

Avaliação da frequência de vibração das fundações superficiais dos aerogeradores das usinas eólicas da Prainha e da Taíba

Alfran Sampaio Moura

D.Sc. - UFC

Alfransampaio@ufc.br

José Geraldo Rodrigues dos Reis

Engenheiro Civil

Engenheiro Civil, GAFISA S/A

jgrodrigues@gafisa.com.br

Alexandre Miranda

Mont'Alverne

D.Sc., UFC

montalverne@ufc.br

Resumo

O presente artigo mostra um estudo comparativo da estimativa da frequência natural de vibração das fundações superficiais de dois aerogeradores situados nas usinas eólicas da Prainha e da Taíba. Inicialmente, abordam-se alguns conceitos básicos da dinâmica das fundações e os principais métodos disponíveis na literatura para cálculo da frequência de vibração de fundações de máquinas rotativas. Em seguida, apresenta-se um estudo com o objetivo de comparar estimativas da frequência de vibração das fundações dos aerogeradores mencionados utilizando diferentes métodos. A faixa de variação das estimativas da frequência natural de vibração foi muito ampla, os métodos empíricos estimaram os menores valores e os métodos do semi-espaço elástico estimam os maiores valores.

Palavras-chave: Fundações. Aerogeradores. Dunas. Vibração.

Abstract

This paper shows a comparative estimate of the vibration frequency on surface foundation substructure generated by aerogenerators in two wind power plants located in Prainha and Taíba, Brazilian Northeast coast. The paper deals with the fundamental concepts of dynamics of foundations. In the literature topic the most recommended methods to estimate vibration caused by rotating machinery in foundation substructures were presented. As an application, the formerly presented methods were applied as a full-scale case to estimate vibration due to aerogenerators. The resulting values were in large range. Empirical methods had smaller numbers than the elastic semi-space methods, which were higher.

Keywords: Foundation. Aerogenerator. Dunes. Vibration

1 Introdução

Uma série de tipos de máquinas, que operam a certas frequências, podem muitas vezes produzir vibrações danosas às estruturas das construções. Felizmente, essas vibrações podem ser controladas de forma a não serem transmitidas na íntegra às fundações das construções. Na prática isso é feito fazendo com que a frequência das máquinas apresentem um certo distanciamento da frequência das fundações, evitando o fenômeno da ressonância, que poderia causar danos e, até mesmo, a ruína da construção. A estimativa dos movimentos, que tanto podem ser de translação como de rotação, do sistema máquina-fundação-solo é mais comumente realizada pelo método em que o solo é considerado homogêneo, isótropo, elástico e semi-infinito (Richart *et al.*, 1970) e o método em que o solo é substituído por molas lineares sem peso (Barkan, 1962). Para a utilização de qualquer um desses métodos é necessário a determinação dos parâmetros dinâmicos dos solos, que são obtidos a partir de ensaios, tanto podendo ser de campo quanto de laboratório. Este artigo tem como objetivo comparar estimativas de frequência de vibração das fundações superficiais de aerogeradores assentes em areias das dunas da costa cearense por diferentes métodos.

2 Conceitos básicos de dinâmica das fundações

Um carregamento pode ser caracterizado como dinâmico quando varia no tempo, em valor e (ou) direção. Edifícios convencionais, durante e depois de sua construção, apresentam variação de massa. No entanto, isso ocorre em pequenos incrementos que não chegam a perturbar o equilíbrio estático vigente entre o peso da edificação e a reação do solo. A velocidade do carregamento em um fenômeno dinâmico depende muito da grandeza da massa de solo envolvida. A partir daí, amostras típicas utilizadas em laboratório só teriam reações caracterizadas como dinâmicas a partir de 25 Hz. Por outro lado, grandes barragens de terra podem sofrer forças de inércia importantes a frequências em torno de 0,5 Hz (Lambe e Whitman, 1976).

Os carregamentos dinâmicos podem ser classificados como periódicos, aleatórios e impulsos. No carregamento periódico há repetição em intervalos regulares de tempo. No caso de carregamento aleatório a variação da carga não apresenta regularidade. O impulso é um caso particular em que o carregamento é aplicado

uma única vez. A operação de máquinas rotativas é um caso típico de carregamento periódico e as ondas em estruturas marítimas de um carregamento aleatório. Impulso ocorre em cargas de impacto como em protetores devido à ancoragem de navios

Eventos dinâmicos em Geotecnia estão, em geral, relacionados a fundações de máquinas, propagação de ondas no solo e cravação de estacas. Máquinas como turbinas, compressores, motores, geradores e, até mesmo, pequenas máquinas usadas em fábricas podem provocar vibrações importantes nas estruturas das construções. Neste contexto, destaca-se a presença de vibrações nas estruturas dos aerogeradores.

A operação de máquinas rotativas poderá ocasionar desequilíbrio das forças que aceleram o conjunto máquina-estrutura-fundação. Se o movimento gerado for periódico o conjunto oscilará e, no caso de vibrações excessivas, poderá comprometer a funcionalidade ou, até mesmo, a utilização de uma dada construção.

O sistema máquina-estrutura-fundação constitui um complexo sistema vibrante com elevados graus de liberdade e consequentes frequências naturais que está sujeito ao fenômeno da ressonância. Entenda-se por grau de liberdade o número de direções de deslocamento em que um determinado sistema é permitido oscilar.

Os deslocamentos estruturais resultam em forças de inércia. No entanto, os próprios deslocamentos influenciam a grandeza dessas forças, por isso diz-se que ocorre um ciclo fechado de causa e efeito. A formulação do problema pode ser estabelecida por meio de equações diferenciais.

Análises determinísticas permitem a avaliação da história dos deslocamentos com o tempo nas estruturas devido a carregamentos dinâmicos. As expressões matemáticas que definem os deslocamentos dinâmicos são chamadas de equações de movimentos. Clough e Penzien (1975) destacam três métodos que podem ser utilizados na formulação das equações de movimento: Equilíbrio direto pelo princípio de d'Alembert's, Princípio do Trabalho Virtual e Princípio de Hamilton.

A representação mais simples de uma estrutura é feita a partir de modelos matemáticos de um grau de liberdade (Figura 1). No sistema de um grau de liberdade permite-se o movimento apenas numa direção. Dessa forma, apenas uma coordenada é necessária para definir totalmente a posição de uma determinada massa considerada concentrada. Essa massa é submetida a um carregamento externo, $F(t)$, que varia no tempo e produz a resposta do sistema.

