

Procedimento para inspeção e monitoramento de fundações de torres eólicas onshore

Mayra de Mattos

Engenheira Civil, Florianópolis, Brasil, mayrasdm@gmail.com

Fábio Krueger da Silva

Professora Dra., Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fabio.krueger@ifsc.edu.br

André Puel

Professor Dr., Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, puel@ifsc.edu.br

Ana Luisa Ferreira

Engenheira Civil, Florianópolis, Brasil, ferreirana@gmail.com

Fernanda Simoni Schuch

Professora Dra., Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fernandass@ifsc.edu.br

RESUMO: No contexto da geração de energia de baixo carbono, o número de parques eólicos em operação no Brasil tem crescido. No cenário europeu, os parques eólicos estão atingindo o fim de sua vida útil, e se debate maneiras de usar a infraestrutura existente, para continuar gerando energia ou repotencializar com máquinas mais modernas. Embora as realidades regionais sejam diferentes, a questão suscitada no que concerne à fundação das torres eólicas é a mesma: como inspecionar essas estruturas e monitorar seu comportamento durante as etapas de operação e manutenção do parque gerador, de forma a garantir a sua segurança, a confiabilidade ao longo do tempo e a tomada de decisões com base em informações? Nesse sentido, este trabalho investiga de que forma as fundações de aerogeradores *onshore* (continentais), sem prévia instrumentação, podem ser inspecionadas e monitoradas durante sua operação. E ainda, 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 consequente deterioração da estrutura e os deslocamentos sofridos pela fundação.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação de torre eólica, Inspeção civil, O&M, Aerogerador.

ABSTRACT: In the context of low-carbon energy generation, the number of wind farms in operation in Brazil has been increasing. In the European scenario, wind farms are reaching the end of their service life, and discussions arise on how to use the existing infrastructure to continue generating energy or to repower with more modern machines. Although regional realities differ, the question raised regarding the foundations of wind towers remains the same: how to inspect these structures and monitor their behavior during the operation and maintenance phases of the power plant, in order to ensure their safety, long-term reliability, and decision-making based on information? In this regard, this study investigates how onshore wind turbine foundations, without prior instrumentation, can be inspected and monitored during their operation. Furthermore, it provides a procedure for visual inspection of the foundation and the backfill pavement. This procedure is complemented by the presentation of monitoring methods and non-destructive testing to determine the fatigue experienced by the structure, the degree of cracking and consequent deterioration, and the displacements undergone by the foundation.

KEYWORDS: Wind turbine foundation, Civil inspection, O&M, Wind turbine.



1 INTRODUÇÃO

No contexto da transição energética, a geração de energia eólica tem figurado papel cada vez mais relevante entre as fontes de energia renovável no Brasil e no mundo. Em 2024, segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a geração de energia eólica correspondeu a 16,1% da capacidade de geração da matriz energética brasileira (ABEEÓLICA, 2024). Nesse cenário, a necessidade de evoluir os processos de operação e manutenção (O&M) desses ativos torna-se iminente em diversas áreas da Engenharia. Tanto para o atingimento da vida útil de projeto quanto para continuidade dos níveis de desempenho, toda estrutura deve ser submetida a inspeções periódicas, bem como a uma manutenção adequada.

Além da finalidade de se evitar o colapso, a inspeção das fundações de aerogeradores pode ter motivações: como o aumento da vida útil (estimada em projeto para 20 anos), o fim do período de garantia e a repotenciação. O atingimento do fim da vida útil é uma realidade tanto nos países europeus, pioneiros na geração de energia eólica, quanto no Brasil. Estima-se que até 2030, mais de 50 parques eólicos no Brasil alcançarão 20 anos de operação, o que representa cerca de 600 aerogeradores (EPE, 2021). Já na Europa esse número é mais expressivo: em 2020, estimava-se em 34.000 o número de aerogeradores com 15 anos ou mais de operação (WIND EUROPE, 2020).

Considerando que as fundações são elementos de infraestrutura que permanecem enterrados no 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 partes das estruturas. Isso se deve: à complexidade e heterogeneidade do solo, à impossibilidade de visualização das fundações após sua execução e às incertezas associadas aos ensaios de campo. Além disso, as fundações de aerogeradores apresentam particularidades quando comparadas às fundações mais comuns, pois, ao longo de sua vida útil estão sujeitas a esforços de fadiga, decorrentes do giro constante dos aerogeradores, e da variação da carga de vento.

