

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE RECALQUES EM ESTACAS ESCAVADAS EQUIPADAS COM O SISTEMA *EXPANDER BODY*

Data de aceite: 16/11/2020

Data de submissão: 04/09/2020

Fernando Feitosa Monteiro

Universidade de Brasília
Fortaleza – Ceará
<http://lattes.cnpq.br/3204932197766528>

Renato Pinto da Cunha

Universidade de Brasília
Brasília – Distrito Federal
<http://lattes.cnpq.br/9013693430617718>

Carlos Medeiros Silva

EMBRE Engenharia e Fundações Ltda
Brasília – Distrito Federal
<http://lattes.cnpq.br/1222667089273854>

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Ceará
Fortaleza – Ceará
<http://lattes.cnpq.br/5139177251248997>

RESUMO: O presente trabalho tem o objetivo de analisar estimativas de recalque para duas estacas escavadas equipadas com a tecnologia *Expander Body* assente no solo do Distrito Federal. A tecnologia *Expander Body* consiste na instalação de um tubo de aço dobrado que é expandido a partir da injeção de calda de cimento pressurizada por um tubo instalado na ponta da estaca. Diversos ensaios de campo (SPT, CPT e PMT) foram empregados para estimar os recalques que foram comparados com os valores

medidos em provas de carga. Os resultados tendem a indicar que os ensaios de PMT fornecem as melhores estimativas de recalque.

PALAVRAS-CHAVE: *Expander Body*, Recalque, Estaca escavada, Prova de carga.

SETTLEMENT ANALYSIS OF BORED PILES EQUIPPED WITH EXPANDER BODY SYSTEM

ABSTRACT: This work aims to analyze settlement estimates for two bored piles equipped with *Expander Body* technology seated on the Federal District soil. The *Expander Body* technology consists in the installation of a bent steel tube that is expanded from pressurized cement grout injection installed at the pile tip. Several field tests (SPT, CPT and PMT) were used to estimate pile settlement that were compared with measured values in pile load tests. The results tend to indicate that the PMT tests provide the best settlement estimates.

KEYWORDS: *Expander Body*, Settlement, Bored pile, Pile load test.

1 | INTRODUÇÃO

A estimativa do recalque do topo de uma estaca é de grande relevância para a análise de qualquer projeto de fundações, sendo o mesmo associado a carga de trabalho, buscando atender ao estado limite de serviço da estrutura. Na literatura, diversos métodos de previsão de recalques são apresentados (Butterfield e Banerjee, 1971; Banerjee e Davis, 1978;

Poulos e Davis, 1980). O método de Poulos e Davis (1980) é um dos métodos mais difundidos em análise de comportamento de estacas. O desenvolvimento desta metodologia de previsão de recalques pode ser avaliado com mais detalhes em Poulos (1979).

Albuquerque (2001) descreve que alguns dos métodos de previsão de recalques consideram as estacas instaladas em um meio elástico ou elastoplástico, ocupando um espaço semi-infinito; outros admitem um mecanismo simples de transferência de carga, através de funções de transferência, definidas de alguma forma. A maioria dos métodos existentes têm como base a teoria da elasticidade, como se o solo tivesse predominância da fase elástica, enquanto o que de fato ocorre é justamente o contrário, havendo a predominância do comportamento elastoplástico (Carneiro, 1999). De modo geral, as metodologias de previsão de recalque necessitam de parâmetros obtidos em ensaios de laboratório ou em ensaios de campo que não são de uso corrente a engenharia de fundações brasileira. Nos últimos anos, verifica-se um grande avanço na disponibilidade de ferramentas com grande precisão, como por exemplo o método dos elementos finitos (MEF) para a estimativa de recalques (Monteiro *et al.*, 2018). Contudo, a qualidade da análise destes métodos está diretamente relacionada com a representatividade dos parâmetros utilizados nas mesmas. Reincidindo na mesma deficiência de metodologias analíticas mais sofisticadas para estimativa de recalque: a obtenção de parâmetros a partir de ensaios de laboratório como ensaios triaxiais e a necessidade de execução de ensaios de campo pouco usuais no meio técnico.

