

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/269

Análise de Provas de Carga Horizontal em Grupos de Estacas Tipo Hélice Contínua Executadas em Solo Arenoso

Cavalcanti Jr, D. A.

Professor. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil, demostenes-jr@academico.ufs.br

Guimarães, L. J. N.

Professor. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, leonardo@ufpe.br

Gusmão, A. D.

Professor. UPE - Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, gusmao.alex@poli.br

RESUMO: Estacas tipo hélice contínua (estaca isolada, grupo com duas estacas em linha e grupo com três estacas em linha com topo livre), executadas em solo com perfil arenoso do Campo Experimental do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, foram submetidas a ciclos de carregamento horizontal no topo. As estacas foram instrumentadas ao longo da profundidade através de inclinômetro. A carga aplicada em cada estaca foi medida através de hastes instrumentadas utilizadas para conectar as estacas de cada grupo. Os resultados apresentados neste artigo enfatizam a sensibilidade do comportamento ao nível de deslocamento, a eficiência de grupo e a variação da rigidez do sistema estaca-solo-estaca a cada ciclo de carregamento.

PALAVRAS-CHAVE: Carregamento horizontal, grupos de estacas, eficiência de grupo.

ABSTRACT: Three groups of continuous flight auger piles with a free top (single pile, group with two piles in single line and group with three piles in single line), built in sandy soil in the Experimental Site of the Civil Engineering Department of the Federal University of Sergipe, were subjected to horizontal loading cycles at the top with increasing load. The piles were instrumented along the depth using an inclinometer. The load applied to each pile was measured through instrumented bars used to connect the piles of each group. The results emphasize the behaviour sensitivity to the displacement level, the group efficiency and the stiffness variation of the pile-soil-pile system at each loading cycle.

KEYWORDS: Horizontal loading, pile groups, group efficiency.

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de estacas isoladas e grupos de estacas sujeitos a cargas horizontais é um problema frequentemente encontrado em fundações de pontes, edifícios altos, cais de atracação e estruturas offshore. Modelos não lineares que utilizam curvas p_y , geralmente adotados na prática de projeto atual, dependem de abordagens empíricas dependentes de resultados experimentais que não podem ser generalizadas. A aplicação de soluções numéricas baseadas em análises tridimensionais por elementos finitos tem se tornado mais comum nos últimos anos em face do desenvolvimento de softwares que permitem a análise da interação estaca-solo-estaca em três dimensões, porém, essa abordagem também carece de uma base de dados mais significativa que permita a calibração dos modelos e aumente o grau de confiabilidade das soluções produzidas por essa via. O objetivo deste trabalho é contribuir para uma maior compreensão do comportamento de grupos de estacas carregadas horizontalmente no topo, através da apresentação de resultados de ensaios em escala real de grupos de estacas submetidos a ciclos de carga e descarga.

2 CAMPO EXPERIMENTAL DEC-UFS

Para execução dos ensaios de carregamento horizontal apresentado nesse trabalho, foi disponibilizada pela Universidade Federal de Sergipe (UFS) uma área de 2.000 m² localizada nas proximidades da Prefeitura da Cidade Universitária Professor José Aloísio de Campos, situada no Bairro, Rosa Elze, município de São Cristóvão, estado de Sergipe. Com vistas à caracterização do terreno do campo experimental, foram realizados ensaios de campo e laboratório, cujos resultados são apresentados a seguir..

2.1 Caracterização Geológica

De acordo com o Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado de Sergipe (CODISE/CPRM, 2014), a Cidade Universitária Professor José Aloísio de Campos está implantada no Terraço Marinho Pleistocênico (Q1tm) localizado entre a planície fluvial da margem direita do rio Poxim e a unidade de relevo semi-colinosa da Formação Barreiras (Grupo Barreiras), sendo topograficamente ressaltado em relação à planície fluvial e topograficamente deprimido em relação as colinas da Formação Barreiras, ocupando níveis altimétricos em torno de oito metros acima do nível do mar. São formados por areias de granulometria bem selecionada depositadas pelo mar no período Pleistoceno da Era Cenozóica ou Quaternária, em posição horizontal, que se distinguem dos Terraços Marinheiros Holocênicos porque estão mais recuados em relação ao mar, decorrente da sua formação em época anterior, em função das transgressões e regressões do nível do mar que ocorreram no Quaternário (FARIAS, 2011).

