

Contribuição ao Projeto de Fundações de Torres de Turbinas Eólicas

Alexandre Strongylis¹, Ronaldo Battista² e Michele Pfeil³

¹ COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro - mestrando / alexstrongylis@coc.ufrj.br

² COPPE/UFRJ – Prof. Titular; Diretor da Controllato Ltda. / controllato1@gmail.com

³ POLI-COPPE/UFRJ– Universidade Federal do Rio de Janeiro- Profa. Titular / pfeil@coc.ufrj.br

Resumo

Este trabalho versa sobre um estudo realizado com o propósito de contribuir para melhor aproveitamento de um tipo existente, mas não usual, de fundação em bloco sobre estacas cavalete de torres para suporte de turbinas eólicas (TTE). Apresentam-se os resultados mais relevantes desse estudo, explorando, em comparação com tipos usuais de fundações, a redução de volumes dos materiais e consequente custo de execução, atendendo plenamente os critérios de segurança e de funcionalidade em serviço, prescritos nas normas de projeto. Analisam-se os resultados obtidos do estudo paramétrico das dimensões geométricas do bloco de coroamento das estacas (raio e altura), geometria dos cavaletes de estacas (profundidade e inclinação), número de estacas, capacidade de carga no solo de fundação, resistência estrutural das estacas além de rigidez transversal e rotacional da fundação sobre estacas e frequências de vibração por flexão lateral do sistema mecânico-estrutural acoplado turbina – torre – fundação – solo. A modelagem estrutural 3D da torre e fundação e a análise paramétrica são feitas através de um programa de análise estrutural. O estudo paramétrico abrange três tipos de estacas: duas delas – hélice e raiz – mais comumente utilizadas nas fundações de torres de TE no Brasil, e microestacas, de aplicação ainda pouco usual no país.

Palavras-chave

Fundação, torre turbina eólica, estacas cavalete, microestacas, rigidez à rotação.

Introdução

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, a energia eólica responde por cerca de 7,5% da produção nacional, 3ª maior fonte de geração de energia no país. Esta produção tende a aumentar com o vasto potencial eólico ao longo da costa brasileira, com a evolução da tecnologia das turbinas eólicas e com o aprimoramento dos projetos das torre e fundações para as turbinas eólicas.

A fundação é responsável por uma parcela importante do custo total do projeto para implantação de uma torre eólica (HAU, 2005). Portanto, avanços na concepção do projeto de fundação de turbinas eólicas agem como um vetor na redução do custo de execução e, consequentemente, do custo de geração da energia eólica. No Brasil, a fundação mais comumente usada para turbinas eólicas é um sistema bloco-estacas hélice. O sistema bloco-estacas hélice resulta em elevada resistência e rigidez ao conjunto, em geral maior que o necessário, tornando assim esta concepção

antieconômica. Soma-se a isto o fato da logística construtiva ser bastante complexa devido às grandes dimensões, ao peso do equipamento de execução das estacas hélice, ao transporte desses equipamentos desde os grandes centros até os sítios eólicos, por vezes situados em locais longínquos e de difícil acesso, além da necessidade de refrigeração constante devido ao atrito solo-perfuratriz, dentre outras dificuldades executivas tal como o elevado consumo de aço e concreto.

Logo, a motivação deste trabalho é contribuir para o projeto de fundações de turbinas eólicas, oferecendo concepções alternativas que utilizam estacas raiz e microestacas em configuração cavalete, prática bastante empregada em fundações de píeres portuários e de pontes.

