

Prova de Carga Instrumentada em Estacas Escavadas – Casos de Obras

Laísa B. Benetti,

Fugro In Situ Geotecnia Ltda, Curitiba, Brasil, laisa.benetti@insitu.com.br

Mariluz B. Slezinski,

Fugro In Situ Geotecnia Ltda, Curitiba, Brasil, mari@insitu.com.br

Hylltton W. D. Bazan,

Fugro In Situ Geotecnia Ltda, Curitiba, Brasil, bazan@insitu.com.br

RESUMO: Provas de carga instrumentada em estaca, geralmente, objetivam detalhar as parcelas de resistência por atrito lateral ao longo do fuste ou, apenas, separar a resistência lateral da resistência de ponta. A quantidade, arranjo e tipo de instrumentação dependem do propósito da mesma. O presente trabalho apresenta detalhes da instrumentação instalada em duas estacas escavadas com polímero executadas em diferentes perfis geológico-geotécnicos, as quais foram submetidas à prova de carga estática vertical à compressão com carregamento lento. A instrumentação ao longo do fuste consistiu na utilização de *strain-gages* resistivos e de corda vibrante, dependendo do caso de obra. Em um dos casos, para o monitoramento do deslocamento de topo, além dos relógios comparadores analógicos, foram utilizados quatro transdutores de deslocamento de corda vibrante. A automação permitiu acompanhar a evolução dos deslocamentos de topo continuamente em tempo real. Nas provas de carga verificou-se o bom desempenho da instrumentação instalada, que permitiu conhecer a transferência de carga ao longo das estacas ensaiadas. Adicionalmente, conclui-se que os resultados de provas de carga instrumentadas subsidiam a tomada de decisões na fase de projeto, as quais refletem em otimização, redução de incertezas e economia.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de carga, instrumentação, estaca escavada.

1 INTRODUÇÃO

Por vezes, a instrumentação de topo utilizada em provas de carga convencionais composta, basicamente, por célula de carga e relógios comparadores analógicos, não proporciona informações suficientes sobre a interação estaca-solo. Em projetos onde informações mais precisas e completas quanto ao comportamento carga-recalque e a transferência de carga ao longo do fuste e da ponta são fundamentais, a instrumentação em profundidade e a utilização sensores automatizados são ferramentas adequadas.

Segundo Dunnicliff (1988), em provas de carga em estacas é comum a utilização de *strain-gages* resistivos e de corda vibrante para a determinação de deformações, tensões e

cargas em seções e profundidades de interesse específico.

O autor explica que um *strain-gage* resistivo é um condutor cuja resistência muda em uma proporção direta com a mudança de comprimento. A deformação (ε) é dada pela relação entre a variação da resistência (ΔR) e a variação do comprimento (ΔL) multiplicadas pelo *gage-factor* (GF).

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} \times GF = \varepsilon \quad (1)$$

O sinal de saída dos *strain-gages* resistivos, normalmente, é medido usando um circuito denominado de ponte de Wheatstone. A configuração mais utilizada para análise de

deformações em estruturas é a de ¼ de ponte com três fios, ilustrada na Figura 1. Nesta configuração são eliminados erros causados por mudanças de temperatura dos fios condutores.

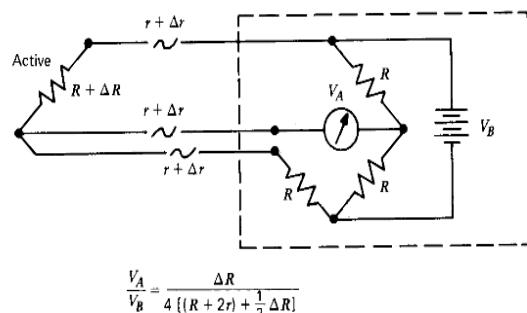


Figura 1. Configuração ¼ de ponte com três fios. Fonte: Dunnicliff (1988).