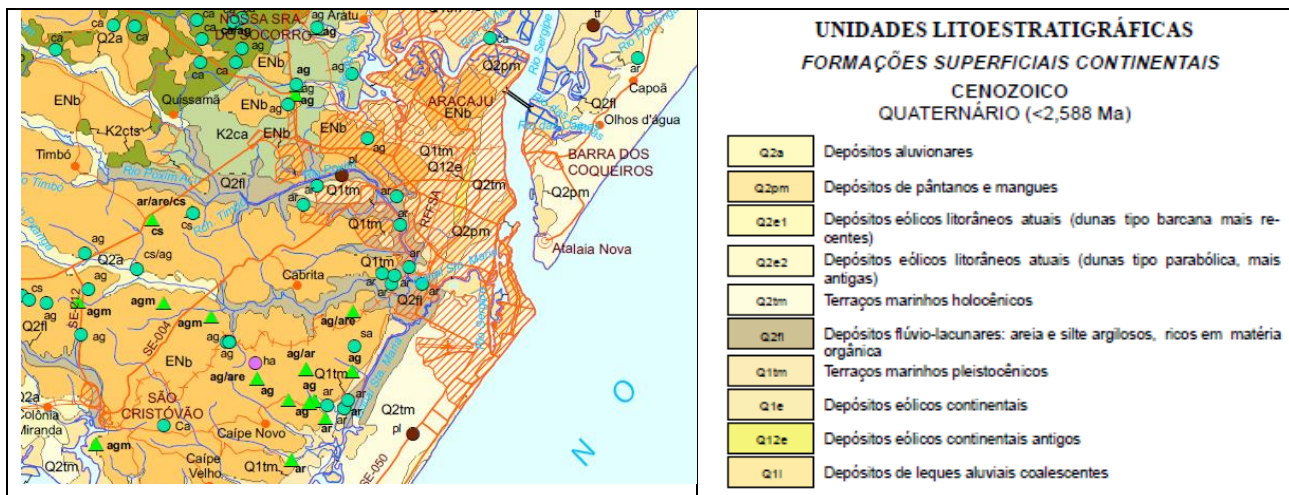


Figura 1. Recorte do Mapa Geológico de Sergipe englobando a área em estudo. Fonte: Mapa Geológico do Estado de Sergipe (CODISE/CPRM, 2014).

2.2 Caracterização Geotécnica

O perfil do solo do Campo Experimental do DEC-UFS é composto basicamente de uma camada superficial de areia fina de compactação fofa, com espessura variando entre 2,6 m e 3,9 m, seguida por uma camada de areia fina muito compacta até a profundidade de 15,45 m onde foi paralisada a sondagem a percussão. O nível de água foi encontrado em torno da profundidade de 2,20 m abaixo da superfície. Para caracterização do terreno do campo experimental foram executados ensaios de sondagem a percussão com medida de torque (SPT-T), ensaios de penetração estática com medidas de poro-pressão (CPTU), ensaios de determinação de densidade “in situ”, ensaios de análise granulométrica, ensaios de resistência ao cisalhamento direto e provas de carga em placa. Na Figura 2 é apresentada a locação das estacas e dos ensaios executados na área do Campo Experimental DEC-UFS.

