

CAUSAS PATOLOGIAS GEOTÉCNICAS OCORRIDAS EM UM COMPLEXO EÓLICO NO ESTADO DE PERNAMBUCO

**JOÃO ALEXANDRE PASCHOALIN FILHO¹, BRENNO AUGUSTO MARCONDES
VERSOLATTO², GILBERTO TARCISO BOTTAN³, ANTONIO CELSO DE SOUSA
JUNIOR⁴**

¹ Professor Doutor, Universidade Nove de Julho, Programa de Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, 11-972578007, paschoalinfilho@yahoo.com.

² Engenheiro Civil, Universidade Nove de Julho, Mestrando do Programa de Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, 11-99469-6410, brennoversolato@hotmail.com.br

³ Engenheiro Civil, Universidade Nove de Julho, Mestrando do Programa de Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, gibabottan@yahoo.com.br, 11-987432775

⁴ Engenheiro Civil, Universidade Nove de Julho, Mestrando do Programa de Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, antoniocelso@uni9.pro.br, 11-9725784444.

Apresentado no
XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2020
23 a 25 de novembro de 2020 - Congresso On-line

RESUMO: Este artigo traz o estudo das causas geotécnicas da ocorrência de trincas no solo de base de geradores eólicos pertencentes a um parque de geração localizado na região do município de Garanhuns/PE. Para subsídio dos estudos foram conduzidas inspeções “in loco” e prospecção do subsolo por meio de sondagens mistas. O local, em termos geológicos, encontra-se inserido, na Província Borborema, sendo constituído pelos litotipos dos complexos Cabrobó e Belém de São Francisco, da suíte intrusiva leucocrática peraluminosa e dos granitóides de quimismo. Após estudos, concluiu-se que as trincas localizadas próximas às cristas dos taludes e base dos aerogeradores consistem em trincas de tração devido à ausência de coesão, característica de solos arenosos. As movimentações de solo observadas próximas aos transformadores foram oriundas de fenômeno de subsidência.

PALAVRAS-CHAVE: Gerador eólico, geologia, recalques diferenciais.

GEOTECHNICAL CAUSES OF PATHOLOGIES OCCURRED IN A WIND COMPLEX IN THE STATE OF PERNAMBUCO

ABSTRACT: This article presents the study of the geotechnical causes of cracks in the base soil of wind generators belonging to a generation park located in the region of the municipality of Garanhuns / PE. To subsidize the studies, inspections were carried out "in loco" and prospecting of the subsoil through mixed surveys. In geological terms, the site is inserted in the Borborema Province, being constituted by the lithotypes of the Cabrobó and Belém de São Francisco complexes, the peraluminous leukocratic intrusive suite and granitoid. After studies, it was concluded that the cracks located close to the slopes' ridges and the base of the wind turbines consist of traction cracks due to the absence of cohesion, characteristic of sandy soils. A subsidence phenomenon caused the soil movements observed near the electric transformers.

KEYWORDS: Wind generator, geology, differential settlement.

INTRODUÇÃO:

A capacidade mundial instalada de geração eólica que era de, aproximadamente, 158GW em 2009, cresceu para 500GW no final de 2016. Tal crescimento ocorre, por se tratar de uma fonte de energia com grande potencial para geração de eletricidade e com baixo custo. (BARROS; BARROS, 2017).

O processo de conversão de energia se inicia quando a força do vento empurra as pás, gerando o seu movimento ascendente e giratório em torno do eixo de rotação do rotor, provocando a rotação deste e, conseqüentemente, a da transmissão. Nesta fase, a energia do vento é transformada em energia mecânica que, em seguida, é convertida em energia elétrica. (OLIVEIRA, 2012; CASTRO, 2009).

Para o assentamento das estruturas dos geradores eólicos é necessário atenção com as condições do subsolo e do tipo de fundação a ser utilizada, de modo que não ocorram problemas de recalque diferenciais; o que poderia causar o desaprumo da torre do gerador. O esforço imposto pelo vento na torre causa um momento de giro em sua base, exercendo uma solicitação de tração entre o solo e a fundação existente. Dessa forma, além da importância estrutural da torre, deve-se considerar a interação solo/fundação face aos esforços solicitantes comuns a este tipo de construção.

Dentre deste contexto, este artigo demonstra o estudo realizado em um parque de geração de energia eólica situado na Microrregião de Garanhuns/PE, em que foram constatadas “in loco” patologias no solo de fundação dos geradores existentes.

