

Análise do Comportamento das Fundações de Torres Eólicas

Ynaê Almeida Ferreira

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, ynaealmeida@gmail.com

Marcos Massao Futai

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, futai@usp.br

RESUMO: A busca por um desenvolvimento sustentável está cada vez mais presente no mundo e com isso, a geração de energia a partir de fontes renováveis tem se tornado cada vez mais constante. O potencial eólico no Brasil é imenso, principalmente nas regiões Sul e Nordeste do país. O aumento na capacidade da turbina requer torres mais elevadas, sendo importante a consideração da interação entre a frequência natural da torre e a frequência de rotação da turbina, bem como o comportamento do solo. Características da fundação e do solo podem afetar a frequência natural da estrutura e influenciar no recalque devido às cargas que atuam na estrutura. Desta forma, busca-se a verificação da sua sensibilidade à variação de parâmetros. Neste contexto, este trabalho consiste na modelagem numérica de uma torre eólica em concreto, com diferentes diâmetros de uma fundação circular e diferentes valores do módulo de deformação do solo, para a obtenção da primeira frequência natural da estrutura. Ainda, analisa-se o comportamento da fundação quanto ao recalque, relacionando este valor com a frequência da estrutura. Tais análises permitem um conhecimento da frequência do sistema e garante projetos seguros e com maior vida útil, podendo selecionar o projeto que melhor atenda às condições de carregamento que a estrutura estará submetida.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações de Torres Eólicas, Frequência Natural, Modelagem Numérica.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia a partir de fontes renováveis tem se tornado cada vez mais constante, como ocorre com a energia eólica. O Brasil apresenta um grande potencial eólico, principalmente nas regiões Sul e Nordeste do país, em que a velocidade média anual dos ventos é propícia para a geração desse tipo de energia, sendo que a região Nordeste possui o maior potencial de geração de energia eólica.

Nos últimos anos, o tamanho médio das turbinas cresceu significativamente. Com o aumento de sua potência, os parques eólicos necessitam de torres mais resistentes e com alturas superiores em relação às existentes atualmente.

A fundação de torres eólicas garante a estabilidade da turbina ao longo de sua vida útil, transmitindo com segurança as cargas da estrutura construída para o solo. A escolha do tipo de fundação depende da natureza do solo,

de modo a suportar a grandeza das cargas recebidas. Dois tipos de fundações podem ser utilizados para torres eólicas *onshore*, a fundação superficial ou fundação profunda.

As torres eólicas são estruturas esbeltas projetadas para resistir às cargas estáticas, sendo também importante considerar os efeitos dinâmicos decorrentes da ação da pressão do vento na estrutura. A análise da frequência natural da estrutura na fase de projeto permite o correto dimensionamento, evitando danos futuros. O tipo de solo e a fundação influenciam no valor da frequência natural. É de extrema importância analisar esses resultados com vista a evitar que as frequências esperadas das ações dinâmicas passíveis de atuar na estrutura não coincidam com as frequências próprias da estrutura (Oliveira, 2012).

O comportamento da fundação em relação ao recalque, também é influenciado pela escolha da fundação e o tipo de solo no qual está instalada a torre eólica.

2 FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS

As fundações de torres eólicas podem ser de dois tipos, fundação superficial ou fundação profunda. A escolha de qual tipo de fundação será utilizada dependerá de como as camadas de solo irão absorver essas cargas em cada profundidade. Assim, é de extrema importância a escolha do tipo de fundação adequada para cada terreno na fase de projeto.

Na fundação superficial utiliza-se a sapata para transmitir os esforços na estrutura para o solo. Para a fundação profunda, faz-se uso do bloco de fundação sobre estacas. Este último é utilizado para solos pouco resistentes até uma grande profundidade, e ainda quando a fundação deve resistir a ações horizontais importantes (Svensson, 2010). Quando a camada de solo próxima à superfície é resistente o suficiente, é preferível a utilização de fundação superficial.