Com relação aos sensores de corda vibrante, Dunnicliff (1988) explica que nestes instrumentos uma corda de aço é tensionada de modo a vibrar em sua frequência natural. Como em uma corda de violão, a frequência de vibração varia com a tensão na corda, ou seja, varia com o movimento relativo das extremidades onde a corda é fixa. A corda pode então ser usada como um *strain-gage*.

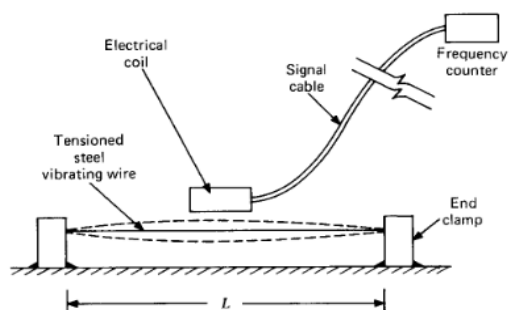


Figura 2. Esquema do *strain-gage* de corda vibrante. Fonte: Dunnicliff (1988).

A frequência de vibração de uma corda vibrante, em termos da deformação da corda, é dada pela equação:

$$f = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{E \varepsilon g}{\rho}} \quad (2)$$

Onde:

L é o comprimento da corda vibrante;

ρ é a densidade do material da corda;

g é a aceleração devido à gravidade;

E é o modulo de elasticidade da corda.

Fazendo $K = \frac{4L^2 \rho}{Eg}$ e como o transdutor

sempre é instalado com a corda vibrante sob uma tensão inicial, a deformação ε desse *strain-gage* é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = K(f^2 - f_0^2) \quad (3)$$

Onde:

f_0 é a frequência de vibração inicial;

f é a frequência vibração em um dado momento posterior ao inicial.

No presente artigo são apresentadas duas provas de carga com objetivos distintos, onde foram empregados sensores de corda vibrante ou resistivos para compor a instrumentação de topo e/ou em profundidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O primeiro caso de obra é de uma estaca do tipo escavada com polímero com 70 cm de diâmetro e 26 m de comprimento, pertencente às obras de fundação de um edifício residencial localizado em Maringá – PR. O perfil geotécnico do local é composto por solo derivado de basalto (argila siltosa e silte muito argiloso) com consistência mole a rija e nível d'água a aproximadamente 18 m.

O segundo caso de obra é de uma estaca do tipo escavada com polímero de 100 cm de diâmetro e 24 m de comprimento pertence ao Campo Experimental Araquari – SC. O perfil geotécnico próximo ao ensaio apresenta solo basicamente arenoso nos primeiros 10,5 m. A sondagem CPTu mostra que nessa região a resistência de ponta q_t se encontra na faixa de 15 a 30 MPa. Abaixo dessa profundidade há intercalações de solo siltoso com q_t entre 2 e 10 MPa até 21,5 m. A partir dessa profundidade há novamente predominância de solo arenoso, agora com q_t médio igual a 7,5 MPa, até o limite da sondagem (30 m). Neste caso a estaca

encontra-se em solo saturado (nível d'água a 1,7 m de profundidade).

No primeiro caso de obra, a estaca teste foi submetida à prova de carga estática vertical à compressão com carregamento lento, conforme preconizado pela NBR 12131 (2006).

A carga foi aplicada em estágios por meio de um conjunto composto por cilindro hidráulico, bomba e manômetro e com a utilização de uma célula de carga. Os deslocamentos de topo foram medidos por quatro relógios comparadores analógicos dispostos em eixos ortogonais sobre o bloco de coroamento da estaca teste.

