

MELHORAMENTO DE SOLOS ARENOSOS FOFOS POR ESTACAS DE COMPACTAÇÃO

Improvement of loose sandy soils by compaction piles

Maria Luiza Moraes*

Kátia Vanessa Bicalho**

Reno Reine Castello***

RESUMO – Analisam-se os resultados da utilização de uma técnica de melhoramento de solo arenoso para viabilização de projetos de fundações de edifícios residenciais com vários andares, apoiadas sobre sapatas. A técnica de melhoramento foi compactação profunda por estacas de densificação cravadas pelo processo tipo Franki e compactação superficial por placa vibratória. Recuperam-se e analisam-se dados das condições do solo antes da melhoria, logo após a melhoria e após decorrer algumas semanas. Analisam-se os dados quanto a sua posição relativa às estacas, quanto à compacidade inicial do solo, quanto ao tempo e quanto à profundidade. As análises dos resultados obtidos comprovam a eficiência da técnica utilizada.

SYNOPSIS – 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, and shallow compaction by 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, time delay for results verification after compaction, and depth. The results analyses demonstrate the method efficiency.

PALAVRAS CHAVE – Melhoramento de solo arenoso fofos, estacas de compactação, estacas de areia e brita, densificação.

1 – INTRODUÇÃO

Técnicas de melhoramento de solos podem ser necessárias em depósitos de solos arenosos fofos para aumentar a capacidade de carga, reduzir recalques totais e diferenciais e evitar ocorrência de liquefação quando sujeitos a carregamentos dinâmicos. A existência de solos arenosos fofos conduz a soluções mais onerosas para as fundações, como estacas ou escavações profundas abaixo do nível de água, pois estes solos possuem grande potencial para o desenvolvimento de recalques elevados. Desta forma, solos arenosos fofos são geralmente descartados para suporte de fundações diretas. Uma outra característica destes depósitos é a heterogeneidade (existência de bolsões de areias mais compactas e menos compressíveis, distribuídos aleatoriamente) que pode gerar recalques diferenciais elevados.

Este fato tem grande influência econômica na região da Grande Vitória, no estado do Espírito Santo, Brasil, principalmente em locais próximos ao litoral, onde existem inúmeros depósitos superficiais de solos sedimentares arenosos com mesma origem geológica compostos por sedimentos

* Engenheira Civil, M.Sc., Solo Fundações & Geotecnia Ltda, Brasil. E-mail: ml_moraes@yahoo.com.br

** Professora Associada II, Ph. D., Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

E-mail: kvbicalho@gmail.com

*** Engenheiro Civil, Ph. D., Solo Fundações & Geotecnia Ltda, Brasil. E-mail: soloreno@terra.com.br

marinhos do Holoceno (período Quaternário), com camadas de areias superficiais geralmente heterogêneas, apresentando diferentes compacidades relativas devidas, provavelmente, às estratificações ocorridas durante as variações do nível relativo do mar (transgressões e regressões) ao longo dos anos (Castello e Polido, 1982; Polido e Castello, 1982; Souza *et al.*, 2005). Em muitos casos a execução de prédios residenciais de médio porte nessas regiões, urbanisticamente vantajosas, fica inviabilizada economicamente devido aos elevados custos de fundações profundas. Dependendo do tipo de fundação profunda analisada, a camada de apoio ou substrato rochoso pode estar em torno de 30 a 50 metros de profundidade (Castello e Polido, 1988).

Diversas técnicas têm sido propostas para aumento da resistência, redução da compressibilidade e do potencial de liquefação dos solos arenosos fofos (Mitchell, 1970). Dentre tais técnicas de melhoramento estão as estacas de compactação, formadas de uma mistura de areia e brita que, ao penetrar no solo, o desloca e vibra provocando sua densificação. No Brasil, o uso de estacas de compactação tem sido prática corrente em algumas capitais nordestinas (João Pessoa, São Luiz, Natal e principalmente Recife) para viabilização de fundações superficiais de edifícios de médio e grande porte, variando de 6 a 30 pavimentos (Alves *et al.*, 2000; Soares, 2002; Gusmão *et al.*, 2002). Também na região litorânea da Grande Vitória, ES, este processo vem sendo usado desde 1992 (Bicalho *et al.*, 2002; 2004; 2004a; 2005; Moraes, 2008).

Neste trabalho é feita uma análise dos resultados da melhoria da camada superficial (cerca de 5,5 metros de espessura) de um terreno arenoso (compacidade relativa variando de fofa a compacta) com intrusões argilosas através da densificação e mistura de camadas para viabilização de uso de fundações diretas para um edifício residencial com cerca de 10 andares, situado na cidade de Vila Velha, região da Grande Vitória, ES. O edifício foi construído entre 1992 e 1994. 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, utilizando-se mais brita, para permitir a expulsão do solo para fora do tubo). É apresentado o processo executivo, seu controle e a análise dos resultados obtidos para esta técnica de melhoria de solos arenosos fofos.