A compreensão das causas de suas principais manifestações patológicas, é um tema recorrente na literatura especializada em fundações. No entanto, a forma de monitorar e controlar essas manifestações ao longo da vida útil de aerogeradores, ainda é pouco sistematizada na literatura brasileira, uma vez que essas estruturas apresentam características construtivas e de uso bastante específicas. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo propor um procedimento de inspeção e monitoramento para fundações de aerogeradores continentais (*onshore*) em fase de O&M, isto é, de fundações já construídas e em operação que, no momento da construção, não foram munidas de instrumentação para tais finalidades. Cabe destacar que esta pesquisa adota uma abordagem técnica, estando a questão econômica fora do escopo, embora se reconheça que a aplicação de soluções em engenharia dependa de uma avaliação técnico-econômica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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. Segundo o autor, as fundações de aerogeradores apresentam as seguintes particularidades: vida útil de 20 anos (175.000 horas de operação), com fadiga proveniente de cargas repetidas; construção em locais onde não há experiências anteriores com soluções de fundações; cargas muito elevadas; e requisitos de rigidez importantes para o desempenho estrutural do bloco de fundação e da torre.

Niyama, Aoki e Chamecki (1998) expõem que a verificação do desempenho das fundações é parte de um problema mais geral que consiste em avaliar o comportamento do conjunto formado por superestrutura, infraestrutura e maciço de solo. Dessa forma, prosseguem os autores, a verificação deve ser realizada 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 da integridade de cada elo. Milititsky, Consoli e Schnaid (2005) corroboram e sintetizam que o êxito ou fracasso das fundações, assim como o surgimento de problemas, pode ter as seguintes origens: má caracterização do comportamento do solo; falha na análise da solução e ser empregada e, conseqüentemente, na definição do projeto; problemas na execução; eventos pós-conclusão; e degradação dos materiais.



2025

A adequada caracterização do solo é essencial para solucionar ou mesmo evitar problemas associados às fundações, uma vez que ele será responsável por 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, tanto a resistência e integridade do elemento estrutural, quanto a resistência do solo, devem ser efetivamente comprovadas. Quanto à degradação dos materiais, a fadiga pode exercer influência relevante sobre o concreto das fundações de aerogeradores. Gonçalves (2003), com base no trabalho de Aguado et al. (1990 *apud* Gonçalves, 2003), expõe que quando uma estrutura é solicitada por cargas repetidas, o material que constitui essa estrutura passa por um processo de perda de resistência. Essa alteração mecânica, que provoca a perda da resistência, pode se acumular sucessivamente a ponto de levar o material à ruptura sob solicitações até menores do que sua resistência estática. Esse fenômeno, conclui o autor, é denominado fadiga e é acompanhado normalmente pela perda de rigidez do material.

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 provocada pela fadiga, mas sim decorrente de deteriorações progressivas às quais a fadiga contribui. Fundações de aerogeradores são, tipicamente, dimensionadas para suportar 10^3 a 10^9 ciclos de carregamento (FARIA; NORONHA, 2013), que incidem tanto sobre o concreto quanto sobre o aço. Em nível macroscópico, Baroni (2010) informa que existem muitos relatos na literatura que associam a fadiga de estruturas de concreto ao aparecimento de fissuração e deslocamento no concreto; enquanto, esses sinais são, na realidade, expressões da fadiga da armadura.

3 MÉTODO E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O desenvolvimento do procedimento, objetivo deste trabalho, embasou-se em pesquisa bibliográfica com referências nacionais e estrangeiras, normas técnicas, regulamentações, práticas comerciais oferecidas no mercado e visitas de campo a instalações existentes e em operação, consistindo na inspeção de cerca de 100 fundações, que, por questões de sigilo, não serão identificadas. A base teórica sobre a qual o procedimento se aplica contemplou a identificação dos tipos de fundações mais comuns para aerogeradores e do comportamento da estrutura em serviço, tendo em vista os esforços solicitantes e as principais verificações de desempenho. Realizou-se um levantamento das anomalias mais representativas em estruturas de concreto armado, tomando como referencial os casos de barragens, fundações em geral e obras de arte especiais.

