

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/315

Fatores Geotécnicos a Serem Considerados em Projetos de Fundações de Turbinas de Geração Eólica – Estudo de Caso

Arthur Pereira da Costa Junior
Geólogo, Tractebel, Rio de Janeiro, Brasil, arthurxjuniorex@yahoo.com.br

Marcio Fernandes Leão
Geólogo-Geotécnico, Tractebel/UFV, Belo Horizonte, Brasil, marciotriton@hotmail.com

RESUMO: A locação dos aerogeradores é definida através do estudo de viabilidade das correntes de vento, com auxílio de softwares específicos. Para selecionar uma área para geração de energia eólica é necessário: observar a viabilidade técnica em áreas de baixa e média intensidade de correntes de vento, realizar um bom levantamento meteorológico e geográfico (minimizar a rugosidade do terreno, que influencia na altura da torre) para aproveitamento eólico geração da energia, verificar o sentido do movimento das correntes de vento e a análise da viabilidade econômica da geração. O presente artigo teve como objetivo identificar os parâmetros geotécnicos que foram utilizados para determinar o melhor horizonte do solo que poderia servir como fundação de aerogeradores para usinas eólicas, na região do Município de Morro do Chapéu-BA. Para a análise, foram utilizados dados geológicos da região, sondagens diretas e indiretas, parâmetros geotécnicos estimados por meio de correlações e consequentemente definição do tipo de fundação. A partir dos resultados foi possível definir o projeto de fundação de oitenta e quatro aerogeradores. Notou-se que havendo a substituição de solo, foi viável a implantação de fundações diretas para os aerogeradores. Conclui-se que as condições obtidas permitiram a decisão rápida sobre os projetos de aerogeradores, devendo as informações obtidas por meio de correlações validadas com ensaios de laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: Aerogeradores, Fundação, Estabilidade.

ABSTRACT: The location of the wind turbines is defined through a feasibility study of wind currents, with the help of specific software. To select an area for wind energy generation it is necessary to: observe the technical feasibility in areas of low and medium intensity of wind currents, carry out a good meteorological and geographic survey (minimize the roughness of the terrain, which influences the height of the tower) to wind energy generation, check the direction of movement of wind currents and analyze the economic viability of the generation. This article aimed to identify the geotechnical parameters that were used to determine the best soil horizon that could serve as a foundation for wind turbines for wind farms, in the region of the Municipality of Morro do Chapéu-BA. For the analysis, geological data from the region, direct and indirect surveys, geotechnical parameters estimated through correlations and consequently definition of the type of foundation were used. Based on the results, it was possible to define the foundation project for eighty-four wind turbines. It was noted that if the soil was replaced, it was feasible to implement direct foundations for the wind turbines. It is concluded that the conditions obtained allowed a quick decision on wind turbine projects, with the information obtained through correlations validated with laboratory tests..

KEYWORDS: Wind turbines, Foundation, Stability.

1 INTRODUÇÃO

A locação dos aerogeradores é definida por meio do estudo de viabilidade das correntes de vento, com auxílio de simulações numéricas. Segundo Epalanga (2013) e Caldas (2010) para selecionar uma área para geração de energia eólica é necessário: observar a viabilidade técnica em áreas de baixa e média intensidade de correntes de vento, realizar um bom levantamento meteorológico e geográfico (minimizar a rugosidade do terreno, que influencia na altura da torre) para aproveitamento eólico geração da energia, verificar o sentido

do movimento das correntes de vento e a análise da viabilidade econômica da geração. Com isso, é definido: o Estado e a Cidade que receberá o empreendimento, os locais de construção, a altura e o espaçamento para cada um dos aerogeradores.

Após a definição de viabilidade do vento inicia-se a definição dos tipos de fundação. Essas fundações devem ser analisadas uma a uma sendo levantados todos os aspectos geológicos-geotécnicos de forma que sejam estáveis durante o período de concessão (25 a 30 anos) e enquanto não forem descomissionadas.