Para a fundação de torres eólicas *offshore*, torres instaladas em alto mar ou a pouca distância da costa, a estrutura deve ser capaz de transmitir as cargas da turbina eólica, através da água, para o solo resistente. As opções mais usuais são a estaca única (*monopile*), base de gravidade (*gravity base*) e multi estacas ou tripé (*tripod*). A estaca única consiste em um longo tubo vertical, cravado ou perfurado no solo abaixo do mar, em cima do qual a torre eólica é montada. A base de gravidade é o tipo de fundação que se apoia sobre a superfície do solo marinho. Sua estrutura é suportada pelo próprio peso e é construída geralmente com concreto armado, podendo também ser constituída de aço. E o tripé trata-se de uma estrutura com três pernas, sobre o qual a torre eólica é montada no seu ponto de intersecção.

3 FREQUÊNCIA NATURAL DE TORRES EÓLICAS

Com a crescente fabricação de turbinas com maior capacidade de geração, as torres estão sendo projetadas cada vez mais elevadas e estruturalmente mais flexíveis.

A análise dinâmica é uma maneira de prever seu comportamento, com a determinação da frequência fundamental ou natural da estrutura.

A ressonância ocorre quando uma força dinâmica externa é aplicada a uma estrutura com a mesma frequência da frequência natural, fazendo com que a estrutura sofra grandes deslocamentos, podendo causar falha imediata ou falha por fadiga ao longo do tempo (Van Zyl e Van Zijl, 2015).

É necessário assegurar que a frequência natural da estrutura não coincida com nenhuma frequência de vibração externa que a mesma possa estar sujeita durante a sua vida útil, garantindo, desta forma, que a estrutura é dinamicamente segura (Hau, 2013). O critério decisivo para o comportamento de vibração em projetos de torres é a posição da primeira frequência natural em relação às frequências de excitação do rotor, as quais são classificadas em forças de excitação que ocorrem com a frequência de rotação do rotor (1P) e forças de excitação que ocorrem com a frequência de rotação do rotor multiplicada pelo número de pás do rotor, sendo 3P para turbinas de três pás. Esta última é a mais crítica.

No caso em que a primeira frequência natural esteja acima de 3P, trata-se de uma torre rígida. Quando a mesma se encontrar no intervalo abaixo de P, a torre é extremamente flexível. Estando a frequência natural no intervalo entre 1P e 3P, tem-se uma estrutura flexível e mais comumente considerada nos projetos atualmente (Van Zyl e Van Zijl, 2015). De acordo com Bhattacharya e outros (2013), a faixa de frequência de trabalho corresponde ao intervalo 10% maior do que a frequência 1P, permitindo uma mudança de frequência até 10% próximo ao limite de ressonância na frequência 3P.

A solução mais segura seria colocar a frequência natural da estrutura bem acima da faixa de 3P. Entretanto, estes modelos exigem torres e fundações com custos elevados, devido a maior rigidez requerida. Do ponto de vista econômico, as estruturas flexíveis são mais desejáveis (Bhattacharya, 2014).

A determinação dos parâmetros modais, modos de vibração e correspondentes frequências naturais, é realizada pela análise modal. Esses parâmetros são calculados a partir dos autovalores e autovetores obtidos através de uma representação da estrutura pelo Método de Elementos Finitos.

A determinação da frequência natural e seus modos é realizada resolvendo o sistema de equações algébricas homogêneas (Brasil e Silva, 2013):

$$[K - \omega^2 M] \hat{u} = 0 \quad (1)$$

sendo K a matriz de rigidez, M a matriz de massa, ω a frequência natural do sistema e soluções na forma $\hat{u}$ chamadas modos de vibração.

Para que este sistema tenha solução não trivial, o determinante da matriz entre os colchetes deve ser nulo resultando em uma equação polinomial de grau n na variável ω^2 , a qual é conhecida como equação de frequência.

As n soluções ω_i são reais e positivas, correspondendo às frequências naturais do sistema. A matriz modal é obtida ao substituir cada um destes valores de frequência, um de cada vez, na Equação 1, e fazendo unitária a primeira componente dos vetores modais correspondentes. Desta forma, são determinados os n modos de vibração em uma matriz modal $n \times n$. As coordenadas modais não possuem unidades, tratando-se apenas de proporções de referência à coordenada arbitrária (Brasil e Silva, 2013). A frequência fundamental da estrutura é a frequência correspondente ao primeiro modo de vibração.