Além disso, procedimentos existentes para esses tipos de estrutura (ANA, 2016; ABNT NBR 9452:2023; DNIT, 2004; MITRE, 2003; NELLI, 2012; GASPARETTO, 2021) serviram de base para a elaboração do procedimento visual aqui proposto, contemplando tanto a estrutura de concreto quanto o pavimento de reaterro. Além da inspeção visual, foram identificados e sugeridos métodos para o monitoramento do comportamento das estruturas por meio de ensaios não destrutivos ou da instalação de sensores na fase pós-obra, compreendendo aspectos como fadiga, abertura de fissuras e deslocamentos.

Cabe pontuar que o julgamento dos resultados de uma inspeção é uma tarefa que requer uma análise completa da situação avaliada. Nesse sentido, tanto a inspeção quanto a interpretação de seus resultados devem ser realizadas por profissionais qualificados. Ressalta-se ainda que a escassez de dados primários relacionados às patologias em fundações – e, mais especificamente, em fundações de aerogeradores – impediu que este procedimento fosse direcionado às manifestações patológicas mais comuns e representativas com base estatística. Assim, foi feita uma indicação das anomalias a serem observadas com base em revisão bibliográfica voltada a diferentes estruturas de concreto.

A classificação da gravidade das anomalias é uma tarefa complexa, que não será aqui desenvolvida. Dessa forma, adota-se 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) – podendo ser adaptada conforme o entendimento de risco de cada organização ou aplicador do procedimento.

4 PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO VISUAL E MONITORAMENTO

Nos subitens que seguem descreve-se: as anomalias observadas nas visitas de campo na estrutura de concreto e no reaterro, a definição de um procedimento de inspeção visual com as sugestões de monitoramento, e, a sugestão de realização de ensaios não destrutivos.



4.1 Anomalias a observar em campo

Como anomalia entende-se qualquer manifestação patológica, deficiência, irregularidade, anormalidade ou deformação que possa afetar a segurança da estrutura, tanto a curto quanto a longo prazo, ou descaracterizar a estrutura em relação a sua concepção original (ANA, 2016; ABNT, 2023). As principais anomalias a observar em campo durante as inspeções visuais na estrutura de concreto são: fissuras, deslocamento, lixiviação, armadura exposta e corrosão; já no pavimento de reaterro destacam-se: fissuras, acúmulo de água e afundamento. Esses aspectos foram destacados em função de sua recorrência e representatividade (SOUZA; RIPPER, 1998; ANA, 2016; ANGELO, 2004; BARONI, 2010; GONÇALVES, 2003; MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2005; MITRE, 2005; COSTA, 2015; LAKSMIKANTHA, 2009).

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, 2023b, 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. Adiciona-se a essas a apresentação de fissuras como indicativo de fadiga sofrida pela estrutura, tanto pelo concreto quanto pelo aço, conforme mencionado anteriormente. A fissuração é considerada a manifestação patológica característica das estruturas de concreto, sendo este, o dano mais comum (SOUZA; RIPPER, 1998). Dada a complexidade e variabilidade dos mecanismos de origem das fissuras, sua interpretação deve ser cuidadosa.

A desagregação do concreto é outro fenômeno frequente, que pode ter origens diversas, manifestando-se geralmente por meio do desprendimento de placas ou fatias do concreto (SOUZA; RIPPER, 1998). Uma peça que apresenta desagregação terá, ao menos localmente, perda da capacidade de resistência aos esforços solicitantes. Os deslocamentos podem ser provocados, por exemplo, pela corrosão das armaduras, quando em estado avançado (ANGELO, 2004), ou ainda pela fadiga da armadura, conforme exposto por Baroni (2010).

A corrosão das armaduras pode também levar à perda de aderência entre o aço e o concreto, comprometendo o comportamento estrutural desses materiais, que são empregados em conjunto no concreto armado (SOUZA; RIPPER, 1998). Além disso, a diminuição da seção de aço provocada pela corrosão interfere na resistência à tração. O processo de lixiviação, conforme exposto por Souza e Ripper (1998), é um tipo de corrosão sofrida pelo concreto, que ocorre quando há dissolução e arraste do hidróxido do cálcio presente na massa de cimento devido ao ingresso de água. Quanto mais poroso for o concreto, maior será a intensidade da corrosão. O avanço desse processo leva, com o passar o tempo, ao enfraquecimento da estrutura, por meio do surgimento de fissuração, da corrosão das armaduras e da desagregação do concreto.

