CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE MELHORAMENTO DE SOLOS ARENOSOS FOFOS POR ESTACAS DE COMPACTAÇÃO

OBSERVATIONS ON THE IMPROVEMENT OF LOOSE SAND BY COMPACTION PILES

Bicalho, Kátia Vanessa, *Professora Adjunta da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória,ES, Brasil, katia@npd.ufes.br*
Castello, Reno Reine, *Professor e Consultor, Solo Fundações & Geotecnia, Vitória, ES, Brasil, soloreno@terra.com.br*
Moraes, Maria Luiza, *Graduanda da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, mluizamoraes@hotmail.com*

RESUMO

Este artigo apresenta análises de resultados obtidos com a utilização de uma técnica de melhoramento de solos arenosos fofos para viabilização de dois casos práticos de fundações de estruturas com elevados carregamentos apoiadas sobre sapatas. A técnica de melhoramento foi compactação profunda de um solo por estacas de densificação executadas pelo processo tipo Franki complementada por compactação superficial com placas vibratórias. Verificam-se as condições dos solos antes da melhoria e após a melhoria através de ensaios de campo. Analisam-se os dados quanto a sua posição relativa às estacas, quanto à compacidade relativa inicial do solo e quanto à profundidade. Os dois casos de obras apresentados permitem comprovar a eficiência da técnica utilizada.

ABSTRACT

This paper analyses the application of a technique for improvement of loose sandy soils supporting heavily loaded structures using shallow foundations. The technique used was deep compaction through sand columns driven with Franki type equipment complemented by shallow compaction with vibratory plate. Results of the compaction processes are presented and discussed to provide guidance for future projects. The discussion includes distance from the sand column, initial relative density, and depth. The analyses demonstrate the method efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Um procedimento relativamente freqüente na prática de fundações, com o objetivo de reduzir custos é a utilização de técnicas de melhoramento das características geotécnicas do terreno de fundação (Basore e Boitano, 1969; Mitchell, 1970; Barsksdale e Takefumi, 1991; Alves et al., 2000; Bicalho et al., 2002; Bicalho et al., 2004). Essas técnicas visam permitir o uso de fundações superficiais substituindo o uso de fundações profundas.

Neste trabalho é feita uma análise dos resultados da melhoria da camada superficial (cerca de 6,5 metros de espessura) de um terreno arenoso fofo através da densificação de camadas para viabilização de uso de fundações diretas para dois edifícios residenciais com cerca de 10 andares situados na cidade de Vitória, estado do Espírito Santo, Brasil. Os edifícios foram construídos entre 1998 e 2000. O processo foi executado com um equipamento de estacas tipo

Franki, utilizando-se a "bucha" convencional para estacas de concreto (mistura de areia e brita) e o fuste com uma mistura típica de 50 % de areia e 50% de brita. A percentagem pode variar um pouco (mais brita) para criar a "bucha" e o fuste, pois caso contrário o pilão seria cravado na areia pura donde seria difícil arrancá-lo. É apresentado o processo executivo, seu controle e análise dos resultados obtidos para essa técnica de melhoria de solos arenosos fofos.

2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O perfil típico do terreno caracteriza-se superficialmente por um aterro com cerca de 1,5m de espessura. O aterro superficialmente é argiloso e em alguns trechos com bolsões de areia cinza escura. O aterro está assente sobre o terreno original que era alagadiço e coberto de vegetação que permaneceu no local marcando a transição entre aterro e solo natural. Esta camada de aterro é errática, sem controle de engenharia e imprestável como camada de apoio. Da mesma forma, o recobrimento vegetal e turfoso do terreno original (logo abaixo da camada de aterro) é imprestável e às vezes pode passar desapercebido nas sondagens devido a sua pequena espessura. O lençol d'água está situado aproximadamente na transição do aterro para solo natural no entorno da cota -1,50m.

As camadas naturais abaixo, com 8 ou mais metros de espessura, compõem-se de areias geralmente limpas, mas às vezes com poucos finos (menos de 8%). Nos 6 primeiros metros a compacidade era predominantemente fofa e nos metros finais era compacta. Assim, nas condições originais, não era viável o uso de diretas de prédios de cerca de 10 andares.

