

Fundações diretas de aerogeradores: diretrizes para casos de não conformidade

Danilo Garbini Amaral

Engenheiro Geotécnico, HEAD5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, danilo.amaral@head5.com.br

Alessandro Cirone

Professor, PUC-RIO, Rio de Janeiro, Brasil, acirone@puc-rio.br

Lucas Ghion Zorzan

Engenheiro Geotécnico, HEAD5 Engenharia, Curitiba, Brasil, lucas.zorzan@head5.com.br

Paulo Cezar da Silva Junior

Geólogo, HEAD5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, paulo.cezar@head5.com.br

Marcelo Rossi Campos

Engenheiro Civil, HEAD5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, marcelo.rossi@head5.com.br

RESUMO: Na prática atual, os projetos de fundações de aerogeradores geralmente se baseiam em três critérios de avaliação: o número de golpes SPT, a velocidade da onda cisalhante e o coeficiente de reação vertical. Na etapa de liberação, o não atendimento a um desses critérios pode acarretar atrasos na obra, uma vez que são exigidas análises técnicas específicas ou novos ensaios nos locais de implantação das fundações. Com o objetivo de agilizar o processo, este trabalho busca estabelecer diretrizes para realizar ajustes no projeto quando a fundação a ser liberada atende parcialmente aos critérios de aprovação. Em virtude do fato de a prova de carga sobre placa ser o método predominante de avaliação no campo, é utilizada uma abordagem embasada em métodos numéricos a fim de relacionar os resultados obtidos por meio da placa com o desempenho da fundação do aerogerador. Como resultado deste estudo, os critérios de aprovação são atualizados e são propostos ábacos de projeto considerando técnicas de tratamento da fundação para casos de não conformidade.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações de Aerogeradores, critérios de liberação, prova de carga sobre placa, ábacos de projeto

ABSTRACT: In current practice, wind turbine foundation projects typically rely on three evaluation criteria: the number of SPT blows, the shear wave velocity, and the modulus of subgrade reaction. Failure to meet any of these criteria during the approval stage can lead to construction delays, as specific technical analyses or new tests at the foundation sites are required. To expedite the process, this work aims to establish guidelines for making adjustments to the design when the foundation partially meets the approval criteria. Given that plate load testing is the predominant evaluation method in the field, a numerical methods-based approach is used to relate plate test results to wind turbine foundation performance. As a result of this study, approval criteria are updated, and design charts considering foundation treatment techniques for non-compliance cases are proposed.

KEYWORDS: Wind turbine foundations, approval criteria, plate load test, design charts

1 INTRODUÇÃO

Aerogeradores são estruturas apoiadas sobre fundações superficiais (sapatas circulares) ou fundações profundas (com estacas), em função das condições e dos aspectos geológico-geotécnicos locais. Fundações superficiais são economicamente mais viáveis, principalmente quando são consideradas as dimensões de tais estruturas, que frequentemente ultrapassam 20 metros de diâmetro. Todavia, a aplicabilidade de fundações

superficiais deve se pautar no atendimento de dois critérios principais: critério de resistência e critério de rigidez.

Em relação ao critério de resistência, durante a etapa de projeto, a capacidade de carga pode ser avaliada por fórmulas teóricas, como o trinômio de Terzaghi (1948), que consideram os parâmetros de resistência do solo de fundação, além da geometria do elemento de fundação.

Quanto ao critério de rigidez, conforme indicado DNV/Risø (2002), são verificadas simultaneamente as rigidezes rotacional e translacional. A rigidez rotacional mínima é normalmente definida pela fabricante do aerogerador, tendo em vista que este é um requisito que garante o correto funcionamento dos sistemas de geração. Já a rigidez translacional mínima é definida pelo projeto estrutural do elemento de fundação, pois está diretamente relacionada com os recalques verticais esperados em função das solicitações da estrutura.

É importante destacar que com o aumento do diâmetro de um elemento de fundação, a capacidade de suporte aumenta ao passo que a rigidez diminui, de tal forma que para fundações de grandes dimensões, o critério de rigidez torna-se preponderante para a verificação e liberação de fundações superficiais em relação ao critério de ruptura.