2 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O perfil típico do terreno da fundação, mostrando o número de golpes das sondagens de simples reconhecimento (*Standard Penetration Test*, SPT) com medida do índice de resistência à penetração dinâmica, N_{SPT} , é apresentado na Figura 1. De uma forma geral, a superfície do terreno natural está na cota 0,00m (cota do meio-fio da rua) e o nível de água freático (NA) situa-se na cota -1,00m. Em parte do terreno, existe um aterro argilo-arenoso com cerca de 1,00m de espessura e a seguir, até a cota -5,00m, ocorre uma camada natural de areia limpa, com uma região variando de pouco compacta a compacta (área 1) e outra região variando (de forma errática) de fofa a medianamente compacta (área 2). Na área 1, os valores de N_{SPT} variam entre 5 e 33 golpes e na área 2 estão entre 2 e 25 golpes (energia supostamente em torno de 75%, de acordo com a maioria das medições no Brasil). Aproximadamente entre as cotas -4,50 e -5,50m tem-se uma camada de areia argilosa, às vezes com material turfoso, com espessura máxima de 0,50m sob a qual encontra-se uma camada de areia concrecionada por cimentação ferruginosa que vai até a cota -8,00m. Entre as cotas -8,00m e -15,00m surgem camadas medianamente compressíveis, de argila marinha orgânica (com espessura entre 2,00 e 4,00m) e areias marinhas fofas, siltes argilosos médios e outros solos de consistências ou compacidades medianas. A seguir, ocorre nova camada de areia muito compacta (com aproximadamente 5,00m de espessura) assente sobre camadas de solos relativamente compressíveis e finalmente solos resistentes e pouco compressíveis (N_{SPT} variando de 13 a 40 golpes), onde findam as sondagens.

Uma solução de fundação que não requeria análises e/ou procedimentos mais sofisticados seria o de apoiar-se fundações profundas na camada de areia muito compacta que ocorre aproximadamente a partir da cota -15,0m. No entanto essa solução apresentou o inconveniente de custos e/ou a dificuldade de atravessar-se a camada de areia ferruginosa, sem causar vibrações prejudiciais aos vizinhos, com os equipamentos regionalmente disponíveis na época. Apoiar as fundações superficialmente através de sapatas promoveria a redução de recalques profundos a valores aceitáveis, mas a camada de areia de apoio originalmente era de compactidade variável apresentando capacidade de carga muito heterogênea, inviabilizando o uso de sapatas. Existia ainda a camada de areia argilosa, às vezes turfosa, subjacente a camada superficial de areia. A solução adotada para tentar-se a melhoria da camada de areia superficial (inclusive a laminação de areia argilosa/turfosa) foi através de densificação e mistura pela cravação de estacas tipo Franki com diâmetro de 400mm 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. O terreno seria assim densificado e promover-se-ia a difusão da areia argilosa no restante da massa de solo. Como não se esperava que tal tipo de compactação fosse eficiente para as partes mais superficiais (cerca de 1 metro) do terreno, como realmente não foi, programou-se a complementação de compactação superficial por placas vibratórias.

3 – PROCESSO EXECUTIVO

Foram executadas estacas de areia e brita de densificação pelo processo Franki a partir do nível original do terreno (cota 0,0m) até a cota -5,0m (Tomlison, 1995). As estacas foram executadas com auxílio de um tubo de revestimento (400mm de diâmetro), abrangendo todo o comprimento da estaca. O tubo foi cravado, verticalmente, com auxílio de um pilão de 20 kN caindo de 6m de altura sobre uma bucha de brita que tamponava a extremidade inferior do tubo. As estacas foram moldadas *in-loco* e constituídas de mistura de areia limpa local e brita nº 2 (injetada por apiloamento), de “base” alargada a cada metro de extração do tubo de diâmetro de 400mm. A base alargada é formada através do apiloamento da mistura mantendo o tubo fixo. Anotam-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). Em cada bulbo devia-se injetar um volume de areia que redundasse em carga admissível da estaca de 700kN. A fórmula foi rearranjada para fornecer o número de golpes, N, necessário para expulsar a última caçamba de areia, ou seja:

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

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 (20 kN);

K_s – constante empírica do solo (areia fina a média, $K_s = 14$);

V_t – volume total de solo adicionado na base (m^3).

No entanto a especificação teve que ser relaxada em alguns casos pois a densificação atingida já era tanta que não se conseguia expulsar a bucha a cada metro. Nestes casos executavam-se bulbos a cada 2 metros aproximadamente (3 bulbos no mínimo).