Mais abaixo ainda ocorre uma camada de argila marinha (orgânica) de espessura variável, seguida de camadas arenosas marinhas fofas, siltes argilosos médios e outros solos de consistência ou compacidade medianas. O uso de estacas convencionais se apoiadas no trecho onde a camada de areia era compacta provocaria concentração de tensões na camada de argila orgânica e aí o risco de recalques diferenciais significativos seria muito grande. Se se atravessasse as camadas de areias fofa e compacta e a camada de argila orgânica todos os problemas técnicos seriam solucionados mas, além do problema de atravessar-se a areia compacta, o comprimento de cravação aumentaria (em torno de 20 metros a mais), indo para um comprimento total de cerca de 30 metros e oneraria muito a obra.

A solução adotada para tentar-se a melhoria da camada de areia superficial foi através de densificação por estacas tipo Franki com diâmetro de 400 mm executadas com "bucha" convencional de areia e brita para cravação da estaca, e o fuste com uma mistura típica de 50% de areia e 50% de brita. Como não se esperava que tal tipo de compactação fosse eficiente para as partes mais superficiais (cerca de 1 metro onde por falta de confinamento haveria ruptura do tipo generalizada do solo) do terreno, como realmente não foi, programou-se a complementação de compactação superficial por placas vibratórias. O terreno seria assim densificado e o tornaria adequado para suporte de fundações superficiais por sapatas. Funcionaria como um radier natural homogeneizando as tensões e uniformizando os eventuais recalques na camada de argila orgânica.

3. PROCESSO EXECUTIVO

Foram executadas estacas de areia e brita de densificação pelo processo Franki (Tomlison, 1995) a partir do nível original do terreno (cota 0,0 m) até a cota –6,5 m. Para não se contaminar a areia subjacente, o aterro e a camada superficial foram atravessados por piteiramento. As estacas foram executadas com auxílio de um tubo de revestimento (400 mm de diâmetro), abrangendo todo o comprimento da estaca. O tubo foi cravado, verticalmente, com auxílio de

um pilão de 20 KN caindo de 6 m de altura sobre uma bucha de brita que tampona a extremidade inferior do tubo. As estacas foram moldadas in-loco e constituídas de mistura de areia limpa local e brita (injetada por apiloamento) do tipo Franki, com diâmetro do tubo de 400 mm. A constituição do material da estaca não é importante desde que seja granular. A brita é necessária apenas para execução da estaca (formação de "bucha"). Uma dosagem típica é 1:1 em volume, e a brita pode ser "corrida" com tamanho máximo de 25 mm (brita n° 2).

Na execução da estaca tipo Franki destacam-se as seguintes etapas:

- Limpeza superficial do terreno (por piteiramento, por exemplo);
- Cravação do tubo no terreno arenoso;
- Determinação da paralisação da cravação do tubo, sem execução de base alargada;
- Formação do fuste com a mistura de brita e areia limpa apiloada e extração gradual do tubo;
- Execução de alargamento do fuste no entorno da cota -2,50m e -5,00m com bulbo de pelo menos 300 litros de volume (com finalidade de aumentar o volume das estacas e vibrar o terreno mais vagarosamente);
- Término de formação de fuste na cota -2,00m.

O alargamento do fuste é formado através do apiloamento da mistura mantendo o tubo fixo. Anota-se o volume de mistura areia-brita injetada e o número de golpes para injetar cada caçamba da mistura. A especificação para controle básico de execução das estacas de compactação foi feita através da fórmula dinâmica de Nordlund (1982) com base em experiências anteriores. Em cada bulbo devia-se injetar um volume de areia que redundasse em carga admissível da estaca de 700 KN. A fórmula foi rearranjada para fornecer o número de golpes, N, necessário para expulsar a última caçamba de areia, ou seja:

$$N = \left(\frac{R_{ad} V_c K_s}{W H V_t^{2/3}} \right) \tag{1}$$

onde: R_{ad} = 700 KN = carga admissível da estaca (coeficiente de segurança = 3);
V_c = volume da caçamba (m^3);
H = altura de queda do pilão (6 m);
W = peso do pilão (20KN);
K_s = constante empírica do solo (areia fina a média, K_s = 14);
V_t = volume total de solo adicionado na base (m^3).

