

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/512

Calibração Avançada de Instrumentação para Estacas Metálicas e Rígidas

Matheus Candal Reis Fernandes

Engenheiro Geotécnico, Benthic, Rio de Janeiro, Brasil, matheuscandal@poli.ufrj.br

Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Professor, Instituto Politécnico/UFRJ, Macaé, Brasil, guimaraes@macae.ufrj.br

Fernando Artur Brasil Danziger

Professor, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, danziger@coc.ufrj.br

RESUMO: Toda instrumentação utilizada para a determinação de qualquer grandeza em provas de carga ou ensaios de campo deve ser calibrada em laboratório. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta as dificuldades encontradas, as soluções adotadas e os procedimentos executados para a realização de calibração em laboratório de instrumentação que inclui células de tensão total e transdutores de poro-pressão. A instrumentação foi planejada e desenvolvida para provas de carga com diversos tipos de carregamento (e.g.: carga horizontal e inclinada a 45°) em estacas metálicas e rígidas realizadas em argila mole. São analisados os tempos de resposta de cada instrumento. Alguns fatores, tais como histerese, não linearidade, não retorno ao zero, etc. são apresentados e criticados.

PALAVRAS-CHAVE: Calibração, Laboratório, Instrumentação Avançada.

ABSTRACT: All instrumentation used to determine any quantity in load tests or field tests must be calibrated in the laboratory. This research presents the difficulties encountered, the solutions adopted and the procedures performed to carry out calibration in an instrumentation laboratory that includes total stress cells and pore-pressure transducers. The instrumentation was planned and developed for load tests with different types of loading (e.g.: horizontal and inclined load at 45°) on metallic and rigid piles installed in soft clay. The answer of each instrument are analyzed. Some factors, such as hysteresis, non-linearity, non-return to zero, etc. are presented and analyzed.

KEYWORDS: Calibration, Laboratory, Advanced Instrumentation.

1 INTRODUÇÃO

A experiência brasileira sobre instrumentação de fundações estaqueadas é bastante grande, mas em sua maioria voltada para estacas com carregamento vertical de compressão. Esse fato ocorre pois a carga vertical de compressão é muito comum em solicitações em estruturas convencionais na engenharia civil. As estacas estão dentre os tipos de fundações bastante executados para estes tipos de estrutura. Assim, existe um destaque para este tipo de carregamento em provas de carga em fundações em estacas.

Diversos trabalhos na literatura brasileira apresentam a utilização de instrumentação para estes casos em que as estacas são solicitadas por carga vertical de compressão. Vale destacar um dos trabalhos precursores no Brasil sobre a técnica de instrumentação com extensômetros elétricos, onde foram colados “*strain gauges*” em estacas tubulares e em metálicas (Niyama et al., 1981). A maioria da instrumentação relatada por diversos trabalhos são os extensômetros elétricos ou “*strain gauges*” instalados em barras de aço, como por exemplo: Rocha, Yassuda e Massad (1985); Rocha e Dantas (1986); Niyama e Azevedo Junior (1990); Albuquerque (1996); Menezes (1997); Ferreira et al. (1998); Albuquerque (2001); Guimarães (2002); Pacheco (2004); Garcia (2006); Mucheti (2008); Albuquerque et al. (2011a) e Albuquerque et al. (2011b). Outros autores mencionam a utilização de células de carga, tais como: Amaral e Rocha Filho (1985); Sales (2000); Souza (2001).

Naturalmente, outros tipos de carregamento podem atuar nas fundações de estruturas na engenharia civil (e.g.: esforço lateral, esforço de tração vertical, esforço de tração oblíqua e momentos). Nestes casos pouco se

tem pesquisado no Brasil, principalmente quando o comportamento da fundação é de um corpo rígido (e.g.: estacas curtas). Internacionalmente merecem destaques as pesquisas de Haugen (1983); Karlsrud and Haugen (1983); Mayne et al. (1995) e Karlsrud (2012), onde células de tensão total foram desenvolvidas para verificar as tensões horizontais despertadas quando estacas curtas eram solicitadas lateralmente.