4 MODELAGEM NUMÉRICA

O Abaqus® é um programa de elementos finitos que, do ponto de vista geotécnico, possibilita a simulação mecânica, de fluxo e térmica (gradiente geotérmico, por exemplo), apresentando variados recursos e modelos constitutivos para simulação de diversos tipos de problemas geotécnicos.

As análises de frequência natural de torres eólicas foram realizadas com a modelagem da torre eólica 3D, com a fundação superficial circular modelada para diferentes diâmetros e com altura constante, e considerando diferentes valores do módulo de deformabilidade do solo.

Ainda, foi realizado o estudo do comportamento da fundação em relação ao recalque ocorrido devido ao peso próprio da torre e da turbina, considerando as análises com

diferentes fundações superficiais e parâmetros do solo.

4.1 Análise da Frequência Natural

Diversas análises estruturais da frequência natural do sistema são realizadas considerando a torre engastada na base. Outras desconsideram o volume de solo, e tomam apenas a sua rigidez. Esta concepção, apesar de aceita em análises estáticas, geram dúvidas em relação às análises dinâmicas. Ao considerar a massa do solo na análise, a frequência do sistema diminui. Portanto, é importante considerar o sistema torre – fundação – solo neste tipo de análise.

Desta forma, a análise da frequência natural da torre eólica foi realizada para uma torre construída em concreto com altura de 100m e que suporta uma turbina eólica de 5MW. Os dados da torre foram baseados em LaNier (2005). O diâmetro externo da torre varia ao longo da altura e a espessura varia linearmente de duas formas diferentes, uma para cada metade da torre. A Figura 1 apresenta os valores para os diâmetros externos e espessuras na base, meio e topo da torre.

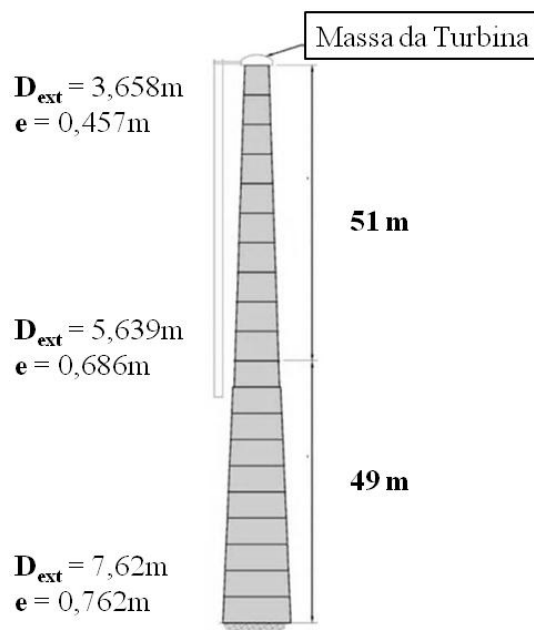


Figura 1. Torre eólica em concreto de 100m de altura com turbina eólica com potência de 5MW.

Fonte: Modificada de LaNier (2005).

A massa da turbina eólica é considerada concentrada no topo da torre eólica e seu valor é

de 480076kg. O concreto utilizado possui uma resistência à compressão dada pela norma americana ACI 318 por $f_c' = 48\text{MPa}$. O módulo de elasticidade secante calculado utilizando a NBR 6118 é igual a 33658MPa e massa específica igual a 2403kg/m³.

A fundação superficial circular é modelada para diferentes diâmetros da fundação, 15, 20, 25 e 30 metros, sendo a altura de 3,5m mantida constante. A fundação em concreto armado apresenta um módulo de elasticidade de 26436MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,15.

A representação do solo é realizada para diferentes valores de módulo de deformação, simulando cinco condições distintas para representação do solo. O módulo varia de 20MPa, considerando uma situação de areia fofa, até 20000MPa, representando a presença de uma rocha sã. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para o solo.

Tabela 1. Parâmetros elásticos utilizados para os diferentes tipos de solo.

Solo	Massa Específica (kg/m ³)	E (MPa)	Coeficiente de Poisson
1	1700	20	0,35
2	1800	35	0,35
3	1900	60	0,35
4	1900	200	0,35
5	2400	20000	0,2

O volume de solo ideal para a modelagem foi definido a partir de um estudo de diferentes dimensões do solo, sendo verificado o valor da frequência até que o mesmo convergisse. Este estudo foi realizado considerando o solo com módulo de deformabilidade igual a 20 MPa. Foi definido o solo com as seguintes dimensões: 75m x 75m x 40m.