Poulos (1994) relata que uma escolha apropriada dos valores de módulos de deformabilidade pode desempenhar, no problema da determinação de recalques de uma estaca, um papel mais importante do que o método em si. Para determinação dos módulos de deformabilidade, vários procedimentos podem ser utilizados baseados em ensaios de campo ou laboratório, correlações empíricas ou retroanálise de provas de carga. Segundo Rocha Filho *et al.*, (1998), a retroanálise é a forma mais adequada para determinação dos módulos de deformabilidade dos solos, estes são comparados com os obtidos através de vários tipos de ensaios de campo e laboratório, com o objetivo de indicar quais os mais adequados para determinação das características de compressibilidade do solo visando ao projeto. Para argila porosa de Brasília, destacam-se os trabalhos de Cunha e Perez (1998), Cunha *et al.* (2001) e Stewart *et al.* (2011).

O presente trabalho tem o objetivo de analisar a estimativa de recalques a partir de diversos ensaios de campo (SPT, CPT e PMT) para estacas escavadas equipadas com o sistema Expand Body assentes na argila porosa de Brasília.

2 | SISTEMA EXPANDER BODY

O sistema *Expander Body* (EB) é produzido a partir de chapas de aço dobrados, sanfonadas, em forma de um corpo cilíndrico, sendo estes instalados na ponta da estaca ou dos tirantes no solo. O conceito *Expander Body* (EB) foi desenvolvido pelo engenheiro sueco Bo Skogberg durante a década de 80 na Suécia e aperfeiçoado na Bolívia durante a última década (Terceros Herrera e Terceros Arce, 2016). A tecnologia *Expander Body* consiste de tubos de aço dobrado com uma seção transversal cilíndrica. Por injeção de calda de cimento, o EB pode ser inflado, gerando um balão de aço de alta resistência (Figura 1).



Figura 1. *Expander Body*.

No caso de estacas escavadas, o EB é instalado em conjunto com a armadura da estaca até que o EB atinja a cota de projeto na base da estaca. Após à instalação, o EB é expandido por injeção de calda de cimento através de uma tubulação de pequeno diâmetro, criando um bulbo hermético de alta resistência. Durante esta etapa, valores de pressão e volume são registrados manualmente ou automaticamente, obtendo dados que guardam grande semelhança com o ensaio pressiométrico. A calda de cimento utilizada na injeção dos EB possui uma relação água-cimento que varia entre 0,4 e 0,5.

A expansão do EB acarreta em um acréscimo do diâmetro da estaca (principalmente em sua base), bem como a redução do comprimento do EB. O encurtamento do EB desenvolve uma zona não comprimida abaixo da ponta. A segunda fase de injeção da calda de cimento é convencionalmente executada através de um tubo de menor diâmetro que se encontra dentro do tubo utilizado durante a primeira fase de injeção do EB (passando pelo EB). Esta segunda injeção de calda de cimento também consolida ou adensa o solo na ponta da estaca, aprimorando a sua capacidade de carga e a sua rigidez. Consequentemente, reduzindo os deslocamentos necessários para se atingir a capacidade de carga de projeto da estaca. O sistema é disponibilizado em diferentes dimensões em função dos requisitos de projeto. A Tabela 1 apresenta as diferentes geometrias dos EB.

Os modelos de EB apresentam comprimentos entre 1 e 2 m, largura de 0,12 m (dobrado).

Modelo	L_i (m)	L_f (m)	ϕ_{EB} (m)	A_p (m ²)	A_L (m ²)	V (m ³)
EB 310	1,0	0,91	0,3	0,07	0,86	0,07
EB 410	1,0	0,86	0,4	0,13	1,08	0,12
EB 610	1,0	0,76	0,6	0,28	1,43	0,21
EB 612	1,2	0,96	0,6	0,28	1,83	0,27
EB 615	1,5	1,26	0,6	0,28	2,38	0,36
EB 815	1,5	1,26	0,6	0,50	3,17	0,63
EB 820	2,0	1,76	0,8	0,50	4,42	0,88

Onde: L_i é comprimento do EB antes da expansão; L_f é o comprimento do EB após a expansão; ϕ_{EB} é o diâmetro efetivo do EB após a expansão; A_p é área da base do EB após a expansão; A_L é a área lateral do EB após a expansão; V é o volume do EB após a expansão.

Tabela 1. Modelos de EB (Silva *et al.* 2018).