A especificação básica de espaçamento de estacas teoricamente pode se basear no volume total de estacas de areia/brita que levassem a uma desejada compacidade relativa. No entanto, tal procedimento requereria conhecimento dos índices de vazios inicial, máximo e mínimo e, para controle de qualidade, do índice de vazios final. Na prática, a obtenção de tais parâmetros com confiabilidade é difícil e o uso de regras baseadas na experiência se mostra mais confiável. O espaçamento básico adotado para estacas tipo Franki convencionais é de 3 diâmetros e tal espaçamento acarreta nas areias locais dificuldades de cravação das últimas estacas de grupos. Este espaçamento foi adotado como referência básica. O projeto final era obtido adotando-se uma taxa admissível do terreno (250 kPa no caso), dimensionando-se as sapatas desejadas e estabelecendo-se uma malha retangular no terreno que excedesse as dimensões da futura sapata em 0,5 m além de cada borda. O espaçamento básico é de 5 diâmetros, mas que variará em função das dimensões da futura sapata.

O controle do espaçamento final das estacas foi feita através de comparação entre sondagens de controle de qualidade realizadas antes e após a densificação por estacas Franki. Propôs-se a execução do estaqueamento em duas etapas. Executa-se a primeira etapa com espaçamento

maior e mais econômico (5 diâmetros), e conferem-se os resultados obtidos. Eventualmente se necessário proceder-se-ia a uma segunda etapa de estaqueamento executando-se estacas intermediárias (ver Figura 1 mostrando posição das estacas de compactação). As estacas (etapa 1) foram executadas segundo uma malha retangular com o espaçamento variando de 1,4 a 2,8 m (3,5 vezes o diâmetro das estacas, sob pilares mais pesados, e 7 vezes o diâmetro das estacas, sob pilares mais leves). A Figura 2 mostra a locação típica de sondagens iniciais e finais de controle de resultados.

As sondagens de controle de qualidade da compacidade relativa obtida foram feitas com penetrômetros dinâmicos segundo as normas preconizadas pela ISSMFE (1989). O penetrômetro dinâmico consiste numa haste com uma ponta rombuda (para criar um vazio entre a haste e o solo evitando atrito ou aderência laterais) que é penetrado no solo por pancadas. O resultado a se obter nessas sondagens é a resistência dinâmica de ponta, q_d, em trechos de 100 a 300 mm:

$$q_d = \left(\frac{PHN}{A\ s}\right)\left(\frac{P}{P+P'}\right) \tag{2}$$

onde: P = peso do martelo de cravação;
P' = peso das hastes, cabeçote e ponta;
H = altura de queda do martelo;
N = número de golpes do martelo para penetração no trecho;
A = área de ponta do cone;
s = trecho penetrado pela ponta N golpes (adotado 200 mm).

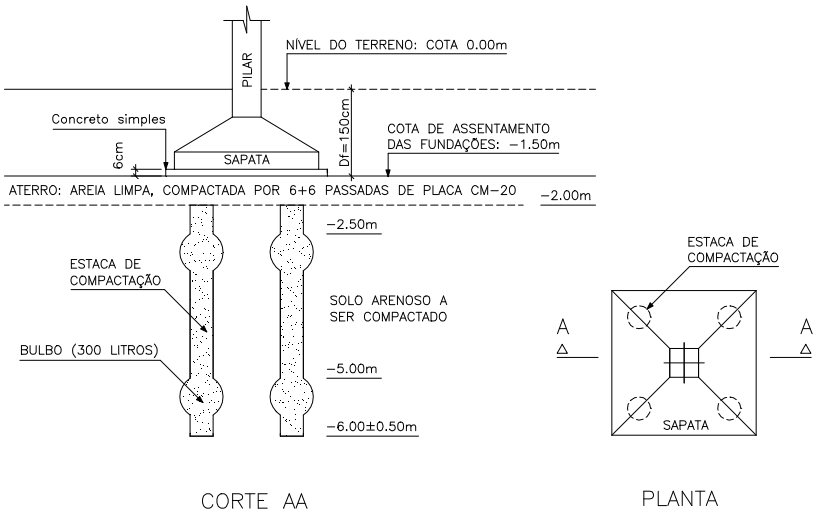

Figura 1 - Posição das estacas de compactação

Segundo Waschkowski (1983) a relação entre as resistências de ponta do penetrômetro dinâmico (q_d) e do cone (q_c) para areias fofas e pouco compactas seriam equivalentes, tal que:

$$\left(\frac{q_d}{q_c}\right) \cong 1 \tag{3}$$

De qualquer forma, embora não se tenha verificado a validade de tal correlação para as areias locais, existe alguma correlação entre os ensaios.

Os testes com penetrômetro foram feitos entre a superfície do terreno e a cota –7,0 m. Executava-se um grupo de estacas (etapa 1) e avaliava-se os resultados através dos ensaios com penetrômetros localizados nos trechos com menor concentração de estacas de densificação e nas bordas das futuras sapatas. Um ou outro ensaio também era executado na região de maior concentração de estacas. Sempre os ensaios eram feitos a meia distância entre estacas.

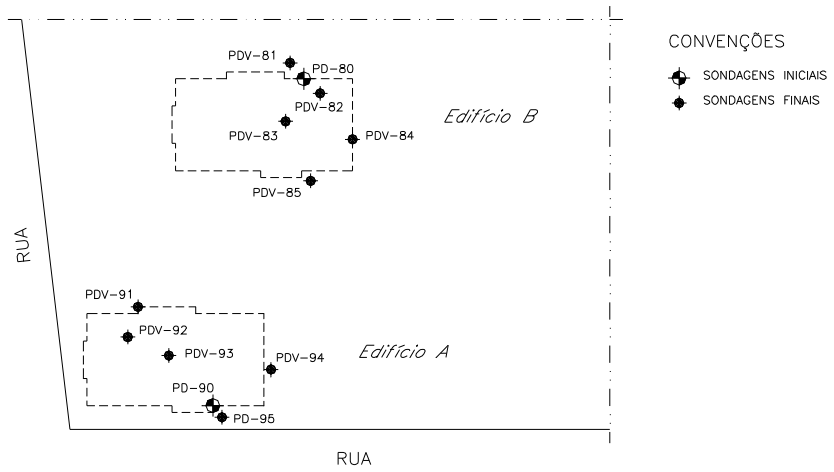

Figura 2 - Posição das sondagens iniciais (PD-80 e PD-90) e finais de controle (PDV)

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste trabalho as duas áreas destinadas a cada edifício, Edifício A (área 1) e Edifício B (área 2), são analisadas em separado. A Figura 3 mostra a variação de q_{di} com a profundidade, onde q_{di} é a resistência de ponta dos ensaios por penetrômetros, antes da densificação, para cada área.

As Figuras 4 e 5 mostram as comparações entre os resultados dos ensaios por penetrômetros antes (resistências iniciais, q_{di}) e após a densificação (resistências finais, q_{df}) por estacas tipo Franki na primeira etapa. Observa-se uma melhora geral do terreno arenoso (a partir de 1,5 a 2 m de profundidade) ao longo de toda a profundidade, mas somente a partir de 2,5 / 3,0 m de profundidade, o resultado médio obtido é significativo, com q_d finais girando em torno de 15 MPa. Tendo em vista que, após a escavação de 1,5 m para assentamento das sapatas, o uso de placas vibratórias seria suficiente para atingir-se a compacidade necessária nos primeiros metros da camada prescindiu-se da segunda etapa de estacas. Observa-se que os PDV-82 e PDV-92 localizados na região com maior concentração de estacas (região central) e com menores espaçamento entre as estacas (3,5 vezes o diâmetro das estacas) apresentaram melhores resultados.