No segundo caso de obra, o ensaio teve como base às premissas da ABNT NBR 12131 (2006), ASTM D1143 (1981) e do Eurocode 7 Part 1. Além da instrumentação convencional supracitada, para o monitoramento do deslocamento de topo foram utilizados quatro transdutores de deslocamento de corda vibrante (VWDT), dispostos da mesma forma que os analógicos (Figura 3). A aquisição e visualização dos dados continuamente em tempo real foram realizadas por meio de um *datalogger* (DataTaker DT80G GeoLogger) e uma programação com interface Excel. As leituras de deslocamento em milímetros eram apresentadas e armazenadas em uma planilha a cada trinta segundos.



Figura 3. VWDT (A) e Relógio comparador analógico (B) – Segundo caso de obra.

No primeiro caso, a instrumentação do fuste envolveu a utilização de *strain-gages* resistivos. Os sensores foram colados em barras de aço com 0,5 m de comprimento e impermeabilizados com resina epóxi. A configuração utilizada foi a de $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone com três fios. As barras foram fixadas na armadura previamente à concretagem da mesma (Figura 4a). No segundo caso foram utilizados *strain-gages* de corda vibrante do tipo *sister-bar*, fixados com braçadeiras diretamente na armadura da estaca previamente à sua concretagem (Figura 4b).

Para os *strain-gages* resistivos foi utilizado um condicionador de sinais modelo ADS1000 da Lynx®, este sistema de aquisição de dados utiliza comunicação através de rede Ethernet (protocolo IP) e permite distâncias consideráveis entre os equipamentos de aquisição e o computador. O programa utilizado, neste caso, foi o AqDados que gerencia a transmissão dos dados para o computador e permite a gravação, leitura, visualização e processamento dos mesmos.

Para os *strain-gages* de corda vibrante (*sister-bars*) foi utilizado um *datalogger* modelo CR1000 da Geokon®. O programa utilizado, neste caso, foi o Multilogger que gerencia a transmissão dos dados para o computador e permite a gravação, leitura e visualização dos mesmos.

No elemento instrumentado com *strain-gages* resistivos, em cada seção foram utilizados quatro sensores dispostos diametralmente opostos em pares para compensar excentricidades, ou seja, para corrigir eventuais esforços de flexo-compressão na estaca. Além disso, devido à suscetibilidade deste sensor a danos, principalmente durante o processo de execução da estaca, essa distribuição é conveniente por aumentar a probabilidade de utilização da seção.



Figura 4. (a) *Strain-gages* resistivos (primeiro caso de obra) e (b) *Strain-gages* de corda vibrante (segundo caso de obra) instalados na armadura da estaca.

Independentemente do tipo de sensor e propósito da instrumentação, nos dois casos de obra foram locadas uma seção instrumentada próxima ao topo da estaca e uma seção instrumentada próxima à ponta. A primeira seção foi exposta para que não houvesse influência do atrito lateral e o módulo de elasticidade da estaca pudesse ser obtido a partir de seus dados. A última seção foi locada com o propósito de medir a carga transferida na região da ponta, se a carga aplicada fosse suficiente para mobilizá-la. As demais seções foram locadas de acordo com as distintas características das camadas de solo, procurando-se separar trechos relativamente homogêneos quanto ao tipo e resistência do solo. As peculiaridades de cada instrumentação são relatadas na sequência.

A prova de carga instrumentada do primeiro caso foi motivada pela necessidade do conhecimento da carga transferida por atrito lateral até aproximadamente 11 m de profundidade (trecho o qual seria escavado e arrasado para a execução de subsolos do edifício), assim como aferir as premissas de projeto consideradas no cálculo do atrito lateral.

Foram locadas duas seções próximas a essa profundidade de interesse. As demais seções foram distribuídas de acordo com o perfil geotécnico.