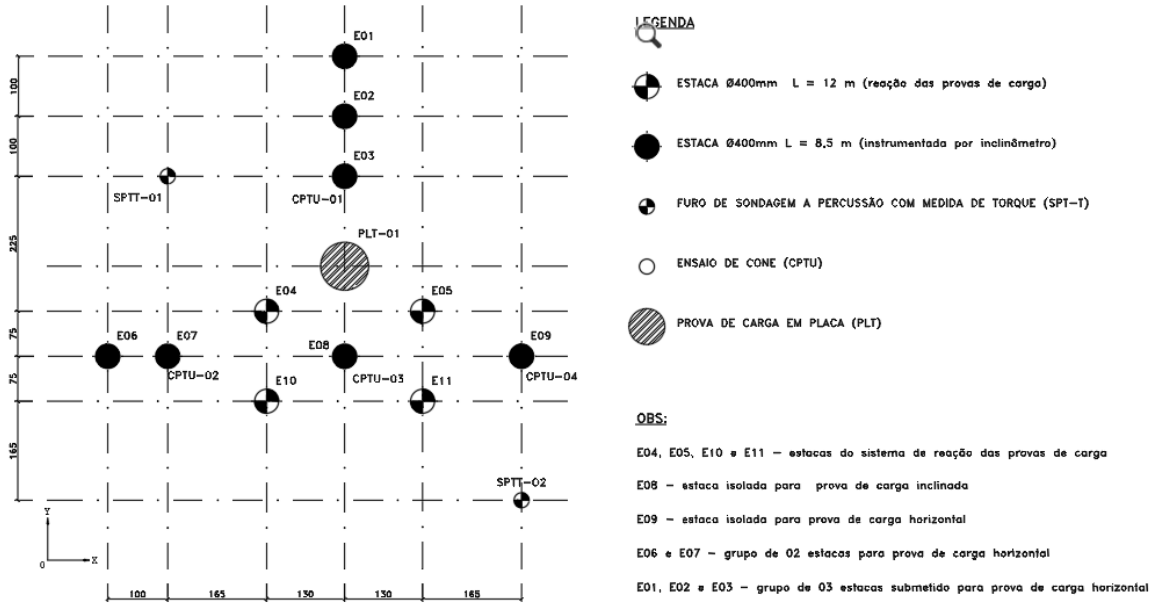


Figura 2. Planta de localização das estacas e ensaios.

2.2.1 Sondagens tipo SPT-T

De acordo com os ensaios de sondagem a percussão com medida de torque (SPT-T) executados nas proximidades das estacas ensaiadas (ver Figura 2 acima), verifica-se que o terreno é composto por areia fina, observando-se um significativo aumento de compactidade a partir das profundidades 3,90 m (furo SPT-T 01) e 2,60 m (furo SPT-T 02). No furo SPT-T-01 com profundidade total de 15,45 m, tem-se uma camada superficial de areia fina fofoa, com espessura de 3,90 m, índice de resistência à penetração (SPT) médio de 5 golpes e torque residual médio de 3,5 kgf.m. A camada subjacente é composta por areia fina compacta a muito compacta, com espessura de 11,55 m, índice de resistência à penetração (SPT) médio de 30 golpes e torque residual médio de 22,0 kgf.m.

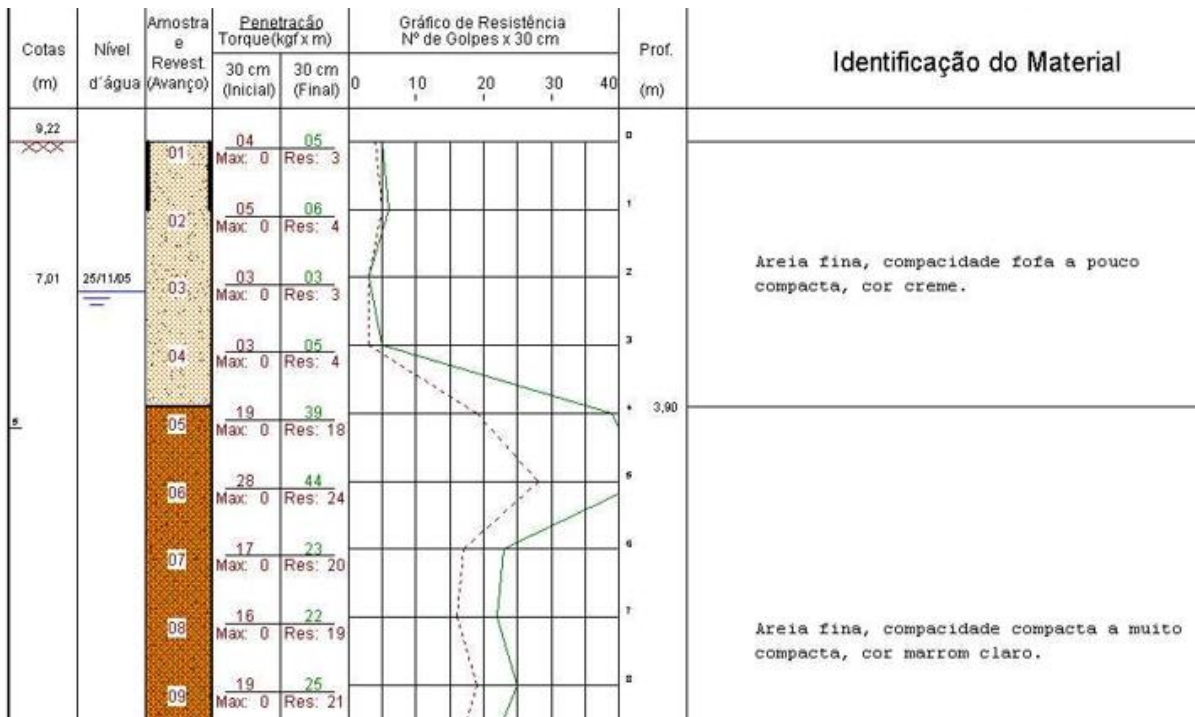


Figura 3. Perfil de sondagem SPT-T-01.