Um estudo paramétrico foi realizado para otimização do sistema bloco-estacas, envolvendo como variáveis: as dimensões geométricas do bloco de coroamento (diâmetro e altura), número de estacas e geometria dos cavaletes (profundidade e inclinação), capacidade de carga geotécnica nos extratos de terreno de fundação, resistência estrutural das estacas, rigidez transversal e rotacional do sistema bloco-estaca e a frequência fundamental do modo de vibração por flexão lateral do sistema estrutural acoplado turbina-torre-fundação-solo. Nesse estudo são elaborados modelos numéricos 3D de fundações do tipo bloco-estacas tendo como objetivo a máxima redução do volume de concreto e peso de aço e conseqüente custo de execução da fundação; mas sempre atendendo aos critérios de segurança estrutural prescritos na NBR 6118, aos critérios de projeto de fundações prescritos na NBR 6122 e ao critério de rigidez à rotação e transversal do bloco sobre estacas, este último para atender a prescrição do fabricante da turbina eólica para a faixa de frequências de vibração por flexão lateral do sistema fundação-torre-turbina.

Descrição Sumária das Características do Sistema Acoplado Turbina Eólica-Torre-Fundação-Solo Utilizado para o Estudo Paramétrico

A torre de concreto armado e protendido tem 80,0m de altura e base 6,0m de diâmetro, a qual é ancorada no bloco de fundação por meio de barras de aço de alta resistência com $\phi=32\text{mm}$, protendidas para garantir transmissão dos esforços. A fundação da torre da turbina eólica em operação (Figuras 1 a,b), selecionada para este estudo paramétrico, consiste num bloco tronco-cônico de concreto armado, com diâmetro da base igual a 17,0m, 1,30m de altura na borda externa e 2,30m de altura no núcleo central, totalizando um volume de 403,0 m³ de concreto. O bloco coroa 22 estacas verticais do tipo hélice contínua, com fuste de 11,0m de profundidade, 70cm de diâmetro e armada com 8 barras de aço CA-50 $\phi=25\text{mm}$. Estacas e bloco são modelados com módulo de elasticidade correspondente a um concreto com resistência a compressão f_{ck} 20 MPa. As Figuras 2(a,b) mostram o perfil do terreno de fundação com a descrição das camadas de terreno e correspondentes número de golpes da sondagem SPT.

O modelo 3D em elementos finitos da estrutura da fundação é ilustrado na Figura 1.a. As cargas aplicadas no modelo 3D da torre eólica (Figura 1.b) são: o peso próprio da estrutura, a carga vertical e momento devido ao conjunto nacelle-pás, o carregamento equivalente estático de vento distribuído ao longo da altura e a força de empuxo devida

à ação de vento no rotor. As cargas provenientes da torre aplicadas no topo do bloco de fundação são simuladas por forças e momentos concentrados num nó fictício originado pelo cruzamento de elementos diametrais de barra muito rígidos (destacados em amarelo na Figura 1.a).

