

Avaliação de Ensaios de Campo para Determinação do Módulo de Elasticidade de Young

Tales Moreira de Oliveira

Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, talesciv@gmail.com

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil

Douglas Henrique Santos Sousa

Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, douglashssousa@gmail.com

Gustavo de Almeida Ladeira

Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, gustavocivilcap@yahoo.com.br

Jan-Pierre Gonçalves Pires

Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, jam.pierre93@gmail.com

Jéssica Lúcia Vieira Condé

Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, jessikh_conde@hotmail.com

Hemilly Cristine Lobo Fernandes

Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, hemilly.ifmg@gmail.com

Lucas Vinicius de Oliveira

Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, lucasvini13@gmail.com

Andreia da Conceição de Faria

Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, andreiafaria@ufsj.edu.br

Leandro Neves Duarte

Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, leandro.duarte@ufsj.edu.br

Erivelto Luiz de Souza

Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, Brasil, souza.erivelto@ufsj.edu.br

RESUMO: Para as condições de um campo experimental, em solo residual argilo-arenoso, se objetivou testar a resposta dos ensaios de campo (DMT, PMT e SPT) na previsibilidade do Módulo de Elasticidade, os quais foram utilizados para alimentar um modelo numérico. O modelo numérico foi previamente calibrado utilizando os resultados de provas de carga, obtendo-se assim um modelo padrão. Obtiveram-se também curvas de carga x deslocamento, empregando os Módulos de Elasticidade adquiridos por correlações com os resultados dos ensaios de campo, que foram plotadas juntamente com a curva padrão, podendo-se assim inferir para as condições do campo experimental, a melhor correlação. A modelagem do sistema se deu pela utilização do programa de elementos finitos Plaxis 3D Foundation. O modelo padrão também foi utilizado para estudar o comportamento de sapatas estakeadas, implementado pelos diferentes Módulos de Elasticidade obtidos pelas correlações com ensaios de campo, posteriormente comparados com o resultado de uma Prova de carga. Para as características geotécnicas deste trabalho foi possível averiguar os

melhores ensaios de campo concomitantemente as correlações utilizadas sobre a previsibilidade do módulo de elasticidade do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios de campo, Módulo de elasticidade, Correlações, Modelos numérico.

1 INTRODUÇÃO

Determinar ou prever a relação tensão-deformação para os estudos de fundações é uma rotina da engenharia de fundações de suma importância para previsão do desempenho das obras de engenharia civil (ANTONIAZZI, 2011). Entretanto, os diferentes métodos existentes, no âmbito das fundações contemplam parcialmente os estudos de sapatas estakeadas, contexto no qual este trabalho procura contribuir para os estudos de carga x recalque ligados a este tema, que vêm crescendo nas últimas três décadas (SALES, 2000 e DUARTE, 2012).

O desenvolvimento tecnológico baseado em ferramentas computacionais corrobora para a evolução dos estudos geotécnicos uma vez que o solo é um elemento trifásico, heterogêneo e isotrópico, exigindo modelos computacionais mais realísticos que conferem uma base matemática complexa como, por exemplo, os modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos ou Método das Diferenças Finitas, cujo desenvolvimento é abarcado, por exemplo, pelos softwares Plaxis, Abaqus, Sigma e demais com capacidade de incorporar diversas propriedades dos solos e da estrutura analisada trazendo, portanto respostas mais refinadas e realistas da capacidade de carga geotécnica e deformações do solo (MENDONÇA, 2005).

Este trabalho verifica algumas correlações utilizadas, com base em ensaios de campo, para determinação do Módulo de Elasticidade de Young, com base em modelagem numérica, e colabora também com os estudos de sapata estakeada, através de modelagem numérica tridimensional de um sistema estrutural solo-fundação mista, utilizando o software Plaxis 3D Foundation, como resposta ao problema obteve-se curvas de carga x deslocamento, as quais permitem verificar o levantamento dos recalques e das tensões desenvolvidas sobre o

solo de fundação. Respostas de ensaios de campo, pressiômetro de Mernard (PMT), dilatômetro de Marchetti (DMT) e sondagem a percussão (SPT), foram testados em termos da previsibilidade do Módulo de Elasticidade do solo, por meio da utilização destes Módulos em modelo numérico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Software Plaxis 3D Foundation

O software escolhido para modelagem numérica proposta, utiliza o Método dos Elementos Finitos é denominado Plaxis 3D Foundation, tendo sido desenvolvido especialmente para análise de fundações.