MATERIAL E MÉTODOS:

O local em estudos consiste em um complexo eólico de geração de energia e encontra-se situado na Microrregião de Garanhuns. Destaca-se que, ao todo, o parque eólico é composto por 106 aerogeradores divididos em subáreas: BR-1, BR-2, BR-3, BR-4, BR-5, BR-6 e BR-7.

Para prospecção do subsolo foram conduzidas 9 sondagens mistas (percussão + rotativa), totalizando 40 metros perfurados. As sondagens foram executadas de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6484. No intuito de se caracterizar de forma efetiva os problemas relatados, foram realizadas inspeções de campo em todas as áreas que dos aerogeradores. A Tabela 1 apresenta a profundidade alcançada em cada uma das sondagens conduzidas.

TABELA 1. Profundidade das sondagens executadas

Sondagem	Profundidade Total (m)	Profundidade do N.A (m)
SM-BR1/01	4,50	Nc
SM-BR1/08	5,00	Nc
SM-BR2/06	4,85	Nc
SM-BR4/01	7,26	Nc
SM-BR4/02	1,70	Nc
SM-BR4/02A	2,20	Nc
SM-BR7/11	2,25	Nc
SM-BR7/14	8,30	Nc
SM-BR7/15	3,50	Nc

As análises estatísticas para verificação da relação entre a ocorrência de danos às estruturas e características da localidade foram efetuadas por meio do tratamento estatístico do Teste Qui-Quadrado, apropriado para relações envolvendo variáveis nominais (drenagem, vegetação, solo, etc). Para tal, foi considerado como base o nível de significância de 5%, ou seja, só foi caracterizada a relação entre um dano e uma característica existente quando o resultado do Teste Qui-Quadrado (probabilidade de significância) foi inferior à 5% ($\text{sig} < 0,05$).

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DO LOCAL:

O local em estudo encontra-se inserido geologicamente na Província Borborema, sendo constituído pelos litotipos dos complexos Cabrobó e Belém de São Francisco, da suíte intrusiva leucocrática peraluminosa e dos granitóides de quimismo. A Província Borborema está situada geograficamente no nordeste brasileiro compreendendo uma área de aproximadamente 450.000 km². A geologia que compõe o local da obra apresenta as seguintes características:

- Rochas com marcantes diferenciações de comportamento geomecânicos e hidráulicos. Essas descontinuidades (superficiais planares) facilitam a percolação de fluidos, o desprendimento de blocos e placas em taludes de corte, o intemperismo e a erosão.
- As rochas alteram-se para solos argilo-siltico-arenosos, pobres em nutrientes (baixa fertilidade natural) e ricos em alumínio (solos ácidos). Erosividade dos solos de moderada nos solos residuais bem evoluídos a alta nos pouco evoluídos, principalmente quando continuamente mecanizados ou intensamente pisoteados pelo gado.
- Onde os solos são rasos e as rochas apresentam-se bem fraturadas, os poluentes podem infiltrar-se e atingir com facilidade as águas subterrâneas.
- Terrenos normalmente adequados para fundações de obras de grande porte.

Serra dos Garanhuns é, provavelmente, uma ramificação isolada da Cordilheira da Borborema que foi, em épocas remotas, interceptada pela erosão geológica ou pelo diastrofismo da crosta. Ela tem a aparência das barreiras cenozoicas pliocênicas do litoral pernambucano, devido aos capeamentos de argilas vermelhas e amarelas, com leitos de caulim, que assentam sobre um "substratum" arenítico, ferruginoso, grosseiro, pertencente ao Terciário Superior.

A presença, porém, de um arenito silicioso, leucocrático, dominante, e de camadas argilosas e conglomeráticas, em sedimentos profundos da referida, serra, a classifica melhor como barreira cretácea, mesozoica, secundária, que repousa sobre um profundo horizonte de gnaissé algonquiano.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

De uma forma geral, as sondagens mistas executadas demonstram camada superficial de espessura média de 0,75m (variando entre 0,0 e 1,5m), composta por aterro silte-arenoso pouco argiloso de coloração marrom escura. A seguir, constata-se a presença de horizontes rochosos com RQD (*Rock Quality Designation*) – Índice de Qualidade de Rocha – apresentando incremento com a profundidade, ou seja, em cotas mais superficiais, estes encontram-se extremamente fraturados com qualidade de rocha variando entre Muito Pobre a Pobre. Em profundidades maiores, a qualidade da rocha apresenta-se entre regular e boa, indicando menor concentração de fraturamento. O nível do lençol freático não foi constatado em nenhum dos ensaios conduzidos.