O pavimento de reaterro pode ter suas propriedades mecânicas alteradas em caso de ingresso excessivo de água. O reaterro tem como função fornecer uma carga estabilizadora para a fundação. Dessa forma, sua fissuração 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, pela mecânica da fissura. Em geral, as fissuras no solo podem se manifestar radialmente ou perimetralmente à fundação. Laksmikantha (2009) classifica a fissuração do solo, conforme sua origem, em quatro tipos: retração, variação térmica, tração e fraturamento. O entendimento da mecânica da fissura serve de base para a interpretação da patologia que se manifesta no pavimento de reaterro e no solo ao redor da estrutura de concreto.

4.2 Procedimento de inspeção

O procedimento de inspeção é dividido em duas etapas: planejamento e execução. A etapa de planejamento consiste na coleta de dados iniciais, como informações sobre a estrutura e seu histórico, identificação da equipe responsável pela inspeção, verificação de requisitos, definição dos objetivos, entre outras aspectos relevantes. Já a etapa de execução corresponde à inspeção visual em campo, que, por sua vez, se subdivide na inspeção da estrutura de concreto da fundação (interna e externamente) e do pavimento de reaterro. Os itens observados em campo são classificados de acordo com sua situação e magnitude, sendo registrados nas respectivas fichas. As possíveis situações indicadas nas fichas podem apontar, por exemplo que a situação não existe (NE), que foi identificada pela primeira vez (PV) ou que apresentou aumento em relação à inspeção anterior (AU). A magnitude das anomalias pode ser classificada desde insignificante (I) até grande (G), cabendo ao inspetor esse julgamento técnico.



A ficha de inspeção visual da fundação e do pavimento de reaterro (Tabela 1) contempla os itens a serem verificados em campo e a descrição de cada um. Recomenda-se, além do preenchimento da ficha, o registro fotográfico das ocorrências identificadas em campo, para posterior inclusão no relatório de inspeção.

Tabela 1. Fichas para execução da inspeção visual

Id	INSPEÇÃO VISUAL DA FUNDAÇÃO¹												
	Localização/Anomalia	Situação²								Magnitude³			
PARTE 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:												
PARTE 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:												
INSPEÇÃO VISUAL DO PAVIMENTO DE REATERRO													
Id	Localização/Anomalia	Situação¹								Magnitude²			
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

4.3 Monitoramento e ensaios não destrutivos

Neste item apresenta-se sugestões de ensaios não destrutivos (END) aplicáveis a estruturas de concreto e, o uso de equipamentos de medição, os quais podem ser empregados na fase de operação do aerogerador (pós-obra), retomando uma das questões norteadoras desta pesquisa: como verificar a segurança



2025

e o desempenho de fundações de aerogeradores em fase de operação? O enfoque dos ensaios e ferramentas apresentados se concentra 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 em operação.

Acerca do monitoramento da estrutura quanto à fadiga, Loraux 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 da fundação, com base na fadiga acumulada pela estrutura. O monitoramento fez uso de *strain gauges* instalados na estrutura, sensores de temperatura, acelerômetros, um sistema de aquisição de dados e dados operacionais provenientes do supervisório do equipamento, como ângulo da nacelle e velocidade do rotor. 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. Essas estimativas foram exploradas, por meio outros métodos, também nas pesquisas de Barber, Mechler e Nitschke (2016) e de Rubert et al (2019). Portanto, sugere-se a aplicação da mesma metodologia para os parques aerogeradores brasileiros.

No que tange o controle sistemático da abertura de fissuras no concreto, visando caracterizar a gravidade do problema e identificar o estado de atividade da fissura, se ativa ou passiva, sugere-se o procedimento adotado por Milititsky, Consoli e Schnaid (2005). Conforme os autores, a abertura progressiva de fissuras em elementos de apoio é um indicador de risco e, portanto, a caracterização do comportamento da fissura torna-se a base para a análise de sua gravidade, sendo geralmente de complexa determinação, junto à sua causa. A abertura das fissuras pode ser medida com fissurômetros ou paquímetros. A atividade ou passividade da fissura pode ser determinada a partir da variação dos valores medidos – enquanto houver variações, a fissura é considerada ativa. Outro método de fácil aplicação para monitorar esse comportamento é a instalação de laminulas de vidro fixadas com resina epóxi na superfície da estrutura. O caráter frágil do vidro faz com que ele se rompa caso tensionado, indicando a tendência de movimentação da fissura.