O modelo da torre eólica 3D é composto por 16000 elementos do tipo C3DR8 (elementos contínuos com 8 nós, com integração reduzida). O conjunto formado pelo volume do solo e fundação apresenta uma variação de 99403 elementos para o conjunto com fundação de menor diâmetro até 116552 elementos para o conjunto com fundação de maior dimensão. Para o solo e fundação foram utilizados elementos do tipo C3D10 (elementos contínuos tetraédricos com 10 nós).

Como condições de contorno do modelo estão presentes apoios do primeiro gênero nas

laterais do solo, de modo a impedir os deslocamentos na direção horizontal. É impedido o deslocamento na direção vertical na base do modelo.

A simulação consistiu em apenas uma etapa (etapa *frequency* do Abaqus®), na qual são determinadas as frequências naturais e seus modos de vibração. A Figura 2 apresenta o primeiro modo de vibração para cada fundação, considerando o solo com módulo de deformabilidade igual a 20MPa. Ainda, são apresentados os valores da primeira frequência natural da estrutura.

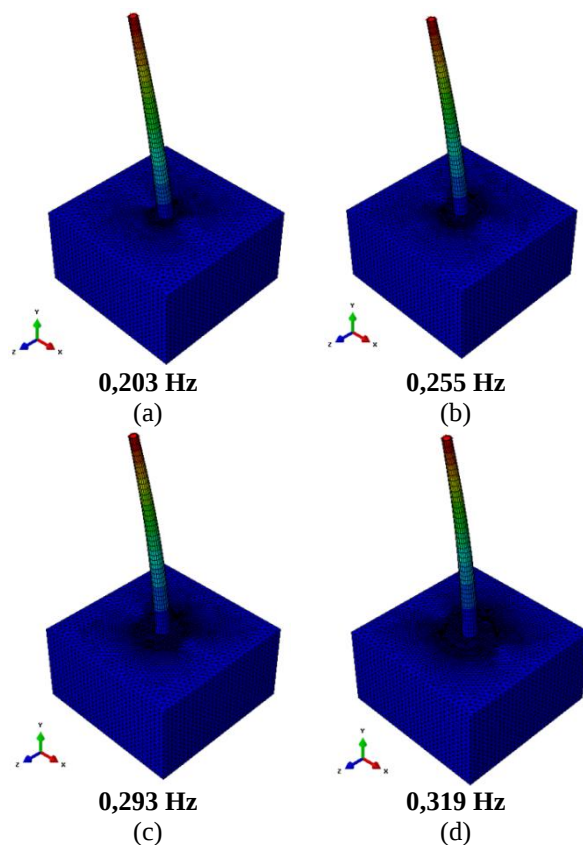


Figura 2. Primeira frequência natural e o correspondente modo de vibração, considerando modelagem da fundação circular com diâmetro igual a: (a) 15m; (b) 20m; (c) 25m; e (d) 30m.

Percebe-se que a frequência natural do sistema torre-fundação-solo é sensível à variação do tamanho da fundação, em que para fundações de igual altura, quanto maior o diâmetro, maior a frequência obtida.

O projeto deve selecionar uma frequência do sistema de forma a evitar a ressonância. No caso em questão, para turbinas de três pás, essa frequência de excitação aerodinâmica ocorre em

três vezes à frequência de rotação do rotor. A frequência de rotação para torres com turbina de 5MW é de 0,187Hz, sendo a frequência de excitação aerodinâmica igual a 0,561Hz (LaNier, 2005).

É importante que a frequência natural esteja entre 1P e 3P para se tratar de uma estrutura flexível, considerando também a faixa de frequência de trabalho que corresponde à frequência natural do sistema 10% maior do que a frequência 1P (0,206Hz) até 10% próximo ao limite de ressonância na frequência 3P (0,505Hz).

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para as análises com as diferentes dimensões da fundação. Ainda, estão presentes duas linhas tracejadas que representam os limites da faixa de frequência de trabalho para esta torre analisada.

Percebe-se que quando o módulo de deformação do solo aumenta a frequência natural também aumenta. Ao aumentar o diâmetro da fundação, ocorre um aumento na frequência. Para a condição em que é representada uma rocha sã com módulo de deformabilidade igual a 20 GPa, foi encontrada uma frequência igual a 0,392Hz, independentemente da dimensão da fundação adotada.