A Figura 6 mostra a variação do fator K_m, que é a relação entre os resultados dos testes por penetrômetros após (q_{df}) e antes do processo de densificação (q_{di}) em função dos resultados dos penetrômetros iniciais (q_{di}), para os dados em estudo. Verifica-se que quanto menor o valor de q_{di} da camada arenosa a ser melhorada através desta técnica de densificação maior será o efeito da técnica (maiores valores do fator K_m). Bicalho et al. (2002) também observaram que nas regiões com maior concentração de estacas a técnica de melhoramento por estacas de compactação apresenta melhores resultados. Os resultados indicam que haverá redução de

futuros recalques diferenciais. Observa-se que na região com maior concentração de estacas (região central, PDV-82 e PDV-92) a técnica de melhoramento apresentou melhores resultados. Por outro lado observa-se ainda uma certa dispersão nos resultados obtidos. Tal dispersão poderá ser reduzida no futuro, com a consideração específica de fatores como, posição relativa às estacas, tempo entre as execuções das estacas e dos ensaios penetrométricos, espaçamento entre as estacas e compacidade relativa inicial dos solos, na medida em que esses fatores venham a ter suas influências quantificadas.

E, finalmente após escavação das fundações foi feita a densificação complementar de superfície do terreno através de placas vibratórias CM-20 da Dynapac (400 kg de massa). Os resultados também foram medidos por penetrômetros mas não são apresentados aqui por se tratar de uma outra técnica diferente da tratada neste trabalho. Os resultados foram de $q_d > 15$ MPa. A técnica de melhoramento utilizada permitiu o uso de fundações superficiais substituindo o uso de fundações profundas. A capacidade de carga adotada para o dimensionamento das sapatas foi de 250 kPa (2,5 kgf/cm^2), como previsto inicialmente.