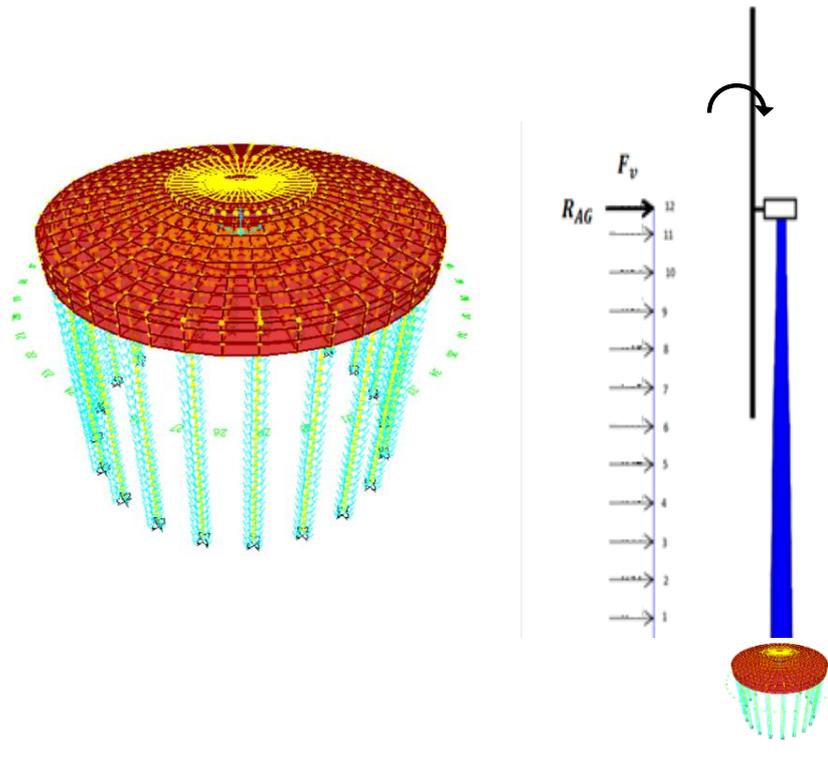
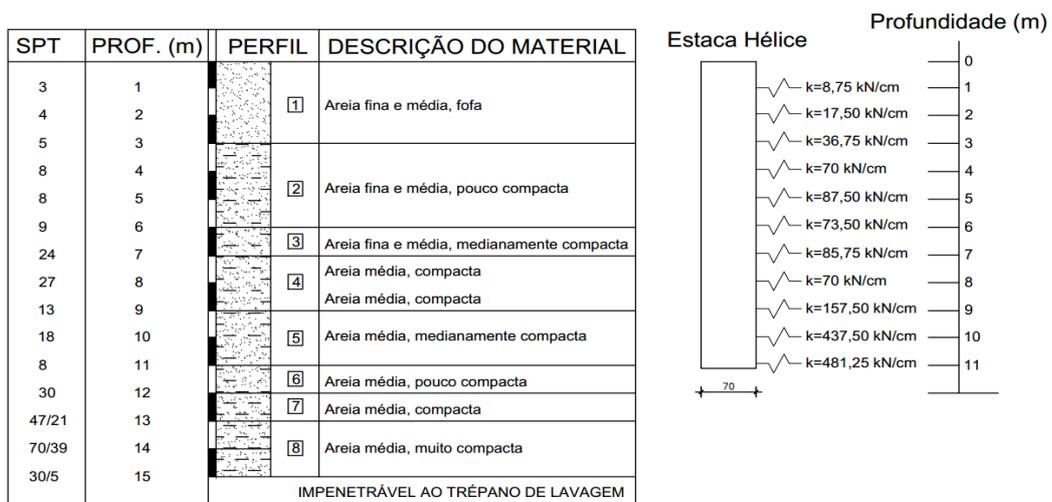


Figura 1(a,b) – Modelo estrutural 3D de uma fundação típica e cargas laterais sobre a torre



Figuras 2(a,b) : Perfil de sondagem típico e coeficientes de reação lateral do solo nas estacas.

Capacidade Geotécnica de Carga e Resistência Estrutural das Estacas

As análises dos modelos das fundações em estacas hélice, estacas raiz e microestacas foram realizadas para combinações dos seguintes carregamentos: peso próprio dos elementos da fundação, peso próprio da estrutura da torre, força de empuxo e força estática equivalente do vento ao longo da estrutura da torre. Nas combinações de carregamentos foram aplicados os coeficientes de majoração e ponderação prescritos na NBR 6118, sendo as verificações feitas para os critérios associados ao Estado Limite de Serviço (ELS) e ao Estado Limite Último (ELU).

A combinação de carregamentos no ELS é utilizada para cálculo das cargas nas estacas, enquanto a combinação de carregamentos no ELU é utilizada para verificação da resistência estrutural do sistema bloco-estacas. Isto porque entende-se que os coeficientes de minoração da resistência prescritos na NBR 6122 para cálculo da capacidade de carga nas estacas se aplicam ao método das tensões admissíveis, não devendo ser sobrepostos aos coeficientes de majoração das cargas aplicadas (NBR6118) para análise no ELU, o que resultaria num projeto desnecessariamente ultraconservador.