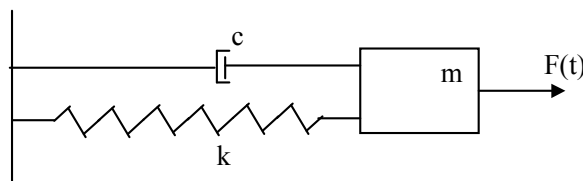


Figura 1: Representação esquemática de um sistema com um grau de liberdade.

Os componentes de um sistema de um grau de liberdade são: uma massa, as propriedades elásticas, os mecanismos de amortecimento e a fonte externa de carregamento. A mola, de rigidez k , sem peso, fornece a resistência elástica ao deslocamento e o amortecedor, c , representa a dissipação de energia.

Aplicando o equilíbrio das forças que atuam na massa da Figura 1 na direção do deslocamento chega-se a:

$$F_i + F_{am} + F_e = F(t) \tag{1}$$

em que: $F(t)$ é a força externa atuante, $F_i = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2}$ é a força de inércia, $F_{am} = c \cdot \frac{dx}{dt}$ é a força de amortecimento e $F_e = k \cdot x$ é a força elástica.

A substituição destas expressões na equação 1 conduz à equação do movimento de um sistema forçado com um grau de liberdade:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x = F(t) \tag{2}$$

em que m é a massa da fundação, c é a constante de amortecimento, k é a constante elástica e $F(t)$ é a força externa atuante.

Para o caso de corpos submetidos a oscilações naturais, isto é, oscilações que ocorrem quando um corpo é deslocado e depois abandonado a si mesmo, a Eq. (2) torna-se:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x = 0 \tag{3}$$

Movimentos deste tipo são chamados de movimento harmônico amortecido. Este movimento apresenta solução expressa em termos de funções seno ou co-seno e amplitude de oscilação gradualmente decrescente por atrito. Se não houver amortecimento ($c = 0$), o movimento é chamado de livre ou harmônico simples.

Para modelos com vários graus de liberdade, a formulação do movimento é análoga à do movimento de um sistema de um grau de liberdade. Neste caso procede-se a uma discretização da massa, cujas forças estão associadas a cada grau de liberdade presente.

3 Métodos de cálculo de fundações de máquinas

Os métodos de cálculo de fundações superficiais de máquinas podem ser agrupados em empíricos, solo como um semi-espaço elástico, solo como um conjunto de molas lineares sem peso e numéricos.

Segundo Costa (1988), os métodos empíricos são mais indicados em análises preliminares. Os métodos que consideram o solo como um semi-espaço elástico e como um conjunto de molas lineares sem peso só devem ser utilizados nos casos de baixos níveis de deformação e os métodos numéricos são mais indicados nos casos de vários graus de liberdade.

3.1 Métodos empíricos

Inclui-se no grupo de métodos empíricos o método da “German Research Society for Soil Mechanics”, que é também conhecido como método do DEGEBO (Tschebotarioff, 1978), os métodos que levam em conta a massa do solo, método de Tschebotarioff e Ward (1948) e o método de Alpan (1961).

O método do DEGEBO (Tschebotarioff, 1978) foi proposto a partir de pesquisas realizadas no início do século, em Berlin, através de um oscilador mecânico com quatro massas excêntricas atuantes nos modos vertical e torcional. Como resultado dessa pesquisa divulgou-se uma série de frequências características para uma ampla gama de solos.

Nos métodos que levam em conta a massa do solo considera-se que o solo age como uma mola que vibra juntamente com a fundação. A principal dificuldade encontrada para a utilização desses métodos reside na quantificação do peso do solo em vibração.

O método de Tschebotarioff e Ward (1948) propõe a obtenção da frequência natural, f_n , em função da área da base da fundação, A , do peso da fundação mais a máquina, P_v , e da frequência natural reduzida, f_{nr} , de forma que:

$$f_n = \sqrt{\frac{A}{P_v}} \cdot f_{nr} \quad (4)$$

Vale comentar que a frequência natural reduzida, f_{nr} , é obtida, em forma gráfica, em função da área da fundação, A , e do tipo de solo.

O método de Alpan (1961) propõe a seguinte relação:

$$f_n = \frac{a'}{\sqrt{P_v}} \cdot A^{0,25} \quad (5)$$

em que: f_n é a frequência natural, P_v é o peso da fundação mais a máquina, A é a área da fundação e a' é um parâmetro que é função do tipo de solo.

Segundo Srinivasulu e Vaidyanathan (1978) métodos empíricos, como o de Alpan (1961), devem ser usados apenas em projetos preliminares, sendo mais adequados para a checagem da ocorrência de ressonância.

3.2 Métodos que consideram o solo como um semi-espaço elástico

A teoria do semi-espaço elástico estuda as vibrações de uma fundação rígida vibrante na superfície de um semi-espaço de dimensões infinitas, homogêneo e isotrópico, cujas relações tensão-deformação são definidas por duas constantes: o módulo cisalhante e o coeficiente de Poisson. O método é analítico e admite a hipótese de pequenas deformações necessárias para se considerar a elasticidade linear dos solos, e considera a perda de energia no maciço de solo por efeito de amortecimento, baseando-se na teoria da propagação de ondas em um meio elástico, admitindo diversas hipóteses simplificadoras para facilitar a resolução matemática do problema.

Segundo Morgan e Moore (1968) a principal dificuldade na utilização nos métodos do semi-espaço elástico é a determinação dos parâmetros dos solos, ou seja, o módulo de deformação cisalhante (G) e o coeficiente de Poisson (ν).

A seguir apresentam-se alguns dos principais métodos que consideram o solo como um semi-espaço elástico.

No método de Hsieh (1962) o movimento vertical de uma fundação rígida é dado por:

$$m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} + \sqrt{G \cdot \rho} \cdot r_o \cdot F_2 \cdot \frac{dz}{dt} - G \cdot r_o \cdot F_1 \cdot z = F \quad (6)$$

Dessa forma, o coeficiente de amortecimento, c , e o coeficiente de rigidez (constante elástica), k , são obtidos por:

$$c = \sqrt{G \cdot \rho} \cdot r_o \cdot F_2 \quad (7)$$

$$k = G \cdot r_o \cdot F_1 \quad (8)$$

em que: F_1 e F_2 são funções de deslocamento para o modo de vibração vertical no intervalo de $0 < a_o < 1,5$ que são dadas em função do coeficiente de Poisson (ν) e a_o é um coeficiente adimensional da frequência, que é dado por:

$$a_o = \omega \cdot r_o \cdot \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (9)$$

Sendo G o módulo de deformação cisalhante, r_o o raio da área circular, ω a frequência circular e ρ a massa específica do solo.