Como alternativa às fundações dessas estruturas, podem ser dimensionadas do tipo direta ou indireta, apresentando vantagens e desvantagens. Buscando alternativas viáveis para esses projetos, as fundações diretas têm sido uma opção. Assim, as sapatas de concreto que servirão de fundação para as turbinas eólicas e que farão a interface entre o aerogerador e o solo que o suportará, são planejadas e calculadas de acordo com os resultados obtidos na campanha de sondagens, executada na área do empreendimento. Destaca-se, que o resultado das sondagens influencia na profundidade de cada uma dessas fundações e podem refletir no formato da sapata de concreto (fundação), conforme Rodrigues (2019). Segundo Lôbo (2018) a fundação (ou sapata de concreto) de base circular é a mais utilizada e mais segura, visto que suas dimensões tendem a distribuir as forças de forma equivalente, diferindo assim das sapatas de formato poligonal apresentam maior esforço sobre as quinas. É necessário que o fabricante do aerogerador forneça documentos com os dados da máquina (motorização vertical ou horizontal), carga de vento, altura do aerogerador, forças que vão atuar sobre a base de concreto e por final a força que o conjunto exercerá sobre o solo de forma a garantir a estabilidade da fundação.

Desta forma, o artigo buscou elencar os fatores geológico-geotécnicos necessários para o dimensionamento de fundações de projeto de aerogeradores, com ênfase às fundações diretas, de forma a determinar o melhor horizonte do solo/rocha como fundação, a nível conceitual, sobre a viabilidade desses projetos.

3 METODOLOGIA

Para a caracterização da fundação, foram executadas sondagens mistas para cada local de fundação do aerogerador, de forma a elaborar o perfil geológico-geotécnico da fundação, auxiliando na categorização do material a ser escavado para construção dos acessos da obra e das plataformas de montagem. A partir dos resultados das sondagens, foram categorizados os materiais geológicos de fundação buscando uma classificação geotécnica, ou seja, incorporando propriedades de engenharia para esses horizontes. Posteriormente, a partir dos dados de NSPT e classificação dos testemunhos rochosos, foram obtidos parâmetros geotécnicos por meio de correlações contidas em referências técnicas. Por fim, foi avaliado qual horizonte seria o mais adequado para o posicionamento das fundações diretas e se haveria necessidade de melhoria do solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Interpretação do perfil e parametrização dos materiais

Buscando a complementação das informações, foram executadas investigações geofísicas pelo Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). Usualmente o perfil sísmico é feito no sentido de maior movimento de vento, nesse perfil é possível identificar variações no topo rochoso e possíveis matacões de rocha. A Figura 1 apresenta uma seção típica de análise com a localização de uma sondagem mista (seta em vermelho) de forma a caracterizar a fundação.

Para critério geotécnicos de caracterização dos solos foi adotada a correlação com: os ensaios de N_{SPT} , a granulometria e a gênese dos materiais. Na porção em solo, foi realizada a divisão do horizonte em três tipos, arenosos (S-are) e argilosos (S-arg), de acordo com o N_{SPT} , ou seja: S1, S2 e S3. O S1 apresentou valores de SPT inferiores a 15 golpes. Já o S2 possui N_{SPT} entre 16 e 25 golpes e para os solos S3 o N_{SPT} é superior a 26 golpes. As propriedades obtidas para os solos arenosos e argiloso são apresentados na Tabela 1 e 2, respectivamente.

