

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MAYRA SILVA DE MATTOS

**PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE
FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS CONTINENTAIS**

FLORIANÓPOLIS, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MAYRA SILVA DE MATTOS

**PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE
FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS CONTINENTAIS**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador:
Prof. Fernanda Simoni Schuch, Doutora

FLORIANÓPOLIS, 2024.

Mattos, Mayra de
PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE FUNDAÇÕES DE
TORRES EÓLICAS CONTINENTAIS / Mayra de Mattos ; orientador,
Fernanda Simoni Schuch, 2024.
94 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Graduação em Engenharia
civil, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Fundação de torre eólica. 3. Inspeção
civil. 4. O&M. 5. Aerogerador. I. Schuch, Fernanda Simoni. II.
Instituto Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
civil. III. Título.

PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS CONTINENTAIS

MAYRA DE MATTOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 30 de agosto, 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Fernanda Simoni Schuch, Doutora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Prof. André Puel, Doutor
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Prof. Fábio Krueger da Silva, Doutor
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Ana Luísa Ferreira, Engenheira Civil

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Marcelo, meu fiel escudeiro e parceiro da vida. Agradeço aos meus avós, Selço e Celina, por me incentivarem a estudar, por toda a minha a vida, e por me ensinarem que ser honesto e humilde abre portas. Agradeço ao meu pai e minha mãe, Celso e Vilma, pelo suporte e incentivo incondicional. Agradeço aos meus amigos, novos e antigos, por estarem sempre por perto. Agradeço à Professora Fernanda pela orientação e parceria durante o desenvolvimento desse trabalho. Agradeço ao IFSC, em especial aos professores do DACC, por terem me apresentado os caminhos da engenharia com muita seriedade e humanidade. Agradeço aos meus colegas de trabalho que me deram oportunidades valiosas de aprender e me desenvolver. Por fim, agradeço a natureza pela generosa dádiva da vida.

RESUMO

No contexto da geração de energia de baixo carbono, tem crescido o número de parques eólicos em operação no Brasil. Já no cenário europeu, os parques eólicos estão atingindo o fim de sua vida útil e tem sido debatidas maneiras de fazer uso da infraestrutura existente para continuar gerando energia, ou mesmo gerar uma potência maior por meio de máquinas mais modernas. Embora as realidades regionais sejam diferentes, a questão suscitada no que concerne a fundação das torres eólicas é a mesma: como inspecionar essas estruturas e monitorar seu comportamento de forma a garantir a sua segurança, a confiabilidade ao longo do tempo e a tomada de decisões com base em informações? As publicações sobre interações solo-estrutura, manifestações patológicas de fundações e outros temas relativos às fundações em geral é vasto na literatura brasileira. Contudo, verificou-se através da pesquisa bibliográfica, que quando se trata de fundações de aerogeradores, especificamente, há ainda espaço para exploração do assunto. Nesse sentido, este trabalho investiga de que forma as fundações *onshore* (continentais) de aerogeradores, que não foram previamente instrumentadas, podem ser inspecionadas e monitoradas durante sua operação e fornece um procedimento de inspeção visual da fundação e do pavimento de reaterro. Tal procedimento é complementado pela apresentação de métodos de monitoramento e ensaios não destrutivos para determinar a fadiga sofrida pela estrutura, o grau de fissuração e conseqüente deterioração da estrutura e os deslocamentos sofridos pela fundação. Com isso, espera-se que o debate técnico sobre essas soluções seja enriquecido, especialmente no que tange a estimativa da fadiga, fornecendo modelos validados que possam ser aplicados em campo.

Palavras-chave: Fundação de torre eólica. Inspeção civil. O&M. Aerogerador.

ABSTRACT

As part of energy transition from fossil fuel power generation to renewable power generation, the number of wind farms in operation has been growing over the years at global scale, Brazil included. In Europe, for instance, wind farms are already reaching the end of their lifetime and projects to evaluate on how to leverage the existing infrastructure lifetime to continue generating energy through retrofit, considering newer wind turbines with greater power generation, raises question around the wind tower foundation. Despite particularities from each site or region under evaluation, the question raised about the foundations of wind turbines is fundamentally similar: how would it be possible to inspect the installed structures and monitor their behavior in order to guarantee the safety and reliability of newly, often bigger, wind turbines over time to make an informed decision? Publications on soil-structure interactions, pathological manifestations and several general foundation-related studies are already available in the Brazilian literature. Nevertheless, as per the bibliographic research available in this work, when targeting wind turbine foundations, more specifically, there is still room to further explore and research this subject. In this sense, this work illustrates how to inspect and to monitor the wind turbines foundations, not previously instrumented, from onshore wind farms during their operation by providing a procedure for visual inspection of the foundation and backfill pavement. This procedure is complemented by the presentation of monitoring methods and non-destructive tests to determine the structure fatigue, its degree of cracking and consequent deterioration and finally foundation displacements.

Keywords: Wind turbine foundation. Civil inspection. O&M. Wind turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz energética brasileira por fonte de geração de energia – 2023.....	12
Figura 2. Principais partes de um aerogerador.	20
Figura 3. Arranjo usual do canteiro de um aerogerador.	23
Figura 4. Anel de aço de conexão da torre na fundação – obra em execução.	28
Figura 5. Anel de aço de conexão da torre na fundação - desenho.	29
Figura 6. <i>Anchor cage</i> - Vista geral dos parafusos protendidos em relação ao concreto.	29
Figura 7. <i>Anchor cage</i> – desenho em perspectiva da solução.	30
Figura 8. <i>Anchor cage</i> sendo executada em obra.	30
Figura 9 – Fundação direta simples.	31
Figura 10. Fundação direta ancorada.	32
Figura 11. Fundação profunda – perspectiva (a) e planta (b).....	32
Figura 12. Estacas de hélice contínua após execução (esquerda) e após arrasamento (direita).	33
Figura 13. Estacas cravadas inclinadas – exemplo de projeto (esquerda) e execução em campo (direita).	34
Figura 14. Fundação de torre eólica – cargas e ações.	36
Figura 15. Recalque em solos coesivos e não coesivos para fundações flexíveis (acima) e não flexíveis (abaixo).	44
Figura 16. Ensaio de cisalhamento direto – procedimento.	46
Figura 17. Ensaio de cisalhamento direto – resultado.	47
Figura 18. Ensaio de compressão triaxial – procedimento.	47
Figura 19. Ensaio de compressão triaxial – resultado.	48
Figura 20. Microestrutura do concreto.	50
Figura 21. Curva de Resistência de Von-Mises para materiais dúcteis (esquerda) e Curva de resistência de Coulomb-Mohr para materiais frágeis (direita).	51
Figura 22. Curva de resistência – material frágil sob ciclo de cargas.	51
Figura 23. Organograma das etapas da pesquisa.	52
Figura 24. Porção externa da fundação de um aerogerador – fissuras de abertura relevante.	60
Figura 25. Porção externa da fundação de um aerogerador – fissura radial de pequena abertura.	60
Figura 26. Porção externa da fundação de um aerogerador – fissuras no graute de alta resistência.	61
Figura 27. Porção externa da fundação de um aerogerador – fissuras no graute de alta resistência.	61

Figura 28. Porção externa da fundação de um aerogerador – desnível entre o graute e o concreto de primeiro estágio.	61
Figura 29. Porção externa da fundação – deslocamento.	62
Figura 30. Porção externa da fundação – deslocamento.	62
Figura 31. Porção externa da fundação – armadura exposta e corrosão.	63
Figura 32. Porção externa da fundação – armadura exposta e corrosão.	63
Figura 33. Porção interna da fundação – lixiviação.	63
Figura 34. Pavimento de reaterro – fissura radial.	65
Figura 35. Pavimento de reaterro – fissura perimetral.	65
Figura 36. Pavimento de reaterro – fissura perimetral.	65
Figura 37. Pavimento de reaterro – acúmulo de água.	65
Figura 38. Raio (R) entre a borda do pedestal e a projeção (tracejado) do limite de fundação na superfície.	67
Figura 39. Porção externa da fundação – parafusos de ancoragem com a sem capas.	71
Figura 40. Exemplo de configuração de monitoramento por <i>strain gauges</i>	75
Figura 41. Dano equivalente e momento fletor em função da velocidade do vento.	76
Figura 42. Instalação de lamínula de vidro para monitoramento da atividade ou passividade de fissuras.	77
Figura 43. Fissura monitorada e localização dos sensores FBG, conforme estudo de McAlorum <i>et al</i> (2018).	78
Figura 44. Fissura monitorada e localização dos sensores FBG, conforme estudo de Perry <i>et al</i> (2017).	79
Figura 45. Tomógrafo usado para a tomografia ultrassônica do concreto.	80
Figura 46. Auscultação geodésica com equipamentos topográficos de alta precisão em torres eólicas.	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Problemas típicos decorrentes de ausência de investigação do subsolo para os diferentes tipos de fundação.	39
Quadro 2. Síntese dos manuais, guias e normas para inspeção de estruturas de concreto.	56
Quadro 3. Exigências mínimas relativas à fissuração e à proteção da armadura em função da Classe de Agressividade Ambiental (CAA).	59
Quadro 4. Ficha de verificação – Planejamento.....	66
Quadro 5. Situação dos itens verificados na inspeção visual – legenda e descrição.....	69
Quadro 6. Magnitude dos itens verificados na inspeção visual – legenda e descrição.....	69
Quadro 7. Ficha de inspeção – Fundação.	70
Quadro 8. Ficha de inspeção – Pavimento de Reaterro.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANA	Agência Nacional de Águas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ELF	Estado Limite de Fadiga
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
END	Ensaio não destrutivo
EPC	Equipamento de Proteção Individual
EPI	Equipamento de Proteção Coletiva
FBG	Fiber bragg gratting
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
LVTD	Transdutor de deslocamento variável linear
OAE	Obras de Arte Especiais
O&M	Operação e Manutenção
RMT	Redes de Média Tensão
RN	Referência de Nível
SAS	Scotland Against Spin
SE	Subestação
SIN	Sistema Interligado Nacional
TU	Tomografia ultrassônica

SUMÁRIO

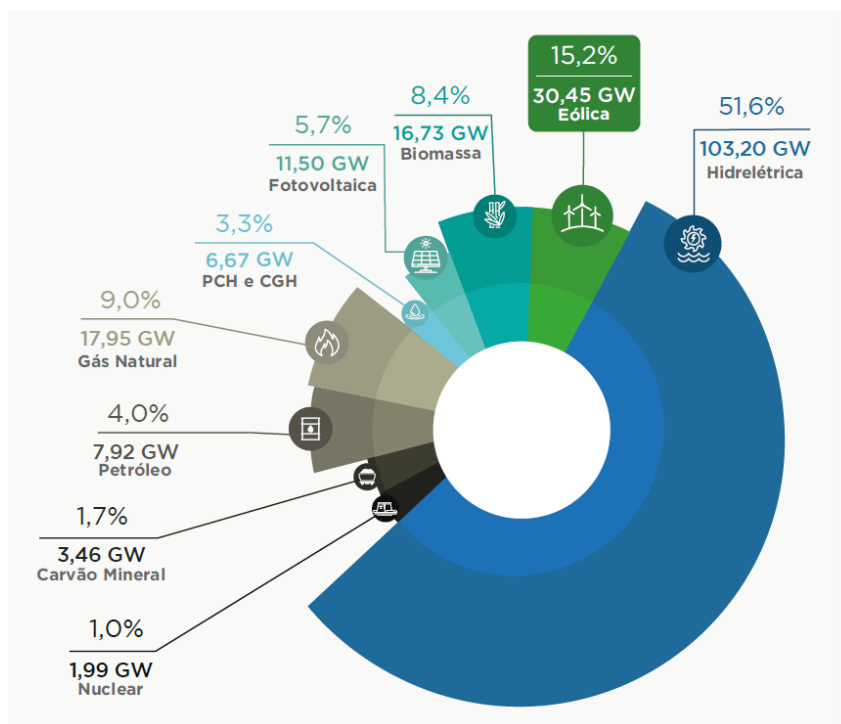
1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	12
1.1	Definição do Problema	14
1.2	Objetivo Geral	15
1.3	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Geração de energia eólica	16
2.1.1	Evolução da geração de energia eólica	16
2.1.2	Usinas eólicas e seus componentes	18
2.1.3	Inspeção de término de garantia, extensão da vida útil e repotenciação (<i>repowering</i>)	24
2.2	Fundações de aerogeradores	25
2.2.1	Conceitos básicos sobre fundações.....	25
2.2.2	Especificidades sobre fundações de aerogeradores.....	27
2.2.3	Comportamento em serviço	34
2.3	Patologias das fundações	38
2.3.1	Origens das patologias em fundações	38
2.3.2	Caracterização do subsolo.....	42
2.3.3	Efeitos da fadiga em estruturas de concreto armado.....	49
3	METODO	52
3.1	Limitações da pesquisa	53
4	RESULTADOS	55
4.1	Manuais, guias e normas existentes	55
4.2	Anomalias a observar em campo	58
4.2.1	Fissuras no concreto	59
4.2.2	Deslocamento do concreto.....	62
4.2.3	Armadura exposta e corrosão	62
4.2.4	Lixiviação	63
4.2.5	Fissuras, acúmulo de água e afundamento no pavimento de reaterro	64
4.3	Procedimento de Inspeção Visual	65
4.3.1	Planejamento	66
4.3.2	Execução da inspeção visual em campo	69
4.4	Monitoramento e ensaios não destrutivos	73
4.4.1	Fadiga	74
4.4.2	Abertura de Fissuras	77
4.4.3	Deslocamento vertical	80
4.5	Relatório de inspeção e avaliação dos resultados	81
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	APÊNDICES	91
	APÊNDICE A – Ficha de planejamento da inspeção visual	92
	APÊNDICE B – Fichas de execução da inspeção visual	93

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

No contexto da transição energética, a geração de energia eólica tem figurado papel cada vez mais relevante dentre as matrizes de energia renovável do Brasil. O boletim anual de 2023 da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) mostra que a capacidade instalada de energia eólica no país evoluiu de 2,5 GW em 2012 para 30,5 GW em 2023, ou seja, um crescimento de mais de 1.000% em uma década (ABEEÓLICA, 2023).

Segundo o mesmo boletim (ABEEÓLICA, 2023), no ano de 2023 a quantidade de energia eólica gerada foi equivalente ao suficiente para abastecer as residências das regiões sul e sudeste por um mês, o que representaria um total de 141 milhões de habitantes no período. Ainda de acordo com o boletim, a energia eólica forneceu no ano de 2023 em média 15,2% de toda a energia injetada no Sistema Interligado Nacional (SIN). O gráfico a seguir (Figura 1) ilustra a distribuição da geração de energia por fonte na matriz energética brasileira em 2023.

Figura 1. Matriz energética brasileira por fonte de geração de energia – 2023.



Fonte: ABEEÓLICA, 2023, p.4.

Analisando o gráfico acima é possível concluir que as energias renováveis representaram juntas, em 2023, mais de 80% de toda a energia gerada no Brasil.

Desse montante, a fatia correspondente a energia eólica é de aproximadamente um sexto, ficando em segundo lugar atrás da energia hidrelétrica que é a principal fonte geradora.

Em um cenário de diversificação de matrizes de geração de energia e do crescimento cada vez mais expressivo da energia eólica, como já mencionado, é iminente a necessidade de evoluir os processos de operação e manutenção dos parques eólicos nas diversas áreas da engenharia. Especificamente na Engenharia Civil é sabido, conforme reiterado por Mitre (2005), que a ação dos agentes ambientais juntamente com a decorrência do tempo de serviço são causas do aceleração do envelhecimento e do surgimento de manifestações patológicas nas estruturas. Sendo assim, para a continuidade dos níveis de desempenho e de funcionalidade esperados, toda estrutura deve receber inspeções periódicas assim como manutenção adequada.

De acordo com a organização SAS (2023), a falha estrutural é o terceiro acidente mais comum documentado para aerogeradores, atrás de falha das pás e dos incêndios. A falha estrutural ocorre, segundo esse levantamento, quando um componente importante da estrutura não resiste aos esforços para os quais foi projetada para resistir. A maior parte desses acidentes relaciona-se com tempestades e queda de torres, porém falta de manutenção e controles de qualidade pobres também estão associados (SAS, 2023). No Brasil, conforme exposto por Milititsky, Consoli e Schnaid (2005), não existem mecanismos de registro e acompanhamento sistemático de problemas em obras em geral, o que dificulta a avaliação estatística das ocorrências de manifestações patológicas tanto em obras de pequeno como de grande porte. Nesse sentido, apenas ocorrências catastróficas chegam ao conhecimento público, porém isso não basta para permitir uma avaliação da real extensão dos problemas e de suas causas raiz.

Considerando que as fundações são elementos de infraestrutura que ficam enterrados sob solo, a verificação do seu estado de conservação implica em alguns desafios. Niyama, Aoki e Chamecki (1998) afirmam que a verificação de desempenho em fundações é mais difícil de ser executada do que em outras estruturas. Isso se dá devido à complexidade e heterogeneidade do solo, impossibilidade de visualizar as fundações após sua execução e incertezas referentes a ensaios de campo. Além disso, as fundações de aerogeradores apresentam algumas particularidades quando comparadas às fundações mais comuns, pois ao longo de sua vida útil sofrem

esforços de fadiga decorrentes do giro constante dos aerogeradores e da variação da carga de vento.

Dentre os inconvenientes causados pelo aparecimento de manifestações patológicas, o impacto do colapso da fundação de um ou mais aerogeradores, do ponto de vista do empreendedor, pode ocasionar a perda de geração de energia e queda de faturamento até que os problemas, que geralmente não são de fácil solução, sejam sanados. Além de evitar um colapso, a inspeção de fundações de aerogeradores pode ter outras motivações, dentre elas o aumento da vida útil (estimada em projeto para 20 anos), as inspeções de fim de garantia e a repotenciação. O atingimento do fim da vida útil é uma realidade tanto nos países europeus, pioneiros da geração de energia eólica, quanto no Brasil. Estima-se que até 2030, mais de 50 parques no Brasil alcançarão 20 anos de operação, o que representa cerca de 600 aerogeradores (EPE, 2021). Já na Europa esse número é mais expressivo, onde estimou-se em 2020 em 34.000 o número de aerogeradores com 15 anos ou mais de operação (WIND EUROPE, 2020).

Nesse sentido, este trabalho tem como foco investigar maneiras de verificar a segurança e desempenho de fundações de aerogeradores em fase de Operação & Manutenção (O&M), isto é, de fundações já construídas e em operação que no momento da construção não foram munidas de instrumentação para tais finalidades. Por fim, cabe destacar que esta pesquisa pretende promover uma abordagem técnica, ficando a questão econômica fora do escopo, embora saiba-se que a aplicação de soluções na engenharia dependa de uma avaliação técnico-econômica.

1.1 Definição do Problema

A compreensão da causa das principais manifestações patológicas em fundações é tema presente na literatura especializada. Como monitorar e controlar essas manifestações ao longo da vida útil de fundações de torres eólicas, contudo, é tema ainda pouco sistematizado na literatura brasileira, pois essas estruturas apresentam características de construção e uso bastante específicas. Nesse contexto, cabe avançar na revisão bibliográfica e na identificação de procedimentos de inspeção e monitoramento de fundações de aerogeradores, conforme sintetizado nos objetivos a seguir.

1.2 Objetivo Geral

Elaborar um procedimento para inspeção e monitoramento em fundações de aerogeradores de parques eólicos continentais (também chamados de *onshore*, na terminação da língua inglesa).

1.3 Objetivos Específicos

1. Identificar e descrever os tipos de fundação empregados para torres eólicas continentais;
2. Compreender e descrever o comportamento dessas estruturas frente às solicitações em serviço;
3. Levantar e explicar quais são as verificações de desempenho necessárias para fundações e como podem ser aplicadas em fundações de torres eólicas;
4. Explorar de que forma as manifestações patológicas e o comportamento da estrutura podem ser monitoradas no contexto da Operação e Manutenção (O&M) em parques eólicos;
5. Elaborar um procedimento para planejamento e execução de inspeções em fundações de aerogeradores em fase de operação e indicar formas de monitoramento do comportamento dessas estruturas após construídas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado o referencial teórico necessário para desenvolver a pesquisa proposta. Ele está dividido em três partes. Na primeira parte é abordada a evolução da geração de energia eólica, as fases do ciclo de vida de um parque eólico e os principais componentes das usinas continentais. Além disso, são apresentados eventos no ciclo de vida de um aerogerador que podem incitar inspeções, como o término da garantia, a extensão da vida útil e a repotenciação.

Na segunda parte é apresentada uma breve revisão sobre conceitos básicos em fundações e seguindo com as especificidades sobre as fundações de aerogeradores: o que as diferencia das demais fundações, seus componentes e exemplos de soluções comuns empregadas em parques continentais. Por fim, são expostos aspectos do dimensionamento e comportamento em serviço.

Por fim, na terceira parte, discorre-se sobre a questão das patologias em fundações em cada etapa do seu ciclo de vida, contemplando desde a caracterização do solo, a concepção do projeto, a execução em campo, eventos pós construtivos, até a degradação dos materiais. Duas dessas categorias, caracterização do solo e degradação dos materiais, terão enfoque nesse capítulo. Destaca-se a o solo devido ao grande grau de incerteza que sua caracterização pressupõe. A degradação dos materiais, por sua vez, é destacada em função da fadiga sofrida pelos materiais da fundação de aerogeradores ao longo de sua vida útil.

2.1 Geração de energia eólica

2.1.1 Evolução da geração de energia eólica

A energia eólica advém da movimentação das massas de ar, dinâmica própria da atmosfera terrestre, que é produzida pelo aquecimento do ar gerando movimentação de massas e convecção, bem como pelo movimento de rotação da Terra. O emprego da energia proveniente dos ventos vem sendo utilizado há aproximadamente 3 mil anos, desde quando moinhos de vento serviam para transformar a energia do vento em energia mecânica, conforme relatado no trabalho de Burton (2001).

No final do século XVIII, de acordo com Reis (2011) havia mais de 20 mil moinhos de vento em funcionamento na Europa, em países como Holanda, Alemanha, Inglaterra e Dinamarca, que eram a força motriz para moagem de grãos, bombeamento de água, entre outras aplicações predominantemente rurais. Dentre as razões para o declínio dos moinhos de vento como geradores de energia mecânica, é possível destacar o uso das máquinas a vapor na Revolução Industrial (REIS, 2011) e, décadas mais tarde, o fato de os combustíveis fósseis se tornarem mais baratos e acessíveis (BURTON, 2001).

Porém, como exposto por Burton (2001), a geração de energia pela matriz do combustível fóssil entrou em declínio com a crise de petróleo da década de 1970, período no qual o governo dos Estados Unidos financiou um número substancial de programas governamentais de pesquisa e desenvolvimento de turbinas eólicas. Embora, de acordo com Reis (2011), as primeiras pesquisas para geração de eletricidade a partir dos ventos já tinham sido iniciadas no século XIX. Retomando o uso desse recurso natural que havia caído em desuso anteriormente, além do alto preço do petróleo, outro estímulo para o desenvolvimento da energia eólica foi a preocupação crescente com a limitação das fontes combustíveis fósseis, recurso finito, o que hoje dá lugar para um movimento consolidado de geração de energia de baixa emissão de carbono.

Para a geração de energia, um conjunto de aerogeradores é chamado de parque eólico, conjunto eólico ou usina eólica. Na estruturação desses parques de geração de energia, os sistemas de geração podem ser classificados quanto ao tipo, conforme explicitado por Reis (2011) e sintetizado a seguir:

- Sistema independente ou isolado: são sistemas em geral de pequeno porte (até 80 kW) que contam com armazenamento, para uso posterior;
- Sistema de apoio (híbrido): tem como objetivo reduzir o consumo de energia de outra fonte que atue como fonte de energia firme, como geradores a combustível, operando em paralelo;
- Sistema interligado à rede elétrica: sistema de grande porte interligado a rede de distribuição de energia.