A capacidade geotécnica de carga das estacas pode ser calculada por meio de métodos semi-empíricos, bastante difundidos na literatura e no meio profissional. A resistência geotécnica total é resultante da soma de duas parcelas - resistência de ponta e resistência por atrito lateral - e o valor médio obtido desses métodos é, em geral, utilizada, como forma de minimizar a divergência entre os resultados dos vários métodos. Os métodos semi-empíricos utilizados neste trabalho são : Velloso (1981); Aoki-Velloso (1975); Decourt-Quaresma (1978); Teixeira (1996); Alonso (1996); Bustamante-Doix (1985).

Resultados obtidos do Modelo 3D da Fundação Original em Bloco Tronco-Cônico sobre Estacas Hélice Verticais

A resistência geotécnica média da estaca hélice, segundo os métodos semi-empíricos utilizados resultou em 1491,0 kN. Este resultado é confrontado com os esforços solicitantes obtidos com o modelo 3D para as combinações de carregamento no ELS. Sob o aspecto estrutural, o bloco e as estacas hélice são usualmente projetadas de modo que não haja esforço de tração na cabeça de nenhuma das estacas. A maior carga de compressão obtida para as combinações no ELU é igual a 2148 kN, sendo a armadura projetada suficiente para resistir a este esforço.

O máximo momento fletor na cabeça das estacas hélice é cerca de 172 kN.m, valor resultante da flexibilidade do bloco de grande diâmetro. Para tornar mais eficiente o sistema bloco-estacas, a configuração de cavalete passa a ser uma alternativa, pois: (i) aumenta a rigidez transversal com estacas de menor diâmetro; (ii) redistribui os esforços de maneira mais homogênea; (iii) diminui consideravelmente o momento fletor na cabeça das estacas, permitindo predominância de esforços axiais nos pares de estacas cavalete.

As tensões solicitantes de compressão no bloco de fundação estão abaixo das tensões resistentes de cálculo à compressão. A análise das tensões de tração e cisalhamento

indicou que é necessária armadura passiva para combater os esforços resultantes dessas tensões.

Modelo 3D de Fundação Alternativa de Bloco Tronco-Cônico sobre Estacas Raiz em Cavaletes

O modelo numérico de estacas raiz foi baseado no modelo numérico de estacas hélice, substituindo-se aquelas estacas pelas estacas raiz na configuração de pares de cavaletes, com 10° de abertura e 18m de profundidade.

A partir deste primeiro modelo, foram realizadas sucessivas reduções no sistema bloco-estacas, até atingir-se uma configuração tida como “otimizada”, a partir da qual ganhos expressivos não são mais alcançados. No modelo 3D otimizado para estacas raiz, as dimensões reduzidas do bloco tronco-cônico, em relação ao original sobre estacas hélice, são: 15,4m de diâmetro, altura no bordo externo de 1,20m, altura no núcleo central de 2,0m e 36 estacas raiz em 18 pares de cavaletes. O volume total do bloco para estacas raiz é 298m³, cerca de 25% menor que do bloco de estacas hélice (403,0 m³).

As estacas raiz tem diâmetro da seção transversal 410mm, armadura de barras de aço CA-50 com 8φ20mm e concreto com fck 20 MPa. Esta seção tem capacidade de carga à compressão axial de aproximadamente 1300,0 kN. A maior profundidade das estacas raiz em relação às estacas hélice tem por objetivo garantir a necessária capacidade geotécnica de carga e adequada rigidez ao conjunto bloco-estacas, visto que tanto o bloco quanto as estacas têm dimensões seccionais reduzidas. As Figuras 3(a-c) ilustram o modelo 3D da fundação em bloco de concreto armado sobre coroa de estacas cavalete.



Figuras 3(a-c) - Modelo 3D em elementos finitos do bloco tronco-cônico sobre coroa 16 de cavaletes, totalizando 32 estacas. Vista 3D, em corte diametral e em distribuição dos cavaletes.