A formulação teórica para a estimativa do espaçamento entre as estacas de compactação é baseada nos índices de vazios inicial (e_0) e final (e_f) da areia que se quer densificar (Mitchell, 1981;

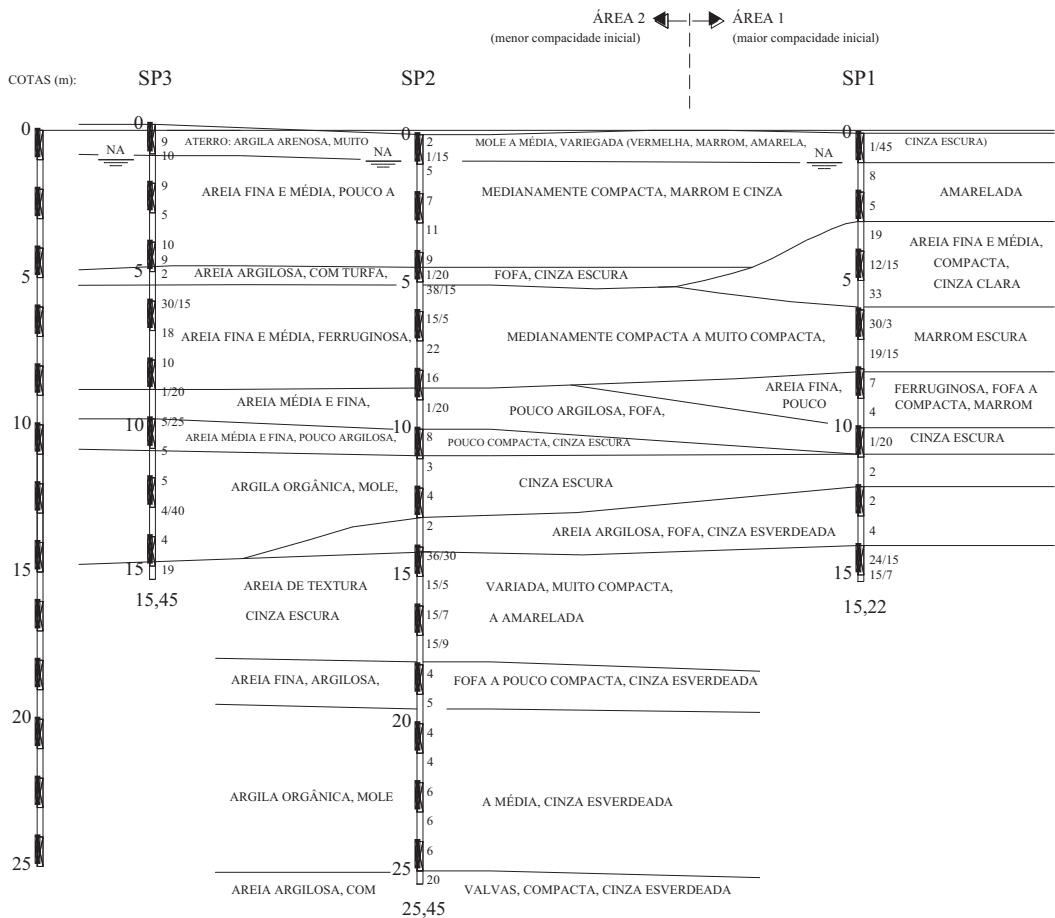


Fig. 1 – Perfil típico do terreno.

Barksdale e Takefumi, 1991; Bowles, 1996), onde o índice de vazios inicial é medido diretamente ou através de correlações e o índice de vazios final seria um valor imposto no projeto, por exemplo, para se obter uma dada compactidade relativa. A formulação teórica sugerida para estimativa do espaçamento entre as estacas numa malha quadrada é dada pela Equação 2 e para uma distribuição triangular, a mesma deverá ser multiplicada por 1,08 (Equação 3).

$$s = \frac{D}{2} \times \sqrt{\pi \times \frac{1 + e_0}{e_0 - e_f}} \quad (2)$$

$$s = 1,08 \times \left(\frac{D}{2} \times \sqrt{\pi \times \frac{1 + e_0}{e_0 - e_f}} \right) \quad (3)$$

sendo, s o espaçamento entre estacas, e_0 o índice de vazios inicial da areia (antes da compactação), e_f o índice de vazios final da areia (após a compactação) e D o diâmetro da estaca. Nestas equações considera-se que a areia é densificada somente devido ao deslocamento lateral, sendo este proporcional ao volume de material injetado na estaca. Como é negligenciado o efeito das vibrações

durante a execução da estaca, tal equação é conservativa, e assim torna-se imprescindível verificar o melhoramento usando ensaios de campo. Os ensaios com penetrômetros foram feitos entre as cotas -1,3m (cota prevista para apoio das sapatas) e a cota -5,5m (topo da areia concrecionada ferruginosa). Executava-se um grupo de estacas (1ª etapa) e avaliavam-se os resultados através dos ensaios com penetrômetros segundo a disposição prevista para a segunda etapa de estaqueamento. Estes ensaios foram feitos de 1 a 40 dias após a realização do estaqueamento.

A especificação 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. A Figura 2 mostra esquematicamente a posição das estacas em relação à área da sapata com espaçamento (S) entre as estacas da 1ª etapa e as locações de possíveis estacas intermediárias (2ª etapa). A avaliação final dos resultados da compactação através das estacas de areia e brita foi feita comparando-se os resultados das sondagens de controle de qualidade realizadas antes e após a compactação. Executava-se um grupo de estacas (1ª etapa) e avaliavam-se os resultados através das sondagens de controle em posições intermediárias entre as estacas conforme recomendações encontradas na literatura (Basore e Boitano, 1969; Mitchell, 1981) e segundo a disposição prevista para a eventual 2ª etapa de estaqueamento (Figura 2). Eventualmente, se necessário, proceder-se-ia a uma segunda etapa de estaqueamento executando-se estacas intermediárias. As estacas da 1ª etapa foram executadas segundo uma malha triangular com o espaçamento variando de 2 a 3,2m (5 a 8 vezes o diâmetro das estacas).