Quanto às turbinas, há a subdivisão das turbinas entre aplicação para parques continentais (*onshore*) e marinhos (*offshore*). Em geral, as turbinas *offshore* são de maior porte e tem seu custo de instalação mais elevado devido à infraestrutura e

necessidade de equipamentos mais robustos para resistir às adversidades do ambiente marinho (REIS, 2011).

2.1.2 Usinas eólicas e seus componentes

Uma usina de geração de energia eólica, ou um parque eólico, é um conjunto de aerogeradores posicionados em local geográfico favorável ao aproveitamento do vento. Segundo Meireles (2015), a vida útil de um parque eólico é composta pelas seguintes fases: prospecção, projeto, licenciamento, financiamento, construção, O&M, repotenciação – quando possível – e descomissionamento.

Na fase de prospecção, conforme destacado por Meireles (2015), a presença de vento em abundância é fator chave para a escolha do local de implantação, onde a velocidade média do vento deve ser superior a 6 m/s (MEIRELES, 2015). Na conversão para energia elétrica, a potência do vento é função da área de captação e da velocidade das pás (REIS, 2011). Meireles (2015) destaca que, na escolha do local de implantação de um parque eólico, é preciso levar em conta os impactos ambientais para que não haja interferência pelo ruído gerado pelo giro das pás em aglomerados populacionais, assim com impactos na flora, fauna, parques naturais e sítios arqueológicos. A disponibilidade de infraestrutura rodoviária e de rede de energia são também fatores chave, uma vez que o acesso de guindastes e caminhões de grande porte, assim como o escoamento da energia produzida, devem ser necessariamente viáveis (MEIRELES, 2015).

Na fase de projeto, a coordenação entre diferentes disciplinas da engenharia é indispensável, pois na concepção de um parque eólico deve se considerar o melhor posicionamento das torres tanto para o desempenho de cada aerogerador como para a construção das plataformas de montagem e das fundações. Contudo, Militistky (2019) destaca que a decisão da localização dos aerogeradores nem sempre leva em conta aspectos de natureza geotécnica. Frequentemente ela tem como base a capacidade de geração e direção dos ventos, sendo, por vezes, selecionados locais com “materiais de baixa resistência, ou regiões de difícil acesso, dificultado desde a investigação do subsolo até a implantação das estruturas” (Militistky, 2019, p.3).

No licenciamento ambiental, as normas vigentes devem ser avaliadas e atendidas conforme a especificidade de cada lugar, visando obter as licenças necessárias em consonância com a preservação do meio ambiente. No Brasil, o licenciamento ambiental de usinas de geração de eletricidade acima de 10MW, independente da fonte, se dá nos termos da Resolução do Conama 001/86, a qual não será objeto de aprofundamento nesse trabalho. Com relação ao financiamento, também não caberá discorrer nesse trabalho.

Meireles (2015) sumariza que na fase de construção de um parque eólico são realizadas as seguintes atividades:

- I. Montagem do canteiro e sinalização da obra;
- II. Limpeza e decapagem da área de implantação;
- III. Melhoramento e/ou construção dos acessos ao parque;
- IV. Movimentação de terra para acesso aos pontos onde os aerogeradores serão instalados, assim como às áreas de montagem;
- V. Construção do sistema de drenagem de águas pluviais;
- VI. Abertura das valas para as fundações dos aerogeradores;
- VII. Abertura das valas para colocação dos cabos elétricos ou para instalação das torres de transmissão de energia;
- VIII. Construção do edifício de apoio e subestação elevadora;
- IX. Concretagem das fundações dos aerogeradores;
- X. Montagem das torres, nacelle e pás;
- XI. Comissionamento dos aerogeradores;
- XII. Trabalhos finais de recuperação da paisagem.

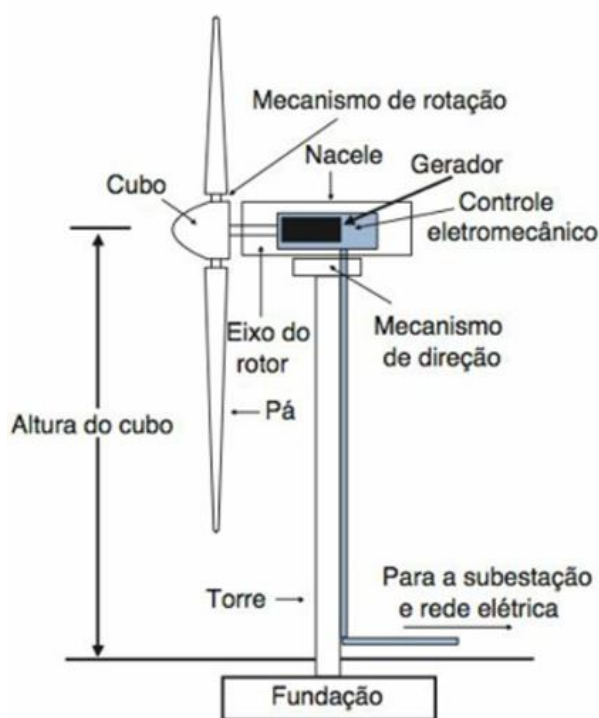
Em termos de estruturas civis, portanto, é possível identificar alguns componentes principais, que serão apresentados e descritos a seguir, resguardando, cada um, a sua finalidade.

a) Aerogeradores

As turbinas para geração de energia eólica são geralmente chamadas de sistemas de conversão de energia eólica ou de aerogeradores (REIS, 2011). Esses equipamentos são responsáveis por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica que, quando transmitida para o gerador, converte essa energia em elétrica. O tipo mais comum de turbinas conta com um eixo horizontal no topo de uma torre vertical, sendo que as pás devem estar posicionadas paralelamente à direção do vento (DNV/RISØ, 2002).

Todos os aerogeradores dispõem dos seguintes componentes básicos: rotor, nacele, gerador, torre e fundação (PINTO, 2013). O rotor é formado pelas pás e pelo cubo, compondo um conjunto que é fixado à nacele. Em geral, são empregadas três pás por aerogerador. A nacele, por sua vez, é a estrutura situada no topo da torre onde estão contidas as engrenagens, o gerador, e demais mecanismos de controle do equipamento. Por vezes, a subestação unitária do aerogerador está situada na nacele, a depender do modelo e do fabricante. A imagem a seguir ilustra esses componentes (Figura 2).

Figura 2. Principais partes de um aerogerador.



Fonte: Pinto (2013).

Rodrigues (2019) destaca que por serem máquinas de rotação, os aerogeradores estão submetidos à fadiga dos materiais, incluindo a torre e a fundação compostas por concreto e aço.

b) Torres

Torre é a estrutura de sustentação vertical do aerogerador e pode ser de dois tipos principais: tubular ou treliçada. As treliçadas foram amplamente usadas em pequenas turbinas e tem maior facilidade de transporte em função do tamanho das peças, como exposto por Pinto (2013). Porém, para torres maiores, o alto tempo de

montagem e maiores despesas de manutenção implicam em desvantagens desse modelo.

A torre tubular, por sua vez, pode ser de concreto ou de aço. Rodrigues (2019) apresenta que as torres tubulares de concreto são usadas preferencialmente em aerogeradores com mais de 80 m de altura. O autor complementa expondo que as torres tubulares de aço têm sido preferidas para a implementação de parques comerciais devido ao menor tempo de montagem em campo. Estas torres são fabricadas em seções de 20 a 30 m de comprimento, içadas em campo e unidas por parafusos nos flanges das suas extremidades.

c) Fundações

A fundação é o elemento de infraestrutura que sustenta a torre a posição vertical e transmite os esforços da torre para o solo. Maiores detalhes sobre as soluções usuais para essas estruturas podem ser encontrados no item 2.2.2 Especificidades sobre fundações de aerogeradores.

d) Subestação Unitária e Subestação Elevadora

Uma subestação (SE) consiste em um conjunto de equipamentos de manobra e transformação utilizados para encaminhar o fluxo de energia em um sistema de potência. Na energia eólica são empregadas as SEs unitárias e SEs elevadoras. As SEs unitárias servem para elevar a tensão gerada pelo aerogerador e alimentar a rede de média tensão (RMT) do parque eólico, podendo estar situadas na nacele ou mesmo fora da torre, no nível do solo, como mencionado anteriormente. A RMT conduz a energia gerada até a SE do parque chamada de SE Elevadora, essa de maior porte, onde uma segunda elevação da tensão é feita até o valor da transmissão para conduzi-la ao ponto de conexão com as linhas de transmissão (PINTO, 2013).

A estrutura civil de uma subestação de um parque eólico compreende um pátio plano revestido de brita ao longo do qual se distribuem os equipamentos elétricos, contendo sistema próprio de drenagem de água e captação de óleo dos

transformadores, além de um ou mais edifícios de apoio, com almoxarifado, sanitários, escritórios etc.

e) Rede de média tensão (RMT) e caixas de passagem

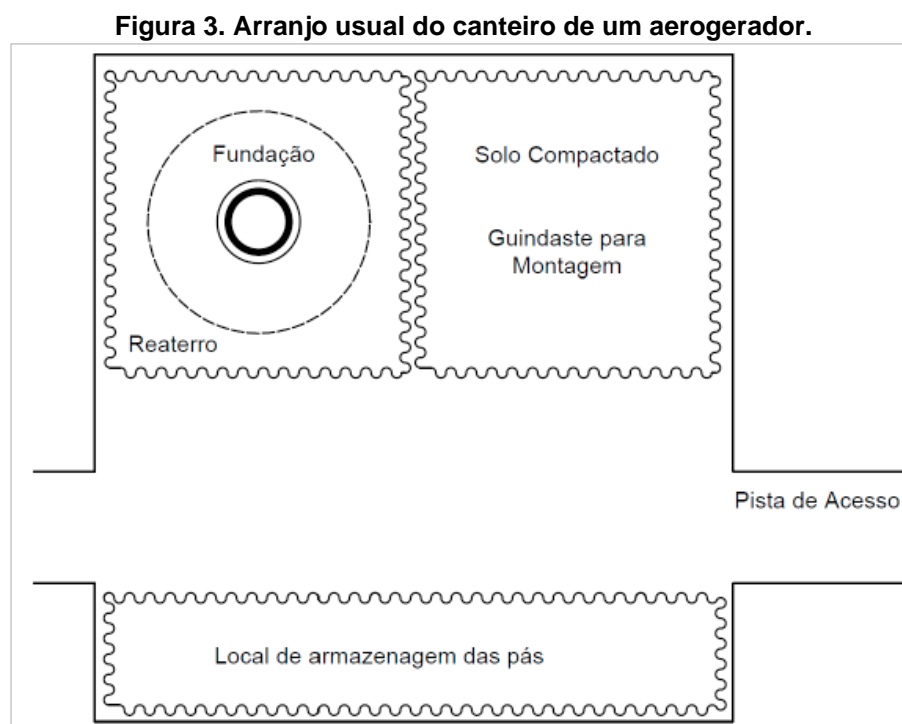
As RMTs são redes que transmitem entre 1 e 34,5 kV, conforme a classificação brasileira apresentada por Pinto (2013). A energia gerada pelos aerogeradores e elevada pela SE unitária se conecta a RMT até chegar à SE elevadora. A depender das características do parque, isso pode se dar com fiação subterrânea ou aérea. Em ambos os casos, é necessário instalar caixas de passagem de cabos próximo a conexões ou em pontos críticos do trajeto.

f) Sistema viário interno do parque, plataformas de montagem e reaterro

Com relação ao sistema viário interno do parque, também chamado de acesso ou acessos, Meireles (2015) destaca que a capacidade carga dos acessos estabelecidos durante a fase de construção de um parque eólico deve ser mantido a longo prazo. Durante o período relativamente curto da construção é frequente e intenso o trânsito de caminhões carregados de concreto, aço e componentes dos aerogeradores, além de guas de montagem. A autora segue informando que o perfil longitudinal e transversal dos acessos típicos desses parques, em pavimento granular, deve atender certas regras para o correto escoamento da água e a devida proteção do pavimento. Além disso, os raios mínimos de concordância vertical e de curvatura devem respeitar limites mínimos para permitirem o trânsito de veículos de grande porte (MEIRELES, 2015).

As plataformas de montagem são as áreas utilizadas durante o período construtivo para apoiar os equipamentos e máquinas necessários para a montagem do aerogerador e precisam ser elaboradas com dimensões suficientes para comportar a instalação dos equipamentos. Pinho (2008) apresenta que, embora as dimensões das plataformas variem muito, pois dependem do tipo de aerogerador, do tipo de grua a ser utilizado e do método de montagem, é possível ter como referência uma área com em torno de 50 m de comprimento e 30 m de largura. O arranjo usual de uma plataforma de montagem, ilustrado pela Figura 3, contempla uma área de solo

compactado que receberá os caminhões e guindastes, a área de escavação de implantação da fundação, a pista de acesso e uma área de armazenagem para locação provisórias das peças da torre e do aerogerador. A depender do arranjo do parque, as plataformas podem estar situadas tanto em regiões de corte como de aterro.



Fonte: Bertuzzi (2013).

O solo compactado, tanto para os acessos como para a plataforma de montagem e para o pavimento de reaterro, deve seguir as especificações normativas vigentes. O processo de compactação controlada visa aumentar a rigidez e a resistência do solo com a diminuição dos vazios entre suas partículas. Além disso, o processo reduz a permeabilidade e torna o maciço de solo mais homogêneo e resistente à erosão. Durante o processo em campo, ao controlar a energia de compactação e o teor de umidade do solo, é possível atingir a resistência definida em projeto. A norma ABNT NBR 7182:2016 determina a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo com procedimento realizado em laboratório. Já em campo é possível verificar essas condições com por meio de dois testes: a norma ABNT NBR 7185:2016, que especifica como obter a massa específica aparente do solo com emprego do frasco de areia, e a norma DNER-ME 052/94, que

estabelece o procedimento para determinação expedita do teor de umidade do solo, o chamado teste “Speedy”.

2.1.3 Inspeção de término de garantia, extensão da vida útil e repotenciação (*repowering*)

Cabe esclarecimento quanto a alguns dos momentos do ciclo de vida de um parque eólico que podem motivar a inspeção da fundação dos aerogeradores. Ao final de sua vida útil de projeto, de cerca de 20 anos, tem-se as seguintes opções (EPE, 2021): extensão da vida útil, repotenciação total ou parcial e descomissionamento. Esse é o tempo considerado nos cálculos, testes, modelagens numéricas e ensaios de resistência mecânica dos componentes, entre outros testes, embora as condições climáticas e de operação definam as condições reais dos equipamentos, podendo sua vida operacional ser maior ou menor que a vida útil de projeto (EPE, 2021). Pode ocorrer ainda, antes do prazo da vida útil de projeto, inspeções de término de garantia.

Obras de grande vulto contam, em geral, com período de garantia pós-obra dentro do qual as atividades de O&M são realizadas pela construtora ou pela fabricante dos equipamentos empregados. Ao final desse período, é usual a realização de inspeção de fim de garantia com o objetivo de identificar falhas em estágio precoce que ainda possam ser sanadas dentro dos termos da garantia fornecida. A extensão da vida útil e a repotenciação são consideradas formas de modernização dos parques. O estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) apresentou que na literatura não há consenso quanto às terminologias ligadas a modernização. Sendo assim, neste trabalho serão adotados os referenciais propostos pelo estudo mencionado.

A extensão da vida útil compreende realizar a troca de componentes eletromecânicos com objetivo de recuperar a performance de geração de energia de projeto e estender seu tempo de operação (EPE, 2021). Em 2016 a Norueguesa DNV-GL definiu parâmetros para a avaliação da extensão da vida útil de aerogeradores como parte de uma certificação oferecida pela organização. Nesse contexto, a DNV-GL (DNV-GL, 2021) destaca que a avaliação deve ter como foco problemas relacionados à fadiga dos materiais buscando danos nos elementos de transferência

de carga, de modo a evitar falhas futuras. No âmbito das estruturas civis, portanto, fazem parte do escopo da avaliação (DNV-GL, 2021): os segmentos da torre e suas conexões, os parafusos de ancoragem da fundação, a seção de aço embutida na estrutura de concreto da fundação, as conexões “grauteadas” com a fundação e o elemento de fundação em si, sejam fundações diretas ou profundas. Maiores detalhes sobre as estruturas de fundação podem ser vistos no item 2.2 Fundações de aerogeradores.

Para a repotenciação pode haver dois cenários, conforme descrito por EPE (2021): repotenciação parcial e total. Na parcial os componentes do aerogerador são aprimorados, considerando, por exemplo, o emprego de rotores de maior diâmetro e aumento da potência instalada, mas mantendo-se a torre e fundação. Já na repotenciação total todo o conjunto do aerogerador é substituído. Isso compreende desmontar toda a planta do parque e reimplantá-la no mesmo local sob nova configuração, envolvendo, assim, novas estruturas de fundação e novas torres levando o parque de volta ao estágio inicial de seu ciclo de vida. A principal diferença entre a repotenciação total e o descomissionamento é que no descomissionamento o parque é desmontado e o local não é mais utilizado para a finalidade de geração de energia eólica.

2.2 Fundações de aerogeradores

2.2.1 Conceitos básicos sobre fundações

a) Fundações diretas

As fundações diretas ou fundações rasas, como também são chamadas, são elementos de infraestrutura que, por definição, transferem os esforços solicitantes da estrutura diretamente para o solo sobre o qual se apoiam. As fundações diretas guardam uma proporção entre sua dimensão e a profundidade na qual se assenta conforme a equação (1), onde h é a profundidade de assentamento e B a menor dimensão do elemento (ABNT NBR 6122:2019).

$$h < 2B \quad (1)$$

As fundações diretas podem ser divididas entre blocos, sapatas e radier. Conforme a classificação de Teixeira e Godoy (1998), a definição de cada elemento é:

- I. Blocos são elementos de apoio construídos em concreto simples e com uma altura relativamente grande de modo que trabalhem exclusivamente a compressão. A forma geralmente é cônica ou de bloco escalonado.
- II. Sapatas de fundação são elementos de apoio em concreto armado e que resistem, principalmente, aos esforços de flexão. A forma mais frequente é a quadrada, podendo assumir também formato retangular ou corrida.
- III. Radier é definido como uma estrutura única que recebe as cargas da estrutura. É constituída de concreto armado e geralmente tem grandes proporções, requerendo grandes volumes de concreto.

O dimensionamento das fundações diretas, conforme apresentado por Teixeira e Godoy (1998), é feito com base em uma tensão admissível do solo de apoio, a ser estimada com base em critérios de segurança a ruptura e deslocamentos admissíveis (recalque).

b) Fundações profundas

As fundações profundas, conforme definido pela ABNT NBR 6122:2019, são elementos de infraestrutura que transmitem a carga ao solo através da resistência de sua base (resistência de ponta), ou do atrito lateral mobilizado ao longo da superfície do elemento (resistência lateral), ou mesmo pela combinação dessas duas resistências. A proporção entre a menor dimensão do elemento (B) e a profundidade de apoio (h) deve respeitar a equação (2) a seguir, sendo h necessariamente maior que 3 m.

$$h > 8B \quad (2)$$

As fundações profundas se dividem em dois grupos: estacas e tubulões. As estacas, por sua vez, conforme classificação de Décourt (1998) se dividem em estacas de deslocamento e estacas escavadas. O autor discorre que as estacas de deslocamento são aquelas que são colocadas no terreno sem que haja remoção do

solo, sendo introduzidas por perfuração ou cravação. No Brasil, os tipos mais característicos são as estacas pré-moldadas de concreto, estacas metálicas, estacas de madeira e estacas Franki. Já as estacas escavadas são executadas *in situ* perfurando-se o terreno e removendo o material do solo a ser preenchido com concreto. Dentro desse tipo encontram-se as estacas de hélice contínua e estacas do tipo Strauss, por exemplo.

Os tubulões são definidos pela ABNT NBR 6122:2019 como elementos de fundação profunda que na etapa final da escavação requerem trabalho manual em profundidade para realizar o alargamento da base ou limpeza de fundo. Albiero e Cintra (1998) expandem essa conceituação afirmando que os tubulões são fundações profundas com grandes diâmetros, com ou sem base alargada, que, a não ser pelo seu diâmetro, se distinguem pouco das estacas escavadas convencionais.

2.2.2 Especificidades sobre fundações de aerogeradores

Ao comparar as fundações de aerogeradores com outras estruturas similares (Milititsky, 2019), verifica-se que o nível elevado de carregamento, as necessidades especiais de desempenho devido aos esforços de fadiga e os locais onde são implantadas conferem a essas estruturas características específicas. Comparando com torres de telecomunicações e de linhas de transmissão elétrica, as fundações de aerogeradores apresentam as seguintes particularidades (MILITITSKY, 2019):

- Vida útil de 20 anos (175.000 horas de operação) com fadiga oriunda de cargas repetidas;
- Construção em locais onde não há experiências anteriores na solução de fundações;
- Cargas muito elevadas;
- Requisitos de rigidez importantes para o desempenho estrutural do bloco e da torre.

A ligação entre a torre e a fundação é o que garante que os esforços solicitantes da estrutura sejam adequadamente transferidos para a fundação e, conseqüentemente, para o solo. Rodrigues (2019) expõe que as duas formas mais comuns de realizar essa conexão em aerogeradores são através de um anel de aço ou de uma *anchor cage*, isso é, uma “gaiola” de parafusos longos protendidos.

O anel de aço (Figura 4) é uma aplicação utilizada há mais tempo, conforme Silva (2013), que se constitui de uma peça maciça de aço em formato anelar com duas flanges de ancoragem, uma em formato “T” na porção inferior e outra em forma “L” na porção superior – trecho através do qual serão transmitidos os esforços de tração e compressão para a fundação. Nessa solução, o anel corresponde ao primeiro segmento da torre, com cerca de 1,5 a 2,0 metros de altura, embutido no concreto do boco de fundação (TEIXEIRA, 2022). Antes da montagem das armaduras, o anel é posicionado sobre o concreto regularizado situado na base do bloco da fundação.

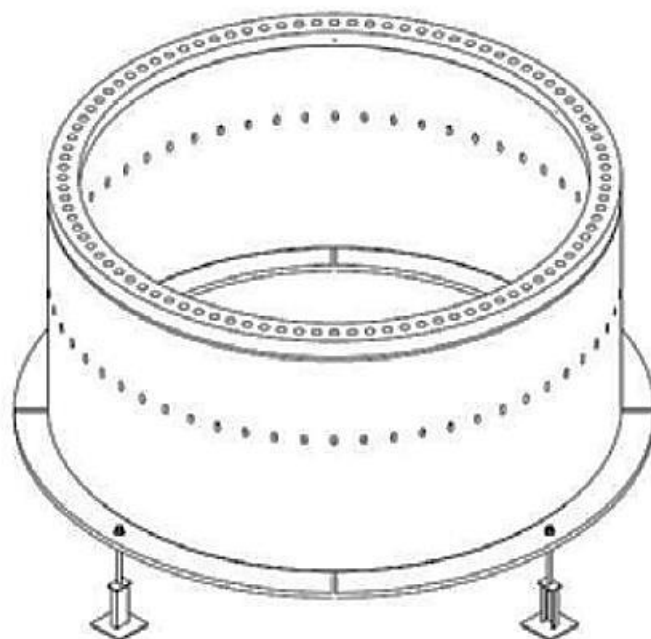
Figura 4. Anel de aço de conexão da torre na fundação – obra em execução.



Fonte: Elaborado pela autora com base em Hau (2006) *apud* Rodrigues (2019).

Teixeira (2022) descreve que ao redor do anel (Figura 5) há orifícios nos quais são implementados varões de aço que se estendem pela parte superior da fundação com a finalidade de reforçar a ligação. Esses varões não devem ficar em contato com o anel para evitar a concentração de tensões elevadas, para tanto, a região é preenchida com argamassa ou outro material isolante. Esta solução está caindo em desuso, pois, de acordo com Teixeira (2022), foram observados movimentos verticais excessivos na ligação torre-fundação em função de vazios localizados abaixo do anel de aço e indevidamente preenchidos com água, originando fissurações. Além disso, o estudo pontua que houve erosão relevante no lado superior do flange, causada pelas forças ascendentes do rotor sobre a fundação (TEIXEIRA, 2022).