Cabe destacar que a maioria destes trabalhos mencionados não detalha muito a parte da calibração dos instrumentos desenvolvidos. E, naturalmente, cada instrumento deve ser calibrado na faixa de carga, tensão, pressão, etc. prevista para acontecer no campo. Dessa forma, pode-se verificar se um dado instrumento é capaz de oferecer respostas adequadas na faixa de trabalho em que irá realmente atuar. Além disso, as particularidades que um determinado instrumento será submetido no campo devem ser previstas em laboratório.

2 A INSTRUMENTAÇÃO

Foram planejadas, testadas e instaladas instrumentação avançada para duas estacas metálicas e consideradas como um corpo rígido. A instrumentação desenvolvida foi composta por células de tensão total e transdutores de poro-pressão.

2.1 As Estacas

Duas estacas metálicas e rígidas foram utilizadas em provas de carga com esforços horizontais e tração inclinada (45°).

Uma das estacas possuía seção quadrada com lado de 20 cm e comprimento de 3 metros. Essa estaca foi a primeira a ser instrumentada, por possuir uma seção mais convencional. A outra estaca era um modelo reduzido de uma estaca torpedo da Petrobras (T-98). Esta estaca possuía uma seção diferenciada com um corpo cilíndrico de diâmetro de 20 cm e quatro aletas em seu corpo. O comprimento total do elemento era de 3 metros. A Figura 1 apresenta a estaca de seção quadrada e a estaca torpedo modelo.

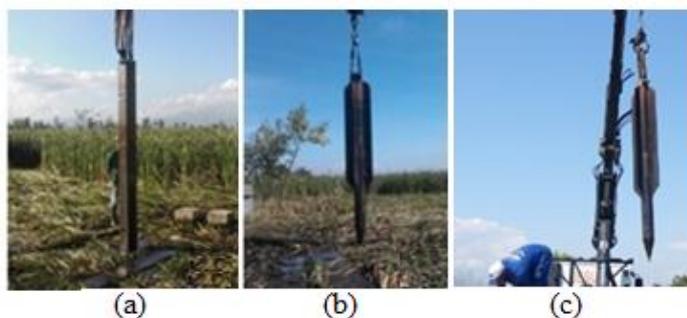


Figura 1. Estaca de seção quadrada e estaca torpedo modelo.

2.2 Células de Tensão Total

Quatro modelos de células de tensão total (CTTs) foram utilizados na instrumentação das estacas. As células de tensão total têm rigidezes e características geométricas diferentes, desde uma miniaturizada até um modelo mais robusto. As capacidades variaram de 500 kPa até 1 MPa, sendo todas do tipo fluido confinado.

Para a instalação das células de tensão total nas estacas foi necessária a fabricação de peças de adaptação metálicas e “o-rings”. Destaca-se que todas as células de tensão total foram calibradas em laboratório com as mesmas peças de adaptação e cabos elétricos que foram instaladas na estaca.

A Figura 2 mostra os quatro modelos de célula de tensão total utilizados nesta pesquisa, além das peças de adaptação utilizadas e os cabos elétricos já instalados.



Figura 2. (a) Modelo PP; (b) Modelo P; (c) Modelo G; (d) Modelo GG.

A Tabela 1 apresenta algumas características dos quatro modelos e peças de adaptação das células de tensão total utilizados nas estacas.

Tabela 1. Diâmetro final com peça de adaptação, diâmetro da face sensível, espessura e capacidade máxima.

Instrumento	Diâmetro final (mm)	Diâmetro face sensível (mm)	Espessura (mm)	Capacidade máxima (kPa)
Modelo GG	68	46	20	500
Modelo G	47	23	10	500
Modelo P	20	12	21	1000
Modelo PP	não se aplica	6	0,5	500

2.3 Transdutores de Poro-Pressão

Três modelos de transdutores de poro-pressão (TPPs) foram utilizados na instrumentação das estacas. Os três transdutores de poro-pressão utilizados também possuíam capacidades variando de 500 kPa até 1 MPa.

Assim como para as células de tensão total nas estacas também foi necessária a fabricação de peças de adaptação metálicas e “o-rings”. Destaca-se que todos os transdutores de poro-pressão foram calibrados em laboratório com as mesmas peças de adaptação e cabos elétricos que foram instalados na estaca.

A Figura 3 mostra os três modelos de transdutor de poro-pressão utilizados nesta pesquisa, além das peças de adaptação utilizadas e os cabos elétricos já instalados.