E ainda, é possível se monitorar fissuras por meio da instalação de sensores do tipo *fiber bragg grating* que, juntamente com dados de vento, permitem acompanhar o grau de fissuração e a evolução da degradação da estrutura em operação, conforme apresentado nos trabalhos de McAlorum et al (2018) e Perry et al (2017). Uma alternativa adicional para obtenção de dados sobre a fissuração da estrutura é o uso de tomografia ultrassônica (TU). A TU permite identificar as aberturas no interior do corpo da fundação, ou seja, na porção não visível da estrutura, por meio dos pulsos emitidos pelo equipamento. Os trabalhos de Lorenzi et al (2023) e Reginato et al (2023) mostram aplicações dessa técnica, havendo vasta literatura disponível sobre ela no âmbito dos END.

Já para o monitoramento de recalques, a utilização de equipamentos topográficos de precisão é uma técnica amplamente 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 o estabelecimento da taxa de movimentação da estrutura, caso haja dúvidas quanto à estabilidade. Destaca-se, ainda, que pode haver recalque por acomodação após a implantação da estrutura, sendo seu valor máximo especificado pelo fabricante ou projetista.

4.4 Relatório de inspeção

A elaboração de um relatório de inspeção é a forma por meio da qual os dados e informações coletados são armazenados e sintetizados, tanto para consultas futuras quanto para consolidação do resultado da inspeção. O formato do relatório depende tanto da organização, que realiza a inspeção e seus procedimentos internos organizacionais, quanto do objetivo da inspeção. Sugere-se registrar, no mínimo, as fichas preenchidas (conforme modelo do item 4.2), as fotografias, o parecer sobre o estado da estrutura e as próximas ações necessárias, como inspeções futuras, ações de monitoramento necessárias ou mesmo intervenções corretivas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A identificação das causas das anomalias verificadas nas estruturas de concreto é um desafio presente no cotidiano dos profissionais da engenharia civil. No caso de fundações já construídas, esse desafio torna-se



ainda maior, pois, por definição, uma fundação é uma estrutura enterrada no solo tornando-se praticamente inacessível. Além disso, no caso das fundações dos aerogeradores já construídos, a dimensão consideravelmente grande da estrutura e os esforços dinâmicos solicitantes torna seu reconhecimento completo uma tarefa possivelmente inviável.

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 a estrutura se encontra. O aspecto visual que melhor fornece pistas quanto a solicitações excessivas e ao desgaste dos materiais é o estado de fissuração. É importante observar que estruturas de concreto frequentemente apresentam fissuras de forma natural, o que, por si só, não implica necessariamente na redução do seu desempenho. Sendo assim, verificar o nível de degradação e a evolução das fissuras constitui um desafio relevante.

Dado o cenário atual de ausência de instrumentação nas 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 tendências de comportamento estrutural, favorecendo o entendimento das causas mais recorrentes de anomalias. Nesse sentido, as fichas de inspeção apresentadas neste trabalho (da estrutura de fundação e do reaterro), fornecem subsídios para o levantamento, registro e armazenamento desses dados. A aplicação em campo irá determinar se o modelo é suficiente em termos de itens a serem verificados, sem perder de vista a possibilidade de adaptá-lo conforme a finalidade da inspeção e a especificidade de cada parque eólico.

A criação de um procedimento estruturado para inspeção visual e monitoramento contínuo das estruturas civis de aerogeradores, representa uma medida estratégica e essencial para garantir a integridade, a segurança e a longevidade dos ativos de geração renovável. Através de diretrizes padronizadas e de uma abordagem preventiva, é possível antecipar falhas, reduzir custos com manutenções corretivas e ampliar a confiabilidade operacional dos empreendimentos eólicos. Convém salientar que a sistematização deste procedimento em ambiente digital não foi alvo desta pesquisa, porém, deve ser pensada e executada, contemplando os itens ora apontados.