Durante a etapa de projeto, são priorizados ensaios geotécnicos convencionais, como ensaios de laboratório (caracterização, cisalhamento direto, triaxiais), ensaios de campo (sondagens a percussão, ensaios pressiométricos) e indiretos (tal como a geofísica MASW). Já na etapa de construção, a liberação das fundações pode ser fundamentada principalmente no mapeamento geológico de superfície e provas de carga sobre placa, que visam simular as solicitações de projeto no terreno de fundação em escala reduzida.

Mesmo com uma etapa de projeto e dimensionamento bem subsidiados por ensaios de campo e laboratório, a possibilidade de não conformidade durante a etapa de implantação deve ser considerada, tendo em vista que a campanha de investigações pode não abranger de forma representativa as condições geológico-geotécnicas de fundações tão grandes como são as fundações de aerogeradores. Neste sentido, o objetivo deste artigo é apresentar diretrizes para casos de não conformidade durante a etapa de implantação, em que mudanças no projeto são muitas vezes impraticáveis em função de cronograma, como forma de dar celeridade na tomada de decisão em relação a alternativas de reforço de fundação.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

As diretrizes propostas pelo presente artigo são fundamentadas nos aspectos teóricos e práticos resultantes do desenvolvimento do projeto e da implantação de um Complexo Eólico localizado no estado do Rio Grande do Norte.

O Complexo Eólico em questão é composto por 55 aerogeradores, com fundações em concreto armado (f_{ck} mínimo de 30 MPa) moldado *in loco*, com geometria de sapata circular com diâmetro de 18,8 m e altura de 3,70 m.

Em relação ao contexto geológico local, o empreendimento está inserido majoritariamente na Formação Equador, que é formada por muscovita-quartzitos e por metaconglomerados, que foram observados em toda a extensão do complexo. Os muscovita-quartzitos são de coloração bege, por vezes, rósea, branco ou cinza claro, com foliação bem desenvolvida, granulometria fina a média e textura equigranular. Os metaconglomerados são polimíticos, com seixos de quartzo, gnaiss, granito, pegmatito, matriz de coloração cinza a esverdeada, predominantemente quartzosa e de granulação média. Durante as escavações das fundações dos aerogeradores, foram observados diques de pegmatito encaixados nos quartzitos e conglomerados da formação, conforme apresentado na Figura 1. Na região, as espessuras de solo são relativamente baixas (3 m), cuja granulometria é arenosa a areno-siltosa, com pedregulhos. Porém, em áreas próximas às margens dos principais rios e na porção sul do complexo, apresentam uma maior profundidade (até 15 m).