Figura 3. (a) Modelo Y; (b) Modelo E; (c) Modelo U;

A Tabela 2 apresenta algumas características dos quatro modelos e peças de adaptação das células de tensão total utilizados nas estacas.

Tabela 2. Diâmetro final com peça de adaptação, diâmetro da face sensível, espessura e capacidade máxima.

Instrumento	Diâmetro final (mm)	Diâmetro elemento poroso (mm)	Espessura (mm)	Capacidade máxima (kPa)
Modelo Y	18	9,5	6,5	500
Modelo E	20	10	23,5	1000
Modelo U	18	5	19,5	700

3 CALIBRAÇÃO

3.1 Infraestrutura do Laboratório

Alguns pontos são muito importantes em um laboratório de calibração para instrumentação avançada para fundações em estacas, tais como: rede elétrica estável, temperatura e umidades controladas, ausência de ruídos, etc.

O laboratório de Ensaios de Campo e Instrumentação Marcio Miranda Soares (COPPE/UFRJ) possui todos os requisitos necessários e foi projetado para que pesquisas com tecnologia de ponta fossem desenvolvidas e aplicadas em diversos projetos de fundações e ensaios de campo.

3.2 Sistemas de Aplicação de Pressão

O laboratório conta com sistemas de aplicação de pressão a ar comprimido e água, que substituem os sistemas antigos de aplicação de pressão a base de coluna de mercúrio. Vale destacar, que sempre que possível, por questões de segurança, deve-se preferir utilizar aplicações de pressões com sistemas que utilizam a água como fluido¹. Somente em casos excepcionais deve-se utilizar, com precaução, sistemas a base de ar comprimido.

O laboratório conta com dois sistemas de aplicação de pressão a ar comprimido. Um deles serve de apoio a ensaios da câmara de calibração do laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Esse sistema conta com uma série de manômetros (analógicos e digitais), válvulas e as pressões máximas alcançadas, com segurança, são da ordem de 700 kPa. Outro sistema de aplicação de pressão é uma bomba convencional de ar comprimido. Destaca-se que esta bomba também é capaz de aplicar vácuo. As pressões máximas aplicadas por essa bomba são da ordem de 250 kPa e o vácuo máximo da ordem de 90 kPa.

Já o sistema de aplicação de pressão com base a água é composto por um mecanismo de controle de pressão e volume capazes de aplicar pressões, com segurança, até 1400 kPa. Estes sistemas são comandados por mecanismos servo-controlados operados de forma simples por um teclado de fácil interface. As velocidades de aplicação de pressão são reguláveis e podem atingir valores extremamente elevados, de até 1000 kPa/minuto. Basicamente, após configurar os dados iniciais basta digitar a pressão desejada que o sistema atua automaticamente, aplicando e mantendo aquela pressão (caso não haja vazamento).

As Figuras 4a e 4b apresentam os dois sistemas de ar comprimido e as Figuras 4c e 4d o sistema à base de água para aplicação das pressões necessárias às calibrações da instrumentação.

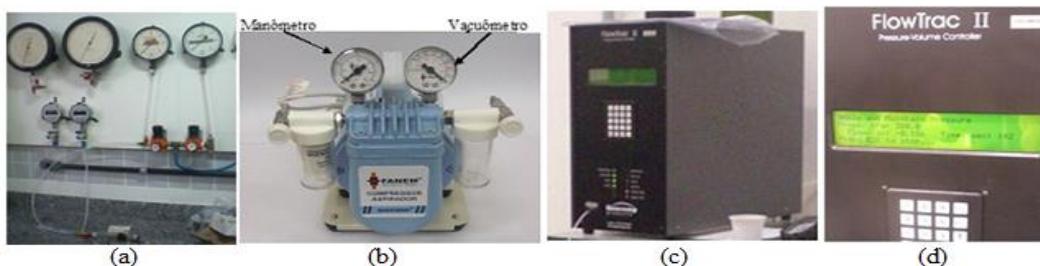


Figura 4. (a) e (b) Ar comprimido; (c) e (d) Água;

3.3 Recipientes para Calibração de Instrumentos

Todos os recipientes para a calibração da instrumentação foram desenvolvidos para as aplicações específicas de determinados instrumentos. Os materiais empregados foram acrílicos, plásticos tipo PVC, borracha, alumínio, latão e aço. Foram necessárias várias adaptações e testes iniciais para tornar os recipientes estanques quando da aplicação das pressões para realizar as calibrações. A Figura 5a apresenta o recipiente 1, a Figura 5b apresenta o recipiente 2, a Figura 5c apresenta o recipiente 3 e a Figura 5d o recipiente 4.