A proposta de Lysmer e Richart (1966) relaciona os métodos que consideram o solo como um semi-espaço elástico com o sistema oscilante amortecido

As constantes propostas no método são:

$$k_z = \frac{4 \cdot G \cdot r_o}{1 - \nu} \quad (9)$$

$$c = \frac{3,4 \cdot r_o^2}{1 - \nu} \cdot \sqrt{G \cdot \rho} \quad (10)$$

Sendo G o módulo de deformação cisalhante, r_o o raio da área circular, ν o coeficiente de Poisson e ρ a massa específica do solo.

Nagendra e Sridharan (1981) propuseram, a partir de funções de deslocamento modificadas independentes do coeficiente de Poisson (ν), as seguintes expressões para o caso de distribuições de pressões uniformes:

$$k_z = \frac{\pi \cdot G \cdot r_o}{1 - \nu} \quad (11)$$

$$c = \frac{2,117 \cdot r_o^2 \cdot \sqrt{G \cdot \rho}}{1 - \nu} \quad (12)$$

Sendo G o módulo de deformação cisalhante, r_o o raio da área circular, ν o coeficiente de Poisson e ρ a massa específica do solo.

3.3 Método que considera o solo como um conjunto de molas lineares sem peso (Barkan, 1962)

No método em que o solo é substituído por um sistema de molas lineares sem peso, o efeito do amortecimento e da participação da massa da mola são desprezados. Segundo Tschebotarioff (1978), embora o amortecimento tenha um efeito considerável nas amplitudes de ressonância, diminuindo as amplitudes, ele pode ser desprezado, a favor da segurança, desde que seja evitada a faixa de ressonância no projeto de fundações.

Segundo Srinivasulu e Vaidyanathan (1978), apesar do método de Barkan (1962) desprezar os efeitos do amortecimento e da participação da massa de solo, sua utilização é simples e capaz de realizar previsões bastante concordantes com o real comportamento da fundação.

Para as vibrações verticais, aplicando-se a lei de Hooke, tem-se que:

$$F_z = -k_z \cdot z \quad (13)$$

Não havendo amortecimento e fazendo $F(t) = P_z \cdot \text{sen } \omega'' \cdot t$, tem-se a equação do movimento vertical de uma vibração forçada sem amortecimento, assim:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + k_z \cdot z = P_z \cdot \text{sen } \omega'' \cdot t \quad (14)$$

Em que m é a massa da fundação, k_z é a constante elástica na direção vertical, P_z o valor máximo da força externa, ω'' a frequência circular de atuação da força externa, t o tempo e $F(t)$ é a força externa atuante.

Fazendo $c_z = p/z_e$, onde c_z é o coeficiente de compressão elástica uniforme, p é a pressão uniforme de compressão e z_e é o recalque elástico, e lembrando que a pressão, p , é igual à relação entre a força vertical, F_z , e a área da base da função, A , tem-se que:

$$c_z = \frac{F}{A.z_e} \tag{15}$$

Mas aplicando a lei de Hooke tem-se:

$$c_z = \frac{k_z}{A} \tag{16}$$

em que: k_z representa a rigidez do solo, c_z é um coeficiente de compressão elástica e A a área da base da fundação.

Substituindo na equação do movimento vertical de vibração forçada sem amortecimento obtém-se:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c_z . A . z = P_z . sen \omega . t \tag{17}$$

Utilizando-se o bloco de ressonância, a determinação de c_z é feita através da análise da vibração de um bloco suportando um oscilador para a determinação da frequência de ressonância. O oscilador mecânico fornece uma excitação vertical através de massas desbalanceadas com frequência de operação variável, de onde obtém-se a frequência correspondente à máxima amplitude.

Admitindo-se que a frequência natural é a frequência de ressonância, a expressão da frequência natural fornece o coeficiente de compressão elástica (c_z), assim:

$$c_z = \frac{4\pi^2 f_{nz}^2 . m}{A} \tag{18}$$

Onde: f_{nz} é a frequência natural correspondente à máxima amplitude, m é a massa da fundação e máquina e A a área da base da fundação.

Finalmente, através de ensaios de placa cíclicos, determina-se c_z apoiando-se uma placa sobre o solo e submetendo-a a repetidos ciclos de carregamentos e descarregamentos que são aumentados a cada estágio. Para cada estágio de descarregamento existirá uma parcela de recalque elástico e outra residual. Da relação entre a pressão no solo e o recalque elástico obtém-se o valor de c_z . (Figura 2).

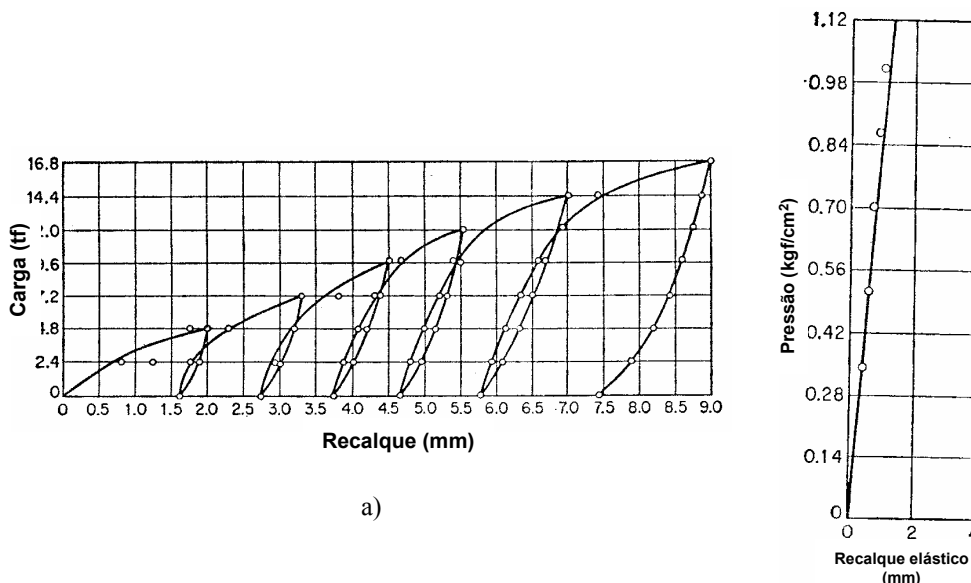


Figura 2: a) Resultado de um ensaio de placa cíclico b) Determinação gráfica de c_z (Barkan, 1962).