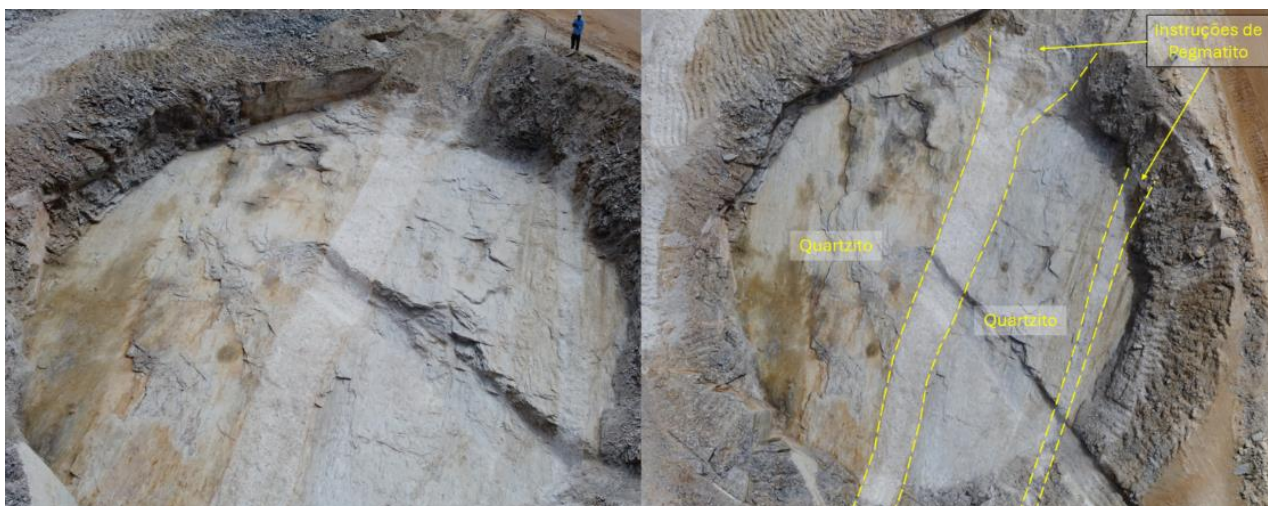


Figura 1: Mapeamento geológico da fundação

O dimensionamento e a análise estrutural do elemento de fundação consideraram as combinações de carregamento fornecidas pelo fabricante do aerogerador, sendo realizadas análise de estabilidade (equilíbrio de forças) e dimensionamento por análise numérica considerando um modelo de elementos finitos do tipo *Shell* apoiado em molas elásticas que representam o terreno de fundação. Como resultado deste estudo, foram obtidas as tensões atuantes na fundação e o coeficiente de recalque vertical mínimo, que representa a rigidez vertical mínima para atendimento à rigidez rotacional imposta pelo fabricante do aerogerador, a qual garante as condições adequadas de operação de todo o sistema.

Em relação à rigidez vertical mínima do terreno de fundação, esta foi obtida a partir da aplicação de um momento unitário no centro da base, paralelo ao plano da fundação, que induz a uma pequena rotação, também paralela ao plano. A partir da relação entre o momento unitário e sua respectiva rotação induzida, obtém-se o coeficiente de rigidez rotacional, que deve ser superior ao mínimo requisitado pelo fabricante. Dessa forma, partiu-se de uma rigidez rotacional mínima de $1E08$ kNm/rad, de onde se obteve um coeficiente de recalque mínimo de 20.940 kPa/m.

A partir do coeficiente de recalque mínimo obtido, foi realizado o dimensionamento do elemento de fundação, considerando, portanto, as rigidezes da base (concreto) e da fundação (solo ou rocha), de onde se obteve a tensão máxima atuante na fundação igual a 200 kPa.

Além do mapeamento geológico de campo das fundações, que deve se atentar a todas as condicionantes geológicas desfavoráveis à estabilidade das bases, o atendimento aos dois critérios mencionados acima (ruptura e rigidez) deve ser rigorosamente verificado. Uma tensão admissível do terreno de fundação inferior à tensão máxima atuante poderia levar ao colapso geotécnico, enquanto coeficientes de recalque inferiores ao mínimo requisitado poderiam levar a deformações excessivas na base, comprometendo significativamente sua integridade estrutural.

Neste sentido, a verificação de tais critérios foi realizada em um primeiro momento na fase de projeto, em que foram considerados os resultados dos ensaios laboratoriais, sondagens mistas e ensaios geofísicos tipo MASW. Em um segundo momento, com o objetivo de verificar os cálculos e demais dimensionamentos da fase de projeto, foram realizados ensaios de placa *in situ* para a confirmação de ambos os critérios, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 6489:2019

Mesmo com uma etapa de projeto bem consolidada e com informações suficientemente disponíveis do ponto de vista prático, alguns ensaios de placa resultaram em deslocamentos excessivos, gerando como consequência coeficientes de recalque abaixo do valor mínimo admissível considerado. Mudanças na concepção do projeto durante a implantação de tais estruturas se tornariam extremamente onerosas, tendo em vista o cronograma de obra, quantidade e porte dos aerogeradores, foram realizadas análises de tensão-deformação simulando diversas espessuras e tipos de substituição de material, para diferentes coeficientes de recalque obtidos em campo, obtendo-se um ábaco de substituição para todo o complexo eólico nas mesmas condições geológicas, trazendo celeridade na tomada de decisão para casos de não conformidade.