Resultados Obtidos com o Modelo 3D da Fundação em Bloco de Concreto Armado sobre Cavaletes de estacas raiz

A capacidade geotécnica de carga de uma dessas estacas é estimada em 1610 kN; valor maior que o esforço axial máximo solicitante igual a 1001 kN, resultante da combinação de carregamentos no Estado Limite de Serviço (ELS).

Sob o aspecto estrutural, a utilização de cavaletes de estacas resulta em esforços axiais de compressão e de tração predominantes e pequenos momentos fletores na cabeça dos cavaletes. Isto se confirma com os esforços máximos verificados para tração, de 325 kN e para compressão, de 1305 kN. O momento fletor, por sua vez, resultou em apenas 30 kN.m, valor bem menor que o encontrado no modelo com estacas hélice.

A tensão solicitante de compressão no bloco ficou menor que a tensão resistente de cálculo. A análise das tensões de tração e cisalhamento indicou que é necessária armadura passiva para combater os esforços resultantes dessas tensões.

Modelo 3D de Fundação em Bloco de Concreto Armado Tronco-Cônico sobre Cavaletes de Microestacas

O modelo 3D do bloco com cavaletes de microestacas é também ilustrado nas Figuras 3(a-c), no entanto, com a configuração de 16 pares de cavaletes com 10° de abertura e 18m de profundidade. Foram realizadas sucessivas reduções nas dimensões geométricas do bloco e alteração na distribuição do conjunto de cavaletes de microestacas, até que fosse atingida uma configuração tida como “otimizada”, a partir da qual não há ganhos expressivos com novas tentativas de redução no sistema bloco-microestacas.

As microestacas tem uma concepção diferente, pois sua seção transversal (Figura 4) foram pré-dimensionadas com 250mm de diâmetro. O tubo utilizado tem especificação NBR8261, com tensão de escoamento de 317 MPa, diâmetro externo de 193,70mm e espessura de 10,6mm.

O método executivo das microestacas (Figura 4) consiste em injeções de graute e/ou argamassa em fases repetidas, de modo estourar as válvulas manchete dispostas ao longo do tubo estrutural, criando assim pegões ao longo do comprimento da microestaca. Desta forma, a capacidade geotécnica de carga à compressão da microestaca se deve principalmente à resistência por atrito lateral, tendo pequena resistência de ponta devido a área reduzida da seção transversal.

Devido ao tubo de aço que serve de armação, as microestacas tem boa resistência estrutural à tração, mas tem capacidade geotécnica de carga à tração devido somente ao atrito lateral com as camadas de solo; exceto nos casos de ponta ancorada em rocha. O tubo de aço estrutural tem área de seção transversal maior que a dos conjuntos de barras de aço das armaduras das estacas hélice ou raiz empregadas nos outros modelos. Aliada a resistência estrutural, a configuração cavalete provê maior capacidade de carga à tração, fazendo com que a microestaca se sobressaia em comparação às estacas hélice e raiz.

Resultados obtidos com o Modelo 3D do Bloco sobre Cavaletes de Microestacas

As dimensões do bloco tronco-cônico resultaram em: 12,60m de diâmetro, altura do bordo externo 0,80m, altura no núcleo central de 1,50m. O volume total do bloco é 154m³, cerca de 60% menor que do bloco com estacas hélice e ainda cerca de 48% menor que do bloco com estacas raiz.