Segundo Barkan (1962), em geral a participação da massa do solo nas vibrações da fundação não excede 23% da massa total (fundação e máquina). Sendo a frequência natural função da raiz quadrada da massa, o cálculo dessas frequências, incluindo a massa de solo, não alteraria mais do que 10% o valor da frequência para o caso de se desconsiderar a participação da massa de solo.

4 Localização do estudo realizado

Para a realização deste trabalho, realizou-se um estudo dos solos que servem de apoio às fundações dos aerogeradores das usinas eólicas da Taíba e da Prainha e que situam-se nas praias de mesmo nome. A praia da Taíba está situada no município de São Gonçalo do Amarante, que limita-se a leste com a Região Metropolitana

de Fortaleza, RMF, e encontra-se a cerca de 60 km da capital do Estado do Ceará (Figura 3a). Já a praia da Prainha está situada no município de Aquiraz, que dista cerca de 20 km da capital cearense, e encontra-se inserida na porção leste da Região Metropolitana de Fortaleza (Figura 3b).

5 Coleta de dados

Os dados necessários à realização deste trabalho referentes aos aerogeradores da Praia da Taíba (Município de São Gonçalo do Amarante) foram obtidos em Moura (2007) e os dados dos aerogeradores da Prainha (Município de Aquiraz) foram coletados em empresas locais. Para a praia da Taíba, coletou-se os resultados de ensaios geotécnicos de laboratório (ensaios de caracterização e especiais) e campo (SPT e PMT), além da caracterização geométrica dos aerogeradores existentes no local, ou seja, obtenção das dimensões e dos pesos dos seus diversos componentes. Para a Prainha coletou-se apenas os resultados de sondagens à percussão (SPT) e da caracterização geométrica dos aerogeradores existentes no local.

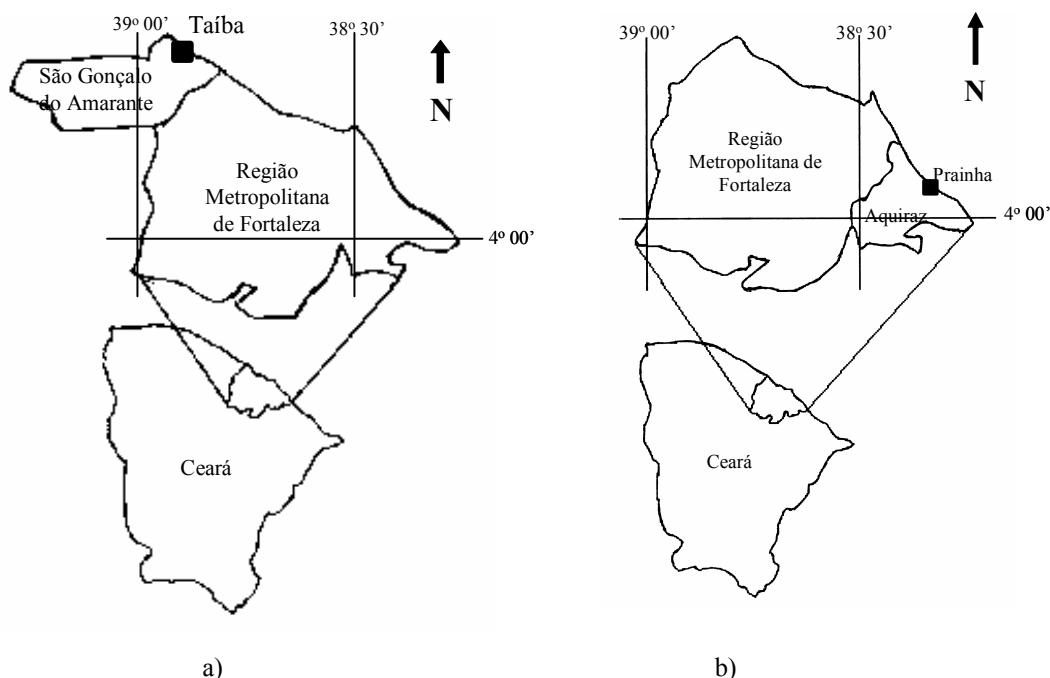


Figura 3: Localização dos aerogeradores estudados a) Município de São Gonçalo do Amarante b) Município de Aquiraz.

6 Ensaio geotécnicos

6.1 Ensaio geotécnicos da praia da Taíba

O comportamento do solo presente na praia da Taíba foi determinado a partir de um programa de ensaios de laboratório (caracterização e especiais) e de uma campanha de ensaios de campo, ensaios à percussão e ensaios pressiométricos. A campanha de laboratório constou de uma bateria de ensaios de caracterização e outra de ensaios especiais. A caracterização constou de análise granulométrica, determinação da densidade real dos grãos, índices de consistência e determinação do índice de vazios máximo e mínimo. Adicionalmente, determinou-se um perfil de umidade natural e de densidade natural “in situ”. A Figura 4 mostra uma curva granulométrica típica do material estudado.

De acordo com a classificação do Highway Research Board (HRB), todas as amostras estudadas enquadram-se no subgrupo dos solos A-3, correspondendo à areia fina, neste caso de duna. Pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) as amostras correspondem ao grupo SP, ou seja, a areia mal graduada, com pouca quantidade de finos. Com o objetivo de obter valores característicos dos parâmetros de resistência do solo estudado, foram realizados dois programas de ensaios de cisalhamento direto em amostras compactadas estaticamente, uma na condição natural, 3% de umidade, e a outra na condição seca. Para cada uma dessas condições, moldou-se corpos de prova com diferentes índices de vazio (e).