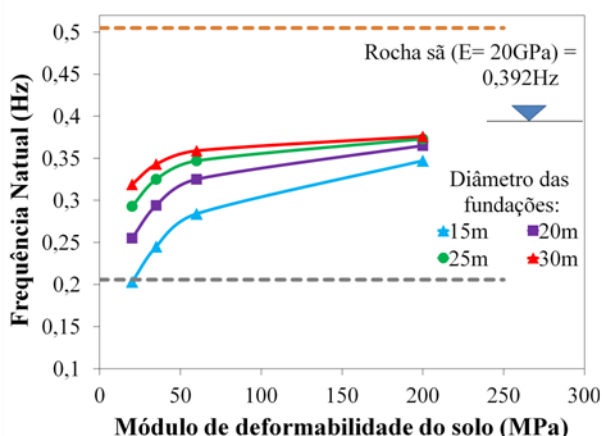


Figura 3. Aumento da frequência natural considerando diferentes fundações, quando o módulo de deformabilidade do solo é aumentado.

Ainda, pode-se observar que depois de certos valores de módulo de deformação do solo, um novo aumento do seu valor não muda a frequência natural. Tal fato ocorre devido a

fundação poder ser considerada como fixa e qualquer aumento na rigidez do solo não terá efeito no valor da frequência natural. Tal fato foi confirmado ao realizar a modelagem considerando apenas a torre e a fundação engastada, na qual se verificou que a sua frequência natural é igual quando considerada a modelagem com a rocha sã.

Considerando a faixa de frequência de trabalho, representada na Figura 3 pelas linhas tracejadas em laranja e cinza, pode-se verificar que apenas uma das condições analisadas não está dentro desta faixa. Desta forma, essa condição de solo com módulo de deformabilidade igual a 20MPa e fundação com 15m de diâmetro, apesar de apresentar uma frequência natural dentro do intervalo 1P e 3P, sendo portanto flexível, deve ser evitada em comparação com as demais possibilidades apresentadas quando utilizada outras fundações no mesmo solo, ou em solos diferentes.

4.2 Análise do Recalque da Fundação de Torre Eólica

A análise do recalque com o modelo 3D foi realizada para observar o comportamento da fundação em relação ao recalque devido apenas ao peso próprio da torre, para os diferentes valores do módulo de deformação do solo.

Para esta análise foram utilizadas as fundações com 20, 25 e 30 metros de diâmetro. O volume do solo foi o mesmo utilizado para a análise de frequência natural, com as mesmas condições de contorno do modelo.

A análise foi realizada considerando a fundação inserida no solo, com profundidade de embutimento igual a altura da fundação. Na modelagem 3D essa consideração foi assumida, considerando a modelagem da fundação na superfície do solo e o solo circundante com uma pressão na superfície decorrente do peso do solo, conforme mostrado na Figura 4 para a fundação de 20m de diâmetro.

O estudo do recalque foi realizada em 3 etapas. A primeira refere-se ao uso da função geostática do Abaqus®, a segunda etapa corresponde a ativação dos elementos de fundação e a aplicação da pressão na superfície do solo para considerar a fundação como inserida ao solo. A terceira etapa corresponde a

aplicação do peso próprio da torre de concreto e a massa da turbina, aplicada distribuída na fundação.

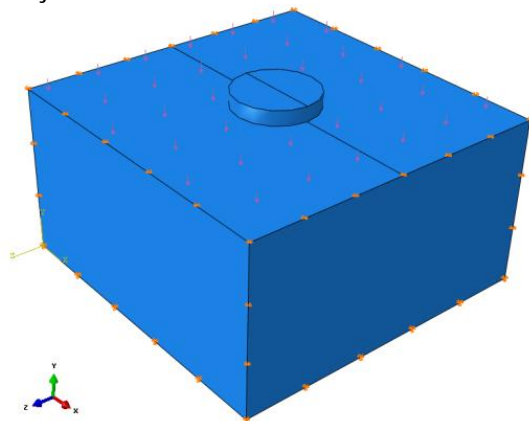


Figura 4. Representação da modelo com as condições de contorno.