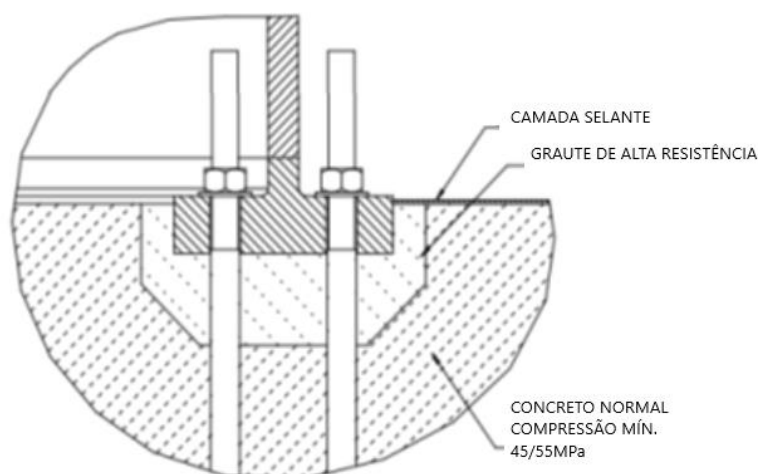
Figura 5. Anel de aço de conexão da torre na fundação - desenho.



Fonte: Teixeira (2022, p. 19).

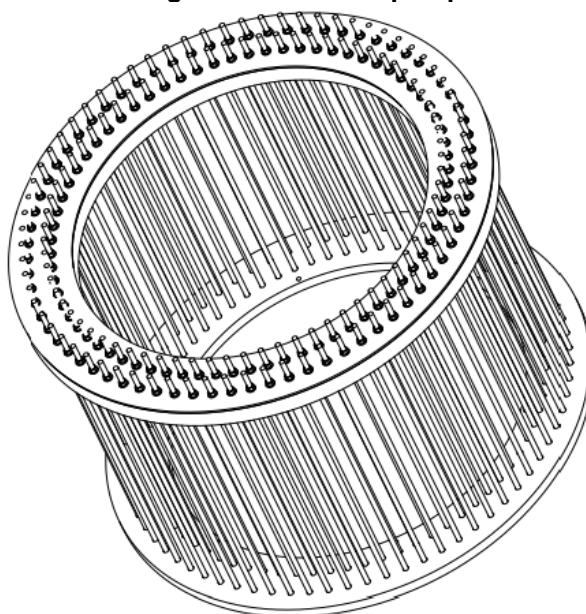
Ainda segundo Teixeira (20220), a *anchor cage* é uma solução composta por parafusos protendidos conectando dois anéis de aço, um na extremidade inferior e outro na superior dos parafusos. Os parafusos não devem entrar em contato com o concreto da fundação, portanto devem ser isolados com uma capa ou algo similar durante a concretagem. Após a cura, o anel superior é nivelado e fixado e então o espaço entre o concreto e o anel é preenchido por argamassa de alta resistência (Figura 6 e Figura 7).

Figura 6. *Anchor cage* - Vista geral dos parafusos protendidos em relação ao concreto.



Fonte: Teixeira (2022, p. 19).

Figura 7. Anchor cage – desenho em perspectiva da solução.



Fonte: Teixeira (2022, p. 20).

Esta solução (Figura 8) tem sido cada vez mais utilizada em substituição ao anel de aço, conforme apresentado por Teixeira (2022), pois permite melhor transmissão das cargas para a fundação. Além disso, é possível reaplicar tensão nos parafusos regularmente durante as atividades de manutenção.

Figura 8. Anchor cage sendo executada em obra.



Fonte: Elaborado pela autora com base em Silva (2013).

As torres eólicas continentais (*onshore*) podem ser suportadas por fundações diretas (sapatas) ou fundações profundas (estacas), conforme sintetiza

DNV/RISØ (2002). As fundações diretas são indicadas para locais em que a capacidade de suporte do solo é adequada à solicitação da estrutura já nas camadas mais superficiais. Dentre as fundações diretas, Milititsky (2019) apresenta que as soluções típicas para aerogeradores compreendem os seguintes tipos: simples, com tirantes e chumbadores e sobre material tratado com cimento.

As fundações diretas simples são a primeira solução considerada devido a possibilidade de serem executadas sem equipamentos especializados e serem de fácil construção, o que confere agilidade na obra (MILITITSKY, 2019). A imagem a seguir (Figura 9) mostra uma fundação direta simples em execução. Em geral essa solução tem formato circular ou octogonal e resistem ao tombamento em função do seu peso próprio (TEIXEIRA, 2022). É válido ressaltar que, o emprego dessa solução só se faz adequado quando o subsolo apresenta resistência e compressibilidade suficientes, não sendo colapsível, expansivo ou cárstico (MILITITSKY, 2019).

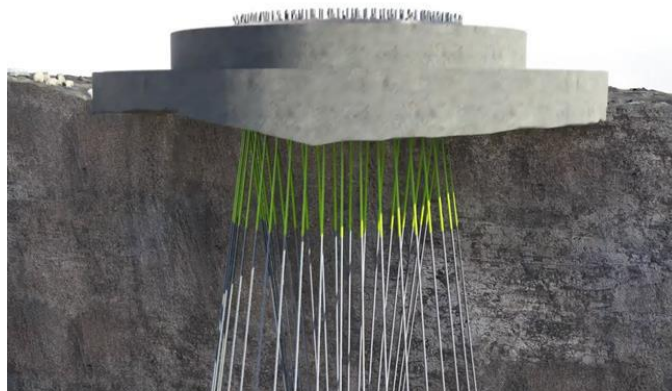
Figura 9 – Fundação direta simples.



Fonte: Teixeira, 2022, p. 24.

Quando a implantação da fundação acontece em regiões com horizonte rochoso ou material competente a pequenas profundidades, pode-se optar por fundações diretas com tirantes ou chumbadores (MILITITSKY, 2019). Nesta solução a presença das ancoragens permite que o volume dos blocos seja menor quando comparado com as fundações diretas simples (MILITITSKY, 2019). Nesse caso, a presença das ancoragens permite uso de menos aço e menos concreto uma vez que comprimem a fundação contra o solo (TEIXEIRA, 2022).

Figura 10. Fundação direta ancorada.

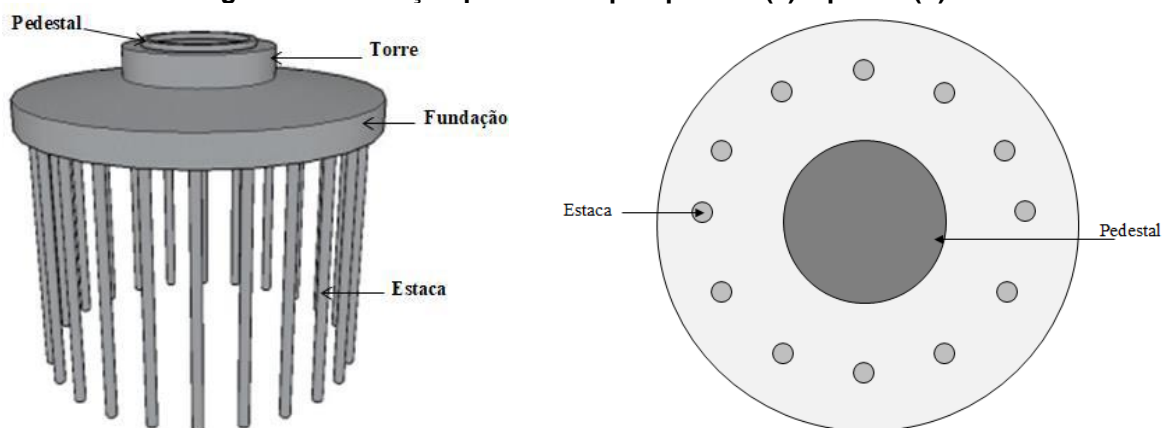


Fonte: Teixeira, 2022, p. 25.

Quando as propriedades do solo não são as ideais para execução de fundações diretas, pode ser avaliada a possibilidade de realizar melhorias para alcançar as propriedades desejadas. Militistky (2019) apresenta que podem ser usados materiais tratados com cimento, como solo-cimento, brita graduada tratada com cimento (BGTC) e *jet-grouting*. Teixeira (2022) complementa as opções de melhoria através da estabilização mecânica (dinâmica ou estática – para solos coesivos), ou seja, a compactação do solo visando reduzir o índice de vazios e melhorando as características de permeabilidade, compressibilidade e resistência.

Já para solos menos resistentes nas camadas mais superficiais, o emprego de fundações profundas se torna mais pertinente, pois a carga é transferida para o solo ao longo da profundidade da estaca ou de sua ponta. A imagem a seguir (Figura 11) ilustra esse tipo de solução. Os tipos mais comuns de fundações profundas para aerogeradores, segundo Militistky (2019), compreendem: estacas escavadas e estacas cravadas pré-moldadas verticais e/ou inclinadas.

Figura 11. Fundação profunda – perspectiva (a) e planta (b).



(a)

(b)

Fonte: Teixeira, 2022, p. 23.

As estacas escavadas se mostram como uma excelente solução por permitirem a execução de elementos armados de grande diâmetro, suportando grandes cargas e apresentando elevada rigidez (MILITITSKY, 2019). A Figura 12 abaixo mostra um exemplo de estacas de hélice contínua executada e após o arrasamento, sendo preparada para vinculação com o bloco de coroamento.

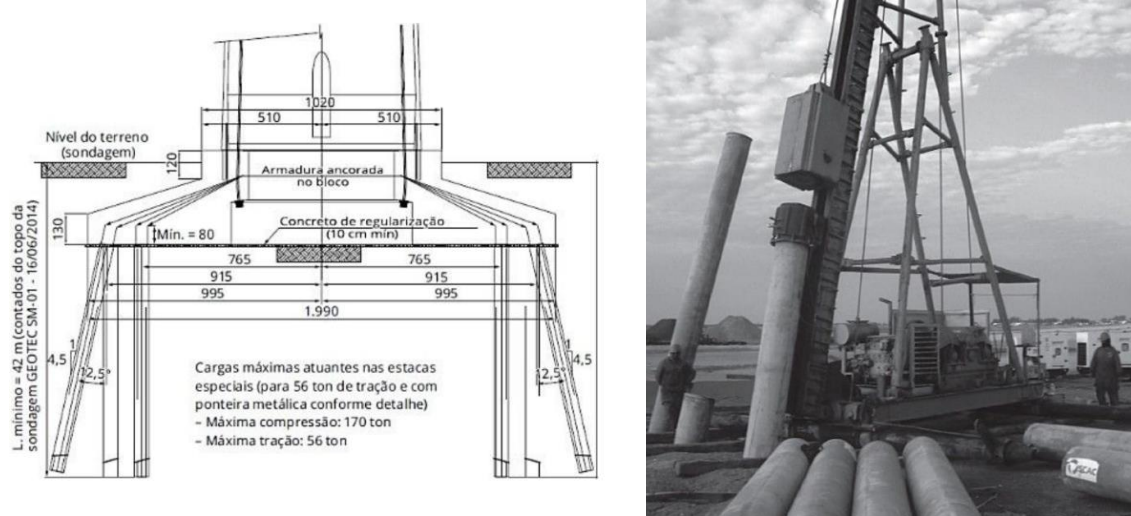
Figura 12. Estacas de hélice contínua após execução (esquerda) e após arrasamento (direita).



Fonte: Milititsky, 2019, p. 31.

As estacas pré-moldadas de concreto e as estacas metálicas podem ser empregadas em locais nos quais o perfil de subsolo é muito mole ou quando é exigido o uso de estacas inclinadas (Figura 13). Nessa solução, conforme exposto por Milititsky (2019), são empregadas estacas pré-moldadas de concreto unidas por solda permitindo que sejam atingidas grandes profundidades e que haja melhor controle tecnológico em função da produção industrial das peças.

Figura 13. Estacas cravadas inclinadas – exemplo de projeto (esquerda) e execução em campo (direita).



Fonte: Elaborado pela autora com base em Milititsky (2019, p. 37 e p. 40).

Além dos critérios relacionados a resistência do solo, é possível sintetizar, com base no trabalho de Milititsky (2019), alguns fatores determinantes na escolha da fundação a ser empregada em um projeto de aerogerador:

- I. A localização da torre pode influenciar na determinação do tipo de fundação, especialmente no caso de fundações profundas que requerem equipamentos e insumos específicos para a confecção das estacas e acesso ao local da obra.
- II. A magnitude das cargas, que é função do tipo de torre, turbina, altura e do regime de ventos da região.
- III. As condições do subsolo preponderam na escolha da fundação, cabendo sempre verificar a possibilidade de executar fundações diretas em função de menor custo e menor complexidade.
- IV. As condições de acesso dos equipamentos também podem influenciar na solução técnica determinada, quando há solos superficiais muito moles e ainda não há acesso adequados.
- V. As práticas construtivas locais e a disponibilidade de materiais exercem influência significativa, seja pela experiência da mão-de-obra disponível, seja pelo acesso aos materiais necessários, especialmente os industrializados (como estacas pré-moldadas e perfis metálicos).
- VI. A durabilidade dos materiais quando expostos às condições ambientais do local onde serão instalados, considerando recobrimentos, proteção contra corrosão de elementos metálicos e soldas, entre outros impactos.

2.2.3 Comportamento em serviço

No Brasil o projeto e execução de fundações é normatizado pela ABNT NBR 6122:2022 que especifica os requisitos a serem observados para todos os tipos

de fundações, incluindo requisitos de desempenho e monitoramento. Complementarmente a ela, a ABNT publicou a versão em português da primeira parte da IEC 61400 que contempla os requisitos de projeto para sistemas de geração de energia eólica, a NBR IEC 61400-1:2023 (ABNT, 2023b). Esta norma faz parte de um conjunto de normas da Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission – IEC*) que se aplicam às diversas partes de um aerogerador, incluindo a fundação.

Estas normas não esgotam o referencial a ser considerado no dimensionamento das fundações de aerogeradores. É comum que os fabricantes de turbinas eólicas indiquem em seus critérios de projeto as cargas, combinações de ações e referências a serem adotadas pelas empresas projetistas. Evidentemente, essas diretrizes devem ser, pelo menos, mais restritivas do que as normas de cada país. Dentre as referências indicadas pelos fabricantes é possível listar algumas delas:

- I. IEC 61400: Parte 1: Requisitos de Projeto (tradução nossa);
- II. IEC 61400: Parte 6: Requisitos de Projeto para Torre e Fundação (tradução nossa);
- III. DNV/RISØ: Diretriz para projeto de Turbinas e Eólicas (tradução nossa)
- IV. Eurocode 2: Projeto de estruturas de concreto – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios (tradução nossa);
- V. Eurocode 7: Projeto geotécnico – Part 1: Regras gerais;
- VI. DIBt 2012: Diretrizes para turbinas eólicas, ações e verificações de estabilidade da torre e da fundação (tradução nossa);
- VII. DNVGL-ST-0126: Estruturas de suporte para turbinas eólicas (tradução nossa).

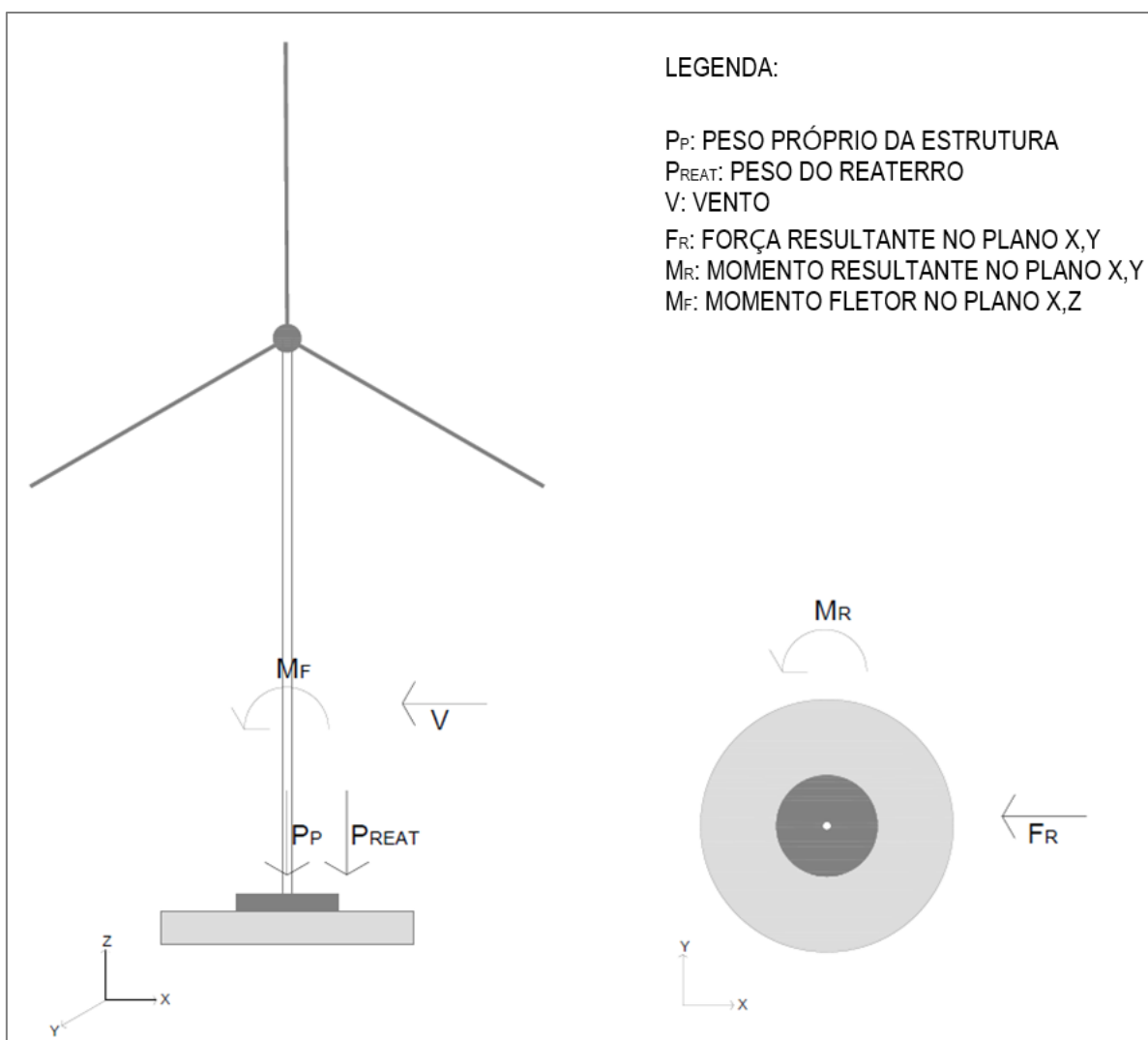
Quanto às cargas a serem consideradas no projeto estrutural, conforme a NBR IEC 61400-1:2023, são classificadas da seguinte forma:

- I. Cargas gravitacionais e inerciais: são cargas estáticas e dinâmicas que resultam da força da gravidade, da vibração e rotação da turbina eólica e de atividade sísmica.
- II. Cargas aerodinâmicas: são as cargas decorrentes do fluxo de ar e sua interação com os componentes fixos e móveis do aerogerador.
- III. Cargas atuantes: resultado da operação e controle do aerogerador, como do freio mecânico.
- IV. Outras cargas: cargas de impacto, efeito esteira, esforço gerado pela presença de gelo, entre outras.

Isto é, as cargas transmitidas para a fundação resultam de duas origens principais: peso próprio da estrutura, do aerogerador e seus componentes e da ação

do vento. O peso próprio da estrutura gera cargas verticais que são somadas ao solo de reaterro que, por sua vez, tem um efeito estabilizador. Já o vento exerce momento fletor, momento torçor e esforços cortantes perpendiculares à torre. A imagem a seguir ilustra a incidência dessas ações (Figura 14). A variação do vento (V) e, conseqüentemente, dos esforços em torno do eixo z geram um plano de carregamento x,y que promove uma força resultante (F_R) e um momento resultante (M_R) nesse plano (ABNT, 2023b).

Figura 14. Fundação de torre eólica – cargas e ações.



Fonte: elaborado pela autora.

O efeito dessas cargas provocará tendências de movimento na fundação à medida que são transferidas da estrutura para a infraestrutura. A F_R tenderá a deslocar a estrutura horizontalmente provocando deslizamento, ou perda de estabilidade, levando ao tombamento por meio do momento no eixo z (M_F). O M_R tenderá a torcer

a fundação no sentido do plano horizontal, deformando os elementos estruturais ou o terreno.

No dimensionamento, as cargas atuantes devem ser combinadas de modo a gerar as situações críticas de projeto e considerar o efeito da subpressão na condição de segurança mais desfavorável (FARIA; NORONHA, 2013). Como sugerido por Faria e Noronha (2013), devem ser gerados os seguintes cenários:

- I. Peso da torre e ventos em condições normais;
- II. Peso da torre e ventos em condições extremas;
- III. Desligamento/acionamento do aerogerador;
- IV. Carregamentos devido ao efeito oscilatório do vento, ou seja, esforços de fadiga.

As verificações compreenderão, portanto, o Estado Limite de Serviço (ELS), o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Fadiga (ELF). O ELU relaciona o projeto aos seus limites últimos associados ao colapso, o ELS relaciona aos limites de serviço relacionados a deformações e o ELF aos danos provocados pelas cargas cíclicas (DALENOGARE *et al*, 2019). Considerando as combinações de cargas e os estados limite são feitas verificações de, pelo menos, os seguintes aspectos (MILITITSKY, 2019; FARIA; NORONHA, 2013):

- I. Recalques totais admissíveis;
- II. Recalques diferenciais provocando inclinação;
- III. Segurança ao tombamento e deslizamento;
- IV. Rigidez rotacional (balanço da estrutura em relação ao solo);
- V. Deformação da estrutura;
- VI. Abertura de fissuras;
- VII. Cobrimento conforme a classe da agressividade ambiental;
- VIII. Efeitos do carregamento cíclico no solo;
- IX. Efeito da água exercendo subpressão no bloco de fundação;
- X. Segurança à erosão.

Para o caso específico de cada conjunto aerogerador e fundação, essas estimativas fornecerão referências a serem levadas em consideração posteriormente nas atividades de O&M, atividades de inspeção e de monitoramento e, conseqüentemente, na avaliação do comportamento da estrutura.

2.3 Patologias das fundações

2.3.1 Origens das patologias em fundações

No que concerne às fundações, Milititsky, Consoli e Schnaid (2005) ressaltam que o êxito ou fracasso dessas estruturas, assim como o surgimento de problemas, pode ter origem em um conjunto de temas que envolvem uma diversidade de especialistas. Niyama, Aoki e Chamecki (1998) complementam essa percepção afirmando que a verificação do desempenho das fundações é parte de um problema mais geral que consiste em verificar o comportamento do conjunto superestrutura, infraestrutura e maciço de solo. Dessa forma, a verificação deve ser feita em todas as fases do processo, desde a concepção do projeto até o fim da vida útil da obra de fundação, pois tratando-se de uma cadeia de eventos, seu sucesso depende de cada elo (NIYAMA, AOKI e CHAMECKI, 1998).

Nesse sentido, sintetizando o exposto por Milititsky, Consoli e Schnaid (2005), temos os seguintes aspectos:

- I. Caracterização do comportamento do solo: os profissionais encarregados dessa etapa, em geral, não são especialistas em fundações ou engenheiros e não acompanham o desenvolvimento de toda a construção da fundação;
- II. Análise e projeto das fundações: o projetista frequentemente não recebe informações precisas sobre eventos ou as condições locais são diferentes das premissas estabelecidas em projeto;
- III. Execução das fundações: alterações das condições encontradas durante a execução, por vezes, não são relatadas e dificuldades construtivas podem comprometer as condições de projeto;
- IV. Eventos pós-construção das fundações: acontecimentos internos ou externos à obra podem afetar o desempenho da estrutura sem que tenham sido previstos em projeto;
- V. Degradação dos materiais constituintes da fundação: o comportamento a longo prazo da estrutura pode ser comprometido pela degradação dos materiais ao longo do tempo.