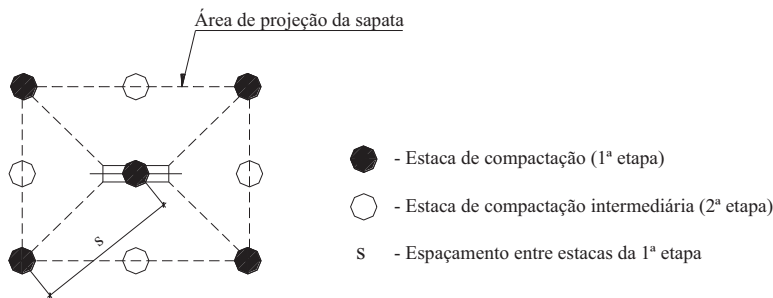


Fig. 2 – Posição das estacas de compactação da 1ª e 2ª etapa.

As sondagens de controle de qualidade foram feitas com penetrômetros dinâmicos contínuos segundo as normas preconizadas pela “Referência Internacional para Procedimentos de Ensaio para Sondagem Dinâmica” (ISSMFE, 1989). O penetrômetro dinâmico contínuo (PD) ou *Dynamic Penetrometer (DP)*, com suas variações, tem sido utilizado há muito tempo em diversos países (Sanglerat, 1972). 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 (Figura 3). O resultado a se obter nessas sondagens é a resistência dinâmica de ponta, q_d , em trechos de 10 a 30 cm:

$$q_d = \left(\frac{P \cdot H \cdot N}{A \cdot s} \right) \times \left(\frac{P}{P + P'} \right) \quad (4)$$

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 20cm).

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

$$\frac{q_d}{q_c} \cong 1 \tag{5}$$

Várias são as correlações empíricas entre os ensaios SPT (N_{SPT}) e CPT (resistência de ponta, q_c) e, tipicamente, as correlações apresentadas na literatura (Danziger e Velloso, 1986; Albiero, 1990; Politano *et al.*, 2001) têm a forma:

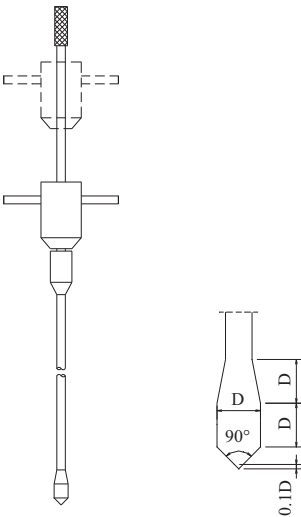
$$K = \frac{q_c}{N_{SPT}} \tag{6}$$

Soares (2002) analisou a correlação entre q_c e N_{SPT} antes e após a densificação de terrenos arenosos por estacas de compactação e concluiu que não há influência significativa da compactação no valor de K. Os valores obtidos, para q_c em MPa, foram $K = 0,50$ (terreno natural) e $K = 0,60$ e $0,65$ (terreno compactado). O Quadro 1 apresenta um resumo com valores de K para a correlação q_c/N_{SPT} para areias da Grande Vitória, ES, Brasil. As areias em estudo têm propriedades índices bem similares apresentando-se como areias finas a médias, quartzosas, geralmente limpas (menos de 5% passando na peneira n.º 200).

Quadro 1 – Correlações empíricas de q_c/N_{SPT} para areias de Vitória, ES, Brasil.

q_c/N_{SPT} médio	Descrição do solo	Energia do SPT	Referência
0,70 e 1,00	Areia fina a média	72%	Castello e Polido (1994)
0,50 (0,25 a 1,00)	Areia fina a média e areia média a fina 0,30mm<D ₅₀ <0,70mm	75%	Cordeiro (2004)
0,40 (0,20 a 0,80)		60%	

Nota: q_c em MPa, D_{50} é o diâmetro abaixo do qual se situam 50% em peso das partículas.



D = diâmetro (variações de 35,7 a 51mm)

Fig. 3 – Penetrômetro dinâmico leve, 10 kg e ponteira cônica (Castello *et al.*, 2001).