3 | ESTUDO DE CASO

O antigo Campo Experimental de Fundações e Ensaio de Campo do Programa de PósGraduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, situa-se no Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte – Brasília – DF. A posição geográfica é determinada pelas coordenadas 15°45'56" de latitude sul e 47°52'20" de longitude oeste (Figura 2), em uma área de aproximadamente 1000 m². As estacas mencionadas neste estudo, estão localizadas em um anexo do antigo Campo Experimental de Fundações e Ensaio de Campo localizado a aproximadamente 20 m de distância do campo experimental supracitado. Detalhes relativos ao campo experimental podem ser encontrados em Cunha (2011).

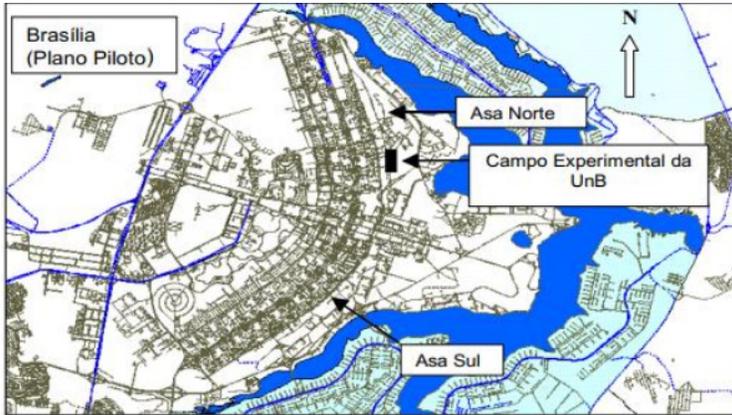


Figura 2. Localização do antigo Campo Experimental da UnB.

A Figura 3 apresenta um perfil simplificado da estratigrafia do antigo campo experimental da UnB. O subsolo é caracterizado por uma camada laterítica superficial, zona de transição e um saprólito formado pela rocha nativa da região. Adicionalmente, exibe-se os resultados médios de índice de resistência a penetração (NSPT), resistência de ponta (q_c) e resistência lateral (f_s) para cada profundidade do campo experimental. A Figura 4 apresenta as curvas pressiométricas obtidas a partir do ensaio PMT realizados no campo experimental. As curvas foram corrigidas (correção de volume e pressão) e ajustadas de acordo com a metodologia proposta por Fontaine *et al.*, (2005). Dessa forma, as curvas são apresentadas a partir do P_o (pressão inicial do tramo pseudo-elástico), removendo assim o trecho de recompressão.

Profundidade (m)	Estatigrafia do solo	N_{SPT}	q_c (MPa)	f_s (MPa)
0.0		2	0.66	0.02
		2	0.47	0.02
	Areia Siltosa	3	0.65	0.04
	Solo laterítico	3	0.86	0.05
		6	1.13	0.07
6.0		5	1.46	0.09
		10	2.42	0.14
8.0	Silte Arenoso	22	3.69	0.21
		23	3.89	0.21
	Camada de transição	28	4.54	0.23
10.0		25	4.64	0.23
	Argila Siltosa	25	4.64	0.23
12.0	Saprólito	33	4.40	0.23

Figura 3. Perfil geotécnico do campo experimental.

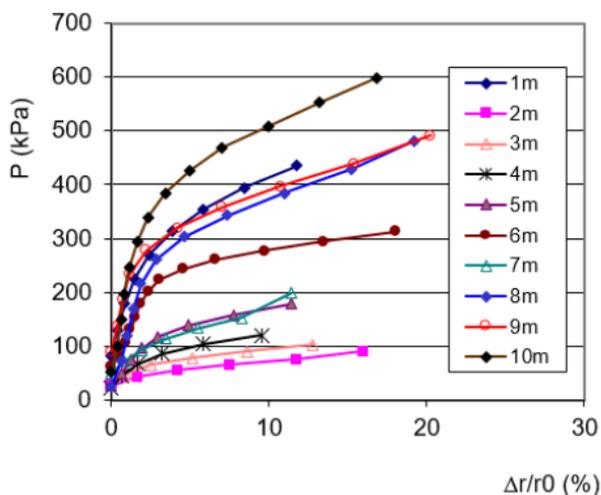


Figura 4. Ensaios pressiométricos corrigidos.

Para a realização da pesquisa foram executadas duas estacas testes com diâmetro de 0,30 m e comprimentos variando de 8,8 e 10 m equipadas com a tecnologia *Expander Body*. O modelo EB 612 ($\varnothing_{EB} = 0,6$ m) foi empregado nesta pesquisa. A armadura longitudinal das estacas constituiu-se de 6 \varnothing 16,0 mm, com 3 m de comprimento e estribos de \varnothing 6,4 mm, a cada 20 cm (Aço CA-50). Além disso, uma monobarra DW 47 mm foi anexada ao centro do EB, bem como tubulações para a injeção do EB (1ª injeção) e para a injeção de fundo do EB (2ª injeção).