Conhecer todas as possibilidades de problemas permite uma ação mais qualificada dos diferentes profissionais envolvidos na vida de uma fundação, desde a etapa de investigação do solo, projeto, construção e fornecimento de materiais, fiscalização do trabalho, até a pós-construção (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2005).

A adequada caracterização do solo é essencial para solucionar ou mesmo evitar qualquer problema associado a fundações, uma vez que ele irá suportar as cargas aplicadas pela estrutura (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2005). A segurança à ruptura é o principal aspecto estrutural a ser garantido, conforme argumentam Niyama, Aoki e Chamecki (1998), por isso a resistência e integridade do elemento estrutural, assim como a resistência do solo devem ser efetivamente comprovadas. Incertezas relacionadas às condições do subsolo levam à patologias nas fundações. Essas incertezas, de acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2005), podem ser resultado da ausência de investigação do subsolo, de uma investigação ineficiente ou ainda da má interpretação dos resultados.

Os problemas típicos decorrentes da falta de investigação do subsolo estão apresentados no Quadro 1. Embora essa situação seja mais comum em obras de pequeno porte, os problemas decorrentes dela podem ser extrapolados para situações em que a investigação é insuficiente.

Quadro 1. Problemas típicos decorrentes de ausência de investigação do subsolo para os diferentes tipos de fundação.

TIPO DE FUNDAÇÃO	PROBLEMAS TÍPICOS DECORRENTES
FUNDAÇÕES DIRETAS	Tensões de contato excessivas, incompatíveis com a capacidade do solo, resultando em recalques inadmissíveis ou ruptura.
	Fundações em solos/aterros heterogêneos, provocando recalques diferenciais.
	Fundações sobre solos compressíveis sem estudos de recalques, resultando em grandes deformações.
	Fundações apoiadas em materiais de comportamento muito diferente, sem junta, ocasionando o aparecimento de recalques diferenciais.
	Fundações apoiadas em crosta dura sobre solos moles, sem análise de recalques, ocasionando ruptura ou grandes deslocamentos da fundação.
FUNDAÇÕES PROFUNDAS	Estacas de tipo inadequado ao subsolo, resultando mau comportamento.
	Geometria inadequada, comprimento ou diâmetro inferiores aos necessários.
	Estacas apoiadas em camadas resistentes sobre solos moles, com recalques incompatíveis com a obra.
	Ocorrência de atrito negativo não previsto, reduzindo a carga admissível nominal adotada para a estaca.

Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2005, p. 28).

Na investigação insuficiente, áreas que não foram objeto de sondagem podem receber caracterização não condizente com a realidade, mascarando trechos profundos de solos moles, por exemplo. Além disso, regiões que necessitam de ensaios especiais de caracterização podem ser negligenciadas. Com isso, em obras de maior porte, é preciso realizar o cruzamento de dados de campo e laboratório para

assegurar maior confiabilidade para o projeto (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2005).

A partir do modelo de subsolo, dos resultados dos ensaios de campo e de laboratório, se necessário, a determinação das solicitações de projeto é definida a fundação a ser adotada. Milititsky, Consoli e Schnaid (2005) sugerem que a variabilidade das propriedades do solo seja tratada, em projetos de grandes obras (como fundações de torres de linha de transmissão e prédios industriais completos), a partir de métodos probabilísticos. Essa análise, prosseguem os autores, podem trazer vantagens em relação a segurança quando comparada com análises determinísticas. Uma obra de fundação compõe-se, normalmente, por um conjunto de elementos com diferentes comportamentos, cada qual com sua tensão de ruptura particular. Como resultado, é possível ter uma curva de distribuição estatística desses valores para a obra enquanto conjunto (NIYAMA, AOKI e CHAMECKI, 1998).

Após essas definições, o elemento de fundação é dimensionado e seu projeto executivo é elaborado. De acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2005), os problemas típicos que ocorrem nessa etapa podem ser causados por mecanismos de interação solo-estrutura, relativos à estrutura da fundação em si – quanto ao projeto ou detalhamento estrutural – e quanto às especificações construtivas ou falta delas. Falhas na execução são a segunda maior causa de problemas em fundações, o sucesso da execução depende do detalhamento adequado dos projetos, da especificação correta dos materiais e da realização dos procedimentos construtivos em conformidade com a boa prática e com o devido controle tecnológico (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2005).

Milititsky, Consoli e Schnaid (2005) descrevem que nas fundações rasas, alguns problemas comuns na execução e que envolvem a interação com solo são o assentamento em solos com diferentes características, sobre reaterro mal compactado e sobre valas que não foram adequadamente limpas. Quanto à estrutura, ainda sobre fundações rasas, cita-se a qualidade inadequada do concreto, adensamento e vibração insuficientes, armaduras mal posicionadas ocasionando problemas de recobrimento afetando a integridade a longo prazo. Os autores prosseguem acrescentando que com relação à execução de fundações profundas, os problemas genéricos são erros na locação, desvio na execução em função de matacões, inclinação final executada em desacordo com o projeto, problemas de

integridade ou continuidade (no caso de estacas escavadas) e características do concreto em desconformidade com o especificado.

Com relação a etapa de vida pós-obra da fundação, podem ocorrer eventos que venham a comprometer a estrutura, sendo alguns imprevisíveis e acidentais e outros que podem ter sua ocorrência prevista e permitem adotar medidas preventivas (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2005). Há uma série de eventos que podem comprometer o comportamento da fundação, mesmo que as etapas anteriores de seu ciclo de vida tenham sido adequadamente executadas. O levantamento de Milititsky, Consoli e Schnaid (2005) destaca: alterações das solicitações de projeto devido a reformas ou alterações de uso, movimentos de massa – como alterações em terrenos vizinhos e escorregamento de taludes –, oscilações não previstas do nível freático, entre outras.

Por fim, a degradação dos materiais, aço e concreto, em contato com o solo é um fenômeno que pode ser previsto em partes na etapa de investigação do subsolo e de projeto. Milititsky, Consoli e Schnaid (2005) fazem referência a parâmetros como resistividade do solo, pH, teor de sulfatos e cloretos que caracterizam um ambiente agressivo. Com relação ao concreto, problemas na cura durante a fase de execução podem ocasionar o aparecimento de trincas e fissuras que, se não tratadas, permitirão o ingresso de agentes agressivos para o interior da estrutura, provocando, além da degradação do concreto em si, a corrosão das armaduras.

A norma ABNT NBR 6118:2023 preconiza que devem ser considerados, ao menos, três mecanismos responsáveis pela degradação do concreto: lixiviação, expansão por sulfato e reação álcali-agregado. A lixiviação ocorre quando há o carreamento de compostos da pasta de cimento pela ação da água, que adentra a estrutura através de fissuras. A expansão por sulfato, que ocorre em função da ação de água contaminada por sulfato, dá origem a reações expansivas deletérias com a pasta de cimento. Por fim, a reação álcali-agregado provoca também expansão deletéria e se dá quando há reação química entre álcalis do concreto e agregados reativos.

Quanto à armadura, a norma supracitada afirma que devem ser considerados os seguintes mecanismos de degradação: despassivação por carbonatação, despassivação com ação de cloretos e deterioração da estrutura propriamente dita. A

ação do gás carbônico da atmosfera sobre a armadura pode gerar despassivação, sendo, portanto, necessário evitar o ingresso desse agente agressivo através do cobrimento adequado e do controle de fissuração. As mesmas medidas podem ser empregadas para evitar que íons de cloro entrem em contato com a armadura, provocando despassivação.

Por fim, a deterioração da estrutura propriamente dita se refere a degradação provocada por ações mecânicas, impactos, ações cíclicas, movimentações de origem térmica, retração, fluência e outras ações que incidem sobre a estrutura. Nesse aspecto, os esforços da fadiga exercem grande influência nas fundações de aerogeradores. Tanto é que os esforços de fadiga são levados em consideração no dimensionamento dessas estruturas.

Em suma, analisar o comportamento das fundações tomando-se por base unicamente as verificações de projeto parece não ser suficiente, é preciso monitorar essas estruturas. Gasparetto, Pantoja e Ramires (2021) corroboram com essa ideia sugerindo que seja formulada uma norma brasileira específica para avaliação de estruturas existentes, pois a avaliação de segurança de uma estrutura que existe é diferente da avaliação para estruturas novas. Em estruturas novas, os coeficientes de ponderação das solicitações e resistências levam em conta incertezas relacionadas ao processo de construção, variabilidade da resistência dos materiais e aproximações numéricas no cálculo do dimensionamento; contudo, ao analisar uma estrutura existente, parte dos fatores desconhecidos podem ser mensurados permitindo modificar os fatores de majoração das ações ou de minoração das resistências (GASPARETTO; PANTOJA; RAMIRES, 2021).

2.3.2 Caracterização do subsolo

É sabido que as características dos solos se distinguem amplamente entre si, a depender da rocha de origem e da história geológica e geomorfológica daquela porção de rocha alterada. Pinto (1998), salienta que todo projeto de fundações contempla a resposta do solo às solicitações impostas pela obra de engenharia ali localizada. O autor apresenta que os estudiosos da mecânica dos solos compreendem que o conhecimento do comportamento desse material, disposto pela natureza de

forma heterogênea, não pode ficar restrito a aplicação de modelos teóricos rígidos nem restritos a parâmetros como o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento.

Nesse contexto, a análise apropriada do solo, conforme descrito pelo autor (PINTO, 1998), deve levar em consideração tanto os parâmetros de deformação (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson), quanto os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito interno). O autor prossegue salientando que esses parâmetros dependem de vários fatores como o nível e o tempo de carregamento, a drenagem do local e a trajetória de tensões.

O solo é um sistema trifásico composto por uma parcela sólida, uma líquida e outra gasosa. Os vazios entre as partículas, fase gasosa, podem ser parcialmente ou totalmente preenchidos por água, fase líquida. As partículas de rocha decompostas em diferentes tamanhos de grãos, desde argilas, siltes, areias, até grânulos maiores compõe a parte sólida. O arranjo dessas três fases juntamente com as características das partículas vai determinar o comportamento mecânico do solo. A tensão, por exemplo, é transmitida em parte pela massa de solo, de partícula a partícula, conforme o tipo de mineral, e em parte através da água que se encontra sob pressão em seus vazios (PINTO, 1998). A resistência ao cisalhamento, por sua vez, depende da coesão e do atrito entre as partículas (CAPUTO E CAPUTO, 2022).

As tensões existentes no solo resultam do seu peso próprio e das cargas nele aplicadas. As cargas aplicadas, conforme descrito por Caputo e Caputo (2022), podem se distinguir entre as tensões de contato e as tensões despertadas no interior do maciço de solo. Os autores prosseguem descrevendo que a tensão vertical resultante (σ_z) em um ponto a determinada profundidade do solo será função da tensão do solo devido ao peso próprio (σ_0), da tensão de alívio decorrente da escavação ($\Delta\sigma_0$) e da carga aplicada ($\Delta\sigma_p$), conforme a equação (3) a seguir.

$$\sigma_z = (\sigma_0 - \Delta\sigma_0) + \Delta\sigma_p \quad (3)$$

A tensão vertical do solo pode ser descrita em termos de tensão efetiva na qual a pressão neutra (u_z), ou poropressão, exercida pela presença de água, é subtraída da tensão decorrente do peso próprio do solo, conforme apresentado na equação (4). Sendo o solo composto por diferentes camadas com pesos específicos diferentes, a

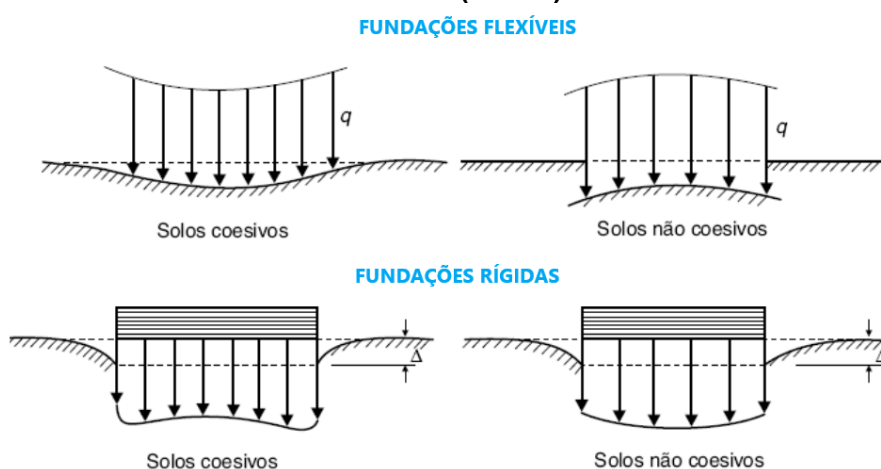
tensão pelo peso próprio será o somatório do produto da espessura de cada camada pela sua massa específica.

$$\sigma_z = \sigma_z - u_z \quad (4)$$

As tensões resultantes de cargas aplicadas são transmitidas ao longo da profundidade do solo, se distribuindo de maneira distinta conforme a geometria do elemento solicitante. Caputo e Caputo (2022) salientam que essas tensões são avaliadas, em vez de calculadas, e que se embasam na hipótese de um maciço de solo semi-infinito, elástico, homogêneo e isotrópico.

As tensões de contato são as tensões localizadas sobre o solo e sob a fundação. Conforme define Caputo e Caputo (2022), a natureza do solo (argiloso ou arenoso), a rigidez da fundação e a profundidade são fatores que interferem na sua distribuição. A imagem a seguir (Figura 15) ilustra resumidamente esse comportamento.

Figura 15. Recalque em solos coesivos e não coesivos para fundações flexíveis (acima) e não flexíveis (abaixo).



Fonte: Elaborado pela autora com base em Caputo e Caputo (2022, p. 118).

Para fundações flexíveis, embora as tensões de contato sejam uniformes e idênticas às transmitidas pelas fundações, a resposta, em termos de recalque do solo, não é (CAPUTO E CAPUTO, 2022). Os autores prosseguem informando que os solos coesivos recalcam mais no centro da área carregada do que na periferia, enquanto para os solos não coesivos o fenômeno é o contrário, dado que o módulo de elasticidade aumenta com o confinamento desse tipo de solo. Já sob fundações rígidas, a deformação é constante sob sua superfície, porém as tensões de contato

não são uniformes. O comportamento dos recalques, portanto é o oposto das fundações flexíveis.

A capacidade de carga de um solo, isto é, sua capacidade de suportar cargas, depende da sua resistência ao cisalhamento (CAPUTO e CAPUTO, 2022). Quando o solo é submetido a uma carga superior à carga que pode resistir, ele se rompe. Conforme Caputo e Caputo (2022), essa característica afeta diretamente importantes problemas da engenharia geotécnica, como a estabilidade de taludes, empuxo sobre contenções e capacidade de carga de estacas e sapatas. Embora a determinação correta da resistência ao cisalhamento do solo não seja ainda matéria precisamente determinada na mecânica dos solos (CAPUTO e CAPUTO, 2022), é possível estabelecer parâmetros fundamentais.

A equação da Coulomb (5) define que a resistência ao cisalhamento depende basicamente de duas componentes, a coesão (c) e o atrito ($tg\phi$) entre as partículas, de acordo com o descrito por Caputo e Caputo (2022). Com isso, a resistência ao cisalhamento do solo (τ_r) pode ser escrita conforme abaixo, onde é considerada a ação da tensão neutra da água (u)

$$\tau_r = c + (\sigma_z - u)tg\phi \quad (5)$$

A má investigação do subsolo é a causa mais frequente de problemas em fundações, de acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2005). Os autores salientam que uma investigação adequada do subsolo começa com estudos de escritórios, em que são levantadas informações sobre a hidrogeologia, pedologia e geotecnia do local de implantação da obra com base em fontes secundárias. Conforme os resultados desses estudos, é definida a abrangência das investigações preliminares, complementares e, eventualmente, especiais com ensaios geotécnicos (MILITITSKY, CONSOLI E SCHNAID, 2005).

O programa preliminar geralmente é desenvolvido com base no Standard Penetration Test (SPT), descrito a seguir. Já os ensaios complementares podem envolver tanto ensaios de campo como ensaios de laboratório. Como ensaios de campo complementares, é possível citar o ensaio do piezocone, pressiômetro e palheta, entre outros (MILITITSKY, CONSOLI E SCHNAID, 2005). Como ensaios de laboratório complementares, os mais usuais, conforme Caputo e Caputo (2022), são

cisalhamento direto, compressão triaxial e compressão simples, resumidos em seguida.

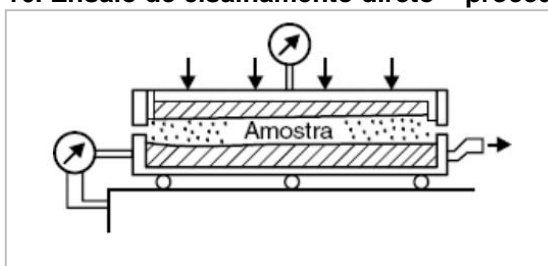
O Standard Penetration Test (SPT) é o teste de reconhecimento do solo mais popular em praticamente todo o mundo (Schnaid e Odebrecht, 2012). Segundo os autores, o teste consiste em uma medida de resistência dinâmica conjugada com uma sondagem de reconhecimento. Esse teste, portanto, permite reconhecer (Quaresma *et al.*, 1998):

- I. O tipo de solo através da retirada de uma amostra deformada a cada metro perfurado;
- II. A resistência do solo à penetração do amostrador padrão, a cada metro perfurado, expressa pelo valor N (N SPT);
- III. A posição do nível freático, quando encontrado no percurso da perfuração.

O ensaio é normatizado no Brasil pela ABNT NBR 6484:2020, publicada inicialmente em 1979, com atualização mais recente em 2020. Como resultado do ensaio, tem-se o perfil de sondagem do solo com o valor N, a caracterização tátil visual do trecho e o nível freático, quando interceptado.

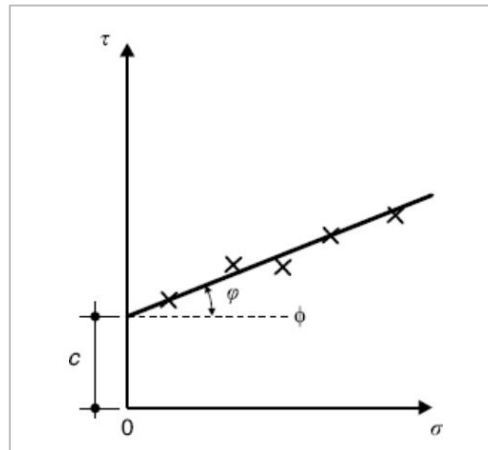
Caputo e Caputo (2022) descrevem que este ensaio busca determinar qual tensão de cisalhamento (τ_r) provoca a ruptura do solo quando submetido a uma tensão normal σ aplicada por duas placas deslocáveis, mostradas na Figura 16. Ao se repetir o ensaio para um conjunto de amostras, os pares ordenados (σ, τ_r) são lançados em um plano cartesiano (Figura 17) que permite obter a coesão (c) e o ângulo de atrito (ϕ) para o solo analisado.

Figura 16. Ensaio de cisalhamento direto – procedimento.



Fonte: Caputo e Caputo (2022, p. 248).

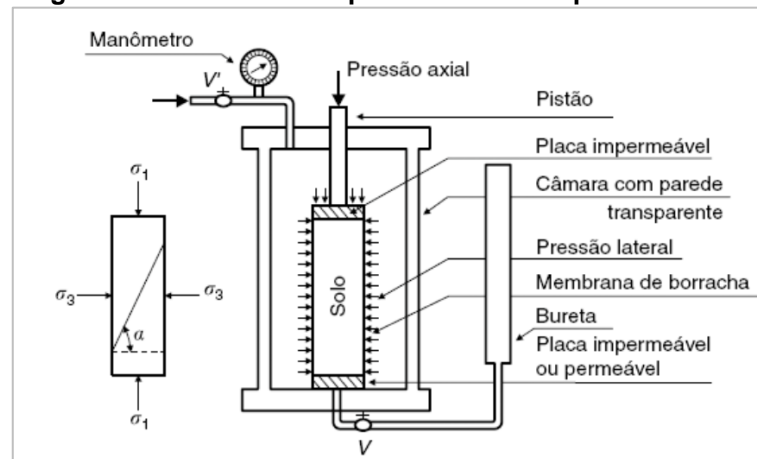
Figura 17. Ensaio de cisalhamento direto – resultado.



Fonte: Caputo e Caputo (2022, p. 249).

O ensaio de compressão triaxial é o mais utilizado, conforme exposto por Caputo e Caputo (2022). Neste ensaio, a amostra de solo é submetida a uma pressão axial estando confinada em uma câmara cilíndrica cheia de água. A amostra recebe a pressão aplicada pelo pistão através da placa impermeável situada na porção superior da amostra. Na base da amostra é também efetuada uma pressão que, por sua vez é exercida pela água (Figura 18).

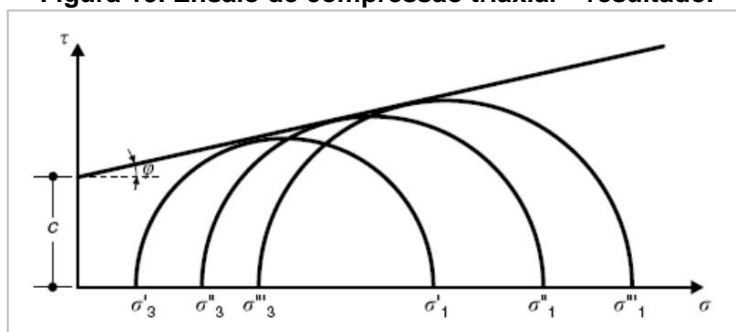
Figura 18. Ensaio de compressão triaxial – procedimento.



Fonte: Caputo e Caputo (2022, p. 249).

Com os pares de tensão vertical e lateral as quais a amostra foi submetida, traçam-se os círculos de Mohr e, com apoio da reta de Coulomb, obtém-se os valores de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ).

Figura 19. Ensaio de compressão triaxial – resultado.



Fonte: Caputo e Caputo (2022, p. 249).

Neste ensaio, específico apenas para solos coesivos, uma amostra cilíndrica com altura igual a duas ou três vezes seu diâmetro recebe aplicação de carga entre dois pratos de uma prensa. Com isso, é traçada a curva tensão-deformação diretamente pelo aparelho utilizado para o ensaio (CAPUTO e CAPUTO, 2022).

2.3.3 Efeitos da fadiga em estruturas de concreto armado

O fenômeno da fadiga diz respeito a uma acumulação sucessiva e gradual de danos em determinada estrutura provocados por solicitações repetitivas e cíclicas. O trabalho desenvolvido por Baroni (2010) buscou avaliar a vida útil remanescente de pontes e viadutos em serviço frente ao tráfego real. Para tanto, a autora investigou os efeitos das composições de tráfego levantadas *in loco* sobre a evolução da fadiga associada a outros danos da estrutura, como a corrosão. Gonçalves (2003), por sua vez, investigou a formação e propagação de fissuras por fadiga em elementos de concreto submetidos a cargas críticas. Ambos os autores realizaram vastos levantamentos bibliográficos, que fundamentarão este item.

