

Análise numérica de fundações de aerogeradores submetidas a carregamentos cíclicos e dinâmicos

Priscila Cristina Castilho de Lima¹, Kurt André Pereira Amann
Departamento de Engenharia Civil, Centro Universitário FEI
castilhopriscila00@gmail.com, kpereira@fei.edu.br

Resumo: O objetivo desse projeto é entender e analisar a complexidade envolvida no projeto de fundações de torres eólicas submetidas a carregamento cíclicos e dinâmicos em que os métodos analíticos e teóricos convencionalmente empregados não obtêm soluções satisfatórias no que diz respeito ao comportamento geotécnico do sistema de fundações.

1. Introdução

As fundações usadas para aerogeradores são as chamadas de fundações profundas (indiretas), segundo a NBR 6122/2010, define-se como fundação profunda aquela que transmite a carga proveniente da superestrutura ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste), ou pela combinação das duas. Além disto, nas fundações profundas a profundidade de assentamento deve ser maior que o dobro da menor dimensão em planta do elemento de fundação.

Estruturas de aerogeradores (wind turbines) são empregadas para converter energia cinética, proveniente da ação do vento, em energia elétrica. Como se verifica em Svensson (2010), o conceito original de se retirar energia de fontes eólicas surgiu com o uso de moinhos de vento para a execução de processos industriais. Graças ao avanço tecnológico das últimas décadas, incluindo o potencial encontrado no emprego de softwares para modelagem computacional, bem como a sofisticação de processos industriais e da Ciência dos Materiais, houve um considerável aumento no uso de wind turbines para a geração de energia elétrica.

Codrington (2013) assinala que os crescentes investimentos em fazendas de aerogeradores, protagonizados pela União Europeia no final do século XX e início do século XXI, encontram sólido contexto na necessidade de se conceber fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, que são finitos e causam consideráveis impactos ambientais.

2. Cenário do Setor Eólico no Brasil

O Brasil hoje possui uma das matrizes energéticas mais diversificadas do mundo. Nos últimos 15 anos contou com investimentos privados em Parques eólicos onde uma parte expressiva está alocada no Nordeste em função principalmente da velocidade média do vento (7,5 m/s).

Tudo começou em 1992 em Fernando de Noronha, quando o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (Celpe) fizeram parceira com um instituto dinamarquês para instalar uma turbina de 225 kW. Mas só em 2009 a energia eólica entrou definitivamente na matriz elétrica brasileira e no mapa da indústria nacional.

A energia Eólica apresentou um grande crescimento no País nos últimos anos, entre 2014 e 2016 a capacidade instalada do setor cresceu 79,7%. Segundo dados do Operador Nacional do Sistema (ONS), em 14 de setembro de 2017, as eólicas abasteceram 64% da demanda média do Nordeste e, até dezembro de 2017, tinham sido instaladas quinhentas usinas eólicas no Brasil, das quais cerca de quatrocentas estão instaladas no Nordeste (ABEEÓLICA, 2017). [1]

3. Análise

De acordo com Codrington (2013), a natureza variável dos carregamentos com o tempo é decorrente do funcionamento do rotor e das condições locais do vento. Os tipos de carregamentos dinâmicos são ilustrados na Figura 2.

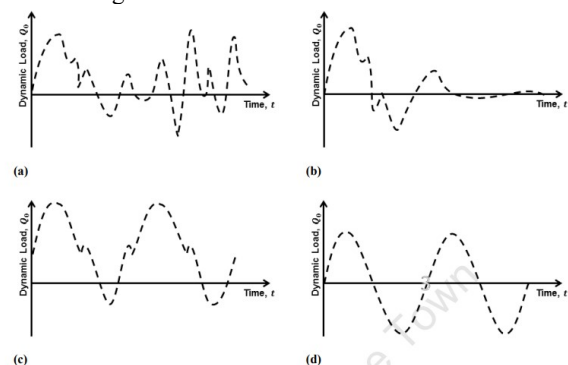


Figura 2 – Tipos de carregamentos dinâmicos: (a) aleatório, (b) transiente, (c) periódico e (d) sinusoidal (Adaptado de Codrington, 2013)

De forma geral, tal comportamento pode ser idealizado por uma força sinusoidal (Q), onde ω é a frequência de excitação e Q_0 é a amplitude. A Equação 1 sintetiza tais fenômenos matematicamente.

$$Q(t) = Q_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

Por outro lado, a resposta da estrutura aos carregamentos também é dependente do tempo. Nesse sentido, vale destacar a relação entre a frequência de excitação (ω) e a frequência natural da estrutura (ω_n), que é função de sua rigidez e massa. Essas relações podem ser verificadas na equação 2.

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (2)$$

São destacadas três zonas de comportamento estrutural para a torre quando solicitada dinamicamente. A primeira é denominada quasi-static, quando os deslocamentos no elemento estrutural respondem às

solicitações de forma instantânea e a frequência de excitação encontra-se abaixo da frequência natural do sistema. O segundo caso é referido por Codrington (2013) como inertia dominated. Nesta situação, a frequência de excitação está bastante acima da frequência natural da estrutura, fazendo com que a resposta da estrutura seja contra a força aplicada. Todavia, o mais crítico dos casos é a ressonância, caso em que a frequência de excitação iguala a frequência natural do sistema, caracterizando grandes deformações.

