



## Estudo da compactação do solo por meio de ensaios geotécnicos e de métodos geofísicos

Carlos T. C. Nascimento (\*), Paula G. O. Passos, Márcio M. Farias, Renato P. Cunha, Augusto C. B. Pires  
Universidade de Brasília, Brazil

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

The main objective of this work is to investigate the effect of sand-gravel compaction piles on the behavior of loose sand deposits. Reduced model tests were carried out on an artificial sand deposit filling a trench 1.5 m wide, 3.0 m long and 2.5 m deep, excavated in a clay rich soil. In situ geotechnical tests and DC electrical resistivity measurements were carried out before and after the construction of compaction piles, in order to characterize the changes in the sand deposit. Conductivity anomalies were observed in the position of the compaction piles with better performance. These anomalies are caused by the introduction of the sand-gravel compaction piles and possibly more related to the mineralogical composition of these piles than compaction itself.

### Introdução

Existem vários processos para melhoramento de solos, cujo objetivo é viabilizar técnica e economicamente a construção de uma obra. Dentre estes estão aqueles que promovem um aumento da densidade do solo por meio da sua compactação, e em particular a compactação pela cravação de estacas.

O aumento da densidade do solo devido à cravação de estacas pode ser obtido com o uso de estacas de madeira; estacas granulares de areia e/ou brita compactadas; e estacas de areia, brita e cimento compactadas. Porém o efeito da compactação e a extensão da densificação ainda não são claros.

As estacas, que consistem de materiais granulares compactados em forma de cilindros, têm sido bastante utilizadas em várias cidades do Nordeste como uma técnica de melhoramento de solos arenosos, visando o aumento da capacidade de carga e redução dos recalques de fundações superficiais. Esta técnica tem possibilitado o aumento da tensão admissível do solo em até cinco vezes, segundo Gusmão Filho & Gusmão (1994).

A melhor maneira de se obter subsídios para modelos e teorias que tentam explicar o comportamento de um determinado tipo de fundação é através da observação do desempenho dos constituintes da fundação. Esta

observação geralmente é feita através de ensaios de campo e/ou laboratório.

Neste contexto, pretende-se analisar, em um modelo reduzido das condições de campo, o comportamento de solos arenosos melhorados com estacas de areia e brita. Ensaios de campo e de laboratório, além de métodos geofísicos superficiais, foram utilizados na caracterização do solo antes e após o melhoramento.

### Método

O princípio de funcionamento das estacas granulares consiste na substituição parcial do solo natural, pela introdução, em pontos localizados, de volumes de materiais granulares, geralmente sob a forma de cilindros irregulares e muito semelhantes às estacas clássicas, reduzindo os recalques e aumentando a capacidade de carga do solo tratado.

No caso específico de terrenos arenosos, o aumento de capacidade do material devido à compactação com estacas de areia e brita, promove uma melhoria nas propriedades de resistência do solo, conferindo à camada melhorada uma grande rigidez, assegurando melhor estabilidade à fundação, e evitando recalques que possam causar danos à obra.

Robinsky & Morrison (1964), *apud* Pacheco (2002), analisaram, por meio de técnicas radiográficas, o deslocamento e a compactação ao redor de estacas-modelo em uma caixa contendo areia. Segundo os autores, o raio de influência ao redor das estacas é de 3,5 a 4,5 diâmetros em solo fofo e de 5 a 6 diâmetros em solo medianamente compacto. Ainda segundo os autores, a zona compactada abaixo da ponta de prova é de 2,5 a 4,5 diâmetros em solo fofo e de 3 a 4,5 diâmetros em solo medianamente compacto.

Outra pesquisa relacionada a melhoramento de solos arenosos com estacas de compactação foi desenvolvida na cidade de Recife, Pernambuco. Nesta pesquisa, Passos (2001) e Passos *et al.* (2002) realizaram provas de carga sobre placas, em um terreno melhorado com estacas de areia, brita e cimento. Os resultados das provas de carga permitiram uma análise da rigidez do solo, bem como do mecanismo de transferência de carga de uma fundação assente no solo melhorado.

