.** Disponível em: <<http://www.odebrecht.com.br/sala-imprensa/noticias?id=17403>>. Acesso em: 09 out. 2013.

OXFORD DICTIONARIES (Reino Unido). **Fatigue.** Oxford University Press. Disponível em: <<http://oxforddictionaries.com/definition/english/fatigue>>. Acesso em: 06 jun. 2013.

SANTOS, P. A. A. **Análise de Investimento e Desempenho de um Pequeno Aerogerador Instalado em Zona Urbana.** Trabalho de Conclusão de Curso. Florianópolis: UFSC, 2011.

SARAIVA EQUIPAMENTOS. **Imagem Trairi, CE.** Disponível em: <http://www.saraivaequipamentos.com.br/visualizar_noticia.php?ipDinamico=noticias.mixtecnologia.com.br&diretorioTemplate=noticia&nomeTemplate=saraiva_noticia_visualizar_noticia.php&codigoNoticia=13772&conjuntoCodigoSecao=s260>. Acesso em: 14 set. 2013.

SCHNAID, Fernando; ODEBRECHT, Edgar. **Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações.** 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

THE GUARDIAN. **Timeline:** The history of Wind power. Disponível em: <<http://www.theguardian.com/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy>>. Acesso em: 17 out. 2013.

VOGT, Stefan. **Buckling of slender piles in soft soils.** Zentrum Geotechnik, Technische Universität München. Disponível em: <<http://www.ismicropiles.org/uploads/Proceedings/2006/Presentation%20-%20Vogt%20-%20Second%20Lizzi%20Scholarship%20-%20Buckling%20of%20Slender%20Piles.pdf>>. Acesso em 13 mai. 2013.

WAR HISTORY ONLINE. **IND MATCHING** Wind farms to lure back German lobsters decimated by WWII. Disponível em: <<http://www.warhistoryonline.com/war-articles/wind-farms-to-lure-back-german-lobsters-decimated-by-wwii.html>>. Acesso em 16 mai. 2013.

WIND MATCHING. **Alstom Eco-122**. Disponível em:
<<http://www.windmatching.com/turbine/328>>. Acesso em: 14 nov.
2013.

GLOSSÁRIO

Anchore cage: coroa de ancoragem.

As built: como construído.

Bearing capacity: capacidade de carga do solo.

Blade: pá eólica.

Bored Pile: estaca de concreto armado moldada in loco utilizada para suportar grandes cargas verticais.

Buckling: flambagem.

Clay: argila.

Crack-width: largura da fissura limite para o estado de serviço de uma estrutura.

Driven Pile: estaca cravada.

Fatigue: fadiga.

Fatigue-life: vida útil da estrutura em termos de fadiga.

Ground water level: nível de água do subsolo, nível freático.

Kentledge: peça maciça de metal utilizada como lastro em embarcações; Peças maciças de aço ou concreto colocadas sobre estacas para simular cargas de serviço e cargas limite.

Liquefaction: liquefação.

Load cases: composição de cargas.

Pile setup: cicatrização da estaca.

Pile tip: ponta da estaca.

Pore pressure: poropressão ou pressão neutra.

Quick sand: areia movediça.

Rammed Pile: estaca cravada.

Reinforced Concrete: concreto Armado.

Restrike: nega descansada, nega de recravação ou nega de recuperação.

Rocking: rigidez do conjunto.

Shaft Resistance: atrito lateral, resistência lateral.

Shear strength: resistência ao cisalhamento/atrito.

Shallow Foundation: fundação rasa.

Slender structure: estrutura esbelta.

Soil's overconsolidation ratio (OCR): taxa de consolidação do solo.

Spreading: dispersão, propagação.

Stiffness: rigidez.

Strain Transducers: transdutores de tensão.

Strength: força, resistência.

Suction Bucket: sistema de cravação de estacas com a expulsão de ar por sucção.

Tilt: tombamento.

Toe resistance: resistência de ponta.

Void ratio: índice de vazios.

Wind tower: mastro da torre eólica; ou torre eólica inteira (turbina, pás, mastro e fundação).