Destaca-se que a rocha constatada “in loco” possui origem metamórfica de coloração cinza escura (variegada), composta mineralogicamente por quartzo, feldspato e mica (gnaisse).

Na Tabela 2 são apresentadas as patologias constatadas por meio de inspeção ao local, enquanto a Figura 1 demonstra a distribuição dos aerogeradores por localidade.

TABELA 2. Patologias gerais constatadas

Área do gerador	Patologia constatada
Área de entorno da praça do aerogerador	<ul style="list-style-type: none"> • Presença de pontos com acúmulo de água pluvial; • Vegetação rasteira dispersa; • Trincas na superfície do terreno; • Evidências de processo de ruptura de talude já ocorrido; • Danificação das sarjetas de drenagem do entorno da praça.
Entorno do transformador – Parte Externa	<ul style="list-style-type: none"> • Trincas no terreno; • Subsidiências e buracos vazios no terreno no contato com a estrutura de alvenaria; • Trincas e fissuras na alvenaria de fechamento; • Desalinhamento dos mourões e blocos de concreto de sustentação das telas metálicas de proteção e fechamento, respectivamente; • Presença de vegetação rasteira e limo nas estruturas de alvenaria; • Subsidiência do terreno por onde passa a fiação elétrica de conexão do conjunto aerogerador e transformador.
Entorno do transformador – Parte Interna	<ul style="list-style-type: none"> • Desaprumos do poste de transmissão de energia; • Desaprumos dos transformadores; • Trincas e fissuras nos contatos das peças pré-moldadas na fundação dos transformadores

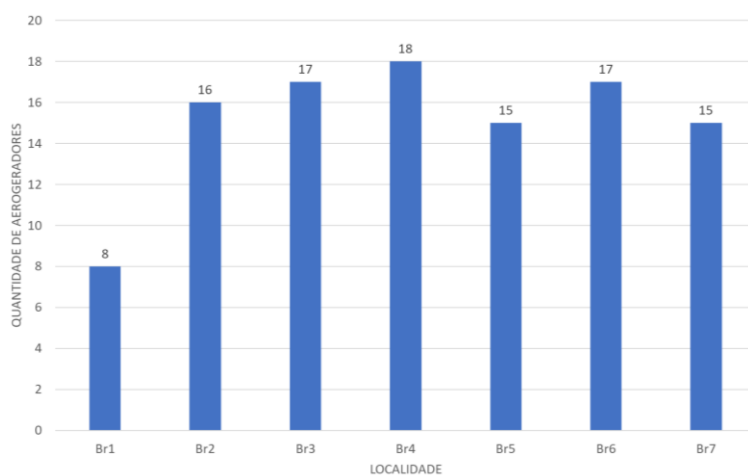


FIGURA 1. Distribuição da quantidade de aerogeradores por área.

As Figuras 2 e 3 demonstram levantamentos realizados a fim de se identificar o nível de severidade das patologias constatadas, tanto em termos estruturais, bem como geotécnicos. Apesar de o risco a vida humana ser baixo, é adotada a consideração “severa” baseada, nos processos erosivos em andamento, solapamentos da fundação, indícios de ruptura dos taludes de aterro e trincas de grande abertura na estrutura e terreno.

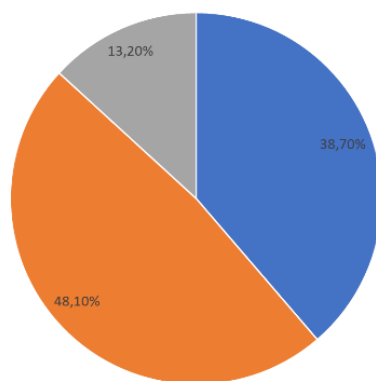


FIGURA 2. Severidade das patologias observadas em cada área.