3 METODOLOGIA

2.1 Determinação do Coeficiente de Recalque para a Etapa de Projeto

Durante a etapa de projeto, o coeficiente de recalque da fundação pode ser obtido a partir dos parâmetros de deformabilidade do solo e da geometria do elemento de fundação, conforme Equação 1, proposta por Boussinesq (1885):

$$k_s = \frac{4E_s}{B \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2)} \quad (1)$$

Em que:

k_s é o coeficiente de recalque;

E_s é o módulo de elasticidade do solo;

B é o diâmetro ou lado do elemento de fundação (base circular ou quadrada);

ν é o coeficiente de recalque.

O módulo de deformabilidade E_s e o coeficiente de Poisson ν podem ser obtidos por correlação com o número de golpes da sondagem SPT (N_{SPT}) ou preferencialmente a partir de ensaios de laboratório (ensaios triaxiais) e ensaios geofísicos tipo MASW.

Para o presente estudo de caso, os parâmetros E_s e ν foram inicialmente obtidos a partir de ensaios triaxiais tipo CD (adensado e drenado). Todavia, como a quantidade de ensaios triaxiais é muito inferior à quantidade de dados obtidos pelo ensaio MASW, que normalmente se dá a cada metro ao longo do subsolo ensaiado, os parâmetros também foram estimados pela velocidade da onda cisalhante (v_s) resultante do ensaio geofísico. A relação entre v_s e o módulo E_s se dá pelo módulo de cisalhamento dinâmico do solo, através da teoria da elasticidade:

$$E_s = 2D_G G_0 (1 + \nu) \quad (2)$$

Em que:

D_G é o fator de degradação do módulo de cisalhamento, dado por $D_G = G_s/G_0$, e G_0 o módulo de cisalhamento máximo (ou dinâmico), igual a $G_0 = \rho v_s^2$.

O fator de degradação do módulo de cisalhamento (D_G) é função das deformações por cisalhamento previstas no solo, que normalmente variam entre 0,01% e 0,1% (Atkinson e Salfors, 1991) para estruturas de fundação. A partir dessas deformações, pode-se estimar o valor de G_s/G_0 pelo gráfico da Figura 2, adaptado de Idriss e Seed (1970), obtendo um valor igual a aproximadamente 0,55.

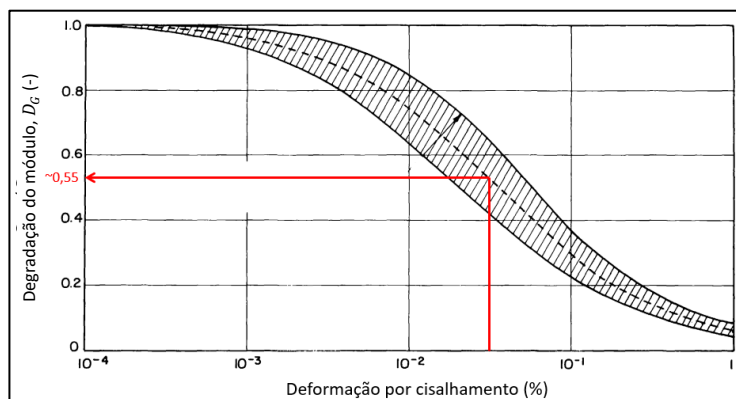


Figura 2: Degradação do módulo de cisalhamento máximo (Adaptado de Idriss e Seed, 1970)

2.2 Determinação do Coeficiente de Recalque para a Etapa de Implantação

De acordo com Bowles (1997), o coeficiente de recalque de uma placa (k_p) pode ser obtido por:

$$k_p = \frac{q}{\delta} \quad (3)$$

onde q é a pressão aplicada e δ é o recalque induzido por q . Na prática americana, o módulo é obtido na pressão que produz um recalque de meia polegada (12,7 mm).