O processo executivo das estacas de areia e brita na região nordeste do Brasil consiste na cravação dinâmica de um tubo metálico, com a extremidade inferior fechada com bucha seca, até uma dada profundidade no terreno. Em seguida, prende-se o tubo, expulsa-se a bucha e introduz-se areia e brita no tubo. A compactação é feita através da queda livre de um martelo. À medida que o material vai sendo compactado, o tubo vai sendo erguido

até a superfície do terreno, conforme mostrado na figura 1.

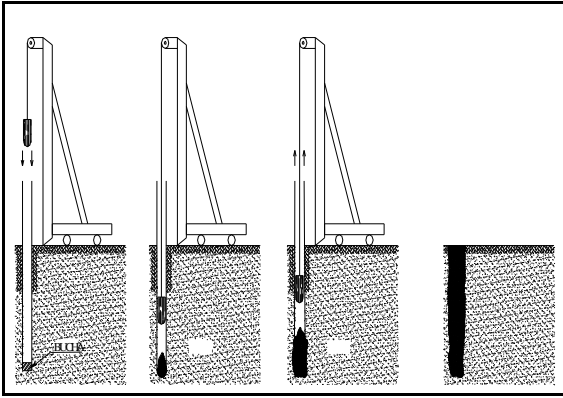


Figura 1 – Processo executivo das estacas de compactação (Gusmão Filho, 1995).

O material geralmente utilizado para a confecção das estacas é uma mistura de areia e brita, sendo o traço usual 3 (areia) e 1 (brita) em volume. O equipamento básico utilizado para melhoramento em pequenas profundidades (até 5 m) consta de um tripé com um martelo de 15 kN de peso (cerca de 1500 kg), caindo de uma altura de cerca de 3 m. O diâmetro usual do tubo é de 30 cm. As estacas são executadas segundo uma malha quadrada ou triangular, com espaçamento de 2 a 3 vezes o diâmetro das mesmas.

O aumento na densidade do solo é basicamente resultante do deslocamento de material do terreno igual ao volume da estaca; da introdução de material adicional compactado no terreno, e da vibração devido ao processo executivo.

Como o objetivo principal deste trabalho é o de estudar o comportamento de solos arenosos melhorados com estacas de areia e brita, fez-se necessário a construção de um depósito de areia fofa, de pequenas dimensões. Este depósito foi construído no *Campus* da Universidade de Brasília, Distrito Federal, numa área de latossolo vermelho, com textura argilosa.

Inicialmente, escavou-se uma vala de 1,5 m x 3,0 m x 2,5 m de profundidade (fig. 2). Posteriormente esta vala foi cheia com areia constituída essencialmente por grãos de quartzo com granulação entre 0,1 e 1 mm de diâmetro. Durante o processo de enchimento procurou-se fazer a deposição da areia na forma de camadas horizontais, de modo a se obter uma estrutura interna homogênea para o depósito de areia (fig. 3).

O melhoramento do material arenoso foi feito de forma semelhante àquela empregada no nordeste brasileiro, porém com dimensões reduzidas. Um tubo metálico de 10 cm de diâmetro, de ponta fechada com bucha seca, foi cravado até a profundidade de 2 metros, com o auxílio do tripé utilizado em ensaios de SPT (*Standard Penetration Test*). Após a expulsão da bucha, introduziu-se areia e brita calcária no tubo e fez-se sua compactação. O traço utilizado na confecção das estacas foi de 3 (areia média) : 1 (brita 0), em volume. Para a bucha, utilizou-se traço 1 (cimento) : 2 (areia média) : 3

(brita 0) em volume, acrescentando-se 3 % em volume de água, e obtendo-se assim um "concreto seco". Ao todo foram construídas nove estacas. Tanto a cravação do tubo quanto a compactação da mistura foram feitas por meio da queda livre de um martelo de 0,5 kN (cerca de 50 kg), caindo de uma altura de 0,5 m (fig. 4).



Figura 2 - Abertura da vala.



Figura 3 - Deposição das camadas de areia.



Figura 4 - Construção das estacas.

Com o intuito de estimar parâmetros do depósito arenoso antes e após a cravação das estacas, realizaram-se vários ensaios de campo. Antes do melhoramento fez-se uma sondagem com o *Dynamic Probing Light* - DPL (Passos *et al.* 2004), uma com o *Standard Penetration Test* - SPT (ABNT, 1980), uma com o *Cone Penetration*

Test - CPT (Campanella & Robertson, 1981; Massarch & Fellenius, 2002), uma com o ensaio dilatométrico - DMT (Marchetti *et al.* 2001) e uma prova de carga sobre placa.