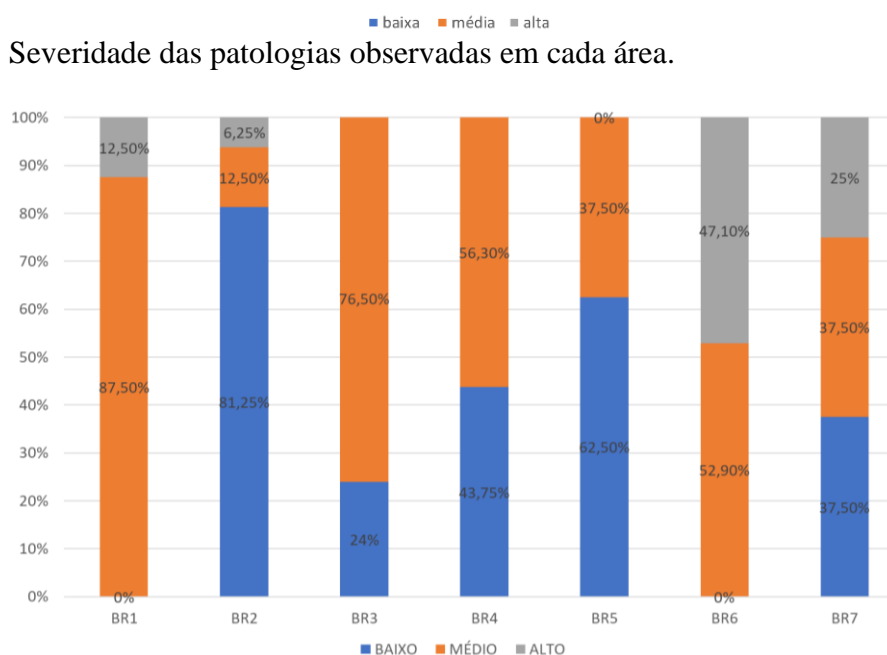


FIGURA 3. Severidade das patologias observadas em cada área.

Por meio das Figuras 2 e 3 pode-se observar que 48,1% das patologias constatadas “in loco” podem ser classificadas como de “média” severidade; em seguida, nota-se que as patologias de “alta” severidade correspondem a 38,7%. Dessa forma, pode-se assumir que aproximadamente 87% das patologias inspecionadas podem ser caracterizadas por apresentar severidades significativas que justificam a tomada de medidas de recuperação e correção.

Dentre as áreas inspecionadas constata-se que a BR-6 é a que possui maior percentual de locais com patologias de alta severidade, ou seja, 47,10% de sua área. Em relação as patologias constatadas, a Tabela 3 demonstra a distribuição destas em relação ao tipo e severidade, considerando-se todas as áreas inspecionadas.

TABELA 3. Distribuição das patologias observadas na área em estudos

Patologia verificada	Severidade			Total
	alta	média	baixa	
Trincas / subsidência no Solo	21,2%	65,2%	13,6%	100%
Trincas na Estrutura	13,7%	50,0%	36,6%	100%

Possibilidade de Movimentação	21,2%	66,7%	12,1%	100%
-------------------------------	-------	--------------	-------	------

Após as inspeções de campo conduzidas, foram levantadas hipóteses que poderiam ter levado às patologias constatadas. Estas foram submetidas a teste estatístico no intuito de comprovar (ou não) a influência de cada uma nas patologias em estudo. A Tabela 4 traz um resumo destas análises.

TABELA 4. Avaliação do conjunto de hipóteses levantadas

Hipóteses levantadas	Confirmação	Significância (<5%)
Há relação entre a ocorrência de trincas/subsidência no solo e o local em estudos?	sim	0,0
Há relação entre a ocorrência de trincas na estrutura e o local em estudos?	não	0,4
Há relação entre a ocorrência de movimentações de solo e o local em estudos?	sim	0,0
Há relação entre a ocorrência de movimentação de solo e a existência de trincas/subsidência no solo?	sim	0,0
Há relação entre a movimentação de solo e ocorrência de trincas na estrutura?	não	0,6
Há relação entre a severidade das patologias levantadas e as condições de drenagem locais?	não	0,53
Há relação entre a severidade das patologias e condição da vegetação local?	sim	0,0
Há relação entre as condições da drenagem superficial e os danos nas estruturas dos cercados dos transformadores?	não	0,56
Há relação entre o tipo de relevo de cada local e os danos nas estruturas dos cercados transformadores?	não	0,6
Há relação entre o perfil da encosta de cada local e os danos nas estruturas dos cercados dos transformadores?	não	0,2
Há relação entre a movimentação do solo e os danos ocorridos nos transformadores?	sim	0,05
Há relação entre as condições de vegetação local e os danos ocorridos na tubulação de fiação	sim	0,01
Há relação entre o tipo de vegetação local e os danos ocorridos na tubulação de fiação?	não	0,33

Observando a Tabela 4 pode-se notar que há relações significativas entre a movimentação de solo e a ocorrência de patologias na estrutura dos transformadores. Também se constata que há uma relação entre os locais de estudo e as patologias geotécnicas observadas, ou seja, há locais que demonstram maior incidência destes problemas do que outros.