A verificação do recalque devido ao peso próprio foi realizada para todos os solos utilizados na análise de frequência natural. A Tabela 2 complementa os parâmetros do solo apresentados na Tabela 1, com os valores do ângulo de atrito e coesão.

Tabela 2. Parâmetros dos solos analisados.

Solo	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
1	25	-
2	30	-
3	35	-
4	35	50
5	40	10000

Para todos os modelos, foi obtido o recalque no centro da base da fundação após a aplicação do peso próprio da torre eólica, considerando os diferentes diâmetros da fundação. O peso da torre e da turbina equivale a 29,18MN.

A Figura 5 apresenta os recalques para as diferentes fundações, quando variado o módulo de deformabilidade do solo.

Observa-se que quando o módulo de deformação do solo aumenta os recalques diminuem. Ao aumentar o diâmetro da fundação, também ocorre uma diminuição no deslocamento da fundação. Para o solo com módulo de deformabilidade igual a 200MPa, essa variação é discreta, mas também apresenta menor deslocamento quanto maior é o diâmetro da fundação.

Quando utilizado o solo com módulo de elasticidade igual a 20GPa, o deslocamento é de

0,2mm, para as diferentes fundações analisadas.

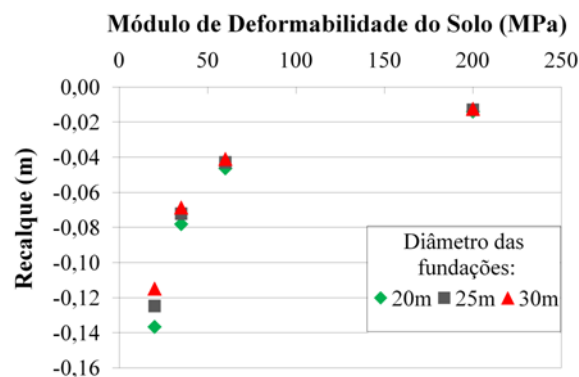


Figura 5. Recalque da fundação, considerando diferentes fundações e diferentes valores do módulo de deformabilidade do solo.

4.3 Relação Entre a Frequência Natural e o Recalque

Neste tópico é realizada uma análise sobre a relação dos resultados obtidos para a frequência natural da estrutura e o comportamento da fundação após receber o peso exercido pela torre eólica. Para tal, relaciona os resultados obtidos considerando as dimensões das fundações analisadas e os solos com diferentes valores do módulo de deformabilidade.

A Figura 6 apresenta a relação entre o recalque obtido no centro da base da fundação com a frequência natural, considerando o solo com módulo de deformação igual a 60MPa. Pode-se verificar que para este solo, quanto maior o diâmetro da fundação, tem-se um maior valor de frequência natural e um menor recalque na fundação.

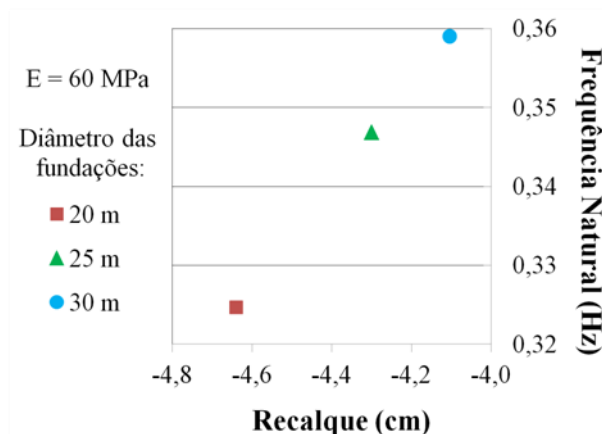


Figura 6. Recalque versus frequência natural para diferentes diâmetros da fundação e solo com módulo de deformação igual a 60MPa.

A relação entre o módulo de deformabilidade do solo com a frequência natural e o recalque está representada na Figura 7, para a fundação com diâmetro de 20m. Pode-se notar que há uma relação entre a frequência natural e o recalque que é consequência do módulo, de modo que, para uma determinada fundação, no caso em questão a fundação com 20m de diâmetro, para o solo com módulo de deformabilidade igual a 20 MPa, tem-se um maior recalque e uma menor frequência natural. Isso ocorre pelo fato do solo ser mais deformável. E para o solo menos deformável, tem-se o oposto, um menor recalque e uma maior frequência natural.