No decorrer dos trabalhos julgou-se necessário dispor de uma ferramenta que possibilitasse obter imagens do interior da caixa de areia antes e depois da introdução das estacas. Com este intuito foram realizados levantamentos geofísicos no local da caixa e que consistiram na obtenção de medidas de resistividade elétrica com corrente contínua, empregando-se o arranjo de eletrodos gradiente. Estes levantamentos foram realizados antes e após a compactação com as estacas.

No método elétrico de corrente contínua efetuam-se medidas da resistividade elétrica da subsuperfície, uma propriedade que se relaciona com a maior ou menor dificuldade do meio de transmitir corrente elétrica. O processo de medição consiste, inicialmente, da cravação de quatro eletrodos na superfície do terreno. Em seguida, empregando-se dois eletrodos, aplica-se um potencial elétrico ao solo, e deste modo faz-se circular uma corrente elétrica contínua na subsuperfície. Finalmente, usando-se o segundo par de eletrodos, mede-se o potencial elétrico que se estabelece no solo durante a passagem da corrente. Conhecendo-se a corrente que está circulando, o potencial que se estabeleceu no solo, e a geometria da distribuição dos eletrodos, é possível calcular a resistividade elétrica na subsuperfície (Telford *et al.* 1985).

Os principais fatores que condicionam os valores de resistividade em solos e rochas são o volume e a composição da água subsuperficial. Quanto maior o volume de água e quanto maior o volume de material em solução na água, menor a resistividade elétrica. A presença de argilominerais também tende a diminuir a resistividade do meio devido à sua capacidade de adsorção de íons metálicos, e pelo fato de que uma textura mais fina diminui a condutividade hidráulica e favorece a retenção de água (Telford *et al.* 1985).

O equipamento utilizado foi um resistivímetro modelo Geopulse, fabricado por Campus Geophysical Instruments, Inglaterra. Trata-se de um equipamento relativamente moderno, portátil e leve (cerca de 6 kg), que possui conexões independentes para os eletrodos de potencial e de corrente, o que o habilita a trabalhar com qualquer arranjo de 4 eletrodos. Este equipamento é alimentado por bateria de 12V, tem potência de 18 W e possibilita trabalhar com valores de corrente entre 1 e 100 mA.

O arranjo gradiente caracteriza-se por empregar 4 eletrodos, dois de corrente (A e B) e dois de potencial (M e N), conforme ilustrado na figura 5. Os alinhamentos definidos pelos dipolos de corrente e de potencial são paralelos, mas não necessariamente colineares. A distância entre A e B situa-se entre 25 e 50 vezes a distância entre M e N. Uma vez instalada a linha AB, movimenta-se exclusivamente o dipolo MN, dentro da área de abrangência das linhas de corrente. Tendo como referência a linha AB, considera-se que a área de abrangência corresponda a um retângulo cujas dimensões podem ser vistas na figura 6.

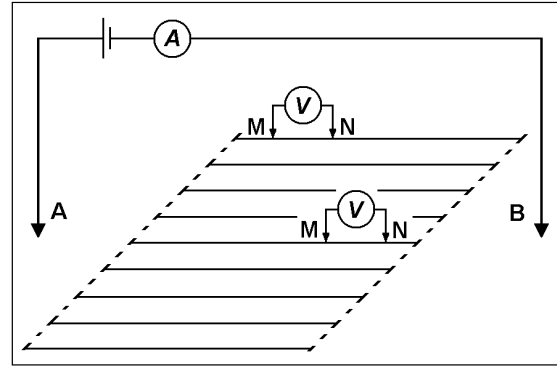


Figura 5 - Arranjo gradiente (Schulz, 1985).

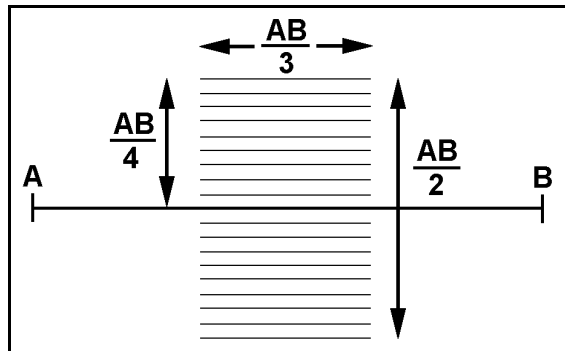


Figura 6 - Linhas de deslocamento do dipolo MN em relação à linha AB (Orellana, 1972).