Moraes (2008) investigou a correlação entre os valores da resistência de ponta (q_d) do ensaio de penetração dinâmica contínua (PD) e o número de golpes (N_{SPT}) do ensaio SPT para areias da região da Grande Vitória, ES, Brasil. Foram feitas análises parciais separadas por áreas de acordo com suas características geotécnicas (áreas 1 e 2 da obra discutida neste trabalho) ou pela proximidade das sondagens e análises globais para todo o terreno nos três casos estudados, obtendo-se correlações ligeiramente melhores. Isto confirma que o tamanho da amostra estatística suplanta outras considerações. Os resultados mostraram uma correlação linear entre N_{SPT} e q_d que depende da altura de queda livre do martelo de cravação utilizado no ensaio PD. Para o ensaio SPT foi adotada energia teórica de 75%. A correlação analisada foi do tipo $q_d = k_d N_{SPT}$ (sendo q_d em MPa) e para todas as análises obteve-se:

Para queda de 0,45m e peso de 64 kg: $q_d = (0,43 \pm 0,03) N_{SPT}$

Para queda de 0,40m e peso de 65 kg: $q_d = (0,43 \pm 0,10) N_{SPT}$

Para queda de 0,75m e peso de 65 kg: $q_d = (0,58 \pm 0,02) N_{SPT}$

As correlações entre q_d e N_{SPT} obtidas por Moraes (2008) são semelhantes às publicadas na literatura (Danziger e Velloso, 1986; Politano *et al.* 2001; Castello e Polido, 1994; Cordeiro, 2004) para o cone estático (CPT). Isto confirma a conclusão de Waschowski (1983) de que os ensaios de cone estático e dinâmico são equivalentes. Observa-se na literatura internacional, para os mais variados tipos de solos, que mesmo para o CPT (que é considerado um ensaio de referência) pode-se obter grandes dispersões nos resultados, em virtude da heterogeneidade inerente a todos os solos.

4 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A camada superficial de areia a ser densificada apresentava uma região com compactidade relativa variando de fofa a muito compacta (área 1) e outra região com compactidade relativa variando de fofa a medianamente compacta (área 2) conforme apresentado na Figura 1. Neste trabalho essas duas áreas são analisadas em separado. A Figura 4 mostra a variação de q_{di} com a profundidade, onde q_{di} é a resistência de ponta dos ensaios por penetrômetros antes da densificação.

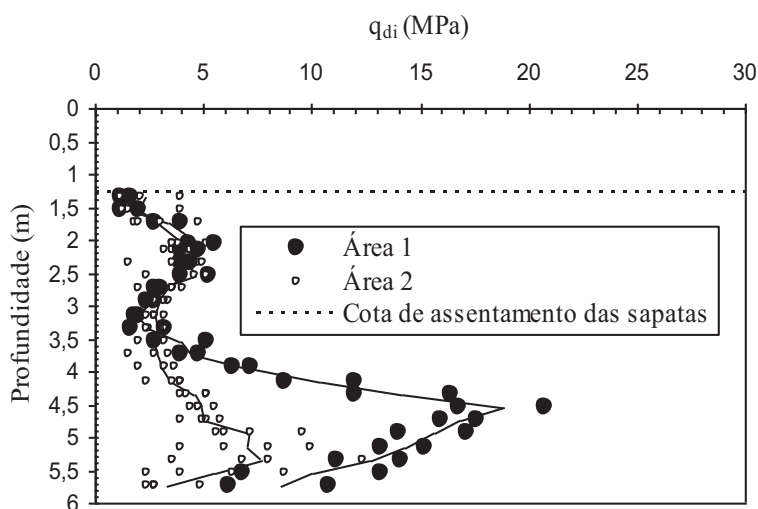


Fig. 4 – Resultados médios iniciais de penetrômetros em duas áreas típicas.

As Figuras 5 e 6 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 Franki na primeira etapa. Os melhores resultados, unidos por uma linha, foram obtidos de sondagens realizadas com maior defasagem de tempo da densificação.

Observa-se uma melhora geral do terreno ao longo de toda a profundidade. Mas somente a partir de 2,5/3,0m 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 para apoio 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 ainda que a camada de areia com argila-turfosa, que ocorria entre as cotas -5m e -5,5m, não foi mais detectada após o melhoramento do terreno.

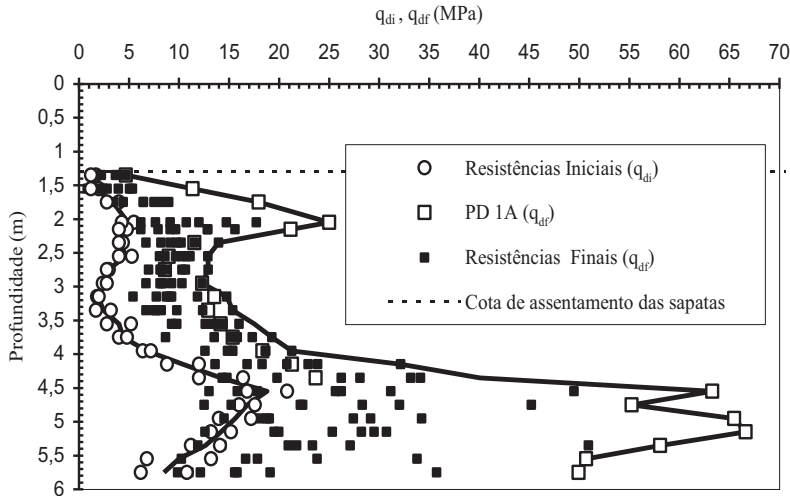


Fig. 5 – Resultados dos penetrômetros antes (q_{di}) e após densificação (q_{df}) - Área 1.