Conforme Rodriguez (2014) contribuir ao entendimento dos mecanismos que controlam o comportamento da interação estaca-solo, em estacas de grande diâmetro executadas em perfil arenoso, foi a principal motivação para a criação do Campo Experimental de Araquari, concebido para a execução de um programa de provas de carga instrumentadas, do qual o segundo caso de obra faz parte. A distribuição dos sensores foi realizada buscando separar trechos com densidade e tipo de solo homogêneas tendo como base sondagens CPTu. Adicionalmente, foram introduzidas seções de controle locadas no centro dessas camadas homogêneas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No primeiro caso de obra, como não havia equipamento disponível com capacidade suficiente para içar a armadura completa e como tal procedimento favoreceria a ocorrência de flambagem, a armadura instrumentada foi introduzida em três partes. Após a escavação do fuste da estaca, a armadura próxima da ponta foi introduzida e travada no topo do furo para ser solidarizada com a segunda parte. O mesmo procedimento foi realizado para a união do último trecho e na sequência a estaca foi concretada. Na ocasião do ensaio, dos 26 *strain gages* instalados, 17 se mantiveram ativos.

Os *strain-gages* remanescentes na seção de referência para definição do módulo de elasticidade da estaca não formaram um par diametralmente oposto. A análise dos dados indicou que a média ou um dos valores pontuais deste nível não eram representativos da seção, de forma que os mesmos foram desconsiderados da análise.

Contudo, conforme Fellenius (2001) é possível determinar o módulo de elasticidade da estaca também com dados das demais seções instrumentadas. Nesse caso, o mesmo é calculado a partir da deformação medida resultante de incrementos de carga subsequentes

ao esgotamento do atrito lateral, na seção em que se deseja obter o parâmetro.

Posto isso, como ficou evidente que o atrito lateral existente até o segundo nível instrumentado se esgotou no segundo estágio de carregamento, esse nível foi tomado como seção de referência para definição do módulo de elasticidade da estaca. Para tanto, a relação “tensão versus deformação” foi obtida a partir dos deltas de acréscimo de carga e deformação específica a partir do terceiro estágio de carregamento, com os dados dos *strain-gages* diametralmente opostos desse nível. O polinômio de segunda ordem ajustado a esses pares de dados foi utilizado para a definição da carga atuante nas demais seções instrumentadas em cada estágio de carregamento. A Figura 5 apresenta os resultados.

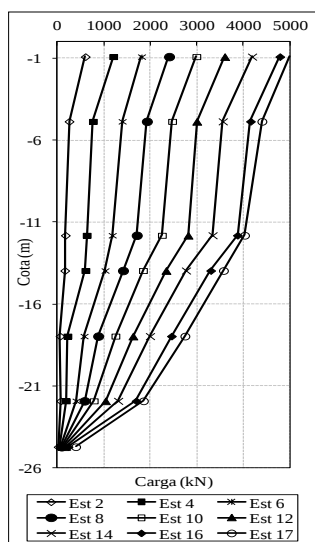


Figura 5. Distribuição de carga em profundidade – Primeiro caso de obra.

Da diferença entre a carga atuante entre duas seções instrumentadas, considerando a área lateral como a medida na seção abaixo do fundo do bloco para todos os trechos instrumentados, definiu-se a resistência lateral unitária ao longo do fuste da estaca, principal objetivo desse ensaio.

Dessa prova de carga, reiterou-se a necessidade da instalação de quatro *strain-gages* por seção, tanto para corrigir eventuais efeitos da excentricidade quanto para aumentar a probabilidade de utilização dos dados.

Na segunda prova de carga, a armadura instrumentada foi içada com seu comprimento

total e inserida na perfuração que na sequência foi concretada. Todos os *strain-gages* instalados se mantiveram ativos durante o ensaio.

Essa prova de carga foi dotada de instrumentação de topo automatizada. O monitoramento do deslocamento de topo pelos VWDT comparado ao realizado com relógios analógicos é apresentado na Figura 6.