2.2.2 Ensaios de Piezocone (CPTU)

Os pontos onde foram realizados os ensaios de piezocone coincidiram com os pontos de locação das estacas E1, E7, E8 e E9. O piezocone utilizado tinha capacidade de carga da ponta cônica de 50 kN, área de ponta de 10 cm², elemento poroso instalado na posição u2 e transdutor de pressão utilizado para a medida da pressão neutra gerada durante a cravação da ponteira com faixa de atuação de 0 a 3.500 kPa.

Para fins de ilustração, apresenta-se a na Figura 4 o resultado do ensaio CPTU-04 executado na mesma locação onde posteriormente foi executada a estaca E9.

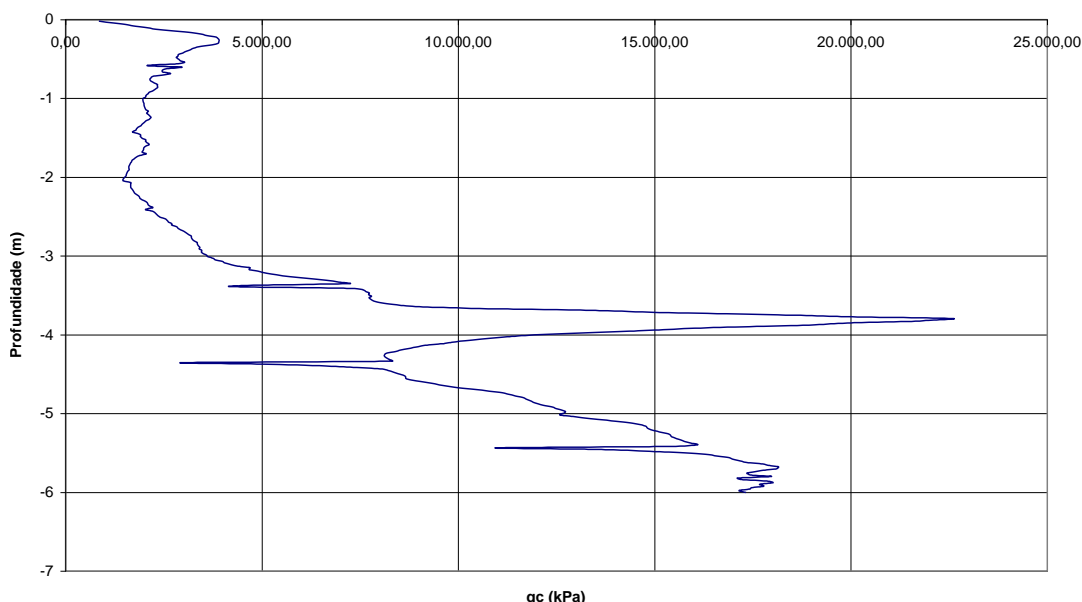


Figura 4. Resistência de ponta do ensaio CPTU x profundidade (Furo CPTU-04 – estaca E9).

2.2.3 Ensaios de Resistência ao Cisalhamento Direto

Foram realizados ensaios de resistência ao cisalhamento direto sem inundação em amostras coletadas entre as profundidades de 0,80 m e 1,10 m, cujos resultados são sumarizados Tabela 1.

Tabela 1. Resultado dos Ensaios de Cisalhamento Direto.

| Índices | Amostra-01 | | | Amostra-02 | | |
|--|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | CP-01 | CP-02 | CP-03 | CP-01 | CP-02 | CP-03 |
| Umidade inicial (%) | 6,88 | 6,88 | 7,02 | 6,86 | 6,86 | 6,86 |
| Peso Específico Aparente Seca inicial (kN/m ³) | 14,51 | 14,39 | 14,46 | 14,48 | 14,48 | 14,48 |
| Índice de vazios inicial | 0,833 | 0,849 | 0,840 | 0,840 | 0,840 | 0,840 |
| Grau de saturação Inicial (%) | 21,9 | 21,6 | 22,2 | 14,48 | 14,48 | 14,48 |
| Índice de vazios após adensamento | 0,793 | 0,802 | 0,787 | 0,805 | 0,795 | 0,785 |
| Umidade final (%) | 4,82 | 5,41 | 6,24 | 6,15 | 5,75 | 6,22 |
| Peso Específica Aparente Seco final (kN/m ³) | 14,95 | 14,85 | 14,98 | 14,60 | 14,76 | 14,86 |
| Índice de vazios final (após cisalhamento) | 0,779 | 0,792 | 0,776 | 0,825 | 0,805 | 0,793 |
| Grau de saturação final (%) | 16,5 | 18,2 | 21,4 | 19,9 | 19,0 | 20,9 |
| Peso Específico dos Grãos (kN/m ³) | | 2,660 | | | 2,664 | |
| Ângulo de atrito (°) | | 31,1 | | | 31,9 | |
| Coesão (kPa) | | 10,1 | | | 14,3 | |