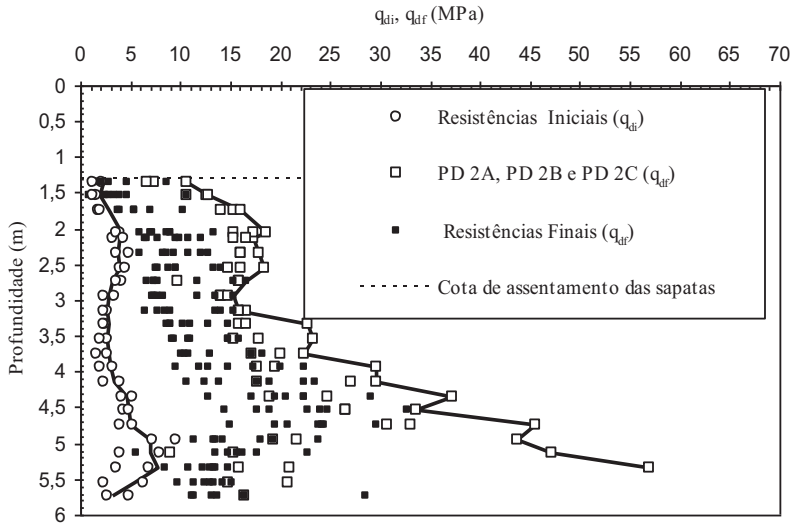


Fig. 6 – Resultados dos penetrômetros antes (q_{di}) e após densificação (q_{df}) - Área 2.

As Figuras 7 e 8 mostram a variação do fator K_m , que é a relação entre os resultados dos ensaios por penetrômetros após (q_{df}) e antes do processo de densificação (q_{di}) em função dos resultados dos penetrômetros iniciais (q_{di}), para as áreas 1 e 2 respectivamente. Verifica-se que 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). Os resultados tendem a reduzir futuros recalques diferenciais. A área 1 é a região de periferia, com menor e mais uniforme concentração de estacas do que a área 2, que é a região central da obra. Observa-se que na região com maior concentração de estacas (região central) a técnica de melhoramento apresentou melhores resultados.

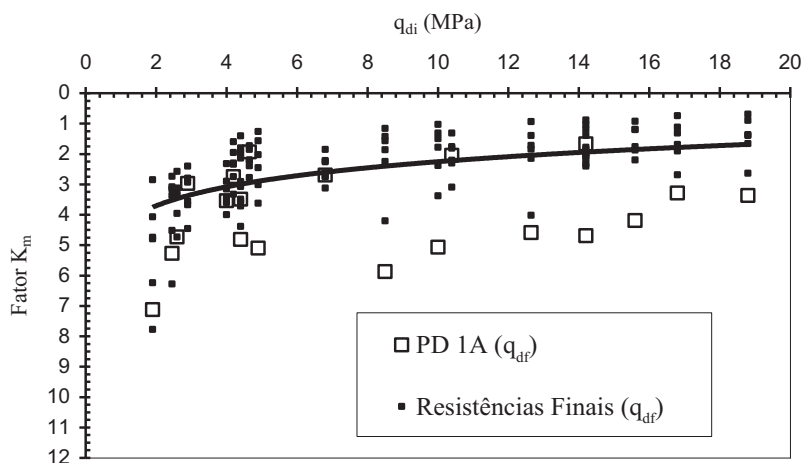


Fig. 7 – Melhoria relativa do terreno - Área 1.

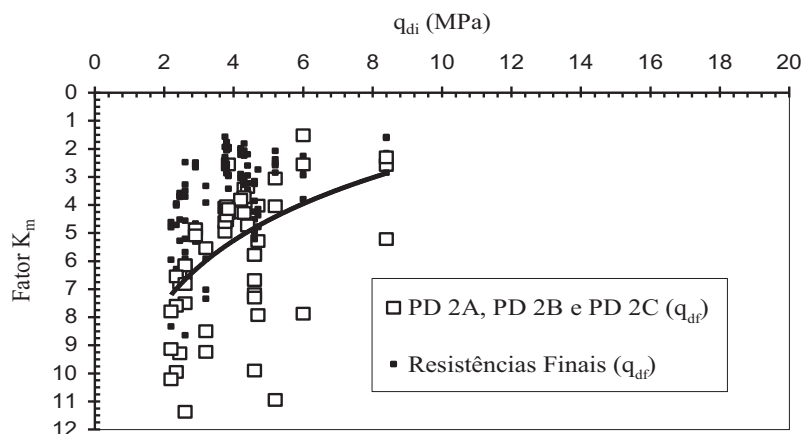


Fig. 8 – Melhoria relativa do terreno - Área 2.

E, finalmente, após escavação das fundações, foi feita a densificação complementar de superfície do terreno através de placas vibratórias tipo CM-20 da Dynapac (400 kg de massa). Os resultados também foram medidos por penetrômetros mas não são apresentados aqui por ser 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 ao invés de fundações profundas. A capacidade de carga adotada para o dimensionamento das sapatas foi de 295 kPa (3,0 kgf/cm²).