O processo de injeção foi realizado mediante uma bomba de argamassa de cimento com capacidade de 8 MPa (Figura 5), onde esta recebia a argamassa de um misturador que também foi utilizado para medir a quantidade de volume que era injetado. A bomba de argamassa enviava a mistura para um cavalete de pressão onde era possível controlar a pressão por meio da utilização de manômetro com capacidade máxima de 30 MPa. O volume de injeção foi controlado por meio de medidor de vazão instalado no misturador de alta turbulência. A segunda etapa de injeção foi realizada após 48 h da execução da primeira etapa de injeção. A Figura 6 apresenta as curvas pressão x volume obtidas a partir da expansão do EB.



Figura 5. Sistema de bomba para injeção dos EB.

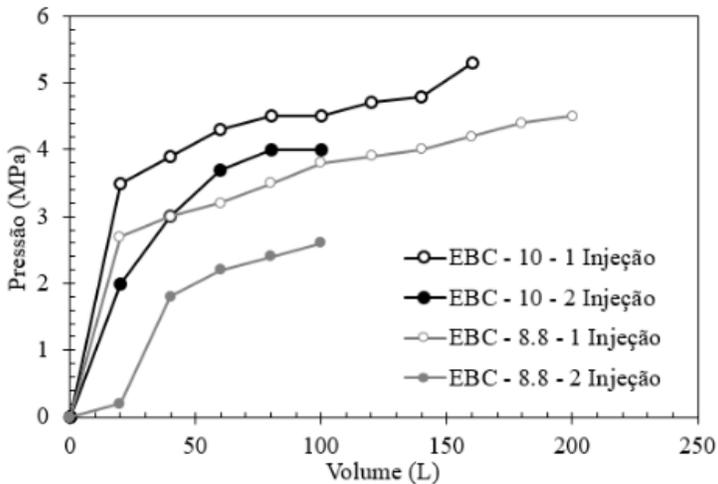


Figura 6. Curvas pressão x volume dos EB.

As estacas teste foram submetidas a provas de carga lenta, de acordo com a ABNT (2006). O carregamento das estacas ensaiadas foi realizado em 10 estágios de carga correspondente, cada um, a 20% da carga de trabalho das mesmas. Nas provas de carga realizadas, observou-se que o deslocamento das estacas variou entre 52,2 e 66,5 mm, atingindo recalques próximos ao limite do deflectômetro (70 mm). Outra característica digna de menção refere-se aos deslocamentos desenvolvidos durante os ensaios, onde é possível observar que os mesmos, em todos os casos, são superiores a 10% do diâmetro do fuste das estacas. A Figura 7 exhibe as curvas carga – deslocamento das estacas EBC 8,8 e EBC – 10. Observa-se que a estaca EBC – 10 foi carregada até 1200 kN, ao passo que a EBC – 8 foi sujeita a um carregamento de 1000 kN. O sistema *Expander Body* confere um

ganho significativo em termos de capacidade de carga e de deslocamento, como observado por Silva *et al.* (2018).

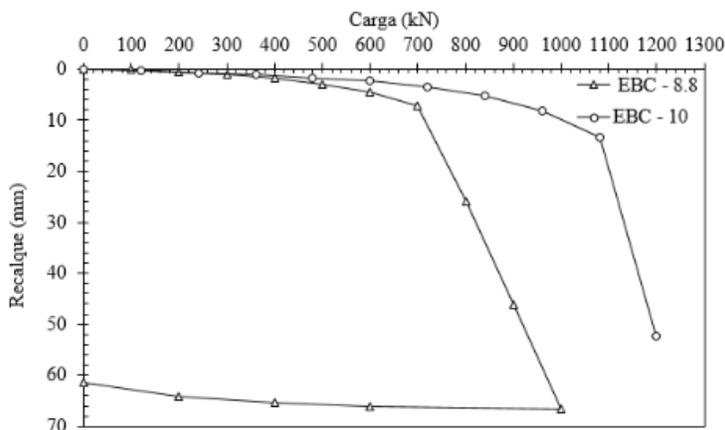


Figura 7. Curvas carga-deslocamento.