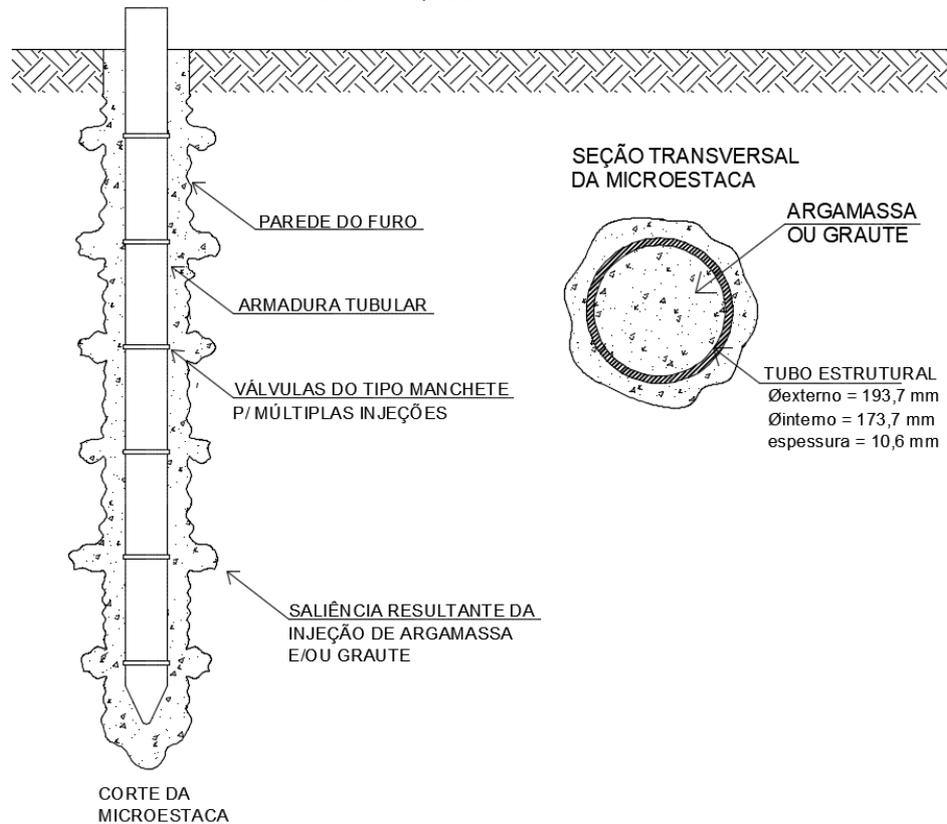


Figura 4 – Esquema de uma microestaca em fase de execução e sua seção transversal.

O cálculo da capacidade geotécnica de carga das microestacas resultou em 1330 kN, estimada como a média dos valores obtidos com os métodos de Aoki-Velloso, Decourt-Quaresma e Bustamante-Doix, levando em consideração somente a parcela do atrito lateral. O valor máximo do esforço solicitante axial de compressão para combinação de carregamento no ELS é 1073 kN, valor menor que o da capacidade geotécnica de carga das microestacas. Sob o aspecto estrutural, os maiores esforços solicitantes de tração e de compressão obtidos para combinação de carregamentos no ELU foram, respectivamente, 661 kN e 1475 kN, e o momento fletor máximo resultante na cabeça de um cavalete foi de apenas 16,60 kN.m.

Segundo SABATINI *et al.* (2005), um método conservador de dimensionamento estrutural das microestacas consiste em determinar os esforços resistentes considerando apenas o tubo estrutural para suportar os esforços solicitantes, desprezando-se, portanto, a resistência do concreto interno ao tubo. A verificação de segurança do tubo estrutural sob esforços combinados é feita segundo as prescrições da NBR 8800/2008. O esforço resistente à compressão (sem flambagem) e à tração é de aproximadamente 1750 kN.

Resumo dos Esforços Solicitantes nos Modelos Bloco-Estacas Analisados

Os esforços solicitantes máximos axiais de compressão e tração, cortantes e momento fletor nas cabeças das estacas hélice, raiz e microestacas são resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 : Valores máximos dos esforços solicitantes no ELU na cabeça das estacas.