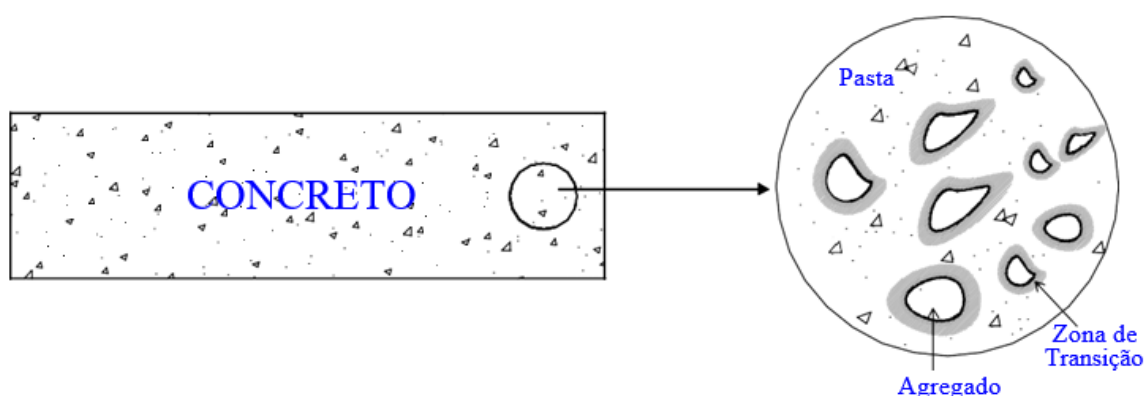
Gonçalves (2003), inspirado no trabalho de Aguado *et al.* (1990 *apud* Gonçalves, 2003), expõe que quando uma estrutura é solicitada pela ação de cargas repetidas, o material que constitui essa estrutura pode passar por um processo de perda de resistência. Essa alteração mecânica, que provoca a perda da resistência, pode ser acumulada sucessivamente de modo que levará o material a ruptura a partir de uma solicitação até menor que a resistência estática desse material. Esse fenômeno, conclui o autor, é chamado de fadiga e é acompanhado normalmente pela perda de rigidez do material.

Como exemplos dessas solicitações cíclicas, além do vento, é possível citar ondas, tráfego de veículos, guindastes e máquinas em movimento e oscilações de temperatura e umidade (GONÇALVES, 2003). A formação de fissuras e o aumento na deformação do elemento estrutural são, conforme destacado pelo autor, os fatores mais importantes ao se analisar a fadiga em estruturas de concreto. Gonçalves (2003) destaca ainda, com base no estudo do Comitê Interamericano do Concreto (CEB, 1998 *apud* Gonçalves, 2003), que, em geral, a ruína de uma estrutura não é diretamente produzida pela fadiga, mas decorrente de deteriorações progressivas com as quais a fadiga contribui.

Em estruturas de concreto armado, a fadiga está relacionada com as propriedades dos materiais, concreto e aço, e com a interação entre eles. Nesse sentido, conforme destacado por Baroni (2010), a fadiga da armadura é considerada como o mecanismo dominante. Porém, diferentemente do aço, o concreto não é um material homogêneo, por isso as análises de fadiga para cada material são distintas.

O concreto é um material heterogêneo composto por três fases: agregado graúdo, matriz de argamassa e zona de transição (Gonçalves, 2003). A zona de transição consiste na camada fina que envolve os agregados graúdos e faz interface com a pasta de cimento (Figura 20). Essa zona, salienta Baroni (2010), geralmente é a região mais fraca da estrutura do material e juntamente com o volume de vazios e as microfissuras têm grande influência na rigidez, no módulo de elasticidade e na durabilidade do concreto.

Figura 20. Microestrutura do concreto.

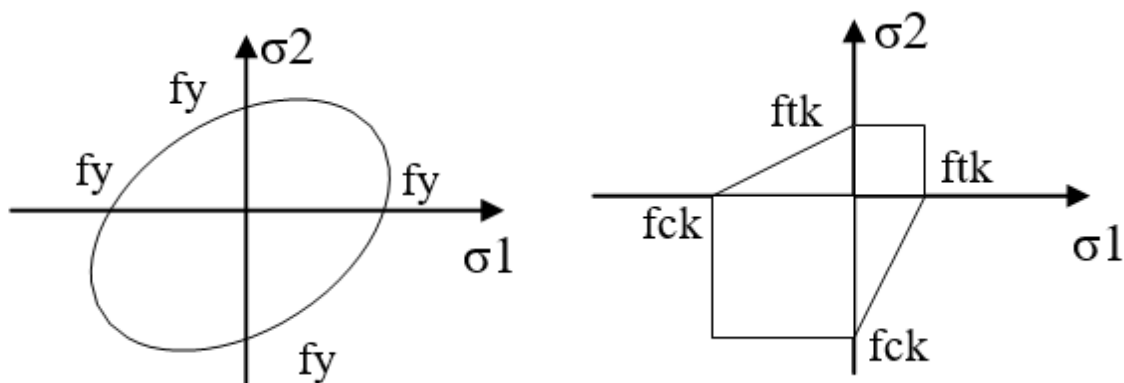


Fonte: Gonçalves, 2003, p. 7.

É válido destacar que as fissuras provenientes da fadiga não apresentam uma superfície identificável, tornando a identificação visual do fenômeno extremamente difícil. O que observa, em vez disso, é uma degradação progressiva do material até a formação de microfissuras (GONÇALVES, 2003). No caso do aço, que é um material dúctil, complementa Gonçalves (2003), a ruptura pode ocorrer sem revelar deformação macroscópica.

Baroni (2010) explicita que o comportamento do aço frente às solicitações de tração e compressão segue uma curva de resistência típica na qual a resistência é a mesma para as duas solicitações. Já o concreto, material frágil, tem maior resistência à compressão do que à tração, representando, portanto, uma curva de resistência variável. A imagem a seguir ilustra as curvas de resistência desses dois materiais (Figura 21).

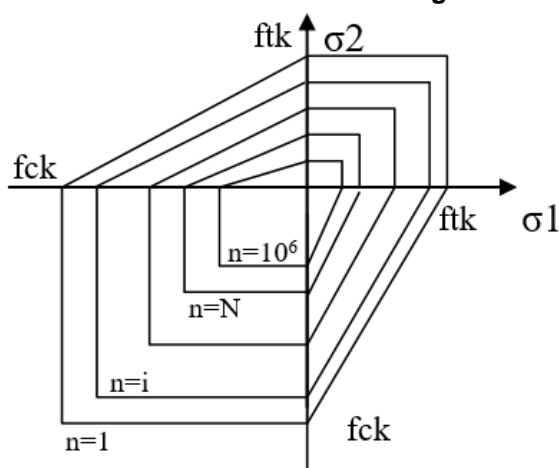
Figura 21. Curva de Resistência de Von-Mises para materiais dúcteis (esquerda) e Curva de resistência de Coulomb-Mohr para materiais frágeis (direita).



Fonte: Uchôa (2007) *apud* Baroni (2010, p. 38).

Para materiais submetidos a ciclos de carga, a resistência vai progressivamente diminuindo, fenômeno representado na curva ilustrada a seguir (Figura 22), conforme mostra a pesquisa de Uchôa (2007) *apud* Baroni (2010).

Figura 22. Curva de resistência – material frágil sob ciclo de cargas.



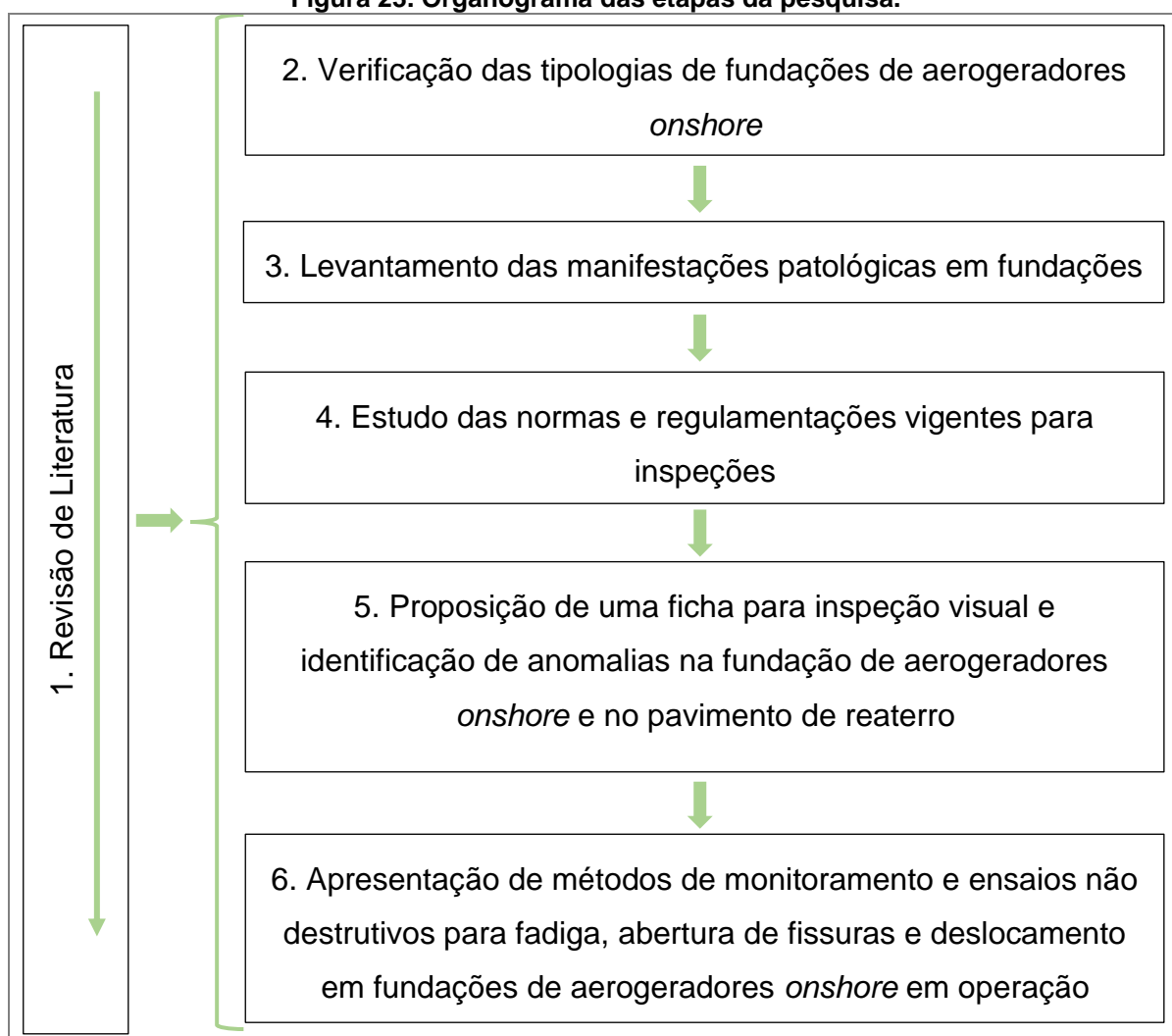
Fonte: Uchôa (2007) *apud* Baroni (2010, p. 38).

Na imagem acima o número “n” representa o número de ciclos ao qual a estrutura está submetida. Fundações de aerogeradores são dimensionadas, tipicamente, para 10^3 a 10^9 ciclos (FARIA; NORONHA, 2013), que incidirão igualmente no concreto e no aço. A nível macroscópico, Baroni (2010) informa que existem muitos relatos na literatura que caracterizam a fadiga de estruturas de concreto armado pelo aparecimento de fissuração e deslocamento no concreto, mas esses sinais são, na realidade, expressões da fadiga da armadura.

3 METODO

A fim de atingir o objetivo geral desse trabalho, que é de elaborar um procedimento de inspeção e monitoramento em fundações de aerogeradores de parques eólicos continentais (*onshore*), foram realizadas pesquisas bibliográficas baseadas em estudos nacionais e estrangeiros sobre o tema, presentes em livros, artigos científicos e relatórios técnicos. Além disso, foram consideradas as normas vigentes e regulações para os temas pertinentes ao estudo e visitas de campo – não identificadas nesse trabalho por questões de sigilo. O organograma abaixo (Figura 23) mostra as etapas da pesquisa.

Figura 23. Organograma das etapas da pesquisa.



Primeiramente estabeleceu-se a base teórica, na qual se fundamenta esse estudo, contemplando temas como a tipologia de fundações mais comuns para

aerogeradores, o comportamento da estrutura em serviço, tendo em vista os esforços solicitantes e as principais verificações de desempenho. A partir disso, foi feito o levantamento das anomalias mais representativas das estruturas executadas em concreto armado, tomando como referencial o caso de barragens, pontes, e estruturas de concreto armado em geral e que podem ser identificadas em inspeção visual. Para a inspeção visual foi elaborado um procedimento a ser seguido, com uso de fichas de inspeção para registro dos dados levantados em campo.

Como guias orientativos para inspeções em fundações de torres eólicas são inexistentes, foram utilizados como subsídio procedimentos e normas existentes para barragens e obras de arte especiais (OAE), como o Volume II – Guia de Orientação e Formulários para Inspeção de Segurança de Barragens, do Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas (ANA, 2016) e as normas ABNT NBR 9452:2023 referente à Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas e na norma DNIT 010/2004 que trata de Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido (DNIT, 2004). Além disso, serviram de subsídio referências bibliográficas como Mitre (2003), Nelli (2012) e Gasparetto (2021) que elaboraram procedimentos de inspeção para diferentes tipos de estruturas de concreto. Por fim, soma-se a isso, a experiência obtida pela autora na inspeção visual de cerca de 100 fundações de aerogeradores de dois parques eólicos brasileiros que, por questões éticas, não serão identificados.

Além da inspeção visual, foram identificados e apontados métodos para monitoramento do comportamento das estruturas por meio de ensaios não destrutivos ou instalação de sensores na fase pós-obra. Os aspectos a serem monitorados compreendem a fadiga, a abertura de fissuras e deslocamentos. Tais aspectos foram selecionados por sua representatividade frente à saúde da estrutura, conforme verificado na revisão bibliográfica realizada. As fontes utilizadas são referências acadêmicas nacionais e estrangeiras, além de práticas comerciais oferecidas no mercado.

3.1 Limitações da pesquisa

- O julgamento dos resultados de uma inspeção é uma discussão a parte que requer um corpo de profissionais qualificados e uma análise completa da situação que se

está avaliando. Dessa forma, esse procedimento não substitui o julgamento do profissional responsável pela avaliação da estrutura. A qualificação do profissional responsável pela inspeção está apresentada no item 4.1 Manuais, guias e normas existentes.

- A falta de dados primários relacionados a patologias em fundações e, mais especificamente, em fundações de aerogeradores impediu que este procedimento se direcionasse para as manifestações patológicas mais comuns e representativas com base em estatística. Sendo feita, portanto, uma indicação das anomalias a serem observados com base em revisão bibliográfica relacionada a diferentes estruturas de concreto. Essas anomalias estão apresentadas no item 4.2 Anomalias a observar em campo.
- A classificação da gravidade das anomalias é uma tarefa complexa que não caberá aqui desenvolver. Dessa forma, será atribuída uma classificação genérica e simplificada baseada na ANA (2016) que define a magnitude das anomalias como insignificante (I), pequena (P), média (M) e grande (G), conforme apresentado no item 4.3 Procedimento de Inspeção Visual.
- Este procedimento não pretende esgotar o assunto, uma vez que é um tema complexo e abrangente. O intuito, então, é introduzir a discussão sobre a inspeção de fundações de aerogeradores e fazer convergir os conhecimentos existentes da engenharia para que se evolua ao longo do tempo em um método de inspeção e monitoramento específico para estas estruturas.

4 RESULTADOS

4.1 Manuais, guias e normas existentes

A revisão da bibliografia mostrou que não há no Brasil uma norma vigente que determine um procedimento padronizado para inspeção de estruturas de concreto. No momento da elaboração deste trabalho verificou-se que, o que se tem, são diferentes normativas relacionadas a estruturas específicas – como barragens, pontes e viadutos –, normas quanto a ensaios dos materiais e a norma ABNT NBR 16.230:2013 (ABNT, 2013) que aborda a qualificação dos profissionais responsáveis pela inspeção em estruturas de concreto.

O tema da qualificação dos profissionais é abordado também na bibliografia consultada como na norma DNIT 010/2004, na norma ABNT NBR 9452:2023, no Manual da Agência Nacional de Águas (ANA) e na dissertação de Mitre (2004). Sobre esse assunto, ABNT NBR 16.230:2013 define requisitos mínimos de escolaridade para os profissionais inspetores, experiência necessária, conteúdo de um programa básico de treinamento para inspetores, entre outros critérios de qualificação para estes profissionais. Outra contribuição relevante dessa norma é a definição de inspeção de estruturas de concreto como sendo:

conjunto de procedimentos técnicos especializados que compreendem a coleta de dados necessários e a formulação de diagnóstico e prognóstico da estrutura, visando manter ou reestabelecer seus requisitos de segurança estrutural, funcionalidade e durabilidade (ABNT, 2013, p. 1).

Nesse contexto o inspetor tem o papel de atribuir a avaliação da estrutura que lhe parecer mais adequada conforme sua experiência e qualificação profissional, assim como sugerir as intervenções necessárias e suas prioridades. De acordo com o levantamento realizado, toda inspeção tem um resultado no qual a análise do inspetor é indispensável.

Além das normas, foram levantadas outras referências que abordam inspeções em estruturas de concreto como obras de arte especiais (OAE), barragens, galerias de drenagem e estruturas de concreto em geral. O Quadro 2, a seguir, mostra as referências selecionadas para essa pesquisa quanto ao tipo de inspeção proposto, aplicação de cada tipo, frequência, padronização do procedimento e resultados esperados.

Quadro 2. Síntese dos manuais, guias e normas para inspeção de estruturas de concreto.

Tipo de documento	Órgão / Autor	Título	Ano de publicação	Estrutura à qual se aplica	Tipos de inspeção propostos	Aplicação	Frequência	Possui fichas de inspeção padronizada?	Resultados
Norma	Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2023c)	ABNT NBR 9452:2023 - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas - procedimento	Publicada em 1986 e atualizada em 2023	Pontes, viadutos e passarelas feitos de concreto, aço ou mistas de aço e concreto.	Cadastral	A ser efetuada após a conclusão da implantação ou quando houver alterações na configuração.	1 vez.	Sim	Classificação da condição da OAE com notas (0 a 5) segundo parâmetros estruturais, funcionais e de durabilidade. Relatório padronizado conforme roteiro e ficha descritos no anexo da norma para cada tipo de inspeção.
					Rotineira	Acompanhamento periódico.	Anual: OAE em geral A cada dois anos: OAE da malha ferroviária.	Sim	
					Especial	Formular um diagnóstico detalhado e os procedimentos recomendados para restituir os requisitos de segurança estrutural, funcionalidade e durabilidade da estrutura. Pode ser necessária a utilização e equipamentos especiais para acesso a elementos ou partes da estrutura.	A cada 5 a 8 anos, conforme critérios especificados na norma.	Sim	
					Extraordinária	Gerada por demanda quando da ocorrência de impacto, sinistro ou evento natural extremo. Pode ser necessária a utilização e equipamentos especiais para acesso a elementos ou partes da estrutura.	Sob demanda.	Não	
Norma	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2004)	DNIT 010/2004 – PRO - Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - Procedimento	2004	Pontes e viadutos de concreto armado e protendido, podendo, também, ser aplicadas em inspeções de pontilhões e bueiros.	Cadastral	Imediatamente após a conclusão da obra ou quando a obra é submetida a importantes alterações estruturais.	1 vez.	Sim	--
					Rotineira	Verificação visual da evolução de falhas detectadas em inspeção anterior, bem como identificação de novos defeitos e ocorrências.	A cada dois anos.	Sim	Classificação da condição da OAE com notas (1 a 5) segundo parâmetros estruturais.
					Especial	Inspeções visuais pormenorizadas, realizadas por um inspetor sênior; as partes de difícil acesso serão examinadas através de lunetas, andaimes ou veículos especiais dotados de lança e gôndolas. Pode, ainda, ser necessário complementar as observações e medições convencionais com medidas de flechas e deformações, efetuadas com instrumental de precisão.	A cada 5 anos.	Não	Relatório não padronizado, mas dentro dos parâmetros da inspeção rotineira.
					Extraordinária	Inspeção não programada, solicitada para avaliar um dano estrutural excepcional, causado pelo homem ou pela natureza.	Quando ocorrer um grave acidente na obra.	Não	Relatório não padronizado.
					Intermediária	Inspeção recomendada para monitorar uma deficiência suspeitada ou já detectada, tal como um pequeno recalque de fundação, uma erosão incipiente, um encontro parcialmente descalçado, o estado de um determinado elemento estrutural etc.	Quando recomendado por inspeções anteriores.	Não	Relatório não padronizado.
Manual	Agência Nacional de Águas* (ANA, 2016)	Manual do Empreendedor – Volume II - Guia de Orientação e Formulários para	2016	Barragens de contenção de água, compreendendo o barramento e	Regular	Detectar a existência de anomalias e identificar perigos em potencial e iminentes da barragem.	Mínimo 1 vez por ano**	Sim	Relatório com fichas de inspeção padronizadas e extrato da inspeção contendo o nível de perigo da barragem,

Tipo de documento	Órgão / Autor	Título	Ano de publicação	Estrutura à qual se aplica	Tipos de inspeção propostos		Aplicação	Frequência	Possui fichas de inspeção padronizada?	Resultados
		Inspeções de Segurança de Barragem		estruturas associadas	Especial		Verificar a condição de segurança da barragem após ocorrências excepcionais como sismos, cheias, depleção rápida do reservatório, entre outros.	Quando ocorrer evento extremo ou em fases delicadas do empreendimento, como antes e depois do enchimento do reservatório.	Sim, caso necessário	nível de perigo das anomalias e necessidades de reparo. Relatório com parecer sobre as condições da estrutura e indicação de medidas detalhadas para correção dos problemas, se houver.
Dissertação de mestrado	Marcos Pedrosa Mitre (MITRE, 2003)	Metodologia para inspeção e diagnóstico de pontes e viadutos de concreto	2003	Viadutos de concreto	Apenas um tipo dividido em duas etapas	Preliminar	Vistoria expedita para identificação do estado geral da OAE e levantar informações para o planejamento da inspeção detalhada	Não definida	Não	Fotografias, croquis, resultados de ensaios exploratórios.
						Detalhada	Inspeção e diagnóstico de problemas patológicos associados à durabilidade da estrutura	Não definida	Sugere elaborar previamente à inspeção, mas não define um modelo	Relatório de inspeção, parecer técnico sobre a condição da OAE e recomendações.
Monografia de especialização <i>lato sensu</i>	Rodrigo Tavares Nelli (NELLI, 2012)	Patologia das estruturas de concreto em obras de arte: metodologia de gestão de inspeção em galerias de águas pluviais e canais	2012	Galerias de águas pluviais e canais	Apenas um tipo dividido em três fases	Fase primária	Levantamento da dimensão do trabalho, verificação das limitações <i>in loco</i> e definição do método de inspeção (visual ou remota)	Não definida	Não	Boletim de inspeção com diagnóstico estrutural e o grau de urgência das intervenções.
						Fase intermediária	Elaboração do plano de ataque e realização da inspeção	Não definida	Não	
						Fase final	Elaboração dos laudos e determinação de critérios para realização de inspeções futuras.	Não definida	Não	
Artigo científico	Angelica Gasparetto, João da Costa Pantoja e Fernando Busato Ramires (GASPARETTO; PANTOJA; RAMIRES, 2021)	Metodologia para inspeção e avaliação de segurança e durabilidade de estruturas de concreto armado	2021	Estruturas de concreto armado em geral	Apenas um tipo		Diagnóstico, inspeção e classificação dos danos <i>in loco</i> para posterior análise da perda de resistência por simulação computacional	Não definida	Sim	Análise do desempenho da estrutura considerando a redução da resistência em função da deterioração.

*O Manual do Empreendedor da Agência Nacional de Águas fornece diretrizes com base nas determinações da Lei 12.334/2010 que estabelece diretrizes para a Política Nacional de Segurança de Barragens. A regulamentação conforme a finalidade da barragem e regulamentações específicas são definidas pelos órgãos responsáveis como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para barragens de geração de energia e a Agência Nacional de Águas (ANA) para barragens de captação de água.