O método de Poulos e Davis (1980) foi empregado para realizar a estimativa de recalques. Diferentes módulos de deformabilidade foram selecionados para cada tipo de ensaio de campo (SPT, CPT, PMT, Curvas pressão x volume de injeção do EB). Robertson e Campanella (1988) sugerem valores de $E = 6$ entre 10 qc. Um valor de 8 qc foi adotado neste trabalho. Poulos (1998) relaciona valores de N_{SPT} a valores de módulo de deformabilidade, sendo a relação descrita por $E = 3 N_{SPT}$. Após as correções padronizadas, os dados do PMT foram plotados e a curva pressão x deformação circunferencial foi retroanalizada por meio da metodologia de expansão de cavidade proposta por Fontaine *et al.*, (2005).

A partir das curvas pressão x volume de injeção do EB, determinou-se valores de módulo de deformabilidade para as estacas equipadas com EB (Sadud *et al.* 2014). A previsão do módulo de deformabilidade de cada camada é realizada a partir do valor médio para cada tipo de ensaio, de acordo com a Tabela 2. Os valores obtidos em campo variaram com a profundidade, assim, valores médios ponderados de acordo com a equação a seguir foram adotados:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot H_i}{\sum_{i=1}^n H_i}$$

Onde:

E_i = módulo de deformabilidade da enésima camada;

H_i = espessura da enésima camada.

Ensaio	Referência	Formulação
SPT	Poulos (1998)	$E = 3 N_{SPT}$
CPT	Robertson e Campanella (1988)	$E = 8 q_c$
PMT	Fontaine <i>et al.</i> , (2005)	Retroanálise
EB	Sadud <i>et al.</i> (2014)	$E = 2 (1+\nu) \cdot (v_0 + v_m) \cdot (\Delta p / \Delta v)$

Tabela 2. Correlações utilizadas para avaliação de módulos.

Onde:

ν = coeficiente de Poisson;

v_0 = volume inicial da curva pressão x volume;

v_m = volume médio da curva pressão x volume;

Δp = variação de pressão;

Δv = variação do volume.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

O valor da carga limite foi extrapolado pelo método de Van der Veen (1953). Valores de carga limite de 1020 e 1220 kN foram obtidos para as estacas EBC – 8,8 e EBC – 10, respectivamente. Os valores previstos foram então comparados com os valores medidos. A razão dos valores previstos sobre os valores medidos são apresentados na Tabela 3. A carga utilizada nas análises foi a metade da obtida em ensaio de prova de carga ($Q_{ult}/2$), ou seja, a carga de trabalho.

Estaca	$Q_{ult/2}$ (kN)	δ_{med} (mm)	$\delta_{calc} / \delta_{med}$			
			SPT	CPT	PMT	EB
EBC - 8,8	510	2,9	1	1,9	1,4	3
EBC - 10	610	2,2	1,5	3	2	7,4

Tabela 3. Recalques medidos e previstos.

O modelo elástico empregado por Poulos e Davis (1980) permitiu uma comparação direta das previsões de recalque das estacas analisadas. Na Tabela 3, pode-se observar que os valores do módulo de deformabilidade obtido a partir do SPT e do PMT fornecem as melhores estimativas dos recalques de estacas, seguidos pelo CPT. As razões de recalque ($\delta_{calc} / \delta_{med}$) a partir das curvas de pressão x volume de injeção do EB obtidos a partir da equação apresentada por Sadud *et al.*, (2014) superestimam consideravelmente os recalques das estacas, pois os módulos de deformabilidade estimados são significativamente inferiores aos obtidos do SPT, CPT e PMT. Esta análise comprova a importância da estimativa de um

módulo de deformabilidade “adequado” para se obter resultados satisfatórios quanto à estimativa de deslocamentos de estacas.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Partindo das análises realizadas, verifica-se que modelos elásticos simples podem ser rotineiramente empregados na prática para a estimativa de recalque de estacas escavadas equipadas com a inovadora tecnologia *Expander Body* em solos laterizados, colapsíveis e não saturados. Embora os dados analisados sejam limitados, os resultados tendem a indicar que os ensaios de SPT e PMT fornecem as melhores razões de recalque ($\delta_{calc}/\delta_{med}$). Vale ressaltar ainda a importância da estimativa de um módulo de deformabilidade “adequado” para se obter resultados satisfatórios quanto à estimativa de deslocamentos de estacas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de parceria entre várias entidades nacionais e internacionais em que cada uma teve um papel específico, seja este econômico, científico ou tecnológico. Agradecemos a Universidade de Brasília, Sistemas DYWIDAG, EMBRE Engenharia e INCOTEC Ingeniería.