Os valores de resistividade elétrica aparente ( $\rho_a$ ) são calculados a partir da corrente ( $I$ ) que circula entre A e B, do potencial (ddp) medido entre M e N e de um fator de geometria ( $K$ ) para o arranjo, que inclui a distância MN e as distâncias do centro deste dipolo até os eletrodos A e B (fig. 7). Recentemente, Gallas *et al.* (2001) empregaram o arranjo gradiente na delimitação de área sujeita a desmoronamento na cidade de São Paulo.

$$\rho_a = K \cdot \frac{ddp}{I}$$

$$K = \frac{2 \cdot \pi}{MN} \cdot \left( \frac{\cos \alpha}{(OA)^2} + \frac{\cos \beta}{(OB)^2} \right)^{-1}$$

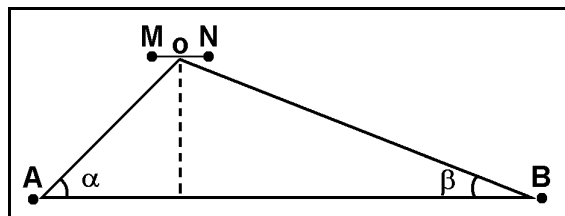


Figura 7 - Elementos usados no cálculo do fator de geometria do arranjo gradiente (Orellana, 1972).

No caso em estudo, no presente artigo, foram utilizadas 21 linhas paralelas, com 2,5 m de comprimento e espaçadas de 0,25 metros. Nos extremos destas linhas situavam-se os eletrodos de corrente (A e B). O



espaçamento entre os eletrodos M e N foi de 0,25 m. As linhas foram dispostas sobre a caixa e nas áreas adjacentes (fig. 8 e fig. 9). Ao todo, em cada levantamento, obtiveram-se 168 medidas de resistividade elétrica regularmente dispostas na área da caixa de areia.

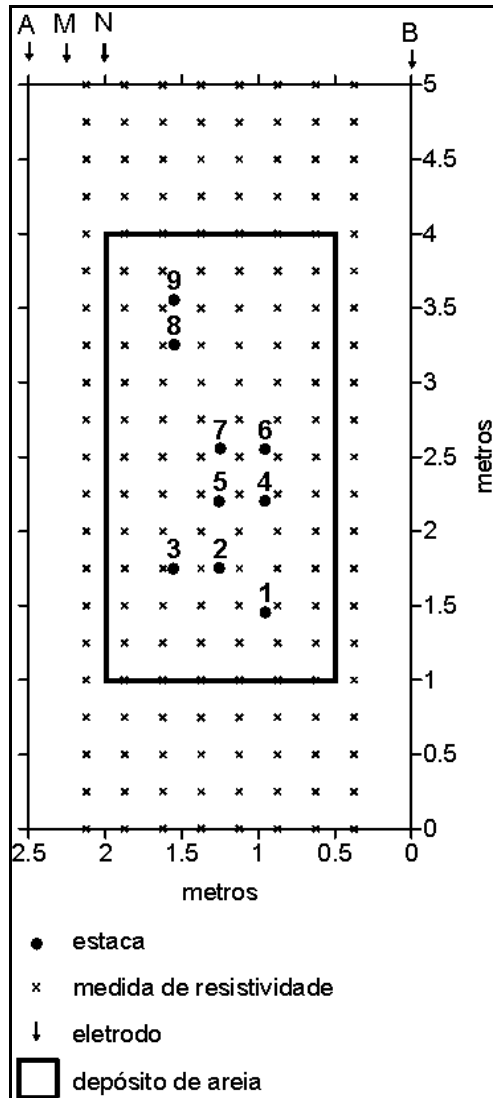


Figura 8 – Local das medidas de resistividade elétrica.



Figura 9 - Aquisição das medidas de resistividade.