Os índices de vazio máximo (e_{max}) e mínimo (e_{min}) para o solo estudado corresponderam a 0,85 e 0,59, respectivamente. Com base nesses resultados, os corpos de prova com “e” igual a 0,80 receberam a denominação de fofo, já aqueles que apresentavam “e” da ordem de 0,60 foram chamados de compactos e os com índice de

vazios próximos a 0,70 foram denominados de intermediários. Nas Figuras 5 e 6 são mostrados os resultados obtidos com os ensaios de cisalhamento direto realizados no estado intermediário ($e=0,70$) nas amostras secas. Os valores obtidos de ϕ em função do índice de vazios para os corpos de prova no estado úmido possibilitaram a construção de um gráfico que permitiu, a partir da relação obtida entre os índices de vazio de cada corpo de prova e o ângulo de atrito estimado pelos ensaios de cisalhamento direto, extrapolações para a condição de campo (Moura, Cunha e Almeida, 2008).

O índice de vazios do solo foi, na média, estimado em 0,59 e, praticamente, não variou com a profundidade. Vale comentar que, a estimativa do índice de vazios (e) com a profundidade foi feita a partir da compactidade relativa (CR), que foi obtida em função do índice de resistência das sondagens à percussão (N_{SPT}), realizadas utilizando-se a proposta de Mitchell *et al* (1978). Determinando-se a variação do ângulo de atrito do solo ao longo da profundidade verificou-se que, ao contrário do que se pensava, a estimativa do ângulo de atrito não variou com a profundidade e manteve-se constante em 43° .

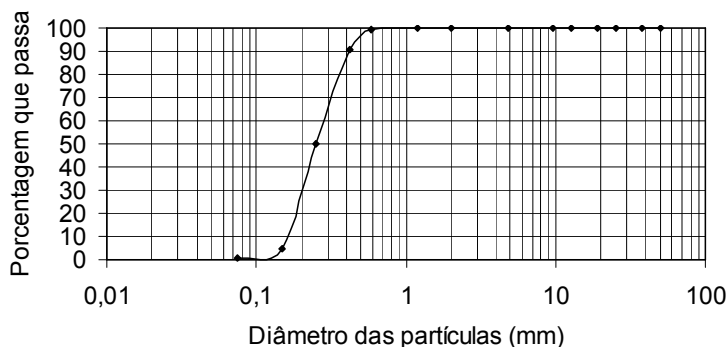


Figura 4: Curva granulométrica típica do material estudado.

Para estimar o valor do módulo oedométrico do solo estudado, assim como o efeito da saturação no mesmo, realizou-se um ensaio oedométrico duplo. Este método, muito utilizado para a avaliação do colapso de solos não saturados, é realizado através de dois ensaios. Para isso, toma-se dois corpos de prova nas mesmas condições iniciais. Um deles é previamente inundado para, em seguida, ser submetido aos estágios de carregamento padronizados. O outro é ensaiado na condição natural, com umidade constante.

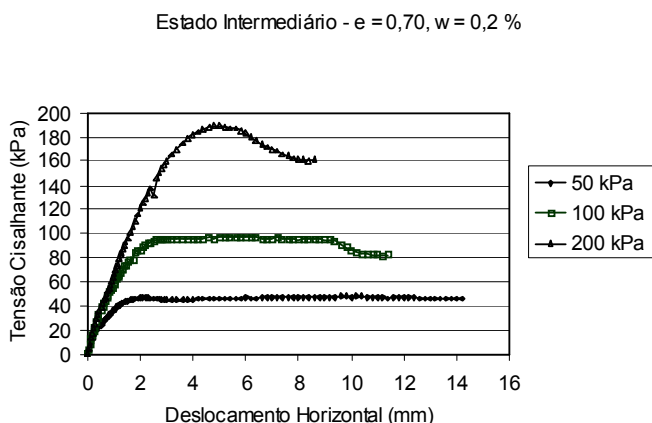


Figura 5: Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal ($e = 0,70$, amostra seca).

A Figura 7 mostra as curvas e versus σ_v do ensaio oedométrico duplo realizado. A compressibilidade do solo é pequena, ou seja, o solo estudado apresenta elevada rigidez. No ensaio oedométrico realizado na umidade natural obteve-se, para o índice de compressão (C_c), representado pela inclinação da reta virgem, o valor de 0,043, e para o índice de recompressão (C_r) o valor de 0,011. O solo ensaiado na condição saturada apresentou discreta diminuição da compressibilidade, neste caso o C_c e o C_r apresentaram valores de 0,038 e 0,013, respectivamente. Maiores detalhes dos ensaios de laboratório realizados no solo da Taíba podem ser obtidos em Moura (2007).

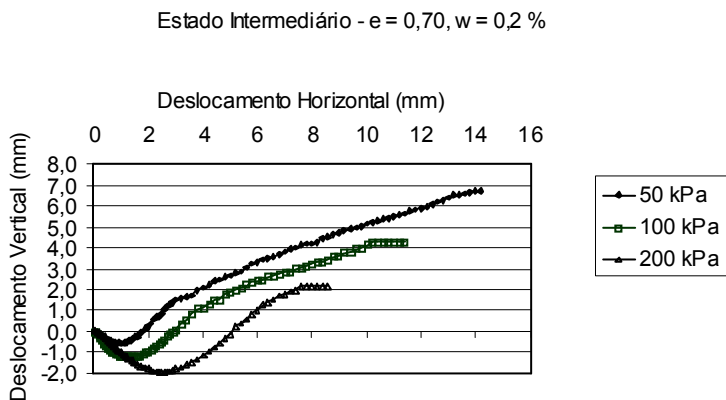


Figura 6 : Curva Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal ($e = 0,70$, amostra seca).

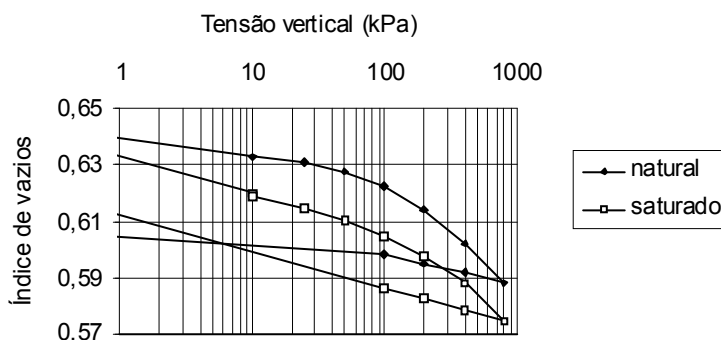


Figura 7: Resultado do ensaio oedométrico duplo.