No caso de fundações reais, o coeficiente de recalque pode ser obtido a partir do ensaio de placa, levando-se em consideração a geometria dos dois elementos (fundação e placa). No caso de fundações sobre solos granulares, podem ser empregadas a Equação 4, proposta por Terzaghi (1955), e a Equação 5, recomendada pelo *American Concrete Institute* (1988):

$$k_s = k_p \left(\frac{B + b}{2B} \right)^2 \quad (4)$$

$$k_s = k_p \left(\frac{b}{B} \right)^n \quad (5)$$

Em que:

k_p é o coeficiente de recalque vertical obtido diretamente pela placa;

b é a largura (ou diâmetro) da placa;

B é a largura (ou diâmetro) do elemento de fundação

n é um expoente que normalmente varia de 0,5 a 0,7.

Conforme Bowles (1997), para valores $B/b \geq 3$, a Equação 4 se torna menos precisa, superestimando os coeficientes extrapolados para o elemento de fundação.

2.3 Determinação do Coeficiente de Recalque via Análise Numérica

Para a determinação do coeficiente de recalque via análise numérica, foi utilizado o *software* RS2 v11.0 da Rocscience Inc, considerando análise com modelo axissimétrico, tendo em vista que a fundação é simétrica e do tipo circular. Foi adotado modelo constitutivo de Mohr-Coulomb com parâmetros de resistência obtidos a partir dos ensaios triaxiais realizados.

Para correlacionar o coeficiente de recalque obtido da placa com o coeficiente de recalque extrapolado para a fundação, foram considerados dois modelos numéricos: um simulando o ensaio *in situ*, com a rigidez e a dimensão da placa utilizada, e outro considerando os carregamentos, geometria e rigidez da fundação, conforme Figura 3.

Para um mesmo carregamento e em ambos os modelos de análise, o módulo de elasticidade da fundação foi variado de 20 MPa até 2.000 MPa, com o objetivo de se obter diversos valores de coeficiente de recalque.

Com base nos coeficientes de recalque que estavam sendo obtidos em campo experimentalmente, foram estudados dois valores de referência, a partir dos quais seriam propostas espessuras de substituição de material.

Em casos de não conformidade, isto é, quando o coeficiente de recalque obtido em campo por meio do ensaio de placa foi inferior ao mínimo admissível, foi proposto um tratamento de fundação com substituição de material, considerando concreto ciclópico com módulo de deformabilidade de 10 GPa. A partir do modelo da fundação do aerogerador, foram simuladas diversas espessuras de substituição, gerando ábacos que correlacionam a espessura, o coeficiente de recalque da fundação e o módulo de deformabilidade do material de substituição.