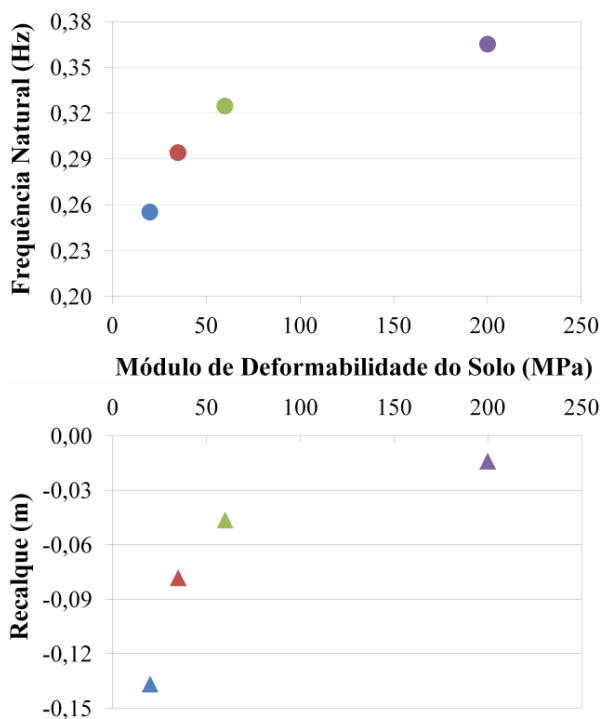


Figura 7. Relação entre o módulo de deformabilidade e a frequência natural e o recalque.

A Figura 8 apresenta a relação entre o fator de segurança e o recalque para os diferentes tipos de solo, considerando a fundação de 20m de diâmetro. O fator de segurança foi calculado relacionando a tensão de ruptura com a tensão à que o solo está submetido neste estudo, o peso próprio da torre e da fundação. A capacidade de carga foi obtida pela fórmula de Terzaghi, com os fatores de capacidade de suporte definidos por Vésic.

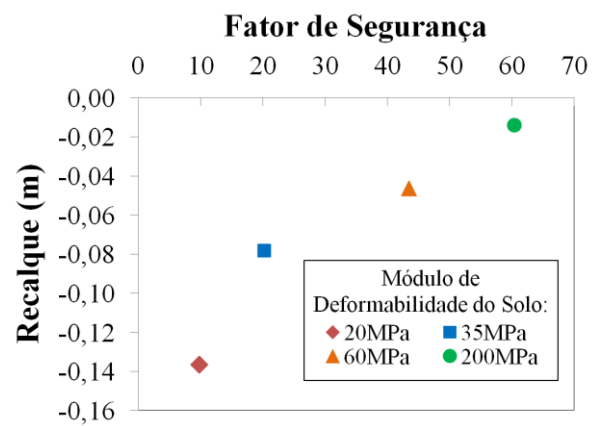


Figura 8. Relação entre o fator de segurança e o recalque para os diferentes tipos de solo.

Percebe-se que os recalques elásticos são pequenos, visto que, para este caso específico, o valor do fator de segurança para cada solo é elevado.

Ainda, é possível relacionar o fator de segurança com a frequência natural, verificando que estrutura com fator de segurança mais elevado apresenta um maior valor na sua frequência natural. Essa relação está representada na Figura 9.

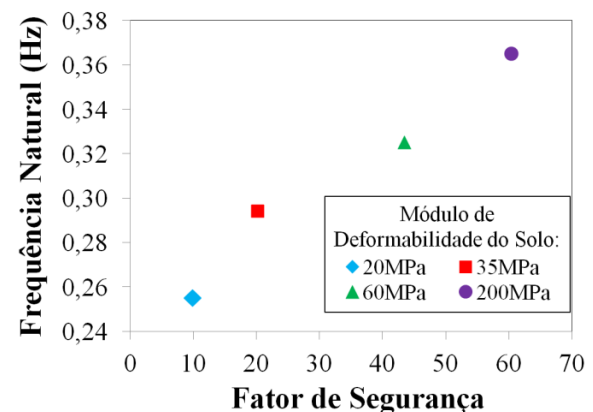


Figura 9. Relação entre o fator de segurança e a frequência natural para os diferentes tipos de solo.