Além dos benefícios técnicos e operacionais, a implementação desse procedimento contribui diretamente para a sustentabilidade e a eficiência do setor de energia eólica, fortalecendo seu papel como pilar fundamental na transição energética. Ao assegurar a disponibilidade e o desempenho contínuo dessas estruturas, promove-se uma matriz energética mais limpa, segura e resiliente, alinhada aos compromissos ambientais e à expansão das fontes renováveis no país. Portanto, a adoção de práticas sistematizadas de monitoramento das estruturas civis não é apenas uma exigência de engenharia e segurança, mas uma contribuição concreta para o desenvolvimento sustentável e para o avanço da geração eólica como vetor estratégico na construção de um futuro energético de baixo carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas (2016). *Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Volume II - Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem*. Brasília, 218 p.
- Angelo, A. M. V. (2004). *Análise das patologias das estruturas em concreto armado do estágio Magalhães Pinto - Mineirão*. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais /UFMG, 439 f.
- Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (2024). *Boletim anual 2024*. São Paulo. 19 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 9452. *Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023b). NBR 6118: *Projeto de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro.
- Barber S. K.; Mechler, S.; Nitschke, M. (2016). *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.



- Baroni, H. J. M. (2010). *Simulação da vida útil de fadiga do concreto em vigas de tabuleiro de pontes em função do fluxo de veículos pesados*. Tese de Doutorado, Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 284 f.
- Costa, C. M. C. (2015). *Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos*. Tese de Doutorado, Curso de Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 181 f.
- Departamento Nacional de Infraestrutura De Transportes (2004). 010/2004 - PRO. *Inspeção em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Empresa de Pesquisa Energética (2021). *Empreendimentos eólicos ao fim da via útil: situação atual e alternativas futuras*. Brasília, 57 f.
- Faria, P.; Noronha, M. (2013). Fundação de Torres Eólicas - Estudo de Caso. In: Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul - GEOSUL 13, Ponta Grossa, *Anais*. p. 1-12. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307512613_Fundacoes_de_Torres_Eolicas_-Estudo_de_Caso. Acesso em: 19 mar. 2023.
- Gasparetto, A., Pantoja, J. C., Ramires, F. B. (2021). *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.
- Gonçalves, R. (2003). *Análise de propagação de fissuras por fadiga em concreto pelo MEF mediante a mecânica do dano contínuo*. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 116 f.
- Lakshmikantha, M. R. (2009) *Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils*. Tese de Doutorado, Curso de Enginyeria del Terreny, Cartogràfica I Geofísica, Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals I Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 391 f.
- Lorau, C.; brühwiler, E. (2016). *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.
- Lorenzi, A. et al. (2023). Application of Ultrasonic Tomography to detect defects in concrete structures. In: *Journal Of Nondestructive Testing*, Mayen.
- MCalorum, J. et al. (2018). Deterioration of cracks in onshore wind turbine foundations. In: *Engineering Structures*, n. 167, p. 121-131.
- Milititsky, J. (2019). Fundações de Aerogeradores: desafios de projeto e execução. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 9, São Paulo. *Anais*.
- Milititsky, J. Consoli, N. C., Schnaid, F. (2005). *Patologia das Fundações*. São Paulo, 207 p.
- Mitre, M. P. (2005). *Metodologia para inspeção e diagnóstico de pontes e viadutos de concreto*. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia da Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo / USP, 182 p.
- Nelli, R. T. (2012). *Patologia das estruturas de concreto em obras de arte: metodologia de gestão de inspeção em galerias de águas pluviais e canais*. Monografia de Especialização, Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2012, 78 p.
- Niyama, S., Aoki, N., Chamecki, P. R. (1998). *Verificação de desempenho*. In: Hachich, W. et al (ed.). *Fundações: teoria e prática*, 2nd ed., Pini, São Paulo, p. 723-751.
- Perry, M. et al. Crack monitoring of operational wind turbine foundation. In: *MDPI*, Basel, v. 1925, n. 17, p. 1-20.
- Reginato, L. A. et al. (2023). Evaluación de la homogeneidad de pilares de hormigón armado mediante tomografía ultrasónica. In: XVII Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIX



Congresso de Control de da Calidad en la Construcción - CONPAT, Santa Cruz de La Sierra. *Anais*. v. 2, p. 1-14.

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

Souza, V. C., Ripper, T. (1998). *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. Pini, São Paulo, 257 p.

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