** Para barragens a periodicidade é definida por lei conforme o nível de risco e dano potencial da barragem.

Observa-se que as normas e o manual da ANA apresentam os tipos de inspeção e sua frequência de forma bem estruturada, definindo o que precisa ser feito e quando. Por vezes até atrelada a requisitos legais, como é o caso das barragens que possuem grande impacto social e ambiental se ocorrer sua ruptura. Por outro lado, as demais referências têm enfoque maior em como analisar o que foi levantado em campo e como complementar esta análise com técnicas de investigação não visuais. Aspecto comum de todas as referências é a necessidade de realizar um exame prévio da estrutura a ser inspecionada, seja por uma inspeção cadastral, seja por uma visita preliminar não estruturada.

O procedimento proposto nesse trabalho se adequa a inspeção do tipo cadastral e preliminar, conforme tipos apresentados no quadro acima. Pode servir ainda para inspeções rotineiras e para fornecer insumos para inspeções especiais, extraordinárias e diagnósticas conforme as tipologias acima. Quando a inspeção for rotineira, os dados levantados e registrados de maneira padronizada servirão para construir o histórico da estrutura, o que permitirá, ao deparar-se com uma manifestação patológica impactante no futuro, se estabelecer uma melhor compreensão do cenário. Para os aerogeradores, conforme apresentado anteriormente neste trabalho, em geral são esperadas inspeções no fim de garantia, no fim da vida útil e para determinar se haverá extensão da vida útil.

É válido destacar, por fim, que uma inspeção não é uma atividade fim, mas sim um meio pelo qual se obtém dados desejados sobre uma estrutura. Sendo assim, a inclusão desse procedimento no contexto do objetivo ao qual ela se propõe permitirá adaptá-lo para tal finalidade.

4.2 Anomalias a observar em campo

As principais anomalias a observar em campo durante as inspeções visuais estão descritas a seguir. Destacou-se tais aspectos em função de sua recorrência e representatividade com base no levantamento bibliográfico realizado (SOUZA; RIPPER, 1998; ANA, 2016; ANGELO, 2004; BARONI, 2010; GONÇALVES, 2003; MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2005; MITRE, 2005). Como anomalia entende-se qualquer manifestação patológica, deficiência, irregularidade, anormalidade ou deformação que possa afetar a segurança da estrutura, tanto em curto como em longo

prazo, ou descaracterizar a estrutura em relação a sua concepção original (ANA, 2016; ABNT, 2023c). Após a apresentação das anomalias, o item 4.3 Procedimento de Inspeção Visual apresenta como registrar cada uma delas nas fichas de inspeção.

4.2.1 Fissuras no concreto

Conforme destacado pela ABNT NBR 6118:2023, “a fissuração de elementos estruturais de concreto é inevitável; mesmo sob as ações de serviço (utilização), valores críticos de tensão e tração são atingidos” (ABNT, 2023a, p. 79). As fissuras podem ter ainda diferentes origens, conforme a referida norma, como retração plástica térmica ou devido a reações químicas internas nos anos iniciais da estrutura. O bom desempenho do cobrimento do concreto para a proteção das armaduras quanto à corrosão depende do controle da abertura de fissuras.

A ABNT NBR 6118:2023, no item 13.4, define limites para fissuração e proteção das armaduras conforme a CAA e o emprego das armaduras (se ativa ou passiva). A referida norma destaca que, devido à alta variabilidade de grandezas envolvidas, os valores-limites para abertura característica das fissuras (w_k) devem ser vistos como critérios para um projeto adequado de estruturas, porém “não se deve esperar que as aberturas de fissuras reais correspondam estritamente aos valores estimados, isto é, fissuras reais podem eventualmente ultrapassar esses limites” (ABNT, 2023a, p. 79). Isto é, os valores indicados pela norma servem como referência, mas por si só não esgotam o diagnóstico da estrutura quanto ao desempenho relativo à proteção das armaduras. Em síntese, tem-se os seguintes valores-limites para concreto armado (Quadro 3):

Quadro 3. Exigências mínimas relativas à fissuração e à proteção da armadura em função da Classe de Agressividade Ambiental (CAA).

Tipo de concreto estrutural	Classe de Agressividade Ambiental	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto armado	CAA I	$w_k \leq 0,4 \text{ mm}$	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	$w_k \leq 0,3 \text{ mm}$	
	CAA IV	$w_k \leq 0,2 \text{ mm}$	

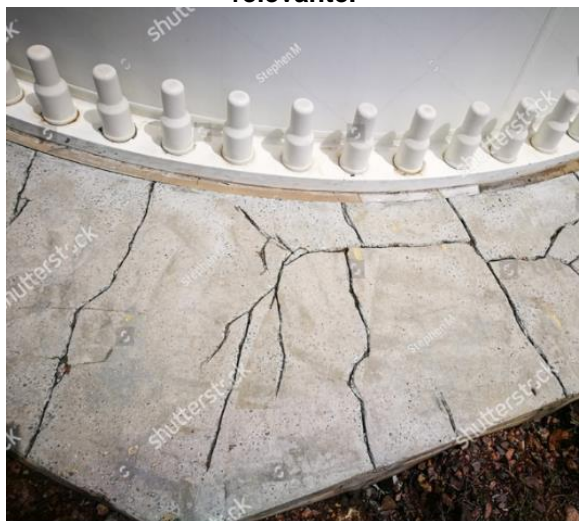
Fonte: Elaborado pela autora com base em ABNT (2023a).

De acordo com o exposto por Souza e Ripper (1998), a fissuração é considerada a manifestação patológica característica das estruturas de concreto, sendo o dano mais comum. A caracterização da fissuração como deficiência estrutural

depende de uma análise mais global da ocorrência, contemplando a origem, intensidade e magnitude da fissuração. Os autores salientam que como primeiras ações frente a identificação de fissurações visando a elucidação das suas causas, cabe o mapeamento das fissuras e a definição de sua atividade, se ativa ou passiva. Quando ativa, considera-se que o mecanismo responsável pela origem da fissuração ainda atua sobre a estrutura, quando passiva considera-se que a fissuração está inativa, assim como seu mecanismo de origem (SOUZA; RIPPER, 1998).

As fissuras podem se apresentar em diferentes magnitudes, conforme ilustrado nas imagens abaixo, que mostram fissuras no concreto de primeiro estágio da porção externa da fundação de um aerogerador (Figura 24 e Figura 25). A foto da esquerda mostra a porção exterior da fundação com fissuras de grande relevância, enquanto a da direita apresenta uma fissura quase imperceptível, porém válida de ser registrada.

Figura 24. Porção externa da fundação de um aerogerador – fissuras de abertura relevante.



Fonte: M (2017).

Figura 25. Porção externa da fundação de um aerogerador – fissura radial de pequena abertura.



Fonte: imagem da autora.

Igualmente, as fissuras no concreto de segundo estágio (graute) poderão favorecer o ingresso de agentes degradantes e água no sistema de ancoragem da torre com a fundação e no próprio corpo da fundação, através de fissuras não visíveis superficialmente. As imagens abaixo (Figura 26 e Figura 27) ilustram as referidas fissuras.

Figura 26. Porção externa da fundação de um aerogerador – fissuras no graute de alta resistência.



Fonte: imagem da autora

Figura 27. Porção externa da fundação de um aerogerador – fissuras no graute de alta resistência.



Fonte: imagem da autora.

Além das fissuras apresentadas acima, pode haver um desnível entre o concreto de primeiro e segundo estágio originário da construção. Embora não se trate propriamente de uma fissura, esse desnível pode provocar também um espaçamento, uma espécie de fenda, entre os materiais. Após executado, esse desnível pode favorecer o ingresso de água e agentes degradantes através do contato entre os dois materiais. O desnível também dificulta a execução de uma camada seladora sobre o contato entre o concreto de primeiro e segundo estágio, caso seja necessário executar. A imagem abaixo (Figura 28) ilustra o referido desnível.

Figura 28. Porção externa da fundação de um aerogerador – desnível entre o graute e o concreto de primeiro estágio.



Fonte: imagem da autora

4.2.2 Deslocamento do concreto

A desagregação do concreto é outro fenômeno frequente que pode ter origens diversas, em geral se manifestando por meio do desprendimento de placas ou fatias do concreto (SOUZA; RIPPER, 1998). Uma peça que apresenta desagregação terá, pelo menos localmente, perda da capacidade de resistência aos esforços solicitantes. A corrosão das armaduras, quando em estado avançado, pode também provocar deslocamentos (ANGELO, 2004). Além disso, conforme exposto por Baroni (2010), a fadiga da armadura pode provocar fissurações e, conseqüente, o deslocamento do concreto. As imagens abaixo exemplificam esse fenômeno (Figura 29 e Figura 30).

Figura 29. Porção externa da fundação – deslocamento.



Fonte: Asareh (2023)

Figura 30. Porção externa da fundação – deslocamento.



Fonte: Barba (2018)

4.2.3 Armadura exposta e corrosão

A corrosão das armaduras leva a perda de aderência entre o aço e o concreto, comprometendo o comportamento estrutural desses materiais que são sempre empregados em conjunto (SOUZA; RIPPER, 1998). Além disso, a corrosão da armadura pode levar a deslocamentos no concreto, como informado no item acima, e a diminuição da seção de aço, interferindo na resistência a tração (SOUZA; RIPPER, 1998). As imagens a seguir ilustram esse fenômeno (Figura 31 e Figura 32).

Figura 31. Porção externa da fundação – armadura exposta e corrosão.



Fonte: Duomit (2024)

Figura 32. Porção externa da fundação – armadura exposta e corrosão.



Fonte: Chaibangyang (2024)

4.2.4 Lixiviação

O processo de lixiviação, conforme exposto por Souza e Ripper (1998), é um tipo de corrosão sofrida pelo concreto quando ocorre dissolução e arraste do hidróxido de cálcio existente na massa de cimento devido ao ingresso de água. Quanto mais poroso for o concreto, maior será a intensidade da corrosão. Segundo os autores, o avanço desse processo leva, com o passar o tempo, ao enfraquecimento da estrutura, por meio do surgimento de fissuração, de corrosão das armaduras e da desagregação do concreto. A manifestação da lixiviação a ser verificada na inspeção visual está representada na imagem abaixo (Figura 33).

Figura 33. Porção interna da fundação – lixiviação.



Fonte: Sabai (2015)

4.2.5 Fissuras, acúmulo de água e afundamento no pavimento de reaterro

O pavimento de reaterro tem função de fornecer uma carga estabilizadora para a fundação do aerogerador, podendo ter suas propriedades mecânicas alteradas no caso de ingresso excessivo de água. Dessa forma, a fissuração no aterro deve ser evitada, assim como o acúmulo de água em sua superfície, pois é através das fissuras que o fluxo de água encontra seu caminho preferencial podendo se armazenar próximo à fundação. Costa (2015) destaca que a formação de fissuras por ressecamento na superfície do solo é um fenômeno natural e que a propagação das fissuras será regida pelo estado de tensões do solo e pela sua capacidade de dissipar energia. Ou seja, prossegue o autor, a propagação das trincas tende a ser regida pela mecânica da fissura (COSTA, 2015). Laksmikantha (2009) classifica a fissuração do solo conforme sua origem em quatro tipos:

- I. Retração: as fissuras de retração ocorrem na camada mais superficial do solo devido a perda de água e o reequilíbrio de tensões. Pela perda de água, o solo perde a capacidade de receber essas tensões e se deforma plasticamente, gerando fissuras com formas geométricas.
- II. Variação térmica: as fissuras por estresse térmico ocorrem quando há variação significativa de temperatura no solo, como congelamento ou umedecimento e secagem rápida do solo. No solo, as trincas por variação térmica são diferentes dos outros materiais, pois no solo a temperatura e a umidade são intimamente relacionadas e o estado de tensões do solo é sensível a essas características simultaneamente.
- III. Tração: as fissuras de tensão são associadas, principalmente, a sobrecarga do solo por meio de cargas estruturais, chuva, vegetação, neve, entre outros.
- IV. Fraturamento: nas fissuras por fraturamento o mecanismo principal é a poropressão, que ocorre quando as fissuras provocadas pela variação de umidade e temperatura diárias favorecem o ingresso de água preenchendo os vazios do solo, bem como quando há variação do nível do lençol freático.

A seguir apresenta-se algumas imagens de ocorrências de fissuras em solos de reaterro de fundações de aerogeradores (Figura 34 a Figura 36). Dado o exposto acima e a complexidade envolvida na análise, não caberá aqui discorrer sobre o mecanismo de origem de cada uma. Ficando, portanto, as imagens como referências do que pode ser encontrado em campo, pois, como citado anteriormente, o diagnóstico deve ser realizado por especialistas capacitados. Encontra-se abaixo também uma imagem de exemplo de indícios de acúmulo de água adjacente à fundação (Figura 37).

Figura 34. Pavimento de reaterro – fissura radial.



Fonte: imagem da autora

Figura 35. Pavimento de reaterro – fissura perimetral.



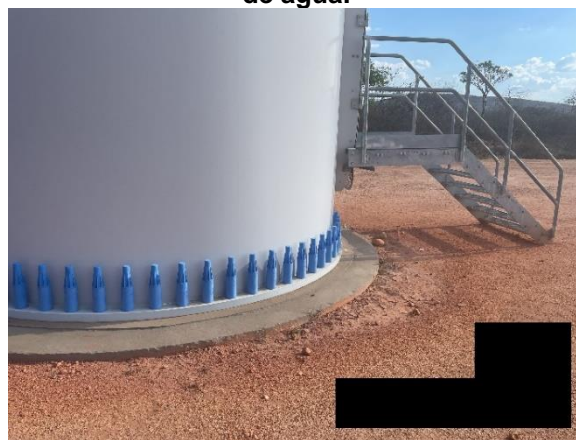
Fonte: imagem da autora.

Figura 36. Pavimento de reaterro – fissura perimetral.



Fonte: imagem da autora

Figura 37. Pavimento de reaterro – acúmulo de água.



Fonte: imagem da autora

4.3 Procedimento de Inspeção Visual

Após identificar quais as anomalias a serem analisadas, deve-se partir para o planejamento e execução da inspeção visual de campo. O procedimento de inspeção é dividido nas etapas de planejamento e execução. A etapa de planejamento consiste na coleta de dados iniciais e conferência de requisitos para a inspeção. Já a etapa de execução se dá pela inspeção visual em campo, que se divide na inspeção

das estruturas de concreto da fundação (interna e externa) e do pavimento de reaterro. Com isso, ao todo propõe-se 3 fichas: uma de itens a serem verificados no planejamento (que pode ser preenchida em escritório) e duas de inspeção visual, sendo uma da fundação e outra do pavimento de reaterro (a serem preenchidas em campo).

4.3.1 Planejamento

A etapa de planejamento compreende o levantamento de dados e informações referente a estrutura a ser inspecionada e a identificação das ferramentas, equipamentos de proteção individual (EPI) e coletiva (EPC) necessários para a atividade. Os itens necessários estão sumarizados na lista abaixo (Quadro 4) e descritos a seguir conforme sua identificação (sigla "Id").

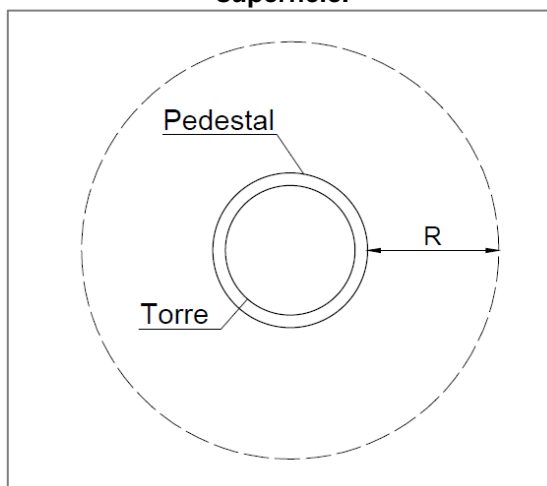
Quadro 4. Ficha de verificação – Planejamento.

Id PLANEJAMENTO	
1.	Data da inspeção: _____
2.	Nome do parque eólico: _____
3.	Número do aerogerador: _____
4.	Fabricante: _____
5.	Potência: _____
6.	Tipo de fundação: _____
7.	Distância da projeção da fundação: _____
8.	Tipo de ligação torre-fundação: _____
9.	Classe de Agressividade Ambiental (CAA):
	<input type="checkbox"/> Classe I
	<input type="checkbox"/> Classe II
	<input type="checkbox"/> Classe III
	<input type="checkbox"/> Classe IV
10.	Direção predominante do vento:
	<input type="checkbox"/> N (Norte) <input type="checkbox"/> NE (Nordeste)
	<input type="checkbox"/> E (Leste) <input type="checkbox"/> SE (Sudeste)
	<input type="checkbox"/> S (Sul) <input type="checkbox"/> SW (Sudoeste)
	<input type="checkbox"/> W (Oeste) <input type="checkbox"/> NW (Noroeste)
11.	Ferramentas necessárias: - - -
12.	Lista de EPIs e EPCs: - - -
13.	Será acessada a porção interna da fundação? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO
14.	Participantes da inspeção: - - -
15.	Projetos disponíveis: -

Id PLANEJAMENTO	
	- - -
16.	Fatos relevantes do histórico da estrutura
17.	Comentários:

- 1. Data da inspeção:** registrar a data da inspeção, essa informação servirá para demarcar no tempo o estado da estrutura, permitindo realizar comparações no futuro e associar seu estado a eventos que possam ter acontecido.
- 2. Nome do parque eólico:** registrar o nome do parque e o nome do proprietário.
- 3. Número de aerogerador:** indicar o número do aerogerador, conforme numerado pela gestão do parque, permitindo que ele seja identificado fácil e inequivocamente.
- 4. Fabricante:** registrar o nome do fabricante do aerogerador, por exemplo: General Electric, Vestas, Siemens Gamesa, entre outras.
- 5. Potência e modelo:** anotar a potência e o modelo do aerogerador, informação que servirá para buscar similaridades com outras possíveis manifestações patológicas, caso haja.
- 6. Tipo de fundação:** identificar a solução empregada para a fundação, tais como fundação direta simples, fundação direta ancorada, fundação direta com solo tratado, fundação profunda com estacas cravadas, entre outras.
- 7. Distância da projeção da fundação:** a distância da projeção da fundação deve ser contada a partir da borda do pedestal, isto é, do limite visível do bloco de fundação no nível do solo (Figura 38). Sugere-se ter em mãos esse parâmetro, pois, dessa forma, a medição em campo com trena ficará facilitada. Esse parâmetro servirá para interpretar possíveis fissuras no pavimento de reaterro.

Figura 38. Raio (R) entre a borda do pedestal e a projeção (tracejado) do limite de fundação na superfície.



Fonte: elaborado pela autora.

8. **Tipo de ligação torre-fundação:** indicar qual a forma de ligação entre a torre e a fundação (anel de aço, *anchor cage* ou outra). Essa informação permitirá interpretar possíveis manifestações patológicas a serem identificadas *in loco*.
9. **Classe de Agressividade Ambiental (CAA):** a identificação da classe de agressividade ambiental, conforme a norma ABNT NBR 6118:2023, fornecerá subsídios para a compreensão do impacto físico e químico sofrido pela estrutura conforme o local em que está implantada.
10. **Direção predominante do vento:** a direção predominante que o vento incide sobre a estrutura implicará no comportamento das ações resistentes. A face da estrutura voltada para a direção predominante se encontrará sob tração favorecendo a abertura de fissuras tanto do concreto quanto do pavimento de reaterro. A face oposta ao vento predominante estará sob compressão, sendo a incidência de fissuras menos provável.
11. **Ferramentas necessárias:** listar as ferramentas que serão necessárias em campo para realização da inspeção visual, como: fissurômetro, trena, câmera fotográfica ou similar, fichas de inspeção, caderneta para anotações e croquis, caneta, entre outros.
12. **Lista de EPIs e EPCs:** identificação dos equipamentos de proteção individual e coletiva conforme os riscos do serviço e as normas de segurança vigentes para o local. Os riscos aos quais o profissional que irá realizar a inspeção estará exposto variam conforme o local e a configuração da estrutura. São exemplos de riscos: radiação solar elevada, desnível maior que 2 metros para acessar o nível mais baixo da parte interna da fundação sem meios seguros de acesso, exposição animais peçonhentos, queda de materiais, entre outros.
13. **Será acessada a porção interna da fundação?** Responder a essa pergunta levará a identificação da necessidade de, possivelmente, solicitar o desligamento do aerogerador ou mesmo conciliar a data da inspeção com a parada da máquina. Não acessar a porção interior da fundação enquanto o aerogerador está energizado é uma boa prática que geralmente é seguida pelas usinas eólicas, dessa forma, essa restrição é um item a ser verificado no planejamento da campanha de inspeção. O acesso a porção interna da fundação permitirá verificar as anomalias no restante da superfície acessível da estrutura.
14. **Participantes da inspeção:** nomes dos profissionais participantes na inspeção.
15. **Projetos disponíveis:** reunir e registrar uma listagem dos projetos disponíveis, preferencialmente como construído (*as built*), tais como: memoriais de cálculo, planta e cortes de formas e armaduras da fundação, desenhos da ancoragem torre-fundação, projeto geotécnico do pavimento de reaterro, projeto de drenagem, entre outros. É válido incluir nesse levantamento os relatórios de obra, se disponíveis, relacionados ao controle de qualidade do concreto, das estacas, *checklists* de montagem e instalação das estruturas civis.
16. **Fatos relevantes do histórico da estrutura:** o levantamento de eventos ocorridos e fatos relevantes do histórico da estrutura ajudará a guiar o trabalho de campo, ressaltando os pontos de atenção, se houver.

17. Comentários: espaço reservado para o registro de comentários e observações que venham a esclarecer dúvidas ou complementar informações relacionadas aos itens anteriores.

4.3.2 Execução da inspeção visual em campo

A etapa de execução contempla a inspeção visual das estruturas de concreto da fundação, externamente e internamente, e do pavimento de reaterro. Os itens verificados em campo são classificados conforme sua situação e sua magnitude e registrados nas fichas. O Quadro 5 descreve as possíveis situações das anomalias verificados em campo, como a indicação de que ela não existe (NE), de que foi identificada pela primeira vez (PV) ou de que aumentou desde a inspeção anterior (AU), por exemplo.

Quadro 5. Situação dos itens verificados na inspeção visual – legenda e descrição.

SITUAÇÃO	DESCRIÇÃO
NA	Não Aplicável: item examinado não é pertinente ao local que está sendo inspecionado.
NE	Não Existente: a anomalia relacionada no item não existe no local inspecionado.
PV	Primeira Vez: quando a anomalia é constatada pela primeira vez, seja por não ter havido inspeção antes, seja por não ter sido identificada em inspeções anteriores.
DS	Desapareceu: quando a anomalia identificada em uma inspeção anterior deixou de existir.
DI	Diminuiu: quando é constatado que a anomalia diminuiu em relação à inspeção anterior.
PC	Permaneceu Constante: a anomalia não apresenta alterações em relação à inspeção anterior.
AU	Anomalia Aumentou: a anomalia apresenta aumento em relação à inspeção anterior.
NI	Não Inspecionado: aplicável quando um item, por alguma razão, não é verificado na inspeção.

Fonte: Elaborado pela autora com base em ANA (2016, p. 64).

O Quadro 6 descreve a magnitude das anomalias identificadas, podendo ser desde insignificante (I) até grande (G), cabendo esse julgamento ao inspetor.

Quadro 6. Magnitude dos itens verificados na inspeção visual – legenda e descrição.

MAGNITUDE	DESCRIÇÃO
I	Insignificante: anomalia de pequena dimensão sem evolução aparente.
P	Pequena: anomalia de pequena dimensão com evolução ao longo do tempo.
M	Média: anomalia de média dimensão sem evolução aparente.
G	Grande: anomalia de média dimensão com evolução aparente ao longo do tempo ou anomalia de grande dimensão.

Fonte: Elaborado pela autora com base em ANA (2016, p. 64).