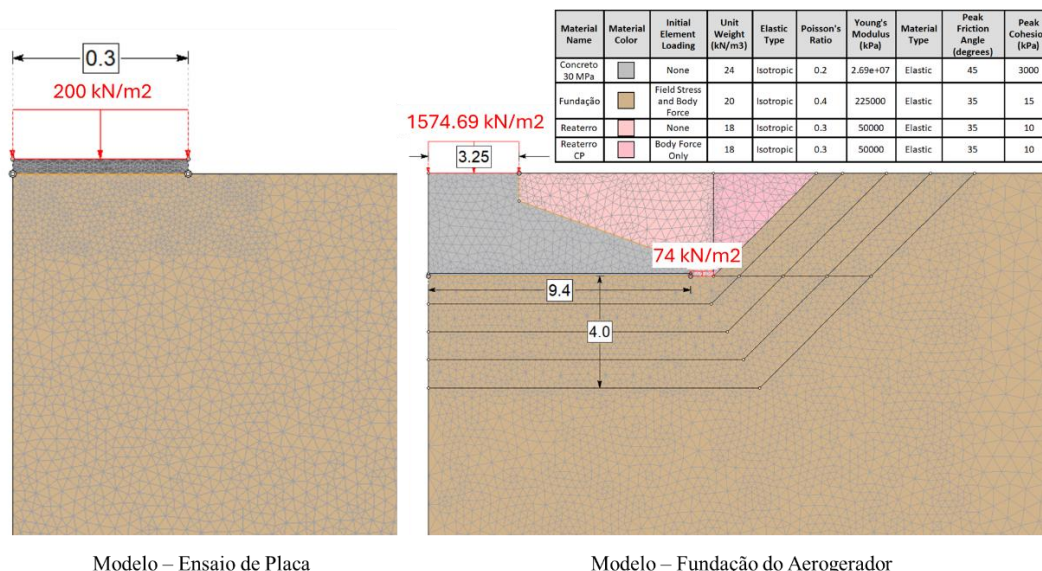


Figura 3: Modelos numéricos das análises de tensão-deformação

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os resultados do coeficiente de recalque para diversos módulos de elasticidade, considerando os resultados das análises numéricas dos modelos de placa e da fundação do aerogerador e os valores extrapolados do modelo da placa pelas equações de Terzaghi (1955) e ACI (1988) para a dimensão da fundação real. Observa-se que os valores obtidos por extrapolação das equações são significativamente superiores em relação à análise numérica considerando as dimensões e rigidez da fundação do aerogerador, corroborando a hipótese de não validade de tais equações para fundações de grandes dimensões ($B \gg b$).

Tabela 1: Coeficiente de recalque em função do módulo de elasticidade de fundação

Fundação	A. Numérica - Placa		A. Numérica - Aerogerador		Terzaghi (1955)	ACI (1989)
E_s (MPa)	δ_v (m)	$k_{s,placa}$ (kPa/m)	δ_v (m)	$k_{s,aero}$ (kPa/m)	$k_{s,aero}$ (kPa/m)	$k_{s,aero}$ (kPa/m)
20	5,30E-03	3,77E+04	8,50E-02	2,35E+03	1,00E+04	6,74E+03
30	3,60E-03	5,56E+04	5,70E-02	3,51E+03	1,48E+04	9,92E+03
40	2,70E-03	7,41E+04	4,70E-02	4,26E+03	1,97E+04	1,32E+04
50	2,09E-03	9,57E+04	3,70E-02	5,41E+03	2,55E+04	1,71E+04
60	1,80E-03	1,11E+05	3,30E-02	6,06E+03	2,96E+04	1,98E+04
80	1,33E-03	1,50E+05	2,34E-02	8,55E+03	4,00E+04	2,69E+04
100	1,04E-03	1,92E+05	2,00E-02	1,00E+04	5,12E+04	3,44E+04
150	6,93E-04	2,89E+05	1,42E-02	1,41E+04	7,68E+04	5,16E+04
200	5,22E-04	3,83E+05	1,08E-02	1,85E+04	1,02E+05	6,84E+04
225	4,87E-04	4,11E+05	9,35E-03	2,14E+04	1,09E+05	7,34E+04
250	4,40E-04	4,55E+05	8,82E-03	2,27E+04	1,21E+05	8,12E+04
500	2,18E-04	9,17E+05	4,85E-03	4,12E+04	2,44E+05	1,64E+05
1000	1,14E-04	1,75E+06	2,64E-03	7,58E+04	4,67E+05	3,13E+05
2000	5,69E-05	3,51E+06	1,40E-03	1,43E+05	9,36E+05	6,28E+05

Os resultados apresentados na Tabela 1 indicam o deslocamento máximo a ser obtido no ensaio de placa para que seja garantido o coeficiente de recalque mínimo definido pelo dimensionamento estrutural da fundação. Considerando o coeficiente de recalque mínimo de 20.940 kPa/m definido pelo projeto estrutural, nota-se que o recalque máximo admissível para o ensaio de placa é da ordem de 0,5 mm.

A Figura 4 apresenta a relação obtida do coeficiente de recalque com o módulo de deformabilidade E_s do material de substituição, considerando espessuras de substituição de 1 m, 2 m e 3 m. Para o estudo, foram

considerados valores de referência de k_s para a fundação de 1.400 tf/m^3 e 1.800 tf/m^3 , em função dos resultados obtidos em campo.