## Resultados

De acordo com os ensaios realizados com o DPL, antes e após a confecção das estacas, observou-se um raio de influência após a compactação equivalente a três diâmetros da estaca e um melhoramento uniforme ao longo desta, exceto para as camadas mais superficiais não confinadas. Este fato está de acordo com a prática usual e simulações numéricas efetuadas em outros trabalhos (Farias *et al.* 2003). Resultados de ensaios realizados entre duas estacas mostraram que não há superposição de efeitos, para o espaçamento adotado.

Já os resultados obtidos do DMT mostraram que o melhoramento ocorre de maneira mais acentuada na direção horizontal quando comparado com os resultados de DPL, que mede basicamente a resistência na direção vertical (Passos *et al.* 2004).

As leituras de resistividade elétrica, obtidas antes e após a instalação das estacas, foram interpoladas por triangulação linear com o programa SURFER 8.0, gerando as figuras 10 e 11.

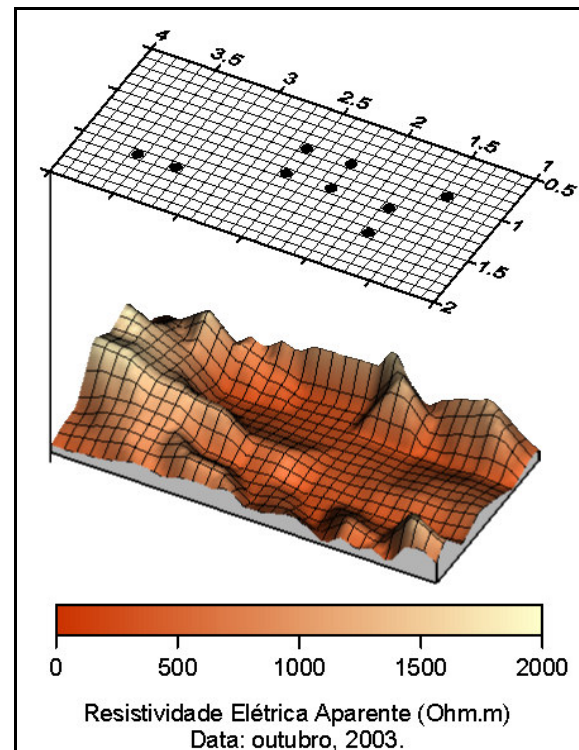


Figura 10 - Valores de resistividade antes da instalação das estacas.

Na figura 10, gerada antes da instalação das estacas, observam-se valores de resistividade aparente entre 0 e 2000 Ohm.m. Os maiores valores de resistividade são observados nas bordas da caixa e na região onde posteriormente seriam colocadas as estacas 8 e 9, conforme a numeração mostrada na figura 8. Os menores valores são observados na parte interna da caixa, no local onde seriam instaladas as estacas numeradas de 1 até 7.

As linhas de amostragem foram posicionadas ortogonalmente aos lados maiores da caixa de areia.

Deste modo, as leituras próximas a estas bordas correspondem à condição onde um eletrodo de potencial situa-se no solo argiloso, fora da caixa e o outro eletrodo de potencial situa-se na areia do interior da caixa. Acredita-se que a transição abrupta do solo argiloso para o meio arenoso seja a responsável por estes valores mais elevados de resistividade que ocorrem posicionados junto aos lados maiores da caixa. Outro aspecto que parece confirmar esta conclusão é o fato de que não se observam valores mais elevados de resistividade próximos aos lados menores da caixa.

Com relação ao interior do depósito de areia, observam-se dois conjuntos bem definidos de dados. Valores superiores a 1500 Ohm.m, na região onde seriam instaladas as estacas 8 e 9 e leituras inferiores a este valor no restante da caixa.

Uma possibilidade para explicar esta distribuição de valores é a de que as leituras obtidas representem o comportamento do fundo da caixa e não do seu interior. Na literatura relativa aos métodos elétricos de corrente contínua é comum que se encontrem expressões para a determinação da profundidade de uma dada leitura em função do espaçamento entre eletrodos. Contudo, tratam-se exclusivamente de estimativas, daí a necessidade da execução de procedimentos de inversão para a construção de modelos geoeletricos da subsuperfície. No caso em estudo, dado que existe um forte contraste de resistividade entre a areia no interior do depósito e o solo argiloso no entorno da caixa, é possível que a maior parte das linhas de corrente esteja circulando pelas interfaces correspondentes às paredes laterais e ao fundo da caixa.