As fichas de inspeção visual foram concebidas com base nas inspeções realizadas em campo e na revisão bibliográfica. A ficha de inspeção visual da fundação (Quadro 7) contempla os itens a serem verificados em campo e a descrição de cada um, conforme uma numeração de identificação (sigla “Id”). A mesma dinâmica será aplicada para a ficha de inspeção do pavimento de reaterro (Quadro 8), a ser apresentada mais adiante.

Recomenda-se, além do preenchimento da ficha, realizar o registro fotográfico das ocorrências identificadas em campo para que sejam incluídas posteriormente no relatório de inspeção. Sugere-se capturar uma fotografia mais geral e outra mais aproximada, sempre contendo alguma referência como caneta, fissurômetro ou outro elemento de dimensão conhecida para facilitar a interpretação da dimensão do que foi fotografado. O registro dos itens em campo pode ser realizado em papel, imprimindo-se as fichas e levando a campo. Pode ser realizado ainda em meio digital, como aplicativos e softwares, o que, evidentemente, dependerá da infraestrutura disponível para a realização da atividade.

a) *Ficha de inspeção da fundação:*

Quadro 7. Ficha de inspeção – Fundação.

EXECUÇÃO – INSPEÇÃO VISUAL DA FUNDAÇÃO ¹													
Id	Localização/Anomalia	Situação ²								Magnitude ³			
		NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
EXTERNA													
1.	Ocorrência de fissuras no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
2.	Ocorrência de fissuras no graute de alta resistência	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
3.	Desnível ou espaçamento entre o concreto da fundação e o graute de alta resistência	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
4.	Parafusos de ancoragem sem capa de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
5.	Desplacamento do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
6.	Armadura exposta e corrosão	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
7.	Comentários:												
INTERNA													
8.	Ocorrência de fissuras no concreto da fundação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
9.	Desplacamento do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
10.	Armadura exposta e corrosão	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
11.	Lixiviação do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
12.	Sinais de entrada de água	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
13.	Comentários:												

¹ Embora a inspeção visual esteja focada na porção visível da fundação, mais superficial, não devem ser descartadas anomalias decorrentes de falhas nas estacas, para o caso de fundações profundas. O que necessitará de ações adicionais às propostas nesse procedimento.

² NA: Não Aplicável; NE: Não Existe; PV: Primeira Vez; DS: Desapareceu; DI: Diminuiu; PC: Permaneceu constante; AU: Anomalia Aumentou; NI: Não inspecionado

³ I: Insignificante; P: Pequena; M: Média; G: Grande

Abaixo seguem as descrições dos itens a serem verificados em campo conforme seu Id apresentado acima. Observar que alguns itens se aplicam igualmente para a parte externa e interna da fundação, como descrito a seguir.

1. **Ocorrência de fissuras no concreto:** verificar a existência de fissuras no concreto de primeiro estágio da fundação, identificando por meio de registro fotográfico e de croqui do local, a densidade de fissuras, o comprimento, a abertura da fissura, entre outros detalhes relevantes para permitir a compreensão da anomalia e a posterior comparação em inspeções futuras.
2. **Ocorrência de fissuras no graute de alta resistência:** no graute de alta resistência o cenário é semelhante ao das fissuras no concreto de primeiro estágio, tanto no mecanismo de surgimento como nas aberturas-limite. O registro também pode ser feito com a mesma lógica: fazer o registro fotográfico e em croqui da densidade de fissuras, do comprimento, da abertura entre outros detalhes relevantes.
3. **Desnível ou espaçamento entre o concreto da fundação e o graute de alta resistência:** efetuar o registro fotográfico da ocorrência, anotar também em croqui, se pertinente. O desnível entre o concreto de primeiro estágio da fundação e o graute de alta resistência tem origem na etapa de construção da obra.
4. **Parafusos de ancoragem sem capa de proteção:** identificar e registrar se há parafusos sem capas de proteção. As capas dos parafusos de ancoragem servem para evitar que os parafusos oxidem, se expostos ao meio ambiente, bem como evitar que a água ingresse na estrutura. A imagem abaixo (Figura 39) mostra parafusos com e sem capa, como exemplo.

Figura 39. Porção externa da fundação – parafusos de ancoragem com e sem capas.



Fonte: Beqiri (2022)

5. **Deslocamento do concreto:** verificar alterações na superfície do concreto, identificando o local e o grau de deterioração. O deslocamento do concreto pode

indicar problemas de corrosão nas armaduras, exposição excessiva do concreto a umidade, fadiga da armadura ou outros problemas.

6. **Armadura exposta e corrosão:** verificar a ocorrência de armaduras expostas e com corrosão, registrando o local e o grau de deterioração. A corrosão das armaduras leva a perda da aderência entre o concreto e o aço, além de comprometer o desempenho estrutural da estrutura.
7. **Comentários:** espaço reservado para o registro de comentários e observações que venham a esclarecer dúvidas ou complementar informações relacionadas aos itens anteriores.
8. **Ocorrência de fissuras no concreto:** a descrição dessa anomalia, disponível no item 1, aplica-se aqui igualmente.
9. **Deslocamento do concreto:** a descrição dessa anomalia, disponível no item 5, aplica-se aqui igualmente.
10. **Armadura exposta e corrosão:** a descrição dessa anomalia, disponível no item 6, aplica-se aqui igualmente.
11. **Lixiviação do concreto:** observar e registrar a localização e dimensão das evidências lixiviação. A lixiviação resulta da entrada de água por meio de pequenas fissuras do concreto, provocando uma reação química, que com o passar do tempo pode ter impacto na durabilidade do concreto da estrutura.
12. **Sinais de entrada de água:** observar se há acúmulo de água no interior da fundação. Caso haja, pode ser indicativo de alguma fissura, falha na selagem ou outra condição não esperada que pode vir a degradar a estrutura com o passar do tempo.
13. **Comentários:** espaço reservado para o registro de comentários e observações que venham a esclarecer dúvidas ou complementar informações relacionadas aos itens anteriores.

b) *Ficha de inspeção do pavimento de reaterro:*

Assim como para as fundações, para o pavimento de reaterro, a ficha é a que segue (Quadro 8).

Quadro 8. Ficha de inspeção – Pavimento de Reaterro.

EXECUÇÃO – INSPEÇÃO VISUAL DO PAVIMENTO DE REATERRO													
Id	Localização/Anomalia	Situação ¹								Magnitude ²			
1.	Fissuras radiais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
2.	Fissuras perimetrais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
3.	Sinais de acúmulo de água	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
4.	Sinais de afundamento/levantamento do solo	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
5.	Presença de vegetação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
6.	Abertura entre a estrutura de concreto e o pavimento de reaterro	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
7.	Erosão na borda dos cortes/aterros	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G

¹ NA: Não Aplicável; NE: Não Existe; PV: Primeira Vez; DS: Desapareceu; DI: Diminuiu; PC: Permaneceu constante; AU: Anomalia Aumentou; NI: Não inspecionado

² I: Insignificante; P: Pequena; M: Média; G: Grande

Abaixo seguem as descrições dos itens a serem verificados em campo conforme seu Id apresentado acima. Observar que alguns itens se aplicam igualmente para a parte externa e interna da fundação, como descrito a seguir.

1. **Fissuras radiais:** observar se há trincas radiais no pavimento de reaterro, partindo da porção visível da fundação em direção ao perímetro da projeção do bloco. Caso haja, registrar suas dimensões (comprimento, abertura) e sua localização em croqui e fotografia. A abertura de trincas pode indicar movimentação do solo.
2. **Fissuras perimetrais:** verificar se há trincas perimetrais no pavimento de reaterro ao redor da porção visível da fundação. Caso haja, registrar suas dimensões (comprimento, abertura) e sua localização em croqui e fotografia. A presença dessas trincas pode indicar movimentação do solo e recalque da estrutura.
3. **Sinais de acúmulo de água:** observar se há indícios de acúmulo de água no pavimento de reaterro, como sedimentos finos acumulados, trechos com afundamentos, entre outras evidências. Isso pode indicar problemas de drenagem. Caso haja, registrar a ocorrência com fotografia e indicar a localização em croqui.
4. **Sinais de afundamento do solo:** verificar se o pavimento de reaterro apresenta regiões com afundamento, isso pode indicar movimentação do solo e problemas de drenagem. Caso haja, registrar a ocorrência com fotografias e indicar a localização em croqui.
5. **Presença de vegetação:** este item se relaciona a manutenção rotineira do parque. Caso haja vegetação nas adjacências da estrutura ou no pavimento do reaterro, registrar e solicitar remoção. O crescimento de raízes pode comprometer tanto a estrutura quanto o solo no reaterro.
6. **Abertura entre a estrutura de concreto e o pavimento de reaterro:** o deslocamento da estrutura da fundação pode provocar o espaçamento entre ela e o pavimento de reaterro. Caso seja identificada essa ocorrência, registrar com fotografia, croqui a e com a medida da abertura.

4.4 Monitoramento e ensaios não destrutivos

Apresenta-se neste item ensaios não destrutivos (END) para estruturas de concreto e uso de equipamentos de medição que podem ser aplicados na fase de operação do aerogerador (pós-obra), retomando uma das perguntas que orienta esta pesquisa, que é: como verificar a segurança e o desempenho de fundações de aerogeradores em fase de operação? O enfoque dos ensaios e ferramentas apresentados se dá em três temas: fadiga, abertura de fissuras e deslocamento vertical (recalque). A literatura referente a END em concreto é vasta, contudo, busca-se aqui estabelecer, na medida do possível, um recorte pautado na literatura

disponível quanto à aplicação desses métodos para fundações de aerogeradores bem como sua aplicabilidade para o monitoramento do comportamento da estrutura já em operação.

4.4.1 Fadiga

O uso de *straining gauges* (ou *strain gage*) para medir o comportamento de estruturas de concreto aparece em uma série de referências bibliográficas disponíveis, incluindo estruturas como pontes, viadutos e barragens. Os estudos de caso apresentados a seguir mostram o uso desse sensor para estimativa da fadiga e como isso pode fornecer dados para estimar a vida útil remanescente de elementos estruturais de aerogeradores. *Strain gauges* são sensores que medem a tensão em um objeto, o que permite interpretar a deformação sofrida por ele, seja de tração, seja de compressão. Esses equipamentos podem ser metálicos, tipo mais comum, ou de fibra ótica, também chamados de FBG (*fiber bragg gratting*, do inglês).

Loroux e Brühwiller (2016) realizaram um monitoramento que durou cerca de 300 dias, com o objetivo de fornecer um modelo de cálculo da vida útil remanescente, com base na fadiga acumulada pela estrutura do aerogerador. A configuração para estabelecer o monitoramento se deu conforme a Figura 40, contemplando: instalação de *strain gauges* (a e b), sensores de temperatura e acelerômetro em pontos estratégicos da torre (a) e um sistema de aquisição de dados (c).

Figura 40. Exemplo de configuração de monitoramento por *strain gauges*.



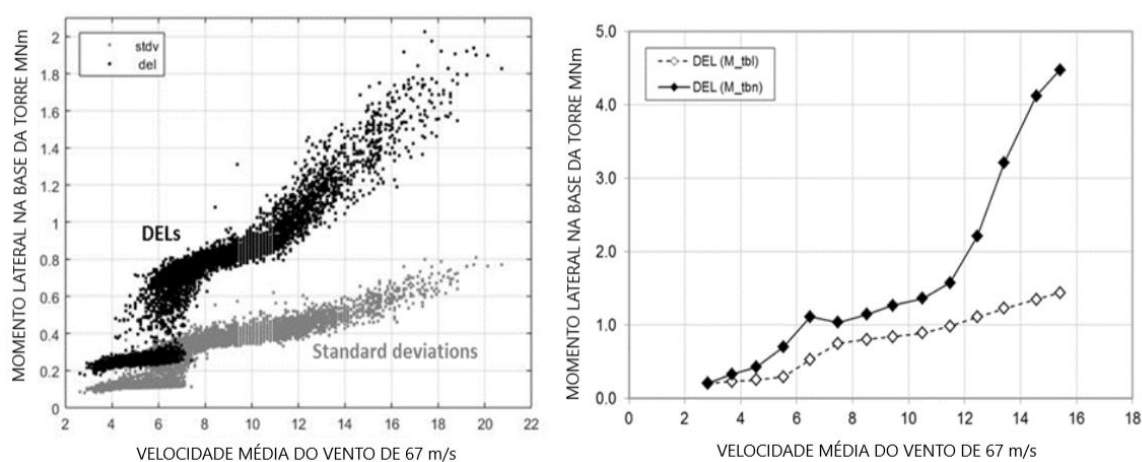
Fonte: Loraux e Brühwiller (p. 2, 2016), tradução nossa.

Foram usados também dados operacionais provenientes do sistema supervisor do equipamento, como o ângulo da nacele e velocidade do rotor, e dados ambientais como velocidade e orientação do vento. O modelo sugerido pelos autores resultou na quantificação do dano total sofrido pela estrutura em função da velocidade do vento que, cruzados com a fadiga estimada em projeto, permitiu inferir a vida útil remanescente da estrutura. Como resultado, após o período monitorado, foi estimado que vida útil remanescente da estrutura é de 135 anos, com um dano médio de fadiga de $2,08 \cdot 10^{-5}$ por dia.

Nesse mesmo sentido, o estudo de Barber, Mechler e Nitschke (2016) mostra que é preciso medir as cargas sofridas pela estrutura durante a operação para se determinar a vida útil restante. Os dados levantados pelos autores, que cobriram um período de 8 meses, foram obtidos por meio de sensores *strain gauges* instalados na base das pás e no topo e base da torre para medir o momento fletor em duas direções perpendiculares e a torção sofrida pela estrutura. Além dos dados do sensor, foram usados dados operacionais como velocidade do rotor, ângulo das pás, posição do rotor, entre outros e dados ambientais sobre o vento.

Os gráficos a seguir (Figura 41) mostram o resultado da medida do momento fletor sofrido pela torre em função da velocidade do vento. No gráfico da esquerda vê-se a velocidade do vento no eixo horizontal e o momento fletor lateral na base da torre no eixo vertical. Cada par ordenado resulta na carga de dano equivalente (sigla *DEL* para *damage equivalente load* no gráfico) com seu respectivo desvio padrão (*standard deviations* no gráfico). No gráfico da direita, vê-se o dano equivalente médio a partir do momento fletor lateral e normal medidos na base da torre, M_{tbl} e M_{tbn} , respectivamente.

Figura 41. Dano equivalente e momento fletor em função da velocidade do vento.



Fonte: Barber, Mechler e Nitschke (p. 4, 2016), tradução nossa.

O trabalho de Rubert *et al* (2019) baseou-se também na estimativa do dano acumulado sofrido pela estrutura, cruzando dados de vento com a tensão medida por *strain gauges* instalados na torre de um aerogerador. O enfoque dos autores foi no comportamento específico da estrutura metálica, contudo, em seu estudo foram feitas pontuações relevantes sobre fundações. Segundo Rubert *et al* (2019), diversos estudos demonstraram que o monitoramento de fundações em torres eólicas é um desafio, uma vez que essas estruturas se encontram predominantemente inacessíveis para inspeções. Nesse sentido, o autor sugere que a quantidade e o grau de severidade das fissuras é o principal elemento que a indicar o estado real da estrutura, uma vez que há limites para sua abertura conforme o ELS.

4.4.2 Abertura de Fissuras

O controle sistemático da abertura de fissuras tem como finalidade caracterizar a gravidade do problema e identificar o estado de atividade da fissura, se ativa ou passiva, conforme sugerido por Milititsky, Consoli e Schnaid (2005). Ainda conforme os autores, a abertura progressiva de fissura em elementos de apoio são indicadores de risco. Portanto, a caracterização de seu comportamento torna-se a base para a análise de sua gravidade sendo geralmente de complexa determinação, junto com sua causa.

A abertura das fissuras pode ser medida com apoio de fissurômetros ou paquímetros. A atividade ou passividade da fissura pode ser determinada a partir da variação dos valores medidos, enquanto variarem significa que a fissura se encontra ativa. Outro método de fácil aplicação é a instalação de lamínulas de vidro fixadas na superfície da estrutura por resina epóxi. O caráter frágil do vidro faz com que ele se rompa caso tensionado, indicando a tendência de movimentação da fissura. A imagem a seguir (Figura 42) ilustra essa aplicação.

Figura 42. Instalação de lamínula de vidro para monitoramento da atividade ou passividade de fissuras.

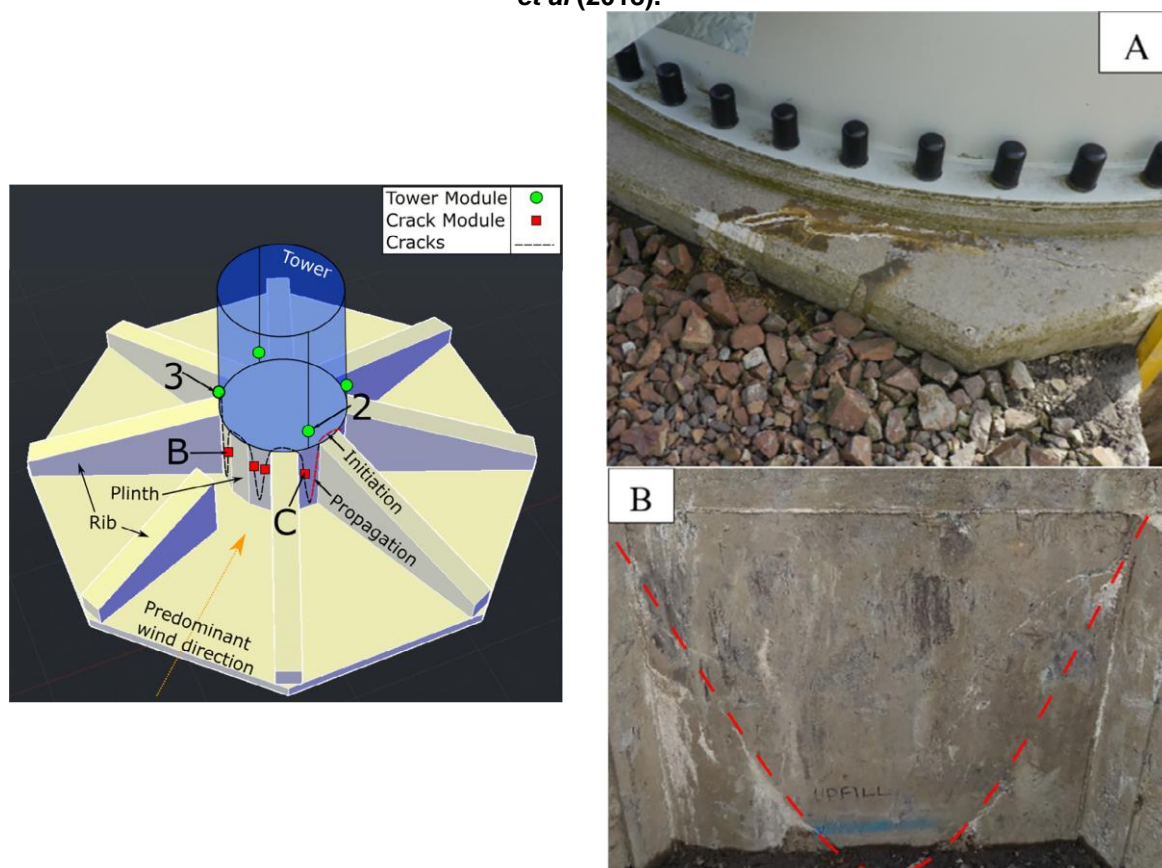


Fonte: imagem da autora.

Outra maneira de monitorar fissuras é por meio da instalação de sensores FBG que, juntamente com dados de vento, permitem acompanhar o grau de fissuração e a evolução da degradação da estrutura enquanto a estrutura encontra-se em operação, conforme apresentado nos trabalhos de McAlorum *et al* (2018) e Perry *et al* (2017).

McAlorum *et al* (2018) realizaram a instalação de sensores FBG na base da torre, a 50 centímetros do chão, com o objeto de medir o momento fletor. Já na fundação, após uma campanha de escavação, os sensores foram instalados na porção externa do plinto nas faces voltadas para o vento predominante, com o intuito de medir a tensão sofrida diretamente pela zona fraturada. A imagem a seguir (Figura 43) mostra: a posição dos sensores, na esquerda, onde está indicada também a linha de propagação da fissura; a fissura vista pela porção superior do plinto (A) e pela porção lateral (B), após a escavação, na direita. O monitoramento durou um período de 9 meses e permitiu concluir que as fissuras monitoradas são superficiais e não apresentam progressão significativa de dano sofrido pela estrutura.

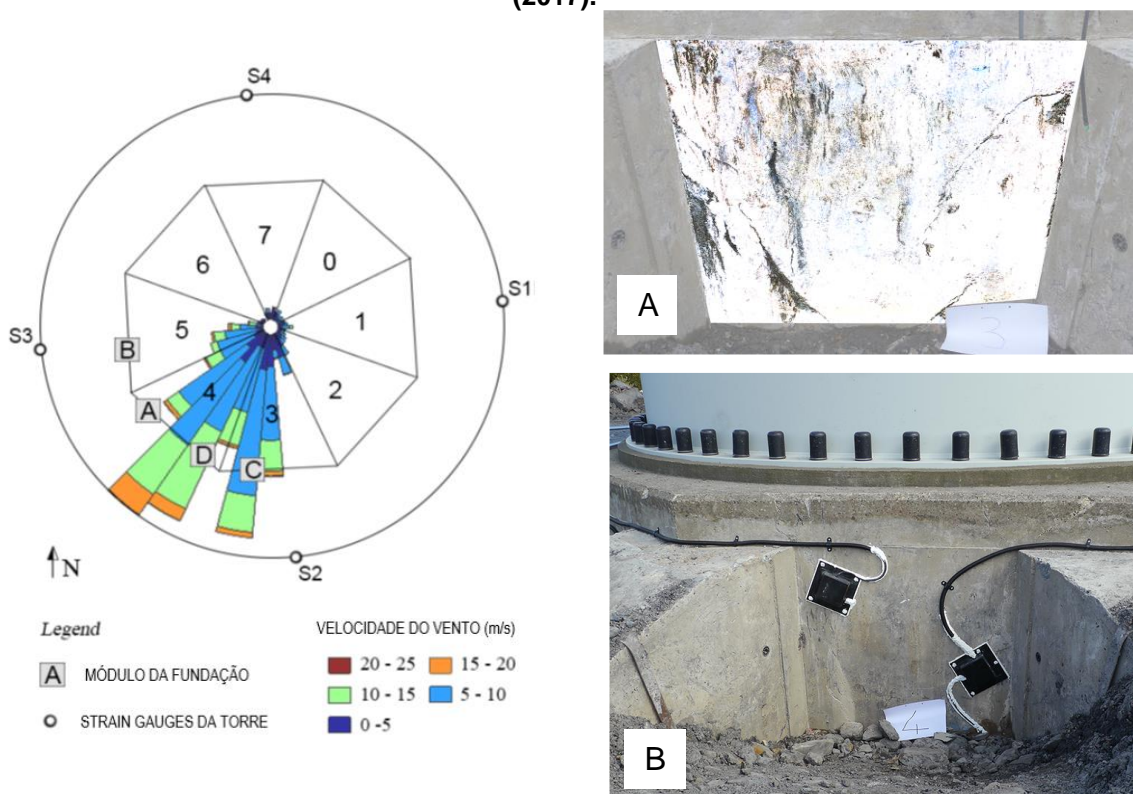
Figura 43. Fissura monitorada e localização dos sensores FBG, conforme estudo de McAlorum *et al* (2018).



Fonte: McAlorum *et al* (p. 123, 2018).

O trabalho desenvolvido por Perry *et al* (2017) também faz uso de sensores FBG instalados no corpo da fundação e na torre que, cruzados com dados de vento e da operação da turbina, forneceram informações sobre a abertura de fissuras na porção enterrada da fundação. A localização dos sensores no corpo da fundação está indicada na imagem abaixo (Figura 44, lado esquerdo), que contempla a porção com a maioria das fissuras encontradas na inspeção visual após escavação, face coincidente com a direção predominante do vento. A imagem mostra também uma fotografia processada por limiarização (A) da face número 3, que recebeu os sensores, e na qual se vê as fissuras do concreto. A face número 4 com seus sensores instalados também está representada na imagem (B).