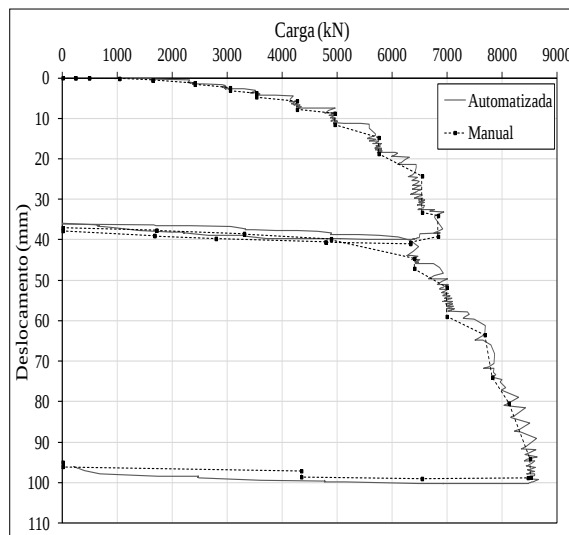


Figura 6. Curvas “carga versus deslocamento” – Segundo caso de obra.

Nesse caso de obra foram utilizados *strain-gages* de corda vibrante do modelo *sister-bars* fabricados pela Geokon®. Este modelo de transdutor é desenhado especificamente para medições de deformações em fundações. A *sister-bar* é instalada junto à armadura da estaca, em posições específicas onde se deseja analisar o comportamento do atrito lateral.

Como se trata de uma prova de carga instrumentada também em profundidade, a interpretação do primeiro nível de *strain-gages*, locado na região livre de influência do atrito lateral, proporcionou a estimativa da carga aplicada no topo continuamente, visto que a leitura dessa instrumentação foi programada para ser realizada a cada minuto.

Assim sendo, a curva carga versus deslocamento “manual” foi construída a partir de anotações manuais do deslocamento de topo e da carga aplicada, visualizadas nos relógios comparadores analógicos e na unidade leitora da célula de carga, respectivamente. A curva carga versus deslocamento “automatizada”, por

sua vez, refere-se ao monitoramento realizado com VWDT e *strain-gages*, conforme supracitado.

Da Figura 6, observa-se a convergência entre os dois tipos de monitoramento. Ademais, enquanto o monitoramento com relógios comparadores analógicos proporciona informações pontuais que necessitam de processamento, o monitoramento automatizado apresenta a evolução dos recalques continuamente em tempo real.

Dessa forma, são facilitadas as medidas referentes a intervalos curtos de leitura ou a ocasião em que os deslocamentos variam rapidamente, por exemplo, como ocorreu no final da prova de carga em questão (deslocamentos de topo superiores a 70 mm), quando a taxa de penetração da estaca passou a ser da mesma ordem de grandeza da de injeção de óleo na bomba, não sendo possível estabilizar a carga.

A curva “carga versus recalque” completa somada a distribuição de carga em profundidade, obtida da interpretação dos níveis instrumentados com *strain-gages* de corda vibrante, apresentada na Figura 7, proporcionaram informações fundamentais ao entendimento do comportamento de estacas de grande diâmetro em solo arenoso, principal objetivo dessa prova de carga.

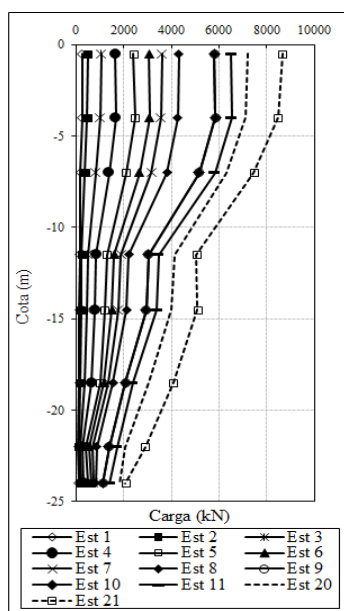


Figura 7. Distribuição de carga em profundidade – Segundo caso de obra.

3.1 Aspectos Práticos

Strain-gages de corda vibrante e resistivos possuem características em comum tais como facilidade de instalação e possibilidade de automação. Os sensores de corda vibrante possuem vantagens com relação aos resistivos como, por exemplo, o sinal de saída em frequência não ser afetado por umidade e alongamento ou encurtamento dos cabos (Hayes & Simmonds, 2002).