O ensaio à percussão é, reconhecidamente, o método de investigação geotécnica mais utilizado no Brasil. A resistência à penetração é obtida a partir do ensaio que dá indicações da resistência do solo e permite a retirada de amostras para fins de caracterização do perfil do solo. Os valores da resistência à penetração obtida no ensaio são comumente utilizados em projetos de fundações. Realizou-se um total de 4 sondagens à percussão, de acordo com a Norma NBR 6484/01 (ABNT, 2001), até uma profundidade de 10m utilizando um trado manual. Na Figura 8 mostra-se uma comparação entre os valores dos índices de resistência à penetração apresentados nas quatro sondagens realizadas, bem como o perfil de resistência médio. O solo estudado é bastante uniforme, sendo constituído basicamente de areia fina, de dunas, de consistência compacta a muito compacta. Os elevados valores do N_{SPT} encontrados são atribuídos ao fato do subsolo estudado posicionar-se numa região geológica de formação bastante antiga apresentando, portanto, um desenvolvimento de processos pedogenéticos. Inclusive foi possível verificar, nas adjacências do local, a presença de revestimentos vegetais de certo porte.

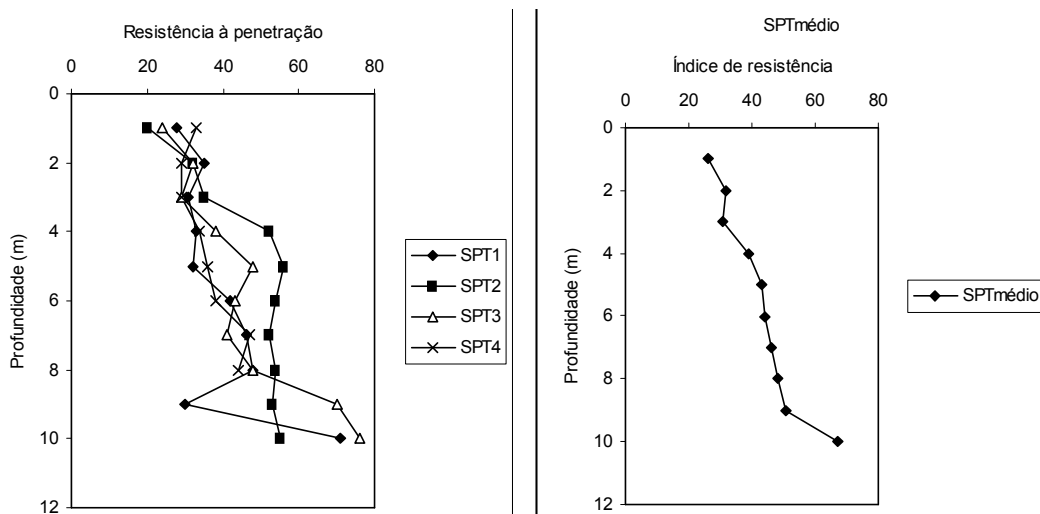


Figura 8: Perfis de resistência à penetração da Praia da Taíba a) Comparação entre as sondagens SPT1, SPT2, SPT3 e SPT4. b) Perfil de resistência médio.

Com relação aos ensaios pressiométricos, o equipamento utilizado é do tipo Ménard, modelo GC, marca APAGEO. O equipamento é composto de uma fonte de pressão, uma unidade de pressão e volume (CPV) e uma sonda cilíndrica, com 45 cm de comprimento e 5,9 cm de diâmetro. A conexão entre a sonda e a unidade de controle é feita por uma tubulação coaxial flexível de 11 mm de diâmetro externo e 25 m de comprimento.

Foram realizados um total de 14 ensaios pressiométricos em dois furos executados até a profundidade máxima de 7m no entorno das fundações do aerogerador de nº 7, utilizando um trado manual do tipo cavadeira, com diâmetro entre 60 e 70 mm e posicionado a 2m das sondagens à percussão

Utilizando-se as recomendações da Norma Americana (ASTM, 1987) determinaram-se os perfis da tensão horizontal no repouso (σ_{ho}), da pressão limite (p_l) e da pressão limite efetiva (p_l^*), do coeficiente de empuxo no repouso (k_o), dos módulos de deformação (E_i) e de cisalhamento (G_i) pressiométricos e do módulo de cisalhamento pressiométrico cíclico (G_{ur}).

Na Tabela 1 mostram-se os resultados dos parâmetros determinados a partir dos resultados dos ensaios pressiométricos no furo PMT1. Maiores detalhes dos ensaios realizados e das análises dos seus resultados podem ser obtidos em Moura, Cunha e Almeida (2008).

Tabela 1: Resumo dos parâmetros obtidos a partir dos ensaios no furo PMT1.

Parâmetro	Profundidade (m)						
	1	2	3	4	5	6	7
σ_{ho} (kPa)	50,00	44,00	70,00	75,00	50,00	50,00	120,00
E_i (MPa)	4,90	12,19	15,18	15,84	20,90	19,68	19,23
G_i (MPa)	1,84	4,58	5,70	5,96	7,86	7,40	7,23
p_l (MPa)	0,74	1,89	2,56	2,72	3,30	-	3,40
p_l^* (MPa)	0,69	1,84	2,49	2,64	3,25	-	3,28
E_{ur} (MPa)	-	135,40	-	169,18	-	-	184,90
G_{ur} (MPa)	-	50,90	-	63,60	-	-	69,51
k_o	2,95	1,30	1,38	1,11	0,59	0,49	1,01

6.2 Ensaios geotécnicos da praia da Prainha

O solo presente nessa praia corresponde a uma areia fina, branca, de compactidade variando de fofa a muito compacta. Coletou-se duas sondagens à percussão (SPT) distantes de 400m uma da outra. Os perfis de resistência das duas sondagens são mostrados nas Figuras 9a e 9b.

Em média, estima-se, para o índice de resistência, o valor de 17 golpes. Vale comentar ainda que o NA não foi encontrado.