2.2.4 Ensaio de Placa

Foi realizado um ensaio de prova de carga em placa com diâmetro de 0,80 m apoiada no fundo de uma cava com profundidade de 1,50 m. A partir da curva carga recalque do ensaio, obteve-se para o coeficiente de reação vertical (k_v) um valor de 22,43 MN/m³. Nos ensaios de determinação de densidade “in situ” realizados na profundidade de 1,50 m, foi obtido um valor médio de 1,40 kN/m³ para o peso específico aparente seco.

3. PROVAS DE CARGA HORIZONTAL EM ESTACAS

As provas de carga foram executadas de acordo com a MB-3472 - Estacas - Prova de Carga Estática. Na Figura 5 apresenta-se o arranjo das vigas de reação e a disposição das estacas ensaiadas. Todas as estacas foram executadas com diâmetro de 400 mm, comprimento de 8,50 m, armação longitudinal composta por seis barras de 16,0 mm, estribos de diâmetro 8,0 mm espaçados a cada 20 cm, concreto com f_{ck} igual a 32,54 MPa e espaçamento entre eixos de 1,0 m. As estacas E4, E5, E10 e E11 fazem parte do sistema de reação para a execução das provas de carga. Após a concretagem, o topo de todas as estacas foi arrasado. No topo da estaca E8 foi executado um bloco de concreto de dimensões 60x60x70 cm para execução de uma prova de carga à compressão (fora do escopo desse trabalho). As estacas E4, E5, E10 e E11 fazem parte do sistema de reação e foram unidas através de uma viga de concreto armado com seção 60x70 cm. O topo das estacas E1, E2, E3, E6, E7 e E9, submetidas a carregamento horizontal, foi reconstituído com a utilização de uma forma metálica de forma a garantir a uniformidade do diâmetro e permitir a montagem de uma braçadeira metálica (anel bipartido) provido de apoios rotulados e ajustáveis que recebem as hastes de transmissão de carga (barras instrumentadas). Foi ensaiada uma estaca isolada (estaca E9), um grupo de duas estacas em linha (estacas E06 e E7) e um grupo de três estacas em linha (estacas E1, E2 e E3). As estacas dos grupos de duas e três estacas foram conectadas através de barras instrumentadas, rotuladas nas extremidades, similares à haste indicada entre o macaco hidráulico e à estaca E9 na Figura 7.