Do emprego dos *strain-gages* de corda vibrante no segundo caso de obra, verificou-se que sua instalação é rápida e simples em comparação com os resistivos, pois houve a necessidade da preparação das barras instrumentadas além da fixação destes últimos. Foi verificado também que os sensores de corda vibrante possuem robustez superior, visto que todos se apresentaram em funcionamento na ocasião do teste.

Na obra onde foram utilizados *strain-gages* resistivos, parte dos sensores foi danificada durante a introdução da armadura. Conforme anteriormente comentado, os *strain-gages* resistivos são mais sensíveis a choques mecânicos, além de terem um limite máximo de deformação, acima do qual o mesmo escoa. Dessa forma, as causas mais prováveis da perda desses instrumentos são altas tensões (de compressão ou tração) geradas na armadura durante o içamento, esforços de atrito gerados durante o posicionamento da armadura na estaca e choque mecânico no próprio *strain-gage*. Portanto, deve haver redundância de seções instrumentadas, principalmente em trechos de interesse, além de acompanhamento na fase de introdução da armadura instrumentada na estaca.

3.2 Tensões Residuais

As curvas de transferência de carga apresentadas mostram as deformações medidas durante o ensaio, desconsiderando eventuais tensões residuais que podem afetar os resultados. Não é objetivo desse trabalho aprofundar o estudo dessas tensões, porém cabe uma breve análise da sua influência.

Kim *et al.* (2004) afirmam que é tradicionalmente assumido que em estacas

moldadas *in loco* as tensões residuais após a cura são nulas. No entanto, a interação entre o concreto e o solo ao seu redor durante o ganho de resistência é complexa e muitos processos influenciam as tensões no interior da estaca neste período (Flynn *et al.*, 2012).

Deformações no concreto (expansão ou retração) podem ocorrer durante a sua cura e são função do tipo e quantidade de cimento, aditivos, relação água/cimento, diâmetro da estaca, umidade e temperatura do ambiente.

No primeiro caso de obra o nível d'água encontra-se a aproximadamente 18 m, ou seja, apenas após essa profundidade a estaca se encontra em solo saturado (argila siltosa ou silte muito argiloso). Dessa forma, abaixo do nível d'água o concreto é susceptível à expansão, enquanto que o trecho superior é influenciado pela sucção do solo.

Segundo Guimarães (2002), a sucção impede ou reduz a retração e também resiste à expansão do concreto. Adicionalmente, a reconsolidação do solo ao redor da estaca e a dissipação da poropressão induzida pela sua instalação deverão introduzir atrito lateral negativo e, consequentemente, tensões residuais na estaca (Fellenius, 2002).

Contudo, como as curvas de transferência de carga apresentaram formato parabólico, que é o esperado considerando o modelo linear das tensões efetivas verticais, acredita-se que o efeito das tensões residuais não foi aparente.

É comum na prática de engenharia geotécnica considerar que a transferência de carga em solos arenosos é proporcional à tensão vertical efetiva. Com relação aos solos argilosos, estudos com base em provas de carga instrumentadas demonstram que essa premissa também se aplica a esse caso (Fellenius, 2008).

A curva de transferência de carga do segundo caso de obra, no entanto, não apresenta esse comportamento. Observa-se que a transferência de carga é praticamente nula entre 11,5 e 14,5 m, sendo que a partir dessa profundidade a mesma é retomada e apresenta certo paralelismo com a curva desenvolvida no trecho inicial (acima de 11,5 m). O formato “S” resultante desse comportamento é típico de estacas submetidas à carga residual (Fellenius, 2002).