¹ Este fato é dado pelo simples fato da água ser muito menos compressível que o ar, ou seja, um recipiente pressurizado com água ao explodir causaria um dano bem menor que um recipiente pressurizado com ar comprimido.

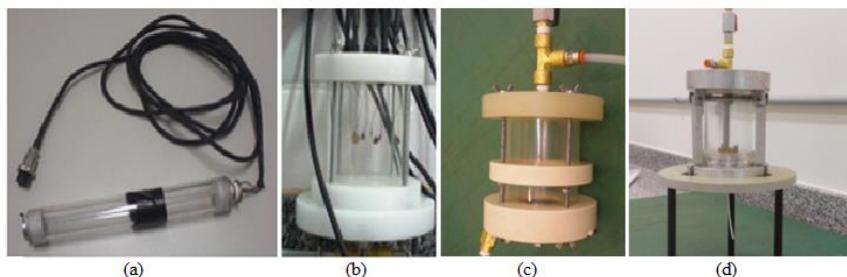


Figura 5. (a) Recipiente 1; (b) Recipiente 2; (c) Recipiente 3; (d) Recipiente 4.

Os recipientes tipo 1 e tipo 2 foram utilizados para calibrar os instrumentos com ar comprimido. Já os recipientes tipo 3 e tipo 4 foram utilizados nas calibrações com água.

3.4 O Processo e suas Particularidades

Após cada instrumento ser planejado e concebido o processo natural era iniciar a calibração do mesmo. Assim, inicialmente os instrumentos eram calibrados individualmente no laboratório. Em certa ocasião foi necessário calibrar alguns instrumentos simultaneamente e, para surpresa da equipe, as respostas daqueles instrumentos não eram as mesmas que quando eles eram calibrados individualmente. Assim passou realizar duas calibrações por instrumento: (i) individualmente e (ii) vários instrumentos similares ao mesmo tempo.

Destaca-se que os instrumentos só eram submetidos ao processo de calibração quando estavam totalmente montados, ou seja, com peça de adaptação, comprimento real do cabo elétrico a ser utilizado, etc. Outro fator relevante, é que os acessórios utilizados na calibração, tais como fontes de alimentação, caixas de passagem, sistema de aquisição, *laptop*, *nobreak* e gerador de energia eram os mesmos previstos a serem utilizados na campanha para a qual aqueles instrumentos estavam sendo desenvolvidos.

A Figura 6 apresenta todo o aparato utilizado para calibração em laboratório dos transdutores de propensão a serem utilizados em prova de carga horizontal em estaca torpedo modelo.

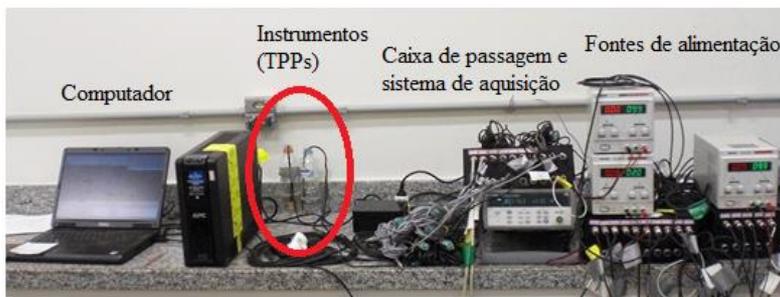


Figura 6. Panorama de calibração de instrumentos na bancada do laboratório.

Muitos problemas foram enfrentados, tais como: curto-circuito em instrumentos durante a calibração, vazamentos de pressões nas câmaras de calibração (recipientes), *o-rings* partidos, dentre outros. A Figura 7 mostra algumas destas dificuldades encontradas no desenvolvimento do processo de calibração avançada de instrumentação em laboratório.