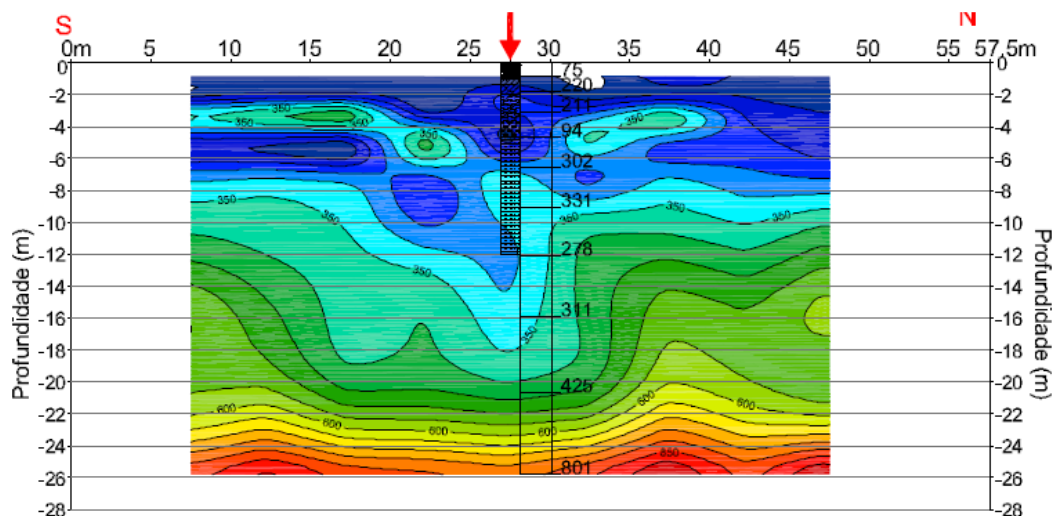


Figura 1. Perfil geofísico MASW obtido para o projeto e em vermelho a localização da sondagem mista.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos para fundações arenosas (S-are) (BARATA, 1984).

Parâmetro	S1-are, $N_{SPT} < 15$	S2-are, N_{SPT} de 15 a 25	S1-are, $N_{SPT} > 25$
N_{SPT}	8	20	33
Peso Específico aparente (kN/m^3)	17	18	19
Coesão efetiva (kPa)	5	5	5
Ângulo de atrito interno ($^\circ$)	28	32	34
Módulo de elasticidade estático (MPa)	12	17,5	26

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos adotados para solos argilosos (S-arg) (BARATA, 1984).

Parâmetro	S1-arg, $N_{SPT} < 15$	S2-arg, N_{SPT} de 15 a 25	S1-arg, $N_{SPT} > 25$
N_{SPT}	8	20	33
Peso Específico (kN/m^3)	18	19	20
Cesão efetiva (kPa)	70	110	200
Módulo de elasticidade estático (MPa)	16,5	24	46

A porção rochosa também foi dividida em três categorias: R1, R2 e R3. As rochas R1 possuem RQD inferior a 10%, recuperação variável, mas tendendo a baixa, sendo de baixa resistência e extremamente fraturada a fragmentada, A5, C5, F5 ou F4, com comportamento de solo muito compacto e duro aos golpes de martelo geológico. As rochas do tipo R2 possuem RQD entre 10 e 40 %, recuperação em torno de 75%, sendo rochas muito fraturadas, mas de coerência alta, ou podendo ser classificado como um maciço rochoso de qualidade geotécnica pobre, A4, C4, F4 a A3, C3, F3. Já as rochas R3 possuem RQD de 40 a 100% e recuperação superior a 85%, sendo geotecnicamente o maciço rochoso de categoria regular (A3, C3, F3 a A2, C2, F2 ou superior). Para critérios geotécnicos de projeto as rochas R1-arg (argilito) e R1-are (arenito) foram consideradas como solos muito resistentes, conforme Tabela 3 e 4.

Tabela 3. Parâmetros para rochas R1-arg.

Parâmetro	Rocha fragmentada / alterada R1-arg
N_{SPT}	50
Peso específico aparente (kN/m^3)	22
Cesão efetiva (kPa)	250
Módulo de elasticidade estático (MPa)	58

Tabela 4. Parâmetros para Rochas R1-are.

Parâmetro	Rocha fragmentada / alterada R1-are
N_{SPT}	50
Peso específico aparente (kN/m^3)	21
Cesão efetiva (kPa)	5
Ângulo interno ($^\circ$)	37
Módulo de elasticidade estático (MPa)	58

Para a estimativa dos parâmetros das rochas foi utilizado o software ROCLAB v 1.0 (Tabela 5), a partir da observação de testemunhos de sondagem, determinação do RQD e das características das superfícies das descontinuidades. Foram considerando os seguintes valores: Parâmetros M_i : 17 para arenitos e 4 para argilitos; Parâmetros M_r : 275 para arenitos e 250 para argilitos; os módulos elásticos da rocha intacta (E_i) considerados foram 1875 MPa para argilitos e 5000 MPa para arenitos; os valores GSI considerados foram 40, 45, 50 e 55 para tipos R2-arg, R2 are, R3-arg e R3-are, respectivamente.

Tabela 5. Parâmetros geotécnicos adotado pelo projeto para as rochas.