REFERÊNCIAS

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 cargas instrumentadas em profundidade**. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 263p.

Banerjee, P.D., Davis, T.G. (1978). The behavior of axially and laterally single piles embedded in nonhomogeneous soils. **Geotechnique**, 28, v. 3, pp. 309-326.

Butterfield, R., Banerjee, P.K. (1971). The elastic analysis of compressible piles and pile groups. **Geotechnique**, 21, v. 1, pp. 43-60.

Carneiro, B.J.I. (1999). **Comportamento de tubulões a céu aberto, instrumentadas, em solo não saturado, colapsível**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 322p.

Cunha R.P., Perez, E.N.P. (1998). **Backanalyses of Elastic Parameters from Piles Executed in a Tropical Porous Clay**. *3rd International Geotechnical Seminar Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Ghent, Bélgica, v. 1, pp. 377-383.

Cunha, R.P., Pereira, J.H.F., Soares, J.M., Mota, N.M.B., Poulos, H.G. (2001). **Backanalyses of Field Loading Tests on Deep Foundations in a Tropical Clay**, *XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, ISSMGE, Istanbul, Turquia, v.2, pp. 869-872.

Cunha, R. P. (2011). Acquired knowledge on the behavior of deep foundations vertically and horizontally loaded in the soil of Brasília. **Soils and Rocks**, v. 34(3), pp. 177-194.

Fontaine, E., Cunha, R.P., David, C. (2005) **A simplified analytical manner to obtain soil parameters from Ménard pressuremeter tests on unsaturated soils**. *50 Years of Pressuremeters International Symposium – ISP5*, Paris, v. 1, pp. 289-295.

Monteiro, F.M., Moura, A.S., Aguiar, M.F.P., Cunha, R.P., Matos, Y.M.P. (2018). **Avaliação do Método de Van Der Veen (1953) para estimativa das cargas de ruptura em estacas raiz da cidade de Fortaleza**. *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Geotecnia e Desenvolvimento Urbano*, v. 2, p. 22-28.

Poulos, H.G., DAVIS, E.H. (1980). **Pile Foundation Analysis and Design**. New York, John Wiley & Sons, 397p.

Poulos, H.G. (1979). Settlement of single piles in nonhomogeneous soil. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, ASCE 105, v. 5, pp. 627-641.

Poulos, H.G. (1994). An approximate numerical analysis of pile-raft interaction. **Int. Journal for Num. & Anal. Meth. in Geomechanics**, v. 18, p. 73-92.

Poulos, H.G. (1998). **The pile-enhanced raft – An economical foundation system**. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Brasília, v. 5, p. 27-43.

Rocha Filho, P., Romanel, C., Alcantara, I.M. (1998). **Estimativa de Módulos de Elasticidade de Solos através da Retroanálise de Provas de Carga em Estaca**. *XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Brasília, DF, v.1, p. 1567- 1574.

Robertson P.K., Campanella, R.G. (1988). **Guidelines for Geotechnical Design Using CPT and CPTU Data**, report FHWA, 340 p.

Sadud, O. A. R., Pinto, F., Terceros Herrera, M. A. (2014). **Comportamiento a carga axial de pilotes con sistema de expansión y desplazamiento total**. *Congreso UPADI, UPADI*, Santa Cruz de la Sierra, Bolívia, pp. 1-31.

Silva, C.M., Terceros H.M.A., Terceros M., Esposito, C., Fernández, D.H., Cunha, R.P. (2018). **Uso da Tecnologia Expander Body em estacas solicitadas a tração e a compressão assentes em solo tropical do Brasil**. *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Geotecnia e Desenvolvimento Urbano*, v. 3, 16-28 p.

Stewart, W.P., Cunha, R.P., Mota, N.M.B. (2011). Settlement of Floating Bored Piles in Brasília Porous Clay. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 34(2), pp. 153-159.

Terceros Herrera, M.A., Terceros Arce, M. (2016). **Recent Advances In The Expander Body Technology**. *XVIII Brazilian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 2, p 31-38.

Van Der Veen, C. (1953). **The Bearing Capacity of a Pile**. *3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, v.2, pp. 84-90.