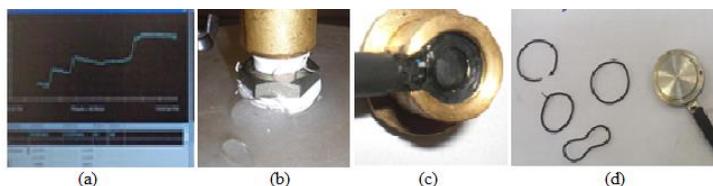


Figura 7. (a) Estágios de carga com início de problemas; (b) Vazamento de água em conexão; (c) Curto-circuito em instrumento; (d) Alguns *o-rings* danificados durante o processo de calibração.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

As calibrações realizadas em laboratório foram analisadas através do programa Calibrs desenvolvido por Danziger (1990), através do qual são obtidos os parâmetros de histerese, não linearidade e não retorno ao zero, conforme sugerido por Schaap e Zuidberg (1982), expresso em forma de porcentagem de fundo de escala (%fso). Além disso, apresentam-se o coeficiente de correlação, erro máximo e erro padrão de estimativa, assim como os coeficiente angular e linear. A Figura 8 apresenta os ciclos de carga e descarga das CTT-PPs.

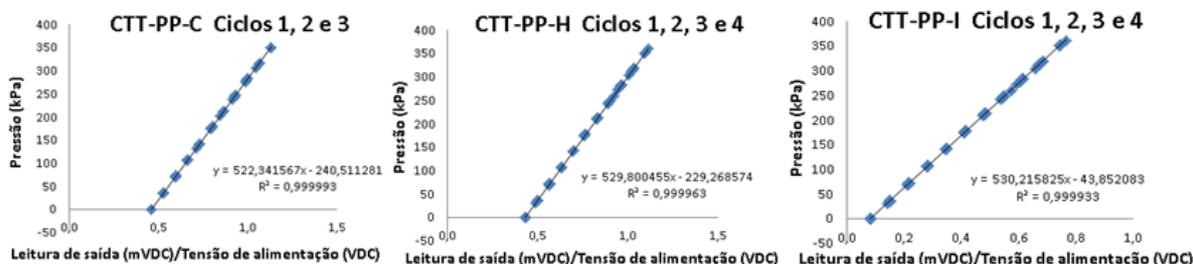


Figura 8. Ciclos de carga e descarga para células de tensão total miniatura.

A Tabela 3 mostra os coeficientes angular, linear, de determinação/correlação (R^2) e outros parâmetros de calibração obtidos através do programa Calibrs para células de tensão total.

Tabela 3. Resultados da calibração das CTT-PPs.

CTT	Ciclo	Coeficiente Angular	Coeficiente Linear	R^2	Erro máx.	Erro padrão	Histerese (% fso)	Não linearidade (% fso)	Não retorno ao zero (% fso)
PP-C	1 a 3	522,341567	-240,511281	0,999993	0,755	0,288	3,1	0,2	0,0
PP-H	1 a 4	529,800455	-229,268574	0,999963	3,076	0,779	1,2	0,9	0,1
PP-I	1 a 4	530,215825	-43,852083	0,999933	0,917	0,487	2,7	0,4	0,1

A Figura 9 apresenta os três ciclos de carga e descarga para os transdutores de poro-pressão (TPP-E).

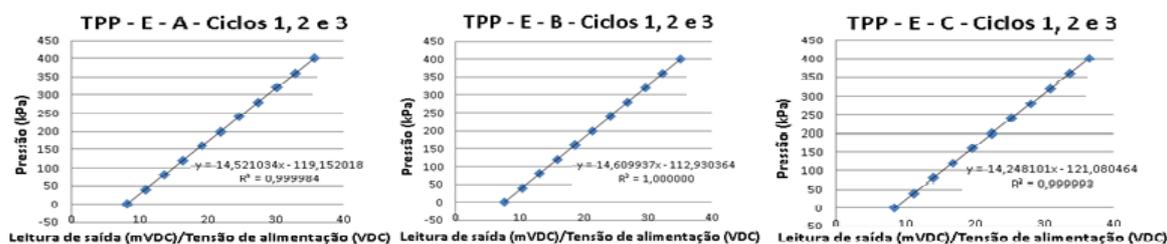


Figura 9. Ciclos de carga e descarga para transdutores de poro-pressão.