Parâmetro	Rocha R2-arg	Rocha R2-are	Rocha R3-arg	Rocha R2-are
RQD (%)	10 - 40 %	10 - 40 %	> 40%	> 40%
RMR	40	45	50	55
GSI	35	40	45	50
Classe (qualidade do maciço rochoso)	IV-III (má a média)	III (média)	III (média)	III (média)
Peso específico aparente (kN/m^3)	24	24	24	24
Coesão efetiva (kPa)	0,21	1	0,26	1,17
Ângulo interno ($^\circ$)	19 $^\circ$	32 $^\circ$	22 $^\circ$	35 $^\circ$

4.2 Estimativa do comportamento

Para os horizontes de solo, considerou-se que o recalque seria do tipo instantâneos, não sendo encontrados lençóis freáticos nas sondagens e desconsiderados recalques de consolidação. Destaca-se a importância do posicionamento da sapata de concreto em fundação homogênea (todo solo ou todo rocha). Foi ainda calculado o coeficiente de lastro do solo (k_{30}), conforme Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros para o coeficiente de lastro em solo (PECK, 1974).

Parâmetros	S1-are $N_{SPT} < 15$	S2-are N_{SPT} de 15 a 25	S3-are $N_{SPT} > 25$
N_{SPT}	8	20	33
Coeficiente de lastro K_{30} (kN/m^3)	19290	43480	104800
Parâmetros	S1-arg $N < 15$	S2-arg N_{SPT} de 15 - 25	S3-arg $N > 25$
N_{SPT}	8	20	33
Coeficiente de lastro K_{30} (kN/m^3)	16150	40400	66600

A partir da análise dos dados, visando a implantação de uma fundação direta para apoio das sapatas de concreto, foram definidas as seguintes unidades geotécnicas: UG-I - solos S1 e S2, UG-II – Solos S3 e rocha R1 e UG-III – Rochas R2 e R3. Para fundações diretas em UG-I (solos S1 e S2) as cargas admissíveis para solos arenosos e argilosos, são apresentadas nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7. Carga admissível para solos arenosos S1-are e S2-are.

Método de cálculo	S1-are (kg/cm ²)	S2-are (kg/cm ²)
Terzagui (1943)	4,1	8,0
Terzagui e Peck (1948) (recalque de 50 mm)	1,3	3,3
Godoy & Teixeira (1996)	1,62	4,0
Guia de fundações rodoviárias Espanha (recalque de 50 mm)	1,32	2,03
Carga admissível adotada para recalque de 50 mm	1,3	2

Tabela 8. Carga admissível para solos argilosos S1-arg e S2-arg.

Método de cálculo	S1-arg (kg/cm ²)	S2-arg (kg/cm ²)
Terzagui simplificado	1,45	2,3
Carga admissível adotada para recalque de 50 mm	1,4	2,3

Como a pressão máxima projetada considerada foi de 200 kN/m² foi desaconselhado o apoio direto das fundações sobre os solos S1, sendo necessário executar sobre escavação até o material S2, S3 ou R. Para se manter a cota de geração do aerogerador fez-se necessário executar a troca de solo para ser mantida a altura do equipamento. Para as fundações diretas UG-II estimou-se a carga admissível (solos S3 e rochas fragmentadas/alteradas R1 e solos S3-are e R1-are), conforme Tabela 9 e 10, respectivamente. Esse material por sua vez atende aos critérios de suporte.

Tabela 9. Carga admissível para solos S3-are e rocha R1-are.

Método de cálculo	S3-are (kg/cm ²)	R1-are (kg/cm ²)
Terzagui (1943)	11,4	20,3
Terzagui e Peck (1948) (recalque de 50 mm)	5,4	8,2
Godoy & Teixeira (1996)	6,6	10,0
Guia de fundações rodoviárias Espanha (recalque de 50 mm)	4	7,2
Carga admissível adotada para recalque de 50 mm	4	7,2

Tabela 10. Carga admissível para solos S3-arg e rocha R1-arg.

Método de cálculo	S3-arg (kg/cm ²)	R1-arg (kg/cm ²)
Terzagui simplificado	4,1	5,3
Carga admissível adotada para recalque de 50 mm	4,1	5,3

Para fundações diretas UG-III foram usados valores de resistências à compressão simples estimados de 7,5 MPa para argilitos e de 20 MPa para arenitos. Assim, a estimativa de carga admissível para rochas R2 e R3 é apresentada na Tabela 11, cumprindo os requisitos de projeto.