Além da reconsolidação do solo ao redor da estaca poder ter gerado tensões residuais, neste caso o solo encontra-se saturado e essa condição pode ocasionar a expansão do concreto. Esta expansão gera deslocamentos verticais ascendentes, consequentemente atrito lateral negativo é mobilizado na parte superior da estaca, e deslocamentos descendentes que geram atrito lateral positivo na parte inferior (Mascarucci *et al.*, 2013). Partindo deste princípio, o atrito lateral medido pela instrumentação na região em que ocorrem deslocamentos ascendentes pode ser superior ao atrito lateral “real” (considerando a influência de tensões residuais) e de forma contrária para a região em que ocorrem deslocamentos descendentes.

O monitoramento das tensões durante a cura do concreto foi realizado e pode confirmar a hipótese levantada, porém esses dados não foram avaliados pelos autores.

4 CONCLUSÕES

A instrumentação geotécnica em estacas com *strain-gages* permite analisar detalhadamente a interação estaca-solo ao longo de toda a profundidade. Essa ferramenta aliada à automação, que proporciona a aquisição de dados continuamente em tempo real, subsidia a tomada de decisões na fase de projeto, as quais refletem em otimização, redução de incertezas e economia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fugro In Situ Geotecnia Ltda, UFPR e UFRGS pela disponibilização dos dados apresentados no presente artigo.

REFERÊNCIAS

- DUNNICLIFF, J. *Geotechnical Instrumentation for monitoring Field Performance*. New York: John Wiley & Sons, USA, 1988. 577 p.
- FELLENIOUS, B.H. From Strain measurements to load in an instrumented pile. *Geotechnical News Magazine*, v. 19, n. 1, pp. 35-38, 2001.
- FELLENIOUS, B. H. Determining the Resistance Distribution in Piles. Part 1: Notes on Shift of No-Load Reading and Residual Load. *Geotechnical News Magazine*, v. 20, n. 2, pp 35 – 38, 2002.
- FELLENIOUS, B. Effective stress analysis and set-up for shaft capacity of piles in clay. Honoring John Schmertmann “From research to practice in geotechnical Engineering”, The Geo- Institute of the American Society of Civil Engineers, Edited by J.E. Lair, D.K., Crapps, and M.H. Hussein. *ASCE Geotechnical Special Publication*, GSP 180, pp. 384-406, 2008.
- FLYNN, K.N.; MCCABE, B.A.; EGAN, D. Residual load development in cast in place piles – a review and new case history. In: *Proceedings of IS Kanazawa / 9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations*, Kanazawa, Japan, pp. 765–773, 2012.
- FUGRO IN SITU GEOTECNIA. *Relatório de Prova de Carga Estática Vertical Instrumentada – RSV-01-PCE-01*. Curitiba, 03 de Fevereiro de 2015.
- FUGRO IN SITU GEOTECNIA. *Relatório de Prova de Carga Estática Vertical Instrumentada – LAG-01-PCE-01*. Curitiba, 29 de Janeiro de 2014.
- GUIMARÃES, R.C. *Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao estudo do Desempenho de Estacas Escavadas*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002. 183 p.
- HAYES, J.; SIMMONDS, A. Interpreting Strain Measurements form Load Tests in Bored Piles. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Piling and Deep Foundations*, Hawthorne, USA: Deep Foundations Institute (DFI International), pp.663-669, 2002.
- KIM, M.; CAVUSOGLU, E.; O’NEILL, M.; ROBERTS, T.; YIN, S. Residual load development in ACIP piles in a bridge foundation. In: *GeoSupport 2004 – GSP*, n. 124, 2004.
- MASCARUCCI, Y.; MANDOLINI, A.; MILIZIANO, S. Effects of residual stresses on shaft friction of bored cast in situ pile in sand. *Journal of Geo-Engineering Sciences*, 1(1): 37-51, doi: 10.3233/JGS-13009, 2013.
- RODRIGUEZ, J. L. B. *Caracterização geotécnica do campo experimental da UFRGS em areia*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2014. 155p.