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

As diferentes melhorias apresentadas nas Figuras 5, 6, 7 e 8 podem ser atribuídas às seguintes causas:

- a) Os pontos com maior concentração de estacas apresentaram melhores resultados. Verifica-se nas Figuras 6 e 8 que os penetômetros PD 2A, PD 2B e PD 2C, que foram realizados em pontos com maior concentração de estacas Franki (região central), apresentaram melhores resultados que os outros ensaios.
- b) A defasagem entre o período de execução do estaqueamento e o período de execução de sondagens de verificação da densificação é importante (Mitchell e Solymar, 1984; Schmertmann, 1987). Segundo Mitchell e Solymar (1984) sondagens mais defasadas da execução de melhoria de terrenos apresentam maiores resistências. Este fato é evidenciado nas Figuras 5 e 7 onde o ensaio por penetômetro PD 1A apresentou melhores resultados (maiores valores de q_d nos trechos compactados) que os outros ensaios. O ensaio PD 1A foi realizado cerca de 40 dias após a execução das estacas. O efeito do envelhecimento (“aging”) nas areias tem sido estudado por muitos pesquisadores (Mitchell, 1981; Schmertmann, 1987, 1991; Mesri *et al.*, 1990; Baxter e Mitchell, 2004). O tempo para esse “envelhecimento” pode variar de alguns dias a centenas de anos e as explicações para o fenômeno ainda não são conclusivas e, conforme notado por Schmertmann (1991), o fenômeno às vezes ocorre e outras vezes não. O grande número de hipóteses sobre o fenômeno (compressão secundária, cimentação, movimento de partículas dispersas, tensões internas e outras considerações) mostra que o mecanismo ainda não é completamente entendido. No entanto, é razoável concluir que avaliações imediatas após o término da compactação podem fornecer resultados conservativos, subestimando-se o ganho de resistência do solo (Mitchell, 1981; Castello, 1998).
- c) Em locais onde o solo (areia muito compacta com alguma cimentação) se mostrou muito resistente foi impedida a expulsão da bucha e/ou abertura de base (bulbo) das estacas de densificação na profundidade prevista de tal forma que algumas estacas não apresentaram base alargada a cada metro conforme previsto no projeto. Entretanto neste trabalho não foi possível verificar a influência do número de bulbos por estacas nos resultados finais (valores de q_d após o melhoramento da camada arenosa), já que a maioria das estacas realizadas na área 1 apresentou 4 bulbos e a maioria das estacas realizadas na área 2 possuem 3 bulbos.
- d) A técnica de melhoria do terreno aumenta sua eficiência com a profundidade. No caso, esta eficiência alcançou o máximo e estabilizou-se a partir de cerca de 2,5/3,0 m de profundidade (cerca de 6 a 8 vezes o diâmetro da estaca). Atribui-se isto ao fato de que o terreno superficial, sem confinamento, se rompe ao invés de ser comprimido. Este fenômeno já foi analisado por Castello e Polido (1982).
- e) A técnica de densificação também foi eficiente para laminações argilosas e a camada argilosa de até 0,5m de espessura, fazendo-a praticamente “desaparecer”. Supõe-se que essa camada, em ruptura hidráulica, se tenha misturado com a camada de areia e também sofrido melhoria. A técnica de adensamento dinâmico já foi usada antes com sucesso com o mesmo objetivo (Lo *et al.*, 1990).

6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

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

As estacas com diâmetro nominal igual a 400mm, executadas com areia e brita, de profundidade igual a 5m, com base alargada a cada metro, executadas segundo malhas triangulares com o espaçamento variando de 2 a 3,2m (5 a 8 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).

Na região com maior concentração de estacas (região central) 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 número de bulbos (bases alargadas) por 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). Os resultados tendem a reduzir futuros recalques diferenciais.

Os ensaios por penetrômetros mais defasados da data de execução das estacas apresentaram melhores resultados. Houve um aumento da resistência da areia densificada ao longo do tempo. O efeito desta técnica de melhoramento ao longo do tempo merece ser melhor pesquisado, pois quanto mais retardada for a verificação dos efeitos da compactação melhores serão os resultados.

7 – AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao CNPq (Projeto Produtividade em Pesquisa) pelo apoio financeiro recebido.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albiero, J. H. (1990). *Correlação entre resistência de cone (q_c) e resistência à penetração (SPT) para solos lateríticos*. IX COBRAMSEF, Salvador, Bahia, vol. 2, pp. 187-194.
- Alves, A. M. L.; Lopes, F.R.; Aragão, C. J. G. (2000). *Proposta de método de projeto de fundações superficiais em solos granulares melhorados por estacas de compactação*. 4º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, pp. 102-112.
- Basore, C. E.; Boitano, J. D. (1969). *Sand densification by piles and vibroflotation*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 95, SM6, pp. 1303-1323.
- 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, pp. 4-17.
- Baxter, C. D. P.; Mitchell, J. K. (2004). *Experimental study on the aging of sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 130, pp. 1051-1062.
- Bicalho, K. V.; Castello, R. R.; Polido, U. F. (2002). *Improvement of loose sand with clayey bands by sand columns*. ASCE Geotechnical Special Publication 116, vol. 2, pp. 1166-1173.
- Bicalho, K. V.; Castello, R. R.; D'Andrea, R. (2004). *The densification of loose sand using compaction piles*. Proceedings of Fifth International Conference on Cases Histories in Geotechnical Engineering, New York, NY, USA.
- Bicalho, K. V.; Castello, R. R.; Moraes, M. L. (2004a). *Contribuição ao estudo de melhoramento de solos arenosos fofos por estacas de compactação*. 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro, Portugal, vol. III, Casos de Obra, pp. 177-184.