Deve-se destacar que também foram obtidas relações significativas entre a vegetação e a severidade das patologias observadas, bem como a danos incidentes a tubulação da fiação. Dentre as relações não significativas apresentadas, destacam-se aquelas que indicam que as patologias constatadas, em princípio, nada têm a ver com o sistema de drenagem superficial local. Outro aspecto que deve ser salientado relaciona-se às condições de relevo e tipo de solo, os quais não demonstraram quaisquer influências em relação as patologias ocorridas. Este fato é explicado uma vez que o solo predominante no local é arenoso, e o relevo do tipo plano.

A movimentação do solo observada consiste em um fenômeno denominado como subsidência. A subsidência pode ser devida a fenômenos geológicos, tais como dissolução, erosão, compactação do material de superfície, falhas verticais etc. Normalmente, o fenômeno acontece de forma gradual e raramente de forma brusca e repentina. Deve-se salientar que este diferencia-se do recalque, uma vez que o fenômeno observado “in loco” não consiste em um deslocamento originado devido a aplicação de um carregamento vertical, mas sim a características geológico/geotécnicas do solo.

Em função das características do perfil identificadas, ou seja, aterro de comportamento arenoso com presença de enrocamentos de diâmetros variáveis, a água acumulada na região dos transformadores percola, trazendo consigo partículas finas de solo, as quais se depositam em camadas mais inferiores do perfil. O vazio deixado por este processo de erosão interna propicia a ocorrência dos fenômenos de subsidência observados, os quais induzem a parte significativa da ocorrência das patologias constatadas nos transformadores e tubulação de fiação.

CONCLUSÕES:

De acordo com os estudos e investigações conduzidos, pode-se concluir que:

Para a coleta de dados necessários a elaboração deste artigo foi realizada previamente uma inspeção visual em cada uma das áreas estudadas. Em seguida foram conduzidas sondagens mistas devidamente localizadas, a fim de se inferir as características estratigráficas locais. Com base nas informações obtidas, foram realizadas análises técnicas no intuito de constatar o nexos causal das patologias observadas “in loco”.

O subsolo local é composto por uma camada superficial de espessura variável composta por solo de comportamento arenoso e permeável. Subjacente verificou-se a presença de camada de rocha em níveis de alteração variando entre Extremamente Fraturado a Pouco Fraturado;

As trincas localizadas próximas às cristas dos taludes podem ser configuradas como trincas de tração devido a ausência de coesão, característica de solos arenosos. Destaca-se que as trincas de tração indicam a movimentação do aterro arenoso em questão, podendo configurar-se em um processo gradativo de instabilização dos taludes.

Especificamente em alguns pontos de corte e aterro, foram observadas presenças de acomodações do terreno no alinhamento da tubulação de fios que interliga o aerogerador ao transformador, sendo estas depressões superficiais e de pequenas magnitudes. Estas movimentações podem ocorrer em função de: a) má compactação do solo durante a recomposição do terreno após implantação da tubulação da fiação; b) fenômeno de subsidência em função do carreamento de partículas finas para o interior de solo devido a convergência e acúmulo de águas pluviais.

Durante as vistorias conduzidas não se verificou a ocorrência de patologias no solo nas proximidades das fundações dos aerogeradores. Dessa forma, as patologias ocorridas no solo em região próxima aos transformadores e àquelas existentes na estrutura dos cercados, não têm relação com a presença dos aerogeradores.

As trincas de maior severidade nas estruturas dos transformadores ocorreram em praças onde foram constatados fenômenos de subsidência.

As movimentações de solo observadas próximas aos transformadores não consistem em fenômenos de recalque, mas sim de subsidência. Esta, por sua vez, foi causada pela percolação de água pluvial com carreamento de partículas finas do terreno para posterior deposição em cotas mais profundas. Este processo, gradual e contínuo, é potencializado pelas características favoráveis de permeabilidade e granulometria do solo local, condições topográficas e ausência de dispositivos de drenagem superficial efetiva nas regiões afetadas.

REFERÊNCIAS:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 6484: “Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio”. Rio de Janeiro, 17p. 2001.

BARROS, L.S.; BARROS, C.M.V. Modificação no controle do lado da rede de geradores eólicos baseados em PMSG para ampliar a suportabilidade a afundamentos de tensão. **Eletrôn. e Potên.**, Campo Grande, v.22, n.2, p.167-178, 2017.

CASTRO, R.M.G. **Introdução a energia eólica**. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 93p, 2009.

OLIVEIRA, L.F.M.P. **Análise do comportamento dinâmico de torres de geradores eólicos**. Dissertação (Mestrado) Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2017, 120p.