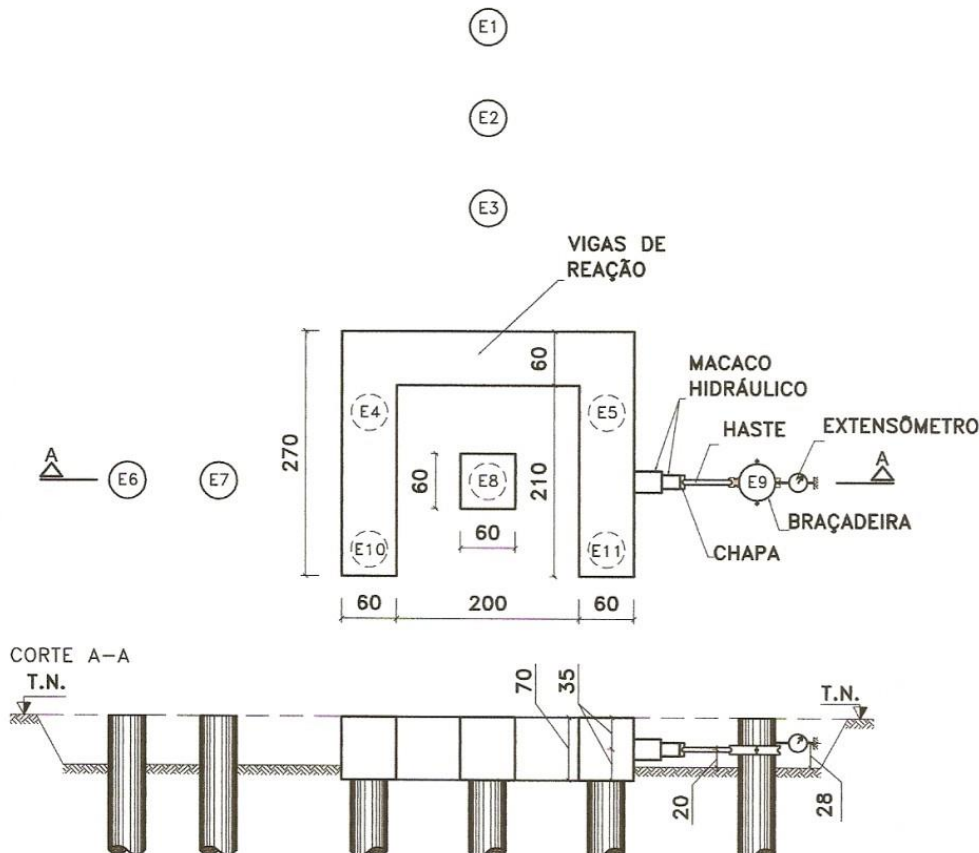


Figura 5. Planta baixa e corte do esquema de reação e disposição das estacas submetidas às provas de carregamento horizontal no topo (cotas em centímetros).

3.1 Prova de Carga Horizontal em Estaca Isolada

A estaca E9 (estaca isolada) foi submetida a seis ciclos de carregamento horizontal (carga e descarga), de acordo com a montagem indicada na Figura 5. A carga foi aplicada pelo macaco hidráulico na estaca E9 (estaca isolada) a uma distância de 20 cm em relação ao nível do terreno (fundo da escavação). As cargas horizontais foram aplicadas na estaca em incrementos de 5 kN (ciclos 1, 2 e 3) e de 10 kN (ciclos 4, 5 e 6), a maioria desses em intervalos idênticos de cerca de 5 minutos. O descarregamento da estaca nos três primeiros ciclos foi realizado em decréscimos de 10 kN, no quarto de 25 kN, no quinto de 30 kN e no sexto em um estágio de 10,5 kN e outro de 4,5 kN. Os deslocamentos horizontais do topo da estaca foram medidos por extensômetros, com sensibilidade de 0,001 mm. Ao final de cada incremento de carga, foram executadas leituras de inclinômetro para medição dos deslocamentos horizontais ao longo da profundidade da estaca (leituras a cada 0,50 m, até os 4,50 m) através do tubo de alumínio inserido no centro da estaca durante a concretagem.

3.2 Prova de carga horizontal em grupo com duas estacas em linha

As estacas E6 e E7 que formam o grupo de duas estacas em linha, foram submetidas a quatro ciclos de carregamento horizontal (carga e descarga). A carga foi aplicada pelo macaco hidráulico na estaca E7 a uma distância de 16 cm em relação ao nível do terreno (fundo da escavação). A carga na estaca E6 foi medida através de uma barra instrumentada colocada entre as duas estacas. As cargas horizontais foram aplicadas no grupo de duas estacas em incrementos de 10 kN (ciclos 1 e 2) e de 20 kN (ciclos 3 e 4) a maioria desses em intervalos idênticos de cerca de 5 minutos. O descarregamento da estaca nos dois primeiros ciclos foi realizado em decréscimos de 20 kN, e no terceiro e quarto ciclo, em decréscimos de 40 kN. De forma similar ao ensaio da estaca isolada, os deslocamentos horizontais do topo da estaca foram medidos por extensômetros e os deslocamentos horizontais ao longo da profundidade foram realizados através de inclinômetro.

3.3. Prova de carga horizontal em grupo com três estacas em linha

As estacas E1, E2 e E3 que formam o grupo de três estacas em linha, foram submetidas a quatro ciclos de carregamento horizontal (carga e descarga). A carga foi aplicada pelo macaco hidráulico na estaca E3 a uma distância de 14 cm em relação ao nível do terreno (fundo da escavação). A carga nas estaca E1 e E2 foi medida através de barras instrumentadas colocadas entre as estacas. As cargas horizontais foram aplicadas no grupo de três estacas em incrementos de 15 kN (ciclos 1 e 2) e de 30 kN (ciclos 3 e 4) a maioria desses em intervalos idênticos de cerca de 5 minutos. O descarregamento da estaca nos dois primeiros ciclos foi realizado em decréscimos de 30 kN, e no terceiro e quarto ciclo, em decréscimos de 60 kN.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS PROVAS DE CARGA