Nascimento *et al.* (2003) avaliaram a variação sazonal da resistividade em latossolos do Distrito Federal concluindo que a influência da variação no conteúdo de umidade do solo é maior em solos arenosos do que em solos argilosos e relacionaram este fato com o aspecto textural. Solos argilosos têm poros de pequenas dimensões implicando numa maior retenção de água. Deste modo, independente da estação climática, os solos argilosos tendem a ter maior quantidade de água do que os arenosos.

Observando-se a figura 11, verifica-se que o contraste de resistividade que havia entre as bordas maiores da caixa e o seu interior deixa de existir. Considerando que esta aquisição de dados foi realizada numa época de seca, 10 meses após a obtenção do primeiro conjunto de leituras, é de se esperar uma redução no contraste de resistividade entre a areia contida no depósito e o solo argiloso do entorno.

Outro aspecto que pode ser observado no interior da caixa é o surgimento de anomalias próximas às estacas de areia e brita. Nota-se que a maioria das estacas situa-se em regiões de baixa resistividade, fato que é particularmente evidente para as estacas 2, 3 e 5. As estacas 4 e 7 parecem fugir a este padrão, associando-se a valores mais elevados de resistividade.

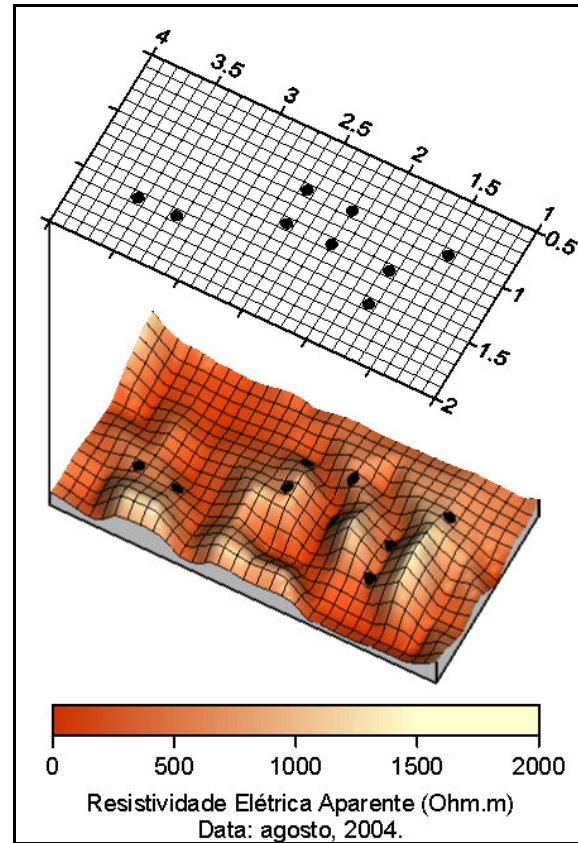


Figura 11 - Valores de resistividade após a instalação das estacas.

Todas as estacas têm cerca de 2 metros de profundidade exceto a de número 4, que tem apenas 1 metro, isto em função de dificuldades técnicas enfrentadas durante sua construção. As estacas 1 e 7 também apresentaram problemas durante a execução, e deste modo não funcionaram tão bem como as demais estacas no que diz respeito à densificação da areia. As estacas 8 e 9 ficaram isoladas das demais estacas, não havendo, desta forma uma interação destas com as demais. Considerando os resultados obtidos nos ensaios geotécnicos, concluiu-se que as estacas que melhor cumpriram sua função foram as de número 2, 3, 5 e 6.

Não se conhecem trabalhos relacionando diretamente resistividade aparente com densidade do meio, mas considerando o comportamento observado no entorno da maioria das estacas, e principalmente daquelas que melhor desempenharam sua função, deduz-se que a introdução da mistura de areia e brita tende a causar uma redução da resistividade.

As estacas têm cerca de 25% de brita calcária na sua constituição, e supõe-se que a redução da resistividade pode estar relacionada com a sua composição mineralógica. Contudo, esta é apenas uma hipótese, não sendo possível descartar a possibilidade da redução da resistividade estar relacionada ao processo de densificação.