Esforços	Estacas Hélice	Estacas Raiz	Microestacas
Axial de Compressão (kN)	2148	1305	1475
Axial de Tração (kN)	62	325	661
Cortante (kN)	207	48	24
Momento Fletor (kN.m)	172	30	17

Rigidez Transversal e Rotacional das Fundações dos Modelos Analisados

Os coeficientes de rigidez transversal e rotacional da fundação em bloco sobre estacas são calculadas aplicando-se valores unitários de carga transversal e de momento fletor no centro do topo do bloco, para obter os respectivos deslocamento e rotação do bloco. Os coeficientes de rigidez transversal e rotacional são então obtidos com a expressão (1(a,b)), onde F e U são, respectivamente, a força aplicada e o deslocamento transversal e M e Θ são, respectivamente, o momento aplicado e a rotação num plano vertical diametral. A Tabela 2 resume os valores desses coeficientes de rigidez para as fundações modeladas com estacas hélice, estacas raiz e microestacas.

$$K_{transversal} = \frac{F_i}{U_i} \quad e \quad K_{rotacional} = \frac{M_i}{\theta_i} \quad (1 \text{ (a,b)})$$

Tabela 2 - Rigidez dos modelos de fundação em estacas hélice, estacas raiz e microestacas.

	Modelos Numéricos		
	Estacas Hélice	Estacas Raiz	Microestacas
Rigidez Transversal (kN/m)	2,92E+05	2,30E+05	9,53E+04
Rigidez Rotacional (kN/m)	1,74E+08	1,00E+08	3,33E+07
Máxima rotação do bloco num plano vertical diametral (rad)	0,00042	0,00087	0,00192

Influência da Rigidez da Fundação no funcionamento das Turbinas Eólicas

O fabricante da turbina eólica instalada no topo da torre prescreve os valores dos coeficientes de rigidez para a fundação e a faixa de frequências 0,29 Hz – 0,39 Hz na qual o sistema estrutural torre (com a turbina) e fundação deve trabalhar para evitar ocorrências de ressonância com o movimento de giro e das vibrações por flexão das pás. Os coeficientes de rigidez à translação e à rotação da fundação em bloco sobre estacas tem influência direta sobre os valores das frequências de vibração por flexão lateral da torre no sistema estrutural acoplado fundação-torre-turbina.

A análise de vibrações livres sob tensões iniciais do sistema estrutural torre-bloco-estacas, submetido aos carregamentos estáticos equivalentes anteriormente descritos, foi feita considerando os efeitos da interação solo-estacas-bloco e das massas de própria estruturas da torre e do bloco e, também, da massa do conjunto nacelle-pás e seus respectivos momentos de inércia rotacionais, os quais podem ter influência significativa sobre os valores das frequências naturais. A análise modal do modelo do sistema estrutural da torre eólica com fundação em bloco sobre coroa de estacas hélice verticais,

selecionada para presente estudo, resulta para a 1ª frequência natural um valor teórico igual a 0,37 Hz. Observa-se, na resposta aerodinâmica medida numa torre típica, que somente o primeiro modo de vibração por flexão lateral com frequência 0,37 Hz é significativo (BATTISTA E CONCEIÇÃO, 2012). Com relação a esta boa correlação entre valores teórico e experimental da frequência fundamental de vibração, deve-se observar que no modelo teórico 3D da torre a base é engastada perfeitamente, enquanto na estrutura existente a base da torre se encontra ancorada num bloco de concreto armado sobre uma coroa de 22 estacas hélice contínuas, que conferem uma grande rigidez à rotação do conjunto bloco-estacas em terreno compacto.

Variando a condição de engaste perfeito a engaste parcial da base da torre em função da rigidez da fundação, os valores da frequência fundamental de vibração da estrutura da torre pouco se alteram como mostra a Tabela 3. Nota-se que a frequência fundamental é pouco alterada para os valores dos coeficientes da rigidez dados na Tabela 2.

Tabela 3 – Frequências de vibração do sistema estrutural torre-fundação.