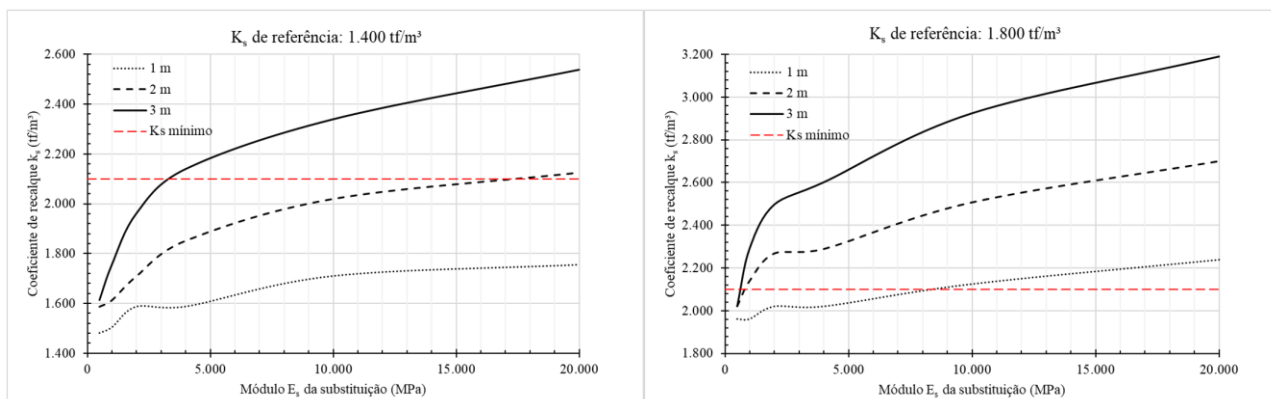


Figura 4: Relação do coeficiente de recalque com o módulo de deformabilidade E_s do material de substituição

Tendo em vista aspectos de disponibilidade de material e cronograma de obra, foi considerado concreto ciclópico como material de substituição, com módulo de deformabilidade mínimo de 10.000 MPa . Neste caso, em função do k_s obtido pelo ensaio de placa, as espessuras de substituição podem ser obtidas pelos gráficos da Figura 4. Por exemplo, considerando k_s para a fundação de 1.800 tf/m^3 , e módulo E_s da substituição de 10.000 MPa , seria suficiente colocar 1 m de material de substituição. Mais gráficos poderiam ser elaborados para outros valores de k_s de referência em função da frequência dos resultados obtidos em campo e com o objetivo de se obter espessuras de substituição mais precisas.

A depender do k_s de referência da fundação, outros materiais menos nobres poderiam ser utilizados, como solos granulares compactados, mistura de solo-cimento etc. Nota-se que para um k_s de referência de 1.800 tf/m^3 , qualquer material com E_s da ordem de 500 MPa poderia ser utilizado, desde que a espessura de substituição fosse da ordem de 2 a 3 m de profundidade. Todavia, para espessura de substituição de 1 m , materiais menos deformáveis, com módulo de pelo menos 8.000 MPa seriam necessários.

A Figura 5 apresenta o resultado considerando fundação com módulo igual 150 MPa (equivalente a um k_s igual a 1.400 tf/m^3) e substituição de $2,0 \text{ m}$ de material com E_s de 18.000 MPa . Nota-se que são obtidos deslocamentos verticais da ordem de 9 mm , que é o valor cujo coeficiente de recalque para a fundação do aerogerador é superior ao mínimo de projeto, conforme indicado pela Tabela 1.