Figura 44. Fissura monitorada e localização dos sensores FBG, conforme estudo de Perry *et al* (2017).



Fonte: Perry *et al* (p. 123, 2018), tradução nossa.

Se uma mesma carga de vento levar a aberturas maiores das fissuras, isso indica que a estrutura está sofrendo degradação (PERRY *et al*, 2017). Além disso, os autores verificaram que a abertura das fissuras tem uma resposta linear à tensão medida na torre.

Outra forma de obter dados sobre a fissuração da estrutura é por meio do uso de tomografia ultrassônica (TU). Diferentemente dos métodos apresentados

anteriormente, que requerem que a fissura esteja visível na superfície para que possa ser monitorada, a TU identifica as aberturas no interior do corpo da fundação, isto é, na porção não visível através dos pulsos emitidos pelo equipamento (Figura 45). Os trabalhos de Lorenzi *et al* (2023) e Reginato *et al* (2023) mostram aplicações dessa técnica, sendo vasta a literatura disponível sobre ela no âmbito dos END.

Figura 45. Tomógrafo usado para a tomografia ultrassônica do concreto.



Fonte: Lorenzi *et al* (p. 3, 2023).

Embora seja um exame pontual, a TU pode apoiar no entendimento do estado geral da estrutura e, a depender do seu resultado, orientar ou não para um programa de monitoramento frequente.

4.4.3 Deslocamento vertical

O monitoramento de recalques por meio de equipamentos topográficos de precisão é uma técnica bastante difundida para controle do movimento de estruturas em geral. Milititsky, Consoli e Schnaid (2005) sugerem que, mais importante do que o valor absoluto de recalque, é a sua velocidade. Por isso, campanhas periódicas de medição são cruciais para se estabelecer a taxa de movimentação da estrutura, caso haja dúvidas sobre estabilidade. É válido destacar também que pode haver um recalque por acomodação após a conclusão da implantação da estrutura, sendo seu valor máximo especificado pelo fabricante.

O trabalho elaborado por Canto e Seixas (2020) estabelece um método para auscultação geodésica de torres eólicas *onshore* através do emprego de equipamentos topográficos de precisão e da definição de um sistema de referência (Figura 46). O método proposto pelos autores consiste no monitoramento do

deslocamento horizontal e vertical a partir da leitura de pontos pré-determinados na torre e atreladas a um marco geodésico de referência.

Figura 46. Auscultação geodésica com equipamentos topográficos de alta precisão em torres eólicas.



Fonte: Canto e Seixas (p. 301, 2020).

Em substituição a leitura manual do deslocamento de estrutura, que requer a ida dos profissionais a campo em um intervalo determinado, verificou-se que há aplicação comercial de sensores LVDT (transdutor de deslocamento variável linear, ou do inglês *linear variable differential transformer*) para o monitoramento de recalque em fundações (DYNAMIS TECHNE, 2024). Esse tipo de equipamento foi empregado no estudo de Currie *et al* (2015) para verificar o deslocamento entre a torre e a fundações em estruturas com o anel de aço embutido, realizando o monitoramento em tempo real do deslocamento entre as partes da estrutura durante a operação do aerogerador. Como resultado, verificou-se que houve deslocamento excessivos durante períodos de ventos turbulentos e na parada e arrancada da máquina, fornecendo indícios dos momentos mais críticos da transferência de esforços para a fundação.

4.5 Relatório de inspeção e avaliação dos resultados

Com base na literatura consultada, sintetizou-se que o relatório da inspeção visual deve conter, minimamente, a seguinte estrutura:

- i. Apresentação
- ii. Planejamento da inspeção
- iii. Execução da inspeção visual
 - a. Fundação
 - b. Pavimento de reaterro
- iv. Resultados da inspeção e parecer sobre a estrutura
- v. Próximas ações

Na “Apresentação” deve ser informado o objetivo da inspeção, por exemplo: cadastramento, rotina, verificação após um sinistro, extensão da vida útil, entre outras possibilidades. A seguir, no item “Planejamento da inspeção”, deve ser apresentada a ficha de planejamento preenchida. É possível que haja dificuldade de se encontrar os projetos completos da estrutura implantada, sendo relevante, portanto, referenciar os materiais disponíveis de modo a compor o acervo técnico da estrutura. Os registros da etapa de planejamento servirão como ponto de partida para a mobilização de inspeções futuras.

No item “Execução da inspeção visual” deve-se apresentar as fichas de inspeção da fundação e do pavimento de reaterro preenchidas. Além das fichas, é válido incluir imagens, croquis e comentários que sirvam para esclarecer os cenários encontrados em campo, identificar sua localização e extensão, além das medições realizadas em campo, caso ocorra. Para a tomada de fotografias é sugerido que se siga as orientações apresentadas anteriormente no procedimento.

A seguir, no item “Resultados da inspeção e parecer sobre a estrutura”, deverá constar um parecer sobre o estado geral da estrutura com base no cenário encontrado. Esse parecer deve ser elaborado por profissional experiente e capacitado, conforme os requisitos das normas vigente, de modo que possa fornecer uma interpretação pertinente do conjunto de evidências vistas em campo.

Por fim, no item “Próximas ações”, sugere-se informar se é necessário realizar algum tipo de monitoramento para estabelecer com maior clareza o estado real de estrutura e indicar alguma ação corretiva imediata, caso necessário. Sugere-se ainda, com base na avaliação, indicar quando deve ser feita a próxima inspeção visual.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A identificação das causas das anomalias verificadas nas estruturas de concreto em geral é um desafio presente no cotidiano dos profissionais da engenharia civil. Em relação a fundações já construídas, esse desafio torna-se ainda maior, pois, por definição, uma fundação é uma estrutura que se encontra enterrada no solo tornando-se inacessível. Além disso, no caso das fundações dos aerogeradores, a dimensão consideravelmente grande da estrutura faz de seu reconhecimento completo uma tarefa quase impossível. A variabilidade de fatores que podem influenciar no desempenho das fundações, como mostrado na revisão bibliográfica, constitui um cenário bastante complexo, requerendo muita experiência por parte dos profissionais que venham a interpretar seu desempenho em serviço.

Nesse cenário, conclui-se que a fadiga é o fenômeno que exerce maior influência sobre a degradação das fundações de aerogeradores. Compreender e identificar esse fenômeno é também um desafio. A inspeção visual pode fornecer algumas pistas da degradação em função da fadiga, porém somente um monitoramento de longo prazo poderá quantificar quão perto do estado limite de fadiga (ELF) a estrutura se encontra. Para tanto, esse trabalho apresentou algumas técnicas possíveis de como estimar e quantificar a fadiga decorrida. O aspecto visual que melhor fornece pistas quanto a solicitações excessivas e ao desgaste dos materiais é o estado de fissuração. É comum que estruturas de concreto apresentem fissuras naturalmente, porém isso não implica na redução do seu desempenho de maneira direta. Sendo assim, verificar o nível de degradação e a tendência das fissuras é o desafio posto para os profissionais da engenharia civil.

Dado o cenário atual da falta de instrumentação das fundações de aerogeradores já implantados, a aplicação de parâmetros e critérios padronizados para inspeção e monitoramento dessas estruturas pode contribuir, ao longo do tempo, para a identificação de modelos que apontem a tendência de comportamento da estrutura, levando à ampliação do conhecimento sobre as causas dos problemas mais recorrentes. Esse acervo de parâmetros e critérios padronizados pode contribuir, ainda, para a evolução das técnicas tanto de construção quanto de projetos e inspeção, otimizando a segurança dessas estruturas e, em última instância, os custos.

Nesse sentido, as fichas de inspeção apresentadas neste trabalho fornecem subsídio para o levantamento e registro desses dados. A aplicação em campo irá determinar se o modelo se faz suficiente em termos de itens a serem verificados, sem perder de vista a possibilidade de adaptar a ficha conforme a finalidade da inspeção e a peculiaridade de cada parque. A ficha de planejamento, por sua vez, fornece parâmetros sobre o cenário inicial a ser conhecido sobre a estrutura, facilitando assim a interpretação dos dados levantados em campo e as especificidades a serem consideradas na análise dos dados coletados. Longe de representar um modelo fixo, espera-se que essas fichas sirvam de base para que o debate sobre a inspeção das fundações, mais especificamente de aerogeradores, evolua e tome corpo. Soma-se a isso, o debate sobre a saúde e vida útil remanescente dessas fundações, que encontra nas estratégias de monitoramento e nos ensaios não destrutivos apresentados nesse trabalho algumas pistas que podem ser ainda mais exploradas e aprofundadas.

Ao fim desse trabalho, dadas as lacunas percebidas durante sua elaboração, tem-se algumas sugestões para trabalhos futuros. Uma delas é realizar o levantamento de dados primários sobre manifestações patológicas nas fundações de aerogeradores. Por ser um tema restrito às empresas que projetam, constroem e operam esse tipo de estrutura, a obtenção de dados sobre o tema fica limitada, cabendo uma pesquisa específica que atenda a requisitos de confidencialidade comercial. O levantamento baseado em fontes primárias seria de grande valia para o entendimento das manifestações patológicas específicas desse tipo de estrutura.

Outra sugestão é a realização de mais estudos experimentais, principalmente no contexto brasileiro, aplicando as técnicas apresentadas nesse trabalho para a realização de monitoramento e de ensaios não destrutivos. Com a estimativa da fadiga decorrida e da vida útil remanescente, avaliar o que ainda pode ser aproveitado das estruturas existentes pode permitir que a repotenciação de parques ao fim da vida útil torne-se mais econômica e ambientalmente viável. Vale destacar que o benefício do uso de sensores automatizados é de fornecer uma série histórica sobre o comportamento da estrutura, o que pode permitir a detecção precoce de possíveis falhas. Com isso, espera-se que o debate técnico sobre essas soluções seja enriquecido, especialmente no que tange a estimativa da fadiga, fornecendo modelos validados que possam ser aplicados em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Volume II - Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem**. Brasília: ANA, 2016. 218 p.

ALBIERO, José Henrique; CINTRA, José Carlos Ângelo. **Análise e projeto de fundações profundas: estacas: tubulões e caixões**. In: HACHICH, Waldemar et al (ed.). *Fundações: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 302-328.

ANGELO, Ana Margarida Vieira. **Análise das patologias das estruturas em concreto armado do estágio Magalhães Pinto - Mineirão**. 2004. 439 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

ASAREH, M. **2376417885**. 2023. Disponível em: <https://www.shutterstock.com/pt/image-photo/concrete-surface-damage-degradation-due-high-2376417885>. Acesso em: 23 abr. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS (São Paulo). **Boletim anual 2023**. São Paulo: ABEEÓLICA, 2023. 19 p.

_____. **ABNT NBR 16.230: Inspeção de estruturas de concreto – qualificação e certificação pessoal - requisitos**. Rio de Janeiro, 2013. 25 p.

_____. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2016a. 13 p.

_____. **NBR 7185/2016: Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego do frasco de areia – Classificação**, Rio de Janeiro, 2016b. 12 p.

_____. **ABNT NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro, 2022. 126 p.

_____. **ABNT NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020. 32 p.

_____. **ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro, 2023a. 242 p.

_____. **ABNT NBR IEC 61400-1: Sistemas de Geração de Energia Eólica - Parte 1: requisitos de projeto**. 1 ed. Rio de Janeiro, 2023b. 186 p.

_____. **ABNT NBR 9452: Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas – Procedimento**. 5 ed. Rio de Janeiro, 2023c. 71 p.

BARBA, T. **1169379406**. 2018. Disponível em: <https://www.shutterstock.com/pt/image-photo/concrete-cover-spalling-steel-rebars-pesaro-1169379406>. Acesso em: 23 abr. 2024.

BARBER S. K.; MECHLER, S.; NITSCHKE, M. **The effect of wakes on the fatigue damage of wind turbine components over their entire lifetime using short-term load measurements.** Journal of Physics: Conference Series 753, Suíça, 13 p., 2016.

BARONI, Henriette Justina Manfredini. **Simulação da vida útil de fadiga do concreto em vigas de tabuleiro de pontes em função do fluxo de veículos pesados.** 2010. 284 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BEQIRI, Mentor. **2120123486.** 2022. Disponível em: <https://www.shutterstock.com/pt/image-photo/foundation-wind-turbine-tower-large-bolts-2120123486>. Acesso em: 23 abr. 2024.

BERTUZZI, Pietro José. **Estudo de aspectos de engenharia para implantação de torres eólicas.** 2013. 102 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

BURTON, Tony et al. **Wind Energy: Handbook.** Inglaterra: John Wiley & Sons, 2001.

CANTO, Luiz Filipe Campos do; SEIXAS, Andréa de. **Auscultação Geodésica em Torres Eólicas Onshore: definição do sistema de referência e de medição para o monitoramento.** Revista Brasileira de Cartografia, [S.L.], v. 72, n. 2, p. 294-311, 22 jun. 2020. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72n2-50539>.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros. **Mecânica dos Solos: teoria e aplicações.** 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2022. 267 p.

CHAIBANGYANG, K. **ID 156057206.** Disponível em: <https://www.dreamstime.com/damages-cracks-structural-spalling-concrete-slab-due-to-corrosion-image156057206>. Acesso em: 23 abr. 2024.

COSTA, Conceição de Maria Cardoso. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos.** 2015. 181 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

CURRIE, Magnus *et al.* **Structural integrity monitoring of onshore wind turbine concrete foundations.** Renewable Energy, [S.L.], v. 83, p. 1131-1138, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.006>.

DALENOGARE, Thais et al. **Parâmetros de Projeto para Fundações de Turbinas Eólicas Onshore.** In: JORNADA DE PESQUISA, 14^{o.}, 2019, Ijuí: Unijuí, 2019. p. 1-16.

DÉCOURT, Luciano. **Análise e projeto de fundações profundas: estacas**. In: HACHICH, Waldemar et al (ed.). *Fundações: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 265-301.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 52/94: **Solos - Determinação da umidade com emprego do Speedy test**. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). 010/2004 - PRO: **Inspeção em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - Procedimento**. Rio de Janeiro: Dnit, 2004. 18 p.

DNV (DET NORSKE VERITAS); RISØ (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: 07 out. 2023.

DNV-GL (DET NORSKE VERITAS – GERMANISCHER LLOYD). **DNV-ST-0262: Lifetime extension of wind turbines**. 2 ed. Oslo: DNV-GL, 2021.

DUOMIT. **Spalling Concrete Treatment: what is spalling concrete and how to repair it**. Disponível em: <https://duomit.com/spalling-concrete-treatment/>. Acesso em: 23 abr. 2024.

DYNAMIS TECHNE (Brasil). **Instrumentação com sensores de deslocamento**. 2024. Disponível em: <https://dynamistechne.com/nossos-servicos/instrumentacao-com-sensores-de-deslocamentos/#:~:text=Em%20funda%C3%A7%C3%B5es%20%C3%A9%20poss%C3%ADvel%20se,provas%20de%20carga%2C%20por%20exemplo..> Acesso em: 20 jun. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Ministério de Minas e Energia (org.). **Empreendimentos eólicos ao fim da via útil: situação atual e alternativas futuras**. Brasília: EPE, 2021. 57 f

FARIA, Patrícia; NORONHA, Marcos. **Fundação de Torres Eólicas - Estudo de Caso**. In: GEOSUL, 13., 2013, Ponta Grossa. 2013. p. 1-12. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307512613_Fundacoes_de_Torres_Eolicas_-_Estudo_de_Caso. Acesso em: 19 mar. 2023.

GASPARTTO, Angelica; PANTOJA, João da Costa; RAMIRES, Fernando Busato. **Metodologia para inspeção e avaliação de segurança e durabilidade de estruturas de concreto armado**. *Brazilian Journal Of Development*, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 4942-4960, jan. 2021.

GONÇALVES, Regiane. **Análise de propagação de fissuras por fadiga em concreto pelo MEF mediante a mecânica do dano contínuo**. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

LAKSHMIKANTHA, M. R. **Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils**. 2009. 391 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia del Terreny, Cartogràfica I Geofísica, Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals I Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/33350400>. Acesso em: 10 jun. 2024.

LORAUX, C.; BRÜHWILER, E. **The use of long term monitoring data for extension of service duration of existing wind turbine support structures**. Journal of Physics: Conference Series 753, Suíça, 9 p., 2016.

LORENZI, A. *et al.* **Application of Ultrasonic Tomography to detect defects in concrete structures**. Journal Of Nondestructive Testing, Mayen, jul. 2023.

M, Stephen. **Stock Foto ID: 674923978**. 2017. Disponível em: <https://www.shutterstock.com/pt/image-photo/cracks-concrete-wind-turbine-foundation-674923978>. Acesso em: 23 abr. 2024.

MCALORUM, Jack *et al.* Deterioration of cracks in onshore wind turbine foundations. **Engineering Structures**, n. 167, p. 121-131, jan. 2018.

MEIRELES, Catarina Ruano. **Estudo e Projeto de Reabilitação dos Acessos aos Parques Eólicos da Iberwind**. 2015. 182 f. Relatório de Estágio (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2015.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 207 p.

MILITITSKY, Jarbas. **Fundações de Aerogeradores: desafios de projeto e execução**. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 9., 2019, São Paulo. São Paulo: SEFE, 2019.

MILITITSKY, Jarbas. **Fundações de torres: aerogeradores, linhas de transmissão e telecomunicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 340 p.

MITRE, Marcos Pedrosa. **Metodologia para inspeção e diagnóstico de pontes e viadutos de concreto**. 2005. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.

NELLI, Rodrigo Tavares. **Patologia das estruturas de concreto em obras de arte: metodologia de gestão de inspeção em galerias de águas pluviais e canais**. 2012. 78 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2012.

NIYAMA, Sussumi; AOKI, Nelson; CHAMECKI, Paulo Roberto. **Verificação de desempenho**. In: HACHICH, Waldemar et al (ed.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 723-751.

PERRY, Marcus *et al.* **Crack monitoring of operational wind turbine foundation.** MDPI, Basel, v. 1925, n. 17, p. 1-20, ago. 2017.

PINHO, António Monteiro. **Gestão de Projectos de Parques Eólicos: contributos para a melhoria do processo.** 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de energia eólica.** Rio de Janeiro: LTC, 2013. 368 p.

QUARESMA, Arthur Rodrigues *et al.* **Investigações geotécnicas.** In: HACHICH, Waldemar *et al.* (ed.). *Fundações: teoria e prática.* 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 119-162.

REGINATO, L. A. *et al.* **Evaluación de la homogeneidad de pilares de hormigón armado mediante tomografía ultrasónica.** In: XVII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCION Y XVII CONGRESSO DE CONTROL DE LA CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN, 2023, Santa Cruz de La Sierra: CONPAT, 2023. v. 2, p. 1-14.

REIS, Lineu Belico dos. **Matrizes energéticas: conceitos e usos em gestão e planeamento.** Barueri: Manole, 2011. 190 p.

RODRIGUES, Henrique Blasi. **Estudo de Fundação Direta de Aerogeradores com Métodos Numéricos.** 2019. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

RUBERT, T. *et al.* **Wind turbine lifetime extension decision-making based on structural health monitoring.** *Renewable Energy*, Reino Unido, 32 p., 2019.

SABAI, Andrew. **356287739.** 2015. Disponível em: <https://www.shutterstock.com/pt/image-photo/minerals-salt-leach-out-cracks-old-356287739>. Acesso em: 01 mai. 2024.

SAMPIERI, Roberto Hernández; COLLADO, Carlos Fernandez; LUCIO, María del Pilar Baptista. **Metodologia de pesquisa.** 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013. 612 p.

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

SCOTLAND AGAINST SPIN (SAS) (Escócia) (org.). **Summary of Wind Turbine Accident data to 30 September 2023.** 2023. Disponível em: <https://scotlandagainstspin.org/turbine-accident-statistics/>. Acesso em: 14 out. 2023.

SILVA, Bruno Samuel Camacho e. **A Engenharia Civil e a Produção Industrial de Energia Eólica.** 2013. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

SOUZA, Vicente Custódio de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 257 p.

TEIXEIRA, Alberto Henrique; GODOY, Nelson Silveira de. **Análise, projeto e execução de fundações rasas**. In: HACHICH, Waldemar et al (ed.). *Fundações: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 227-264.

TEIXEIRA, Diana Isabel Varejão. **Soluções de Fundações para Aerogeradores "onshore"**. 2022. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2022.

Wind Europe. **Decommissioning of Onshore Wind Turbines-Industry Guidance Document**. 2020. Disponível: <https://windeurope.org/data-and-analysis/product/decommissioning-of-onshore-wind-turbines/>. Acesso em: 27 fev. de 2024.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Ficha de planejamento da inspeção visual

Id PLANEJAMENTO	
1.	Data da inspeção: _____
2.	Nome do parque eólico: _____
3.	Número do aerogerador: _____
4.	Fabricante: _____
5.	Potência: _____
6.	Tipo de fundação: _____
7.	Distância da projeção da fundação: _____
8.	Tipo de ligação torre-fundação: _____
9.	Classe de Agressividade Ambiental (CAA):
	<input type="checkbox"/> Classe I
	<input type="checkbox"/> Classe II
	<input type="checkbox"/> Classe III
	<input type="checkbox"/> Classe IV
10.	Direção predominante do vento:
	<input type="checkbox"/> N (Norte) <input type="checkbox"/> NE (Nordeste)
	<input type="checkbox"/> E (Leste) <input type="checkbox"/> SE (Sudeste)
	<input type="checkbox"/> S (Sul) <input type="checkbox"/> SW (Sudoeste)
	<input type="checkbox"/> W (Oeste) <input type="checkbox"/> NW (Noroeste)
11.	Ferramentas necessárias: - - -
12.	Lista de EPIs e EPCs: - - -
13.	Será acessada a porção interna da fundação? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO
14.	Participantes da inspeção: - - -
15.	Projetos disponíveis: - - -
16.	Fatos relevantes do histórico da estrutura
17.	Comentários:

APÊNDICE B – Fichas de execução da inspeção visual

EXECUÇÃO – INSPEÇÃO VISUAL DA FUNDAÇÃO ¹													
Id	Localização/Anomalia	Situação ²								Magnitude ³			
		NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
EXTERNA													
1.	Ocorrência de fissuras no concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
2.	Ocorrência de fissuras no graute de alta resistência	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
3.	Desnível ou espaçamento entre o concreto da fundação e o graute de alta resistência	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
4.	Parafusos de ancoragem sem capa de proteção	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
5.	Deslocamento do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
6.	Armadura exposta e corrosão	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
7.	Comentários:												
INTERNA													
8.	Ocorrência de fissuras no concreto da fundação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
9.	Deslocamento do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
10.	Armadura exposta e corrosão	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
11.	Lixiviação do concreto	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
12.	Sinais de entrada de água	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
13.	Comentários:												
EXECUÇÃO – INSPEÇÃO VISUAL DO PAVIMENTO DE REATERRO													
Id	Localização/Anomalia	Situação ¹								Magnitude ²			
		NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
1.	Fissuras radiais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
2.	Fissuras perimetrais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
3.	Sinais de acúmulo de água	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
4.	Sinais de afundamento/levantamento do solo	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
5.	Presença de vegetação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
6.	Abertura entre a estrutura de concreto e o pavimento de reaterro	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G
7.	Erosão na borda dos cortes/aterros	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G

¹ Embora a inspeção visual esteja focada na porção visível da fundação, mais superficial, não devem ser descartadas anomalias decorrentes de falhas nas estacas, para o caso de fundações profundas. O que necessitará de ações adicionais às propostas nesse procedimento.

² NA: Não Aplicável; NE: Não Existe; PV: Primeira Vez; DS: Desapareceu; DI: Diminuiu; PC: Permaneceu constante; AU: Anomalia Aumentou; NI: Não inspecionado

³ I: Insignificante; P: Pequena; M: Média; G: Grande