A Tabela 4 mostra os coeficientes angular, linear, de correlação/determinação (R^2) e outros parâmetros de calibração obtidos através do programa Calibrs para células de tensão total.

Tabela 4. Resultados da calibração dos TPP-Es.

TPP	Ciclo	Coeficiente Angular	Coeficiente Linear	R^2	Erro máx.	Erro padrão	Histerese (% fso)	Não linearidade (% fso)	Não retorno ao zero (% fso)
E-A	1 a 3	14,521034	-119,152018	0,999984	1,977	0,485	0,6	0,5	0,1
E-B	1 a 3	14,609937	-112,930364	1,000000	0,176	0,072	0,1	0,1	0,0
E-C	1 a 3	14,248101	-121,080464	0,999993	0,572	0,311	0,2	0,1	0,1

A histerese é a diferença máxima entre a indicação do ponto de subida e descida em uma curva de calibração de um instrumento. Assim, quanto menor a histerese, maior a chance da precisão da medição estar

correta. A Figura 10 apresenta um caso no início do processo de calibração em que as células de tensão total miniaturas foram testadas no sistema de ar comprimido e os gráficos dos quatro carregamentos e descarregamentos não se apresentaram confiáveis.

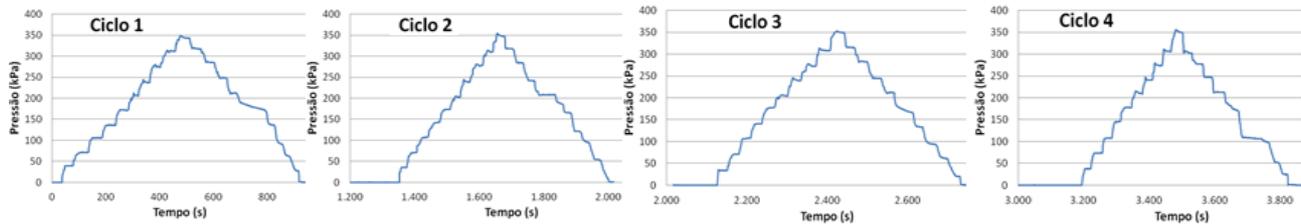


Figura 10. Ciclos de carga e descarga, não confiáveis, para células de tensão total miniaturas

A Tabela 5 mostra os mesmos parâmetros e coeficientes apresentados anteriormente. Vale destacar que neste caso, a histerese foi superior a 40% do fundo de escala, indicando, realmente, que a calibração não era confiável.

Tabela 5. Resultados da calibração para célula de tensão total.

CTT	Ciclo	Coefficiente Angular	Coefficiente Linear	R ²	Erro máx.	Erro padrão	Histerese (% fso)	Não linearidade (% fso)	Não retorno ao zero (% fso)
	1 a 4	525,710857	-240,512748	0,999932	4,473	0,906	40,2	1,1	0,0

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A confiabilidade em uma medida está associada a capacidade que um determinado instrumento tem de reproduzir daquela medida. Um instrumento confiável deve ser calibrado, em laboratório, na faixa de carga, tensão, pressão, etc. prevista a acontecer no campo. Dessa forma, pode-se verificar se um dado instrumento é capaz de oferecer respostas adequadas na faixa de trabalho em que irá realmente atuar.

Estacas curtas, que sofrem movimento de corpo rígido quando solicitadas horizontalmente não sofrem flexão, assim a instrumentação ideal para verificar a transferência de carga (tensão) entre a fundação e o solo seriam as células de tensão total e os transdutores de poro-pressão (casos em que o nível d'água atinge as profundidades de instalação dessas estacas).

Nesse sentido, essa pesquisa apresenta detalhes de calibração em laboratório de instrumentação avançada para estacas metálicas rígidas, composta de células de tensão total e transdutores de poro-pressão. As estacas e a instrumentação foram projetadas para serem submetidas a esforços horizontais e de tração oblíqua em argila mole com nível d'água coincidente com o nível do terreno.

Os parâmetros analisados na calibração dos instrumentos, como histerese, não linearidade e não retorno ao zero, mostraram, de uma forma geral, que os instrumentos desenvolvidos, perante todas as adaptações realizadas, apresentaram um comportamento muito bom.