Svensson (2010) especifica a natureza dos carregamentos transmitidos às fundações, destacando que: a solicitação vertical é bastante inferior à magnitude dos momentos e forças horizontais, de natureza excêntrica, impostos à estrutura; wind turbines estão sujeitas a cargas cíclicas (momento e forças horizontais) provenientes das ações do vento e do rotor; e o mais importante, isto é, a natureza dinâmica dos carregamentos provoca respostas variáveis da estrutura na forma de vibrações que, juntamente às ações cíclicas de momento e forças horizontais provocam a degradação da rigidez do solo ao longo do tempo, reduzindo a parcela de resistência das fundações por atrito lateral.

Em Codrington (2013) afirma-se que a determinação de módulos de resiliência representativos do comportamento tensão x deformação do solo constitui uma das mais complexas atividades da Mecânica dos Solos. Diferentes modelos tentam atribuir módulos de elasticidade ao sistema solo – estrutura, entre os quais pode-se citar a Teoria da Elasticidade, que assume a ocorrência de deformações imediatas e reversíveis. Entretanto, propostas mais adequadas podem ser encontradas em modelos de elasticidade não-linear, uma vez que as características em termos de tensão e deformação de geo materiais dependem do nível de deformações cisalhantes as quais o solo está submetido.

Dessa forma, não se pode assumir um modelo elástico-linear, mas uma função entre as tensões de cisalhamento e as tensões efetivas de confinamento. A Figura 3 relaciona diferentes modelos para o comportamento do sistema solo – estrutura em função das tensões cisalhantes.

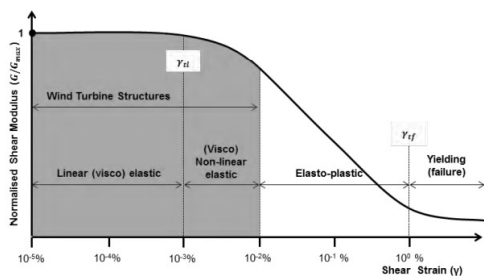


Figura 3 – Determinação não-linear do módulo de cisalhamento normalizado em função das deformações de cisalhamento (Codrington, 2013)

Victor e Cerato (2000) argumentam que carregamentos dinâmicos podem ser definidos como solicitações variáveis com o tempo em um dado sistema. Assim, definem-se os atributos: frequência das solicitações e número de ciclos de solicitações. No caso

de fundações de aerogeradores, Codrington (2013) mostra que a frequência de wind turbines é relativamente baixa (de 1Hz a 100 Hz). Por outro lado, o número de ciclos de carregamento é desproporcionalmente alto (para a faixa de frequências citadas, os ciclos variam entre 10 a 100), o que pode provocar: cargas de impulso associadas a eventos dinâmicos singulares; problemas de vibração e propagação de ondas, agravados por terremotos e fadiga.

As equações devem ser apresentadas no lado esquerdo e numeradas no lado direito entre parênteses.

$$W = \tau_z (\theta_2 - \theta_1) \quad (1)$$

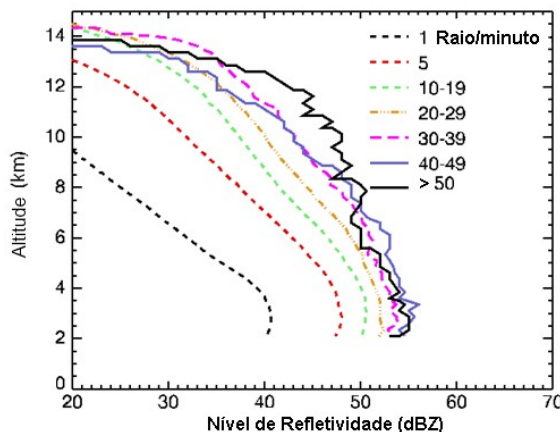


Figura 1 – Título da figura.

As tabelas devem ser referenciadas sequencialmente por Tabela I - seguida do título na parte superior da mesma e centralizado. O texto da mesma deve ser centralizado.

Tabela I – Formato da página.

Margem	Tamanho (cm)
Superior	2,0
Inferior	2,5
Esquerda	2,0
Direita	2,0
Coluna	1,0

4. Conclusões

Destaque os principais resultados alcançados na pesquisa.

5. Referências

- [1] D. S. Azevedo et. al., IEEE Journal of Solid-State Circuits, **42** (2003) 1234-1239
- [2] M. Rocha, Conceitos Fundamentais, Springer-Verlag, 1999

Agradecimentos

A instituição XXX pela realização das medidas ou empréstimo de equipamentos.

¹ Aluno de IC do Centro Universitário FEI (ou FAPESP, CNPq ou outra). Projeto com vigência de XX/18 a XX/19.