Com todas as considerações abordadas até o momento, adota-se a fundação com 20m de diâmetro e o solo com módulo de deformabilidade igual a 200MPa, ângulo de atrito igual a 35° e coesão igual a 50kPa, para a análise completa do modelo com a aplicação das cargas de serviço (vertical, horizontal e momento). Essa fundação instalada no solo com estes parâmetros apresentou uma frequência dentro da faixa de frequência de trabalho e um

recalque pequeno quando aplicado apenas o peso próprio da torre.

Os valores das cargas de serviço foram definidos por LaNier (2005), com os valores de 29519kN, 1159kN e 17207kNm, sendo referentes a carga vertical, horizontal e momento, respectivamente.

Com a aplicação das cargas de serviço é possível obter a deflexão máxima ocorrida, bem como o ângulo de rotação da fundação. Para esta análise, obteve-se uma deflexão da fundação de 0,012m e rotação de 0,0005 radianos.

5 CONCLUSÕES

O aumento da capacidade da turbina acarreta na necessidade de projetar torres de elevadas alturas. Com isso, aumenta a necessidade do conhecimento da frequência natural do sistema torre-fundação-solo.

As características da fundação e do solo no qual a torre é instalada podem afetar o valor da frequência natural da estrutura. É verificado que com o aumento do diâmetro da fundação, mantendo sua altura constante, percebe-se que a frequência natural é elevada. A mesma situação ocorre ao aumentar o módulo de deformabilidade do solo.

A análise do recalque apenas devido ao peso da torre eólica permite verificar, a título de comparação, o comportamento da fundação quando o módulo de deformabilidade do solo é variado. Nesta condição, para uma mesma fundação, tem-se um menor recalque quanto menos deformável é o solo. Ainda, percebe-se que para um mesmo módulo de deformação do solo, fundações com maiores dimensões apresentam menores recalques.

Ao relacionar os resultados obtidos para frequência natural e recalque, nota-se que existe uma relação entre elas mediada pelo módulo de deformabilidade do solo. Tal relação define que para solos menos deformáveis, tem-se um menor recalque e uma maior frequência natural. Enquanto que, para solos mais deformáveis, a frequência natural é reduzida e o recalque aumentado.

Com a simulação da ação das cargas de serviço para o modelo definido foi possível

obter os valores da deflexão máxima ocorrida, bem como o ângulo de rotação.

Com todas as análises discutidas, conclui-se que o comportamento da estrutura em relação à sua frequência natural é sensível à variação dos parâmetros de rigidez e dimensão. Ainda, percebe-se a importância em analisar o local no qual será instalada a torre eólica, bem como a estrutura de fundação que irá transmitir todas as solicitações ao solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Bhattacharya, S., Nikitas, N., Garnsey, J., Alexander, N.A., Cox, J., Lombardi, D., Muir Wood, D., Nash, D.F.T. (2013) Observed dynamic soil–structure interaction in scale testing of offshore wind turbine foundations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 54, pp. 47–60.
- Bhattacharya, S. (2014). Challenges in Design of Foundations for Offshore Wind Turbines, The Institution of Engineering and Technology, *Engineering Technology Reference*, pp. 1–9.
- Brasil, R.M.L.R.F. e Silva, M.A. (2013). *Introdução à dinâmica das estruturas para engenharia civil*, São Paulo: Blucher.
- Hau, E. (2013) *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 3rd ed., Krailling Germany: Springer, 886p.
- LaNier, M.P. (2005). *LWST Phase I Project Conceptual Design Study: Evaluation of Design and Construction Approaches for Economical Hybrid Steel/Concrete Wind Turbine Towers*, Golden: National Renewable Energy Laboratory, 698 p.
- Oliveira, L.F.M.P. (2012) *Análise do Comportamento Dinâmico de Torres de Geradores Eólicos*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.
- Svensson, H. (2010) *Design of Foundations for Wind Turbines*, Dissertation (Master). Department of Construction Sciences - Structural Mechanics. Lund University.
- Van Zyl, W.S. e Van Zijl, G.P.A.G. (2015) Dynamic behaviour of normally reinforced concrete wind turbine support structures, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, Vol. 57, No. 4, pp. 38–44, Paper 1230.