- Bicalho, K. V.; Castello, R.R.; Moraes, M. L. (2005). *Loose sandy soil densification by compaction piles*. Proceedings of 6th International Conference on Ground Improvement Techniques, Coimbra, Portugal, pp. 169-176.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design*. 5th ed. USA: McGraw Hill Companies.
- Castello, R. R.; Polido, U. F. (1982). *Capacidade de carga de estacas cravadas em areia - correlações baseadas em pressão efetiva*. VIII COBRAMSEF, Olinda, Pernambuco.
- Castello, R. R.; Polido, U. F. (1988). *Tentativa de sistematização geotécnica dos solos quaternários de Vitória, ES*. Depósitos quaternários das baixadas litorâneas brasileiras: origem, características geotécnicas e experiências de obras. Rio de Janeiro, RJ: ABMS, vol. 2, pp. 3.1-3.23.
- Castello, R. R.; Polido, U. F. (1994). *Comunicação Pessoal*. Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo.
- Castello, R. R. (1998). *Geotécnica*. Vitória, ES: Centro Tecnológico-UFES.
- Castello, R. R.; Polido, U. F.; Bicalho, K. V.; Ribeiro, R. C. H. (2001). *Recalques observados de sapatos em solos terciários de São Paulo*. Solos e Rochas, vol. 24, n° 2, pp. 143-153.
- Cordeiro, D. D. (2004). *Obtenção de parâmetros geotécnicos de areias por meio de ensaios de campo e de laboratório*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 198 pp.
- Danziger, B. R.; Velloso, D. A. (1986). *Correlações entre SPT e os resultados dos ensaios de penetração contínua*. VIII COBRAMSEF - 8º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Porto Alegre, RS., pp. 103-113.
- Gusmão A. D.; Pacheco J. L.; Gusmão Filho, J. de A. (2002). *Caracterização tecnológica de estacas de compactação para fins de melhoramento de terrenos*. XII COBRAMSEG - 12º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Geotecnia, São Paulo, SP.
- ISSMFE (1989). Technical Committee on Penetration Testing of Soils - TC 16, "Report with reference test procedures CPT-SPT-DP-WST". Information No. 7, Swedish Geotechnical Institute.
- Lo, K. W.; Ooi, P. L.; Lee, S. (1990). *Dynamic replacement and mixing of organic soils with sand charges*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v. 116, no. 10, pp. 1463-1482.
- Mesri, G.; Feng, T. W.; Benak, J. M. (1990). *Post densification penetration resistance of clean sands*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 116, no. 7, pp. 1095-1115.
- Mitchell, J. K. (1970). *In-place treatment of foundation soils*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 96, SM 1, pp. 73-110.
- Mitchell, J. K. (1981). *Soil improvement: state-of-the-art report*. X International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Stockholm, vol. 4, pp. 509-565.
- Mitchell, J. K.; Solymar, Z. V. (1984). *Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 110, n. 11, pp. 1559-1576.
- Moraes, M. L. (2008). *Estacas de compactação para melhoramento de solos arenosos fofos e uso de penetrômetro dinâmico pesado na avaliação dos resultados*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 224 p.

- Nordlund, R. L. (1982). *Dynamic formula for pressure injected footings*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 108, n. 3, pp. 419-437.
- Polido, U. F; Castello, R. R. (1982). *Densificação de areia com rolo vibratório para fundação direta*. VII COBRAMSEF - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Fundações, Olinda, Recife, PE.
- Politano, C. F., Danziger, F. A. B.; Danziger, B. R. (2001). *Correlações entre resultados de CPT e SPT em solos residuais*. Solos e Rochas. São Paulo, vol. 24, n.1, pp. 55-71.
- Soares, W. C. (2002). *Estacas de compactação para melhoria de solo*. Dissertação de mestrado. UFSC, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo.
- Souza, C. R. G., Suguio, K., Oliveira, A. M. S.; Oliveira, P. E. de (2005). *Quaternário do Brasil*. Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. São Paulo, SP: ed. Holos, pp. 102-104.
- Tomlison, M. J. (1995). *Pile design and construction practice*. Fourth edition, E & F N Spon.
- Sanglerat, G. (1972). *The penetrometer and soil exploration*. 2nd ed., Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v. 1.
- Schmertmann, J. H. (1987). *Discussão sobre "Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand"* por Mitchell e Solymar. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 113, n.2, pp. 171-176.
- Schmertmann, J. H. (1991). *The mechanical aging of soils*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 117, n. 9, pp. 1288-1331.
- Waschkowski, E. (1983). *Le Pénétromètre Dynamique*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n. 125, pp. 95-103.