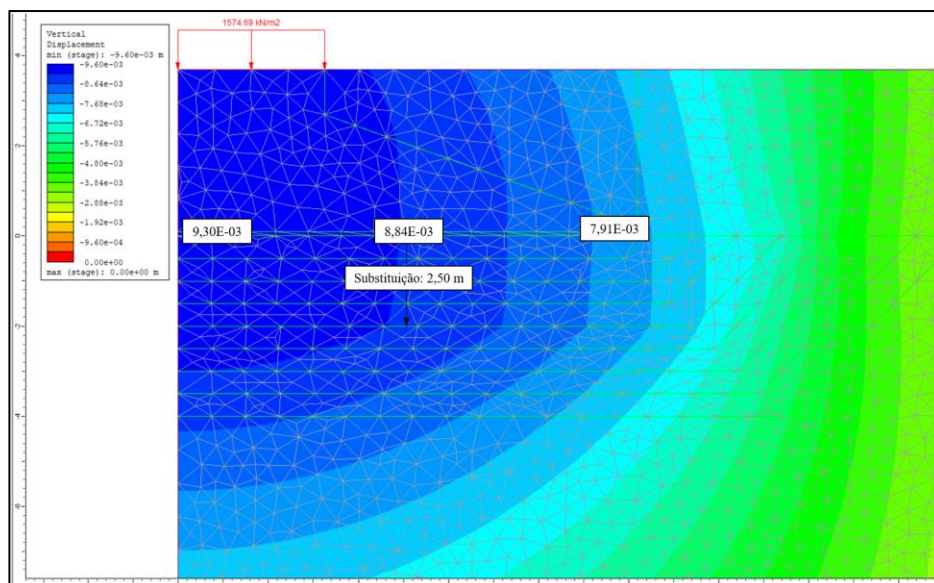


Figura 5: Deslocamentos verticais para $2,0 \text{ m}$ de substituição ($E_s = 18.000 \text{ MPa}$) de uma fundação com $E_s = 150 \text{ MPa}$.

5 CONCLUSÕES

A liberação de fundações de aerogeradores deve considerar, além de aspectos geológicos locais, o atendimento aos critérios de dimensionamento geotécnico e estrutural das bases. Neste sentido, uma prática recorrente é a avaliação dos critérios de projeto por meio de ensaios de placa *in situ*.

Os estudos apresentados indicaram que a utilização de correlações existentes na literatura para extrapolação do coeficiente de recalque do ensaio de placa para a fundação de aerogeradores não é recomendável. Devido à grande diferença entre o diâmetro da fundação do aerogerador e o diâmetro da placa de ensaio, tais correlações tendem a superestimar significativamente o coeficiente de recalque. Para que houvesse validade de tais correlações, a placa utilizada no ensaio deveria apresentar um diâmetro mínimo igual a 1/3 do diâmetro da fundação (Bowles, 1997), o que é inviável na prática considerando que as fundações podem ultrapassar 20,0 m de diâmetro.

Tendo em vista a deficiência das correlações existentes na literatura, o presente estudo propôs a confirmação desses coeficientes de recalque por análise numérica, considerando as reais dimensões e rigidezes do elemento de fundação, correlacionando os resultados das análises com os obtidos em campo pelos ensaios de placa.

Em relação à condição de não conformidade, foi proposta a utilização de ábacos que correlacionam a espessura de substituição, o módulo de deformabilidade do material de substituição e a rigidez da fundação considerando as dimensões da base do aerogerador. Tais ábacos permitiram uma maior agilidade na tomada de decisão, permitindo correlacionar os resultados insatisfatórios dos ensaios de placa com as espessuras de substituição necessárias para atendimento aos requisitos de projeto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute (1988). 336.2R-88 Suggested Analysis and Design Procedures for Combined Footings and Mats. Farmington Hills, MI.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6489. Solo - Prova de carga estática em fundação direta. Rio de Janeiro.
- ATKINSON, J. H.; SALLFORS, G. *Experimental determination of soil properties*. General Report to Session 1. In: Proc. 10th ECSMFE, Florence. 1991. p. 915-956.
- BOUSSINESQ, Joseph. Applications des potentials à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. 1885.
- BOWLES, Joseph E.; GUO, Yingzhong. Foundation analysis and design. New York: McGraw-hill, 1996.
- IDRISS, I. M.; SEED, H. Bolton. Seismic response of soil deposits. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, v. 96, n. 2, p. 631-638, 1970.
- RISØ, D. N. V.; VERITAS, N. Guidelines for design of wind turbines. LABORATORY, RN (ed.). Copenhagen, Denmark: Wind Energy Department, 2002.
- TERZAGHI, K.V. Evaluation of coefficient of subgrade reaction, Geotechnique. Londres, Vol. 5, No. 4, p. 297-326. 1955.