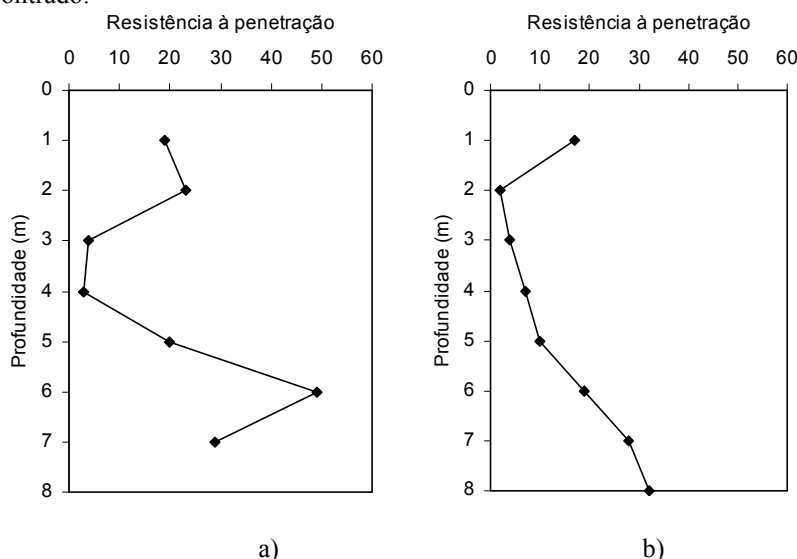


Figura 9: Perfis de resistência à penetração da Prainha a) SPT1 b) SPT2

7 Caracterização dos aerogeradores

Os aerogeradores da Taíba e da Prainha são iguais, da marca Wobben Windpower/Enercon, modelo E-40, potência nominal de 500 kW, diâmetro do rotor de 4,2m, altura do eixo de 46,2m, com controle ativo de ângulo de passo das pás na frente da torre, sentido horário de rotação, com três pás cada uma, com um comprimento de 18,9m e pesando 13 kN. As pás são de fibra de vidro reforçado com epoxi. O gerador apresenta eixo horizontal e pesa 136 kN. As fundações dos aerogeradores são sapatas quadradas de concreto armado, de 9m de lado e 1,5m de altura. As torres medem 44m de altura, são feitas de aço com 2,54cm de espessura e pesam 359 kN. O diâmetro da torre na base é de 2,5m e na altura máxima de 1,2m. A nacele dos aerogeradores é o compartimento localizado no topo da torre que abriga o gerador, o multiplicador de velocidades, o freio mecânico e os eixos. A nacele é feita de fibra de vidro, apresenta diâmetro de 4,4m, comprimento de 6,7m e pesa 129 kN. Considerando-se que o peso específico do concreto armado seja de 25 kN/m³, verifica-se que o peso das fundações de cada aerogerador é de cerca de 3038 kN. Adicionando-se a esse o peso da torre, 359 kN, da nacele, 129 kN, do gerador, 136 kN e das três pás, 39 kN, estima-se um peso total de 3700 kN, para cada aerogerador.

8 Estimativas da frequência natural de vibração e comparação dos resultados

As estimativas das frequências de vibração das fundações dos aerogeradores das praias da Taíba e da Prainha foram realizadas por meio de alguns dos métodos mais divulgados na literatura, três empíricos (DEGEGO, Tschebotarioff e Ward, 1948 e Alpan, 1961), dois outros métodos que consideram o solo como um semi-espaço elástico (Lysmer e Richart, 1966 e Nagendra e Sridharan, 1981). Além desses, também é utilizado o clássico método que considera o solo como um conjunto de molas lineares sem peso proposto por Barkan (1962). Na Tabela 2 mostra-se as estimativas da frequência natural de vibração dos aerogeradores das praias da Taíba e da Prainha. Na Figura 10 mostra-se uma comparação das estimativas realizadas.

Tabela 2: Estimativas da frequência natural de vibração (f_n) das fundações dos aerogeradores das praias da Taíba e da Prainha.

Método	f_n (rpm)	
	Taíba	Prainha
DEGEGO	1455	1455
Tschebotarioff e Ward (1948)	385	385
Alpan (1961)	404	404
Lysmer e Richart (1966)	1394 a 1507	890 a 912
Nagendra e Sridharan (1981)	1235 a 1335	789 a 808
Barkan (1962)	1529	489

Pela Tabela 2 observa-se que a faixa de variação das estimativas da frequência natural foi ampla, variando de 331 a 1529 rpm. Com exceção do método “German Research Society for Soil Mechanics” (DEGEGO), cuja confiabilidade dos valores estimados é reconhecidamente questionada por desconsiderar, dentre outros fatores, a influência da área de contato na frequência de vibração (Tschebotarioff, 1978), os métodos empíricos estimaram os menores valores. Vale destacar que os valores da frequência natural estimados pelos métodos empíricos de Tschebotarioff e Ward (1948) e Alpan (1961) foram bastante concordantes e variaram de 385 a 404 rpm. Por outro lado, os métodos do semi-espaço elástico estimaram os maiores valores da frequência natural cujos valores para a praia da Taíba, em média, variaram de 1285 a 1451 rpm e, para a praia da Prainha, variaram de 799 a 912 rpm. Pela proposta que considera o solo como um conjunto de molas lineares sem peso, Barkan (1962), a frequência natural foi estimada em 1529 e 489 rpm para as fundações das praias da Taíba e da Prainha, respectivamente.

As estimativas da frequência de vibração estimadas pelos métodos empíricos para as duas situações analisadas (Taíba e Prainha) foram iguais. Como os solos de apoio das fundações apresentam características geotécnicas distintas, comprovada pela elevada diferença do índice de resistência (Figura 10 e 11), observa-se a baixa confiabilidade desses métodos.

A frequência natural de vibração, estimada pelos métodos consideram o solo como um semi-espaço elástico (Lysmer e Richart, 1966 e Nagendra e Sridharan, 1981), apresentaram diferenças iguais a 37%. Os maiores valores de frequência foram obtidos para as fundações da Taíba. Esse resultado é coerente, pois solos mais rígidos tendem a apresentar menores amplitudes e maiores frequências de vibração.

Mais uma vez comparando-se os valores de f_n para as fundações da Taíba e da Prainha, observou-se que o método de Barkan (1962) apresentou diferenças muito elevadas. Isso ocorreu porque as estimativas realizadas para a Prainha utilizaram o índice de resistência médio (N_{SPT}), da sondagem à percussão (SPT) e, na Taíba, utilizou-se valores do módulo pressiométrico cíclico (E_{ur}) obtidos de ensaios pressiométricos (PMT). Dessa

forma, os módulos de cisalhamento (G) utilizados para as estimativas das frequências de vibração obtidos das formas distintas, corresponderam a níveis de deformação também distintos.