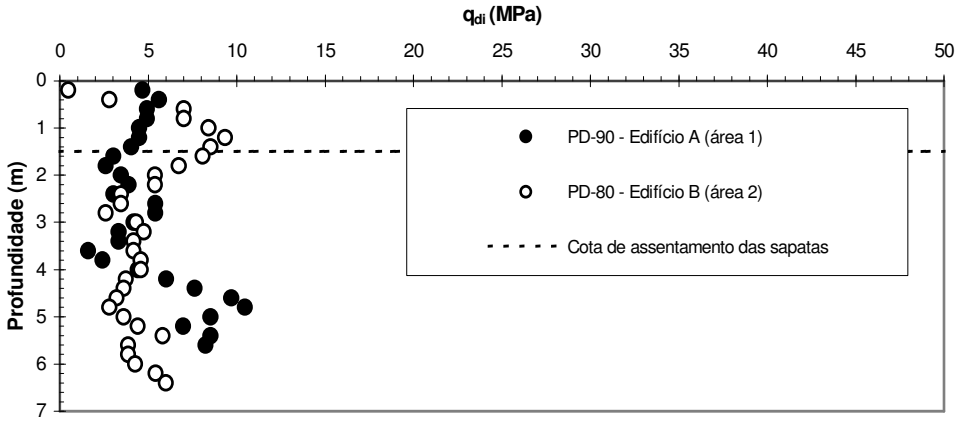

Figura 3 - Resultados médios iniciais de penetrômetros em duas áreas típicas

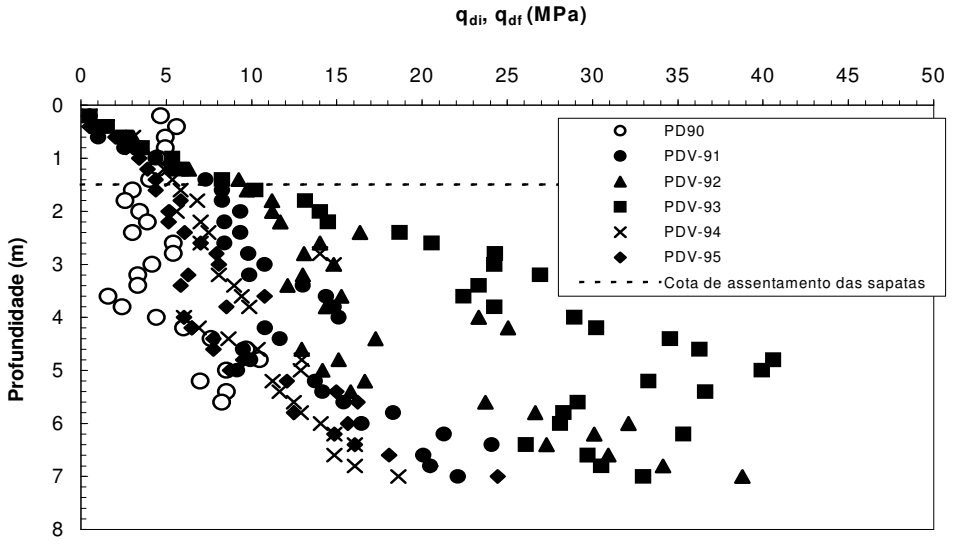

Figura 4 - Resultados dos Penetrômetros antes (q_{di}) e após densificação (q_{df}) – (área 1)

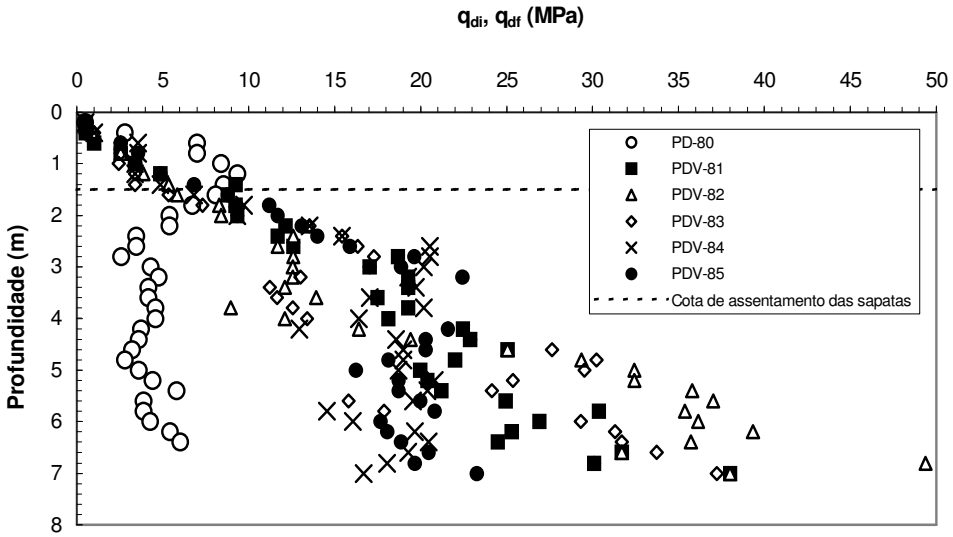

Figura 5 - Resultados dos penetrômetros antes (q_{di}) e após densificação (q_{df}) – (área 2)

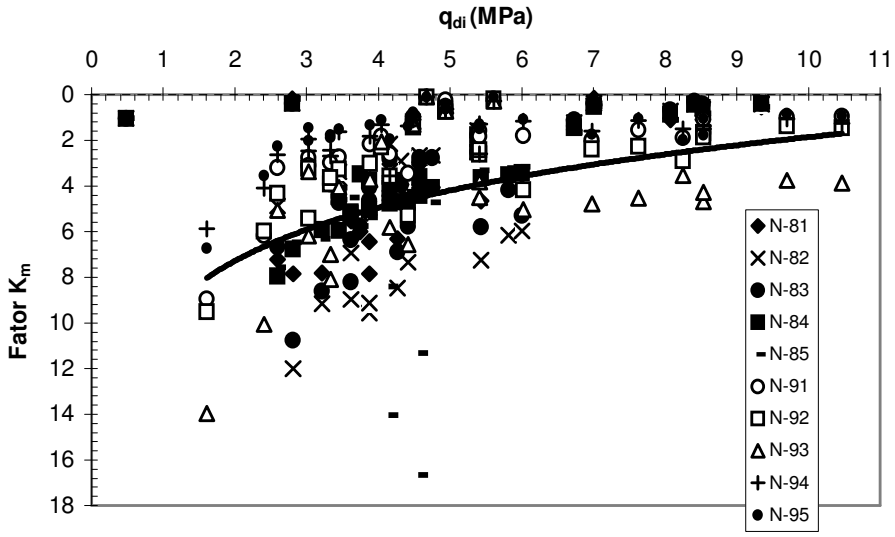

Figura 6 - Melhoria relativa do terreno - área 1 e área 2

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As seguintes conclusões foram obtidas no estudo de utilização da técnica de melhoramento de camadas arenosas através da densificação por estacas tipo Franki, usando-se areia e brita no lugar de concreto.