## Conclusões

As medições de resistividade aparente possibilitaram a visualização da alteração no interior de depósito de areia, antes e após a instalação das estacas. Observaram-se anomalias condutivas associadas às estacas que tiveram um melhor desempenho como elementos de densificação da areia. É possível que as anomalias observadas tenham sido causadas pela introdução das estacas, e este fato provavelmente deve-se mais à sua composição do que a densificação promovida. Sugere-se o desenvolvimento de um experimento similar, onde a influência de outros fatores relacionados com as condições de contorno e com as variações no conteúdo de água possa ser controlada, de modo a testar a aplicabilidade de medidas de resistividade aparente como ferramentas de avaliação da compactação do solo.

## Referências

- ABNT.** 1980. Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos; NBR-6484. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 12p.
- Campanella, R. G. e Robertson, P. K.** 1981. Applied Cone Research; Cone Penetration Testing and Experience. Proceedings of the ASCE National Convention, St. Louis, 1:343-360.
- Farias, M. M., Nakai, T., Hinokio, M., Shahin, H.M., Pedroso, D. M.** 2003. Prediction of the Densification Process of Compacted Sand Piles using Sub-loading  $t_{ij}$  Model. Proceedings of the International Workshop on Prediction and Simulation Methods in Geomechanics, Atenas, 185-188.
- Gallas, J. D. F., Taioli, F., Malagutti Filho, W., Prado, R. L., Dourado, J. C.** 2001. Métodos e técnicas geoeletricas rasas na delimitação de área afetada por ruptura em teto de túnel urbano. Revista Brasileira de Geofísica, 19:33-46.
- Gusmão Filho, J. A.** 1995. Contribuição à Prática de Fundações: A Experiência do Recife. Tese para Concurso de Professor Titular, Recife, Universidade Federal de Pernambuco.
- Gusmão Filho, J. A. e Gusmão, A. D.** 1994. Estudo de casos de fundação em terrenos melhorados. X COBRAMSEG, Foz de Iguaçu, 1:191-198.
- Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., Calabrese, M.** 2001. The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations; a report by the ISSMGE Committee TC16. Proceedings of the International conference on in situ measurement of soil properties, Bali, 41p.
- Massarch, K. R. e Fellenius, B. H.** 2002. Vibratory compaction of coarse-grained soils. Canadian Geotechnical Journal, 39:695-709.
- Nascimento, C. T. C., Pires, A. C. B., Moraes, R. A. V.** 2003. Variação sazonal da resistividade em latossolos: Congresso da SBGF, Rio de Janeiro. In CD-ROM.
- Orellana, E.** 1972. Prospección Geoelectrica en Corriente Continua. Madrid, Paraninfo.523p.
- Pacheco, J. L.** 2002. Estudo de Técnicas de Melhoramento de Terrenos Superficiais Arenosos no Recife. Dissertação de Mestrado, Recife, Universidade Federal de Pernambuco.
- Passos, P. G. O.** 2001. Contribuição ao Estudo do Melhoramento de Depósitos Arenosos Através da Utilização de Ensaio de Placa. Dissertação de Mestrado, Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba.
- Passos, P. G. O., Bezerra, R. L., Gusmão, A. D., Cavalcante, E. H.** 2002. Avaliação da resistência e deformabilidade de solos melhorados com estacas de areia e brita. XII COBRAMSEG, São Paulo, 3:1679-1689.
- Passos, P. G. O., Farias, M. M., Cunha, R. P.** 2004. Use of DMT and DPL Tests to Evaluate Ground Improvement in Sand Deposits. Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Porto, 2:1709-1716.
- Robinsky, E. I. e Morrison, C. F.** 1964. Sand displacement and compaction around model friction piles in sand. Canadian Geotechnical Journal, 1(2):81-93.
- Schulz, R.** 1985. Interpretation and depth of investigation of gradient measurements in direct current geoelectrics. Geophysical Prospecting, 33:1240-1253.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., Keys, D. A.** 1985. Applied Geophysics. Cambridge, Cambridge University Press, 860p.

## Agradecimentos

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, financiador desta pesquisa. Ao pessoal envolvido direta e indiretamente na montagem do experimento. Ao geólogo Gustavo Mello, pelo auxílio durante os levantamentos geofísicos.