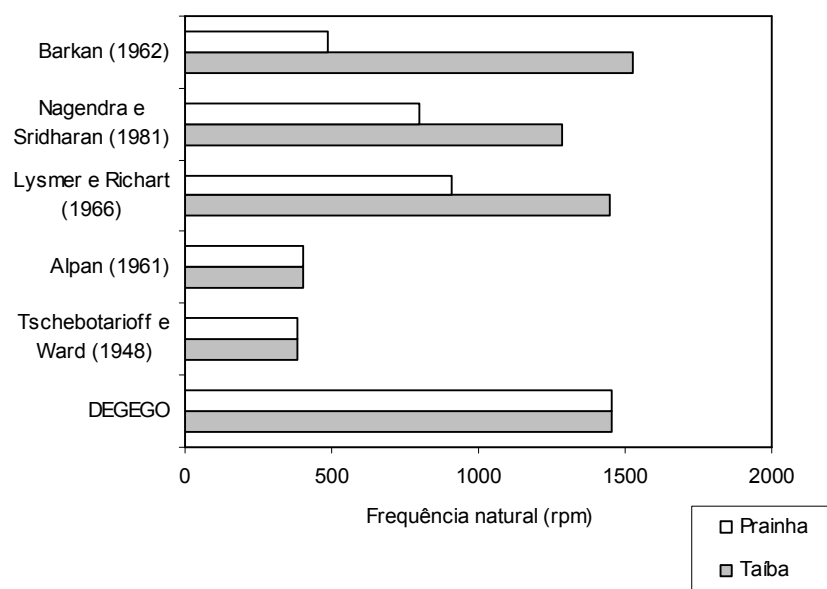


Figura 10: Comparação das estimativas da frequência natural de vibração (f_n) das fundações dos aerogeradores das praias da Taíba e da Prainha.

9 Conclusões

A realização deste trabalho permitiu o estabelecimento das seguintes conclusões:

- A faixa de variação das estimativas da frequência natural de vibração foi muito ampla, variando de 331 a 1529 rpm;
- Pelas estimativas da frequência natural de vibração dos aerogeradores das praias da Taíba e da Prainha, verifica-se que os métodos empíricos estimam os menores valores e os métodos do semi-espaço elástico estimam os maiores valores;
- As estimativas da frequência de vibração estimadas pelos métodos empíricos não são confiáveis pois, para as duas situações analisadas, e que apresentam solos de características geotécnicas distintas, as frequências estimadas foram iguais;
- Os métodos do semi-espaço elástico e de Barkan (1962) proporcionaram estimativas distintas de f_n com relação aos métodos empíricos, por considerarem em seus métodos características de deformabilidade do solo de fundação;
- Elevadas diferenças entre estimativas de f_n pelos métodos do semi-espaço elástico e de Barkan (1962) são atribuídas, principalmente, aos distintos ensaios utilizados e, conseqüente, aos diferentes níveis de deformação de cada um.

Referências

- ALPAN, I. Machine foundations and soil resonance, *Geotechnique*, Quebec, v. 11, p. 95-113, 1961.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6484/01: execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos*. Rio de Janeiro, 2001.
- BARKAN, D. D. *Dynamics of bases and foundations*. New York: McGraw-Hill, 1962. 434 p.
- CLOUGH, P.; PENZIEN J. *Dynamics of structures*. Singapore: McGraw-Hill, 1975. 634 p.
- COSTA, A. A. *Análise de fundações de máquinas sujeitas a excitações verticais*. 1988. 184 f.Tese (Mestrado em Geotecnia)-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro,1988.
- HSIEH, T. K. Foundation vibrations. *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, London, v. 22, p. 211-226, 1962.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. *Mecânica de solos*. México, DF: Limusa, 1976. 582 p.

LYSMER, J.; RICHART, F. E. Dynamic response of footings to vertical loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Washington, DC, v. 92, n. 1, p. 65-91, Jan. 1966.

MITCHELL, J. K.; GUZIKOWSKI, F.; VILET, W. C. B. *The measurement of soil properties in situ, present methods: their applicability and potential*. Berkeley: University of California, 1978.

MORGAN, J. R.; MOORE, P. J. *Application of soil dynamics to foundation design*. In: LEE, J. K. *Soil mechanics: selected topics*. London: Butterworth & Co, 1968. p. 465-527.

MOURA, A. S. *Avaliação de metodologias de projeto de fundações superficiais de aerogeradores assentes em areia de duna*. 2007. 323 f. Tese (Doutorado em Geotecnia)-Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 2007.

MOURA, A. S. et al. Caracterização geotécnica de uma areia das dunas da Taiba-CE por meio de ensaios de laboratório e campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14., 2008. *Anais ...* Búzios, 2008. p. 1334-1341.

NAGENDRA, M. V.; SRIDHARAN, A. Response of circular footings to vertical vibrations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, London, v. 107, n. GT7, p. 989-995, July 1981.

RICHART JUNIOR, F. E.; HALL, J. R.; WOODS, R. D. *Vibrations of soils and foundations*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970. 414 p.

SOBRE OS AUTORES

Alfran Sampaio Moura

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará – UFC. Especialista em Engenharia Rodoviária – UFC. Mestre e Doutor em Geotecnia pela Universidade de Brasília – UnB. Atualmente é professor Adjunto do curso de Engenharia Civil da UFC – Campus Cariri, atuando nas áreas de Geotecnia e Transportes.

José Geraldo Rodrigues dos Reis

Engenheiro Civil formado pela Universidade de Fortaleza – UNIFOR, atualmente ocupa a função de coordenador de obras da empresa GAFISA S/A.

Alexandre Miranda Mont'Alverne

Possui graduação em Engenharia Civil pela UFC, mestrado e doutorado em Engenharia Civil pela PUC-Rio. Atualmente é professor adjunto da UFC/campus cariri. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Mecânica das Estruturas, atuando principalmente nos seguintes temas: concreto armado, mecânica das estruturas e estruturas metálicas.

Recebido em: 17.11.2008

Aceito em: 14.04.2009

Revisado em: 20.04.2009