As estacas com diâmetro nominal igual a 400 mm, executadas com areia e brita, de profundidade igual a 5 m, com fuste alargado (bulbo) em alguns pontos, executadas segundo malhas retangulares com o espaçamento variando de 1,4 a 2,8 m (3,5 a 7 vezes o diâmetro das estacas), apresentaram resultados satisfatórios ao longo de toda profundidade analisada mas

foram mais eficientes a partir de 2,5/3,0 m (6 a 8 diâmetros das estacas) de profundidade (q_d > 15 MPa).

Nas regiões com maior concentração de estacas (região central) e menor espaçamento entre as estacas (3,5 vezes o diâmetro das estacas) a técnica de melhoramento apresentou melhores resultados. É recomendado fazer uma análise mais detalhada do efeito da concentração de estacas nesta técnica de melhoramento (raio de influência da estaca executada) e verificar a influência do espaçamento entre estacas nos resultados finais do processo de densificação.

Quanto menor a compacidade relativa da camada arenosa a ser melhorada através desta técnica de densificação maior será o efeito da técnica (maiores valores do fator K_m).

6. REFERÊNCIAS

[1] ALBIERO, J. H."Correlação entre Resistência de Cone (q_c) e Resistência à Penetração(SPT) para Solos Lateríticos", IX COBRAMSEF, Salvador, Bahia, v. 2, (1990) pp. 187-194.

[2] ALVES, A. M. L.; LOPES, F.R.; ARAGÃO, C.J. G. "Proposta de método de projeto de fundações superficiais em solos granulares melhorados por estacas de compactação", 4 SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, São Paulo, (2000) pp. 102-112.

[3] BASORE, C. E.; BOITANO, J. D."Sand Densification by Piles and Vibroflotation". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, v. 95 (1969) SM6, pp. 1303-1323.

[4] BARKSDALE, R.D.; TAKEFUMI, T. (1991). "Design, Construction and Testing of Sand Compaction Piles". DEEP FOUNDATION IMPROVEMENTS: DESIGN, CONSTRUCTION AND TESTING. ASTM STP 1089, Melvin I. Esrig and Robert C. Bachus, Eds., ASTM, Philadelphia (1991) pp. 4-17.

[5] BICALHO, K. V.; CASTELLO, R. R.; POLIDO, U. F. "Improvement of Loose Sand with Clayey Bands by Sand Columns". ASCE Geotechnical Special Publication 116, v. 2 (2002) pp. 1166-1173.

[6] BICALHO, K. V.; CASTELLO, R. R.; D'ANDREA, R. "The densification of loose sand using compaction piles". Fifth International Conference on Cases Histories in Geotechnical Engineering, New York, NY, USA (2004). (trabalho aceito).

[7] CASTELLO, R. R.; POLIDO, U. F. "Comunicação Pessoal". Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, (1994).

[8] CASTELLO, R. R.; POLIDO, U. F. "Capacidade de Carga de Estacas Cravadas em Areia - Correlações Baseadas em Pressão Efetiva". VIII COBRAMSEF, Olinda, Pernambuco (1982).

[9] ISSMFE "TECHNICAL COMMITTEE ON PENETRATION TESTING OF SOILS - TC 16, Report with Reference Test Procedures CPT-SPT-DP-WST". Information N. 7, Sewdish Geotechnical Intitute, (1989).

[10] MITCHELL, J. K. "In-place Treatment of Foundation Soils". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, v. 96 (1970) SM 1, pp. 73-110.

[11] NORDLUND, R. L. "Dynamic Formula for Pressure Injected Footings". Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, v. 108 (1982) n. 3, pp. 419-437.

[12] TOMLISON, M. J. "Pile Design and Construction Practice". Fourth edition, E & F N Spon, (1995).

[13] WASCHKOWSKI, E. "Le Pénétromètre Dynamique". Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n. 125 (1983) pp. 95-103.