Percebeu-se que em alguns casos das calibrações, principalmente quando os instrumentos eram verificados individualmente ou, eventualmente, quando utilizado o sistema de aplicação de cargas a ar comprimido, os valores de histerese não eram satisfatórios. Em alguns casos chegou a ser de cerca de 40%, mesmo para valores de coeficiente de correlação próximo a 1 e parâmetros de não linearidade e não retorno ao zero de 0% fso.

Já todos os instrumentos que foram calibrados por sistema com a interface de aplicação de pressão preenchido com água resultaram em valores bem pequenos para todos os parâmetros e o coeficiente de correlação próximo a 1. Fato este explicado pela compressibilidade da água ser bem menor que do ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, P. J. R. (1996). Análise do comportamento de estaca pré-moldada de pequeno diâmetro, instrumentada, em solo residual de diabásio da região de campinas. 225f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- Albuquerque, P. J. R. (2001) Estacas escavadas, hélice contínua e ômega: Estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de carga instrumentadas em profundidade. 263f. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Albuquerque, P. J. R.; Massad, F.; Fonseca, A. V.; Carvalho, D.; Santos, J.; Esteves, E. C. (2011a) Effects of the Construction Method on Pile Performance: Evaluation by Instrumentation. Part 1: Experimental Site at the State University of Campinas. *Soil and Rocks*, v. 34, n. 1, p 35-50.
- Albuquerque, P. J. R.; Massad, F.; Fonseca, A. V.; Carvalho, D.; Santos, J.; Esteves, E. C. (2011b) Effects of the Construction Method on Pile Performance: Evaluation by Instrumentation. Part 2: Experimental Site at the Faculty of Engineering of the University of Porto. *Soil and Rocks*, v. 34, n. 1, p 51-65,
- Danziger, F.A.B., (1990) Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaios de piezocone: aplicação a argilas moles. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 252 p.
- Guimarães, R. C. Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. 2002. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2002
- Haugen, T. (1983), “Cyclic loading of piles and pile anchors – field model tests. Data report. Static lateral load tests pile 03.” Norwegian Geotechnical Institute, Report 400010-24.
- Mayne, P., Kulhawy, F., and Trautmann, C. H. (1995), “Laboratory modeling of laterally-loaded drilled shafts in clay.” *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 121(12), 827–835.
- Mucheti, A. S. (2008) Estaca hélice segmentada: execução, verificação de integridade e estudo de comportamento. 123 f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Niyama, S.; Massad, F.; Rocha, R.; Xavier Filho, M. S. Análises de provas de carga em micro-estacas injetadas num solo de alteração In: SIMPÓSIO BRASILEIROS DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1981. p.683-705.
- Niyama, S.; Azevedo Junior, N. (1990) Considerações sobre instrumentação de estacas cravadas de ponta aberta. In:– SINGEO 90, Rio de Janeiro-RJ. Anais., Rio de Janeiro, p.27-36.
- Karlsrud, K. (2012), “Prediction of load-displacement behavior and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results”. Thesis of Doctor Philosophies, Trondheim.
- Karlsrud, K., and Haugen, T. (1983). “Cyclic loading of piles and pile anchors – field model tests. Final report. Summary and evaluation of test results.” Norwegian Geotechnical Institute, Report 400010-28.
- Pacheco, R. T. Análise da interação entre estacas escavadas em solo residual (2004) 221f. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Rocha, R.; Yassuda, A.J.; Massad, E. Provas de carga em estaca raiz instrumentada. In: I SEFE, 1985, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS. 1985. v.1, p.179-193.
- Rocha, R.; Dantas, F.A.S. (1986) Análise do comportamento da argamassa de preenchimento e das provas de carga instrumentadas em estaca do tipo raiz. In: VIII COBRAMSEG, Porto Alegre/RS. Anais. Porto Alegre: ABMS. v.6, p.181-192
- Sales, M. M. (2000) Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas. 229 f. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.
- Schaap, L.H.J. and Zuidberg, H.M., (1982) Mechanical and electrical aspects of the electric cone penetrometer tip. In Proc., II ESOPT, Amsterdam, v. 2, p 841-851.
- Souza, A. (2001) Estaca piloto instrumentada: uma ferramenta para o estudo de capacidade de carga de estacas quando submetidas a esforços axiais de compressão. 322 f. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.