Condições de rigidez	Modelos Bloco-Estacas				
	Rígido (Engaste perfeito)	Rigidez de Projeto	Estacas Hélice	Cavaletes de Estacas Raiz	Cavaletes de Microestacas
Frequência Fundamental (Hz)	0,365	0,359	0,359	0,359	0,359

Dimensionamento à Flexão do Bloco de concreto armado

O dimensionamento do bloco de concreto armado à flexão segue as diretrizes da NBR 6118 com utilização de barras de aço CA-50. O cálculo é feito para o setor mais solicitado do bloco, correspondente ao trecho entre o núcleo central e uma estaca ou cavalete estacas. O cálculo do momento fletor radial e da armadura num setor do bloco de concreto armado é feito em analogia a uma viga engastada (no núcleo do bloco) sob carga concentrada numa seção (no centro da estaca ou cavalete de estacas). Os resultados do dimensionamento estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Consumo de aço e concreto para as diferentes soluções de fundação.

Resultados do dimensionamento	Bloco com Estacas Hélice	Bloco com Estacas Raiz	Bloco com Microestacas
Volume de concreto do bloco (m³)	403	298	154
Redução no consumo de concreto (%)	--	25%	62%
Volume de concreto das estacas (m³)	93,1	86,9	28,8
Área de aço por setor do bloco (cm²)	130	112	140
Armadura longitudinal à flexão do bloco (tf)	16,2	10,1	8,8
Aço das armaduras das estacas (tf)	7,3	12,2	29,6
Número de estacas	22	36	32

Comentários Finais

Propõe-se neste artigo o emprego de cavaletes de estacas de pequeno diâmetro como uma alternativa à prática usual do emprego de estacas verticais de grande diâmetro

(como p/ ex. estacas hélice) em fundações de torres de turbinas eólicas. Avalia-se a viabilidade técnica e econômica de cavaletes de estacas raiz e microestacas, buscando reduzir o volume de concreto armado utilizado no bloco e nas estacas, respeitando todas as premissas de projeto e as prescrições normativas.

No caso exemplo analisado, a concepção em microestacas resultou no menor volume de concreto e peso de aço para o bloco e menor consumo de concreto no estaqueamento, reduzindo custo de execução com a logística e mobilização dos equipamentos. Entretanto, o custo de execução de cada microestaca é maior que o da estaca raiz. Mas, a redução de mão de obra e do volume de concreto armado do bloco e concreto das estacas pode, afinal, tornar vantajoso o emprego de cavaletes de microestacas.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122 – Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2014.
- ANEEL. (s.d.). ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Acesso em 26 de janeiro de 2018, disponível em <http://www.aneel.gov.br>.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. (1975). Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity. In: Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, V, 1975, Buenos Aires, Anais, p.367-376
- ALONSO, U. R. (1996). Estimativa da adesão em estacas a partir do atrito lateral medido com o torque no ensaio SPT-T. Solos e rochas, 20, 47-59.
- BATTISTA, R.C.; CONCEIÇÃO, R.S. (2012). Avaliação Estrutural de uma Torre de Concreto Armado com Altura de 78m para Suporte de Aerogeradores. Relatório Técnico CL-811 e 829/13 – Queiroz Galvão Energias Renováveis, CONTROLLATO Ltda., Rio de Janeiro.
- BUSTAMANTE, M., & DOIX, B. (1985). Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés. Bull Liaison Lab Ponts Chauss, (p. 140).
- DÉCOURT, L., & QUARESMA, A. R. (1978). Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (Vol. 6, pp. 45-53).
- HAU, E. (2005). Wind turbines - Fundamentals, Technologies, Applications, Economics. Springer.
- SABATINI, P. J., et al. (2005). "Micropile design and construction." US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, Report No. FHWA-NHI-05-039 (2005).
- TEIXEIRA, A. H., & GODOY, N. S. D. (1996). Análise, projeto e execução de fundações rasas. Fundações: teoria e prática. São Paulo: Pini, Cap, 7, 227-264.
- VELLOSO, P. P. C. (1981). Estacas em Solo–Dados para a Estimativa do Comprimento. Ciclo de Palestras sobre Estacas Escavadas, Clube de Engenharia, Rio de Janeiro.