Tabela 11. Carga admissível para rochas R2 e R3.

Método de cálculo	R2-arg (kg/cm ²)	R2-are (kg/cm ²)	R3-arg (kg/cm ²)	R3-are (kg/cm ²)
Norma DIN 1054 (2005)	15	15	15	15
Código inglês CP2004 (1972)	20	40	20	40
Código USA	15	40	15	40
Códigos ingleses	37,5	100	37,5	100
Bowles (1988)	10	25	12	35
Guia de fundações rodovias Espanha (DIN 1054)	4,9	8,0	8,0	13,1
Terzagui com fatores de carga de Rankine	5,5	40	10,5	93
Carga admissível adotada para recalque de 50 mm	4,93	8,0	8,05	13,14

A partir dos resultados, foi adotada fundação direta para os 84 aerogeradores. Foi descartado o apoio direto das fundações em solos S1 por apresentar capacidade de carga à ruptura inferior a pressão vertical máxima projetada de 200 kN/m². Assim, 4 fundações sofreram troca de solo para substituição do solo S1 por

concreto ciclópico. Os solos S2 e as unidades geotécnicas UGII e III apresentam capacidade de carga à ruptura superior a pressão vertical máxima projetada (200 kN/m^2) e valores aceitáveis de recalque para essa pressão de acordo com os requisitos de projeto (recalque máximo de 50 mm e diferencial máximo de 3mm/m). Por fim, a rigidez rotacional e horizontal calculada atende às exigências técnicas do fabricante em todos os casos;

5 CONCLUSÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais, com diferentes tipos formações rochosas, diferentes ambientes deposicionais e distintos processos tectônicos envolvidos na sua composição. Como todas as obras de geração de energia se considera os locais em que há a viabilidade de geração independentes dos desafios que venham a ser gerados e vencidos pela engenharia por conta de uma geologia desfavorável.

A energia renovável vem se mostrando forte e cada vez mais eficaz como a nova matriz energética, mas ela traz questões desafiadoras quando se trata de sua fundação. Tradicionalmente são feitos estudos de caracterização do solo e da rocha com a retirada de amostras e análises em laboratório, como indicam as boas práticas da engenharia. Para plantas eólicas essa prática é mais crítica, visto que os aerogeradores são localizados afastados e a estratégia de compreensão do meio localmente pode limitar estratégias. Assim, estudos expeditos, a nível conceitual, adota a correlação dos dados gerados pelas sondagens mistas e sondagens geofísicas por meio de correlações existentes propostas pela literatura.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que me deu suporte durante toda minha pesquisa e ao Dr. Marcio Leão que me deu apoio e me orientou e motivou a prosseguir com a publicação do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barata, F.E. (1984) Propriedades da mecânica dos solos: uma introdução ao projeto de fundações. Rio de Janeiro LTC.
- Bowles, J. E. (1988) Foundation Analysis and Design. 5th Edition.
- Caldas, D. M. (2010) Estudo do potencial eólico e estimativa de geração de energia de um projeto eólico na cidade do Rio de Janeiro utilizando WindPro eo WASP. Trabalho de graduação para engenheiro elétrico da Escola politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CP 2004/1972 – Code of Practice for Foundations.
- DIN 1054 – Ground – Verification of the safety of earthworks and foundations, 2005.
- Epalanga, S. A. O. (2013) Energia eólica – Viabilidade técnica de projeto eólico na região de Urubici. Trabalho de graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina.
- Godoy, N. S., Teixeira, A. T. (1996). Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. Fundação: Teoria e Prática, Hachich et al. (eds.), Ed Pini Ltda., São Paulo, Cap. 7p. 227-264.
- Lôbo, J. R. Estudo do Projeto Geotécnico de Fundação de Uma Turbina Eólica. Projeto de Graduação - Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2018. VIII, 90 p.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., Thornburn, T. H. (1974) Foundation Engineering. John Wiley & Sons, N.Y.
- Rodrigues, H. B. (2019) Estudo de Fundação Direta de Aerogerador com Métodos Numéricos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, SC, 165 p.
- Terzaghi, K. (1943) Theoretical Soil Mechanics. John Wiley and Sons.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. (1948) Soil mechanics in engineering. New York, John Wiley & Sons.