4.1 Valores da constante do coeficiente de reação horizontal (nh) obtidos através de retroanálise da prova de carga da estaca isolada

Nos quatro primeiros ciclos de carregamento das provas de carga realizadas na estaca isolada (E9), foram alcançados deslocamentos y_0 na superfície do terreno inferiores a 4 mm. Adotando-se a sugestão de utilizar valores de n_h pouco dependentes dos deslocamentos sofridos à superfície proposta por Alizadeh & Davisson (1970), tem-se para a faixa de deslocamento na superfície (y_0) compreendida entre 0,8 e 1,2 mm, valores de n_h entre 221 e 317 MN/m³. Os pequenos deslocamentos horizontais na superfície do terreno nos quatro primeiros ciclos de carregamento da estaca isolada (máximo de 2,941 mm) conduzem a valores de coeficiente de reação horizontal do solo muito superiores aos usualmente indicados na literatura técnica para o mesmo tipo de solo. Nos ciclos de carregamento 5 e 6 da estaca isolada (E9), os deslocamentos à superfície superaram a faixa entre 4 e 8 mm sugerida por Cintra (1981), possibilitando adotar valores de n_h neste intervalo. Nesses ciclos, os níveis de deslocamento y_0 foram muito maiores que os dos demais (máximo de 29,219 mm no ciclo 06), uma vez que o nível de carregamento foi bem mais elevado (cerca de 120% maior). O significativo aumento do carregamento, provocou deslocamentos horizontais na superfície bem maiores que nos demais ciclos, conduzindo a valores de n_h bem menores e mais próximos aos apresentados

na literatura técnica. Por exemplo, para os dois últimos ciclos (5 e 6), os valores da constante do coeficiente de reação horizontal do solo foram respectivamente de 20 MN/m³ e de 10 MN/m³.

4.2 Valores de módulo de deformabilidade do solo (Es) obtidos através de retroanálise da prova de carga da estaca isolada

Para estimativa do módulo de deformabilidade do solo (Es), foi utilizada a abordagem adotada por Lima e Cunha (2002) considerando a solução proposta por Poulos (1971) baseada na Teoria da Elasticidade, e a solução adotada por Souza Coutinho (2000), baseada na teoria apresentada por Budhu & Davies (1987, 1988). Para o ciclo de carregamento 01 da estaca isolada, considerando a faixa de deslocamento na superfície (y_0) compreendida entre 0,8 e 1,2 mm, foram obtidos valores de Es entre 114,10 MN/m² e 103,02 MN/m² de acordo com a abordagem proposta por Poulos (1971) e 46,63 MN/m³ e 39,87 MN/m² de acordo com a abordagem proposta por Budhu & Davies (1987, 1988), os quais são bastantes superiores a valores obtidos em ensaios triaxiais para o mesmo tipo de solo encontrado na camada superficial do terreno do campo experimental da UFS. A fim de ressaltar a variação da rigidez do sistema solo-estaca-solo com a repetição dos ciclos de carregamento, verificou-se que no sexto ciclo, para a carga de 20 kN, o deslocamento y_0 foi de 2,12 mm, levando a valores de Es da ordem de 25,25 MN/m² de acordo com a abordagem proposta por Poulos (1971), e 4,67 MN/m² de acordo com a abordagem proposta por Budhu & Davies (1987, 1988).

4.3 Análise da eficiência dos grupos de duas estacas em linha e três estacas em linha

Tomando-se como referência a carga mobilizada para o mesmo nível de deslocamento horizontal no ponto de aplicação do carregamento (Mandolini et al, 2005 e Schmidt, 1985), verifica-se que a eficiência de grupo para os grupos de duas estacas em linha e de três estacas em linha com espaçamento entre eixos de 2,5 diâmetros, tende para um valor de eficiência em torno de 70% em relação a estaca isolada. A fim de verificar a variação da eficiência com os ciclos de carga e descarga (redução da rigidez do sistema estaca-solo), também foi considerada a relação entre as cargas aplicadas para atingir o mesmo deslocamento para os vários ciclos de carregamento da estaca isolada. Para os ciclos 02 e 03 foi obtido um valor de eficiência em torno de 90%. Para o Ciclo 04, verifica-se uma maior perda de rigidez (eficiência de 85% em relação ao ciclo 01), ressaltando que durante a aplicação de carga no estágio entre 50 kN e 60 kN houve uma mudança brusca de comportamento. Para o Ciclo 05 com carga máxima de 120 kN e para o Ciclo 06 com carga máxima de 150 kN, a redução da rigidez do sistema estaca-solo em relação ao ciclo 01 é altamente pronunciada (26% para o ciclo 05 e 17% para o ciclo 06).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base no estudo experimental sobre grupos de estacas tipo hélice contínua executadas em solo arenoso apresentado neste trabalho, apresentam-se as seguintes conclusões e recomendações:

1. Considerando que valores do coeficiente de reação horizontal (n_h) são altamente dependentes do nível de deslocamento, a adoção de valores de n_h definidos com base em deslocamentos próximos à carga última pode resultar em projetos conservadores. Nesse sentido, recomenda-se que em casos onde os valores de carregamento horizontal governem o dimensionamento das fundações, o dimensionamento seja baseado em resultados de provas de carga executadas a priori;

2. Os valores do módulo de deformabilidade do solo (Es) obtidos a partir da retroanálise de ensaios de carga horizontal para o deslocamento correspondente às cargas horizontais usualmente adotadas em projeto para a estaca hélice contínua de diâmetro 400 mm, são superiores aos obtidos em ensaios triaxiais para o mesmo tipo de solo, evidenciando a necessidade de mais estudos experimentais e teóricos referentes ao comportamento de estacas carregadas horizontalmente para níveis de carregamento de serviço;

3. Verifica-se que a cada repetição de carregamento ocorre uma degradação da rigidez do sistema estaca-solo, refletida no aumento da deflexão a cada ciclo de carregamento. Este comportamento está associado ao espaço gerado entre o topo da estaca e o solo circundante que aumenta a cada ciclo de carregamento, representando um desafio para a modelagem do comportamento de estacas submetidas a carregamentos horizontais cíclicos.

4. Com relação à eficiência de grupo, verificou-se que para o espaçamento entre eixos de 2,5 diâmetros, a eficiência dos grupos de estacas ensaiados, atingiu valores em torno de 70%.

AGRADECIMENTOS

Os resultados apresentados neste artigo, fazem parte da pesquisa de doutorado desenvolvida pelo autor principal no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPE - Universidade Federal de Pernambuco. Os autores agradecem o apoio institucional das suas universidades de origem e das instituições públicas e empresas privadas que forneceram apoio técnico e financeiro para a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio. NBR 12.13. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 04 p.
- Alizadeh, M.; Davisson, M. T. (1970), Lateral load tests on piles-Arkansas River project. ASCE, Vol. 96, SM4, pp. 1583-1604.
- Budhu, M.; Davies, T.G. (1987), Non-linear analysis of laterally loaded piles in cohesionless soils. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, pp. 289-296.
- Budhu, M.; Davies, T.G. (1988), Analysis of laterally loaded piles in soft clays. J. Geotech Eng., ASCE, 114(1), pp. 21-39.
- CODISE/CPRM (2014), Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado de Sergipe, Escala 1:250.000. Governo do Estado de Sergipe.
- Cintra, J. C. A (1981), Uma análise de provas de carga lateral em estacas e comparação com os métodos da Teoria de Reação Horizontal. Dissertação de Mestrado. USP - EESC – Departamento de Geotecnia, 150 p.
- Farias, M. C. V. (2001), Sub-bacia hidrográfica do rio Poxim : transformação da paisagem (1970-2010). Tese de Doutorado em Geografia. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE:[258 p].
- Kocsis, P. Discussion of lateral load tests on piles. Arkansas River Project, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, v. 97, no SM6, June, 1971, p. 932-935.
- Lima, M. J.; Cunha, R. P.(202). Obtenção de parâmetros de projeto via retroanálises de estacas carregadas horizontalmente, assentes em argila porosa colapsável de Brasília-DF, In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo.
- Mandolini, A, Russo, G. & Viggiani, C. (2005), Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. © 2005–2006 Millpress Science Publishers/IOS Press.
- Poulos, H. G. (1971a), Behavior of laterally loaded piles: I Single Piles. Journal of the Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 97, SM5, pp. 711-731.
- Poulos, H. G. (1971b), Behavior of laterally loaded piles: II Pile Groups. Journal of the Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 97, SM5, pp. 733-751.
- Schmidt, H. G. (1985), Horizontal Loads Tests on Piles of Large Diameter Bored Piles. In: XI ICSMFE, v. 3, p. 1569-1573.
- Souza Coutinho, A. G. F. (2000), Previsão da Curva Forças/Deslocamentos de Grupos de Estacas Sob Cargas Laterais Baseada em Ensaio de Estacas Isoladas. VII Congresso Nacional de Geotecnia, Porto Vol I, 645-654.