2.2 Campo Experimental

O Campo é composto geotecnica por um solo argilo-arenoso, residual de gnaiss com variações de cores entre marrom a variegado com traços de feldspato e é localizado em uma região da Zona da Mata de Minas Gerais, no campus da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa. As posições dos ensaios de campo podem ser visualizadas na Figura 1 a seguir.

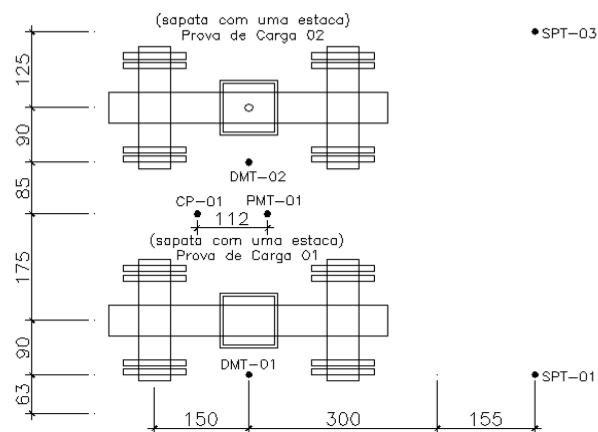


Figura 1. Distribuição dos ensaios no campo experimental.

2.3 Metodologia

Os dados apresentados por Duarte (2012), obtidos de testes de campo e análise de laboratório, foram explorados e utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, de onde então, determinaram-se os parâmetros básicos para execução das análises no Plaxis. A fim de se obter os objetivos propostos, primeiramente fez-se a calibração de um modelo numérico não linear, de acordo com as propriedades do solo obtido da prova de carga 01 (PC-01), da caracterização geotécnica do solo e da sua resposta ao ensaio triaxial tipo consolidado-drenado, realizados com um bloco indeformado (CP-01) retirado do campo experimental de acordo com a Figura 1. Após, ajustou-se a curva resposta (carga x deslocamento) na modelagem numérica, pela alteração dos valores de: Módulo de Elasticidade de Young (E), coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ), no modelo constitutivo de Mohr Coulomb, até que a curva resposta obtivesse um comportamento similar ao comportamento obtido para o ensaio de prova de carga lenta, PC-01, obtendo-se assim um modelo calibrado e uma curva carga x recalque padrão. Em seguida, utilizando-se de correlações proposta por diferentes autores, obteve-se o valor do Módulo de Elasticidade, com base nas respostas dos ensaios de campo: SPT 01, DMT 01 e PMT 01, ver Figura 1, estes módulos foram dispostos no modelo e os resultados foram posteriormente comparados com a curva padrão.

Para a sapata estacada foram utilizados os dados da prova de carga número 2, PC-02, conforme Figura 1, a qual apresenta a resposta para uma sapata estacada, construída com uma estaca broca com diâmetro de 9 cm e comprimento de 1,20 m. Para tanto, os parâmetros geotécnicos obtidos no modelo padrão da PC-01, foram utilizados, porém introduziu-se a estaca, e posteriormente os Módulos de Elasticidade, obtidos por correlação dos ensaios de campo localizados na região de influência da PC-02, (SPT-03, DMT-02 e PMT -01), fazendo-se então uma comparação da resposta da prova de carga PC-02, com a resposta obtida pela aplicação do modelo numérico, carregado com os diferentes módulos

de elasticidade.

Para a verificação do comportamento das curvas carga x recalque, obtidas através da simulação numérica com os Módulos de Elasticidade oriundos das correlações com os resultados dos ensaios de SPT, PMT e DMT, considerou-se o solo, por hipótese simplificadora, como sendo um meio homogêneo, ou seja, calculou-se um valor médio para as respostas dos ensaios ao longo do extrato estudado. Para a correlação com o valor médio do SPT, aplicou-se a proposta de Ruver e Consolini (2006):

$$E = 1,89 \times N_{\text{SPT}, 60} \quad (1)$$

$$N_{\text{SPT}, 60} = 1,20 \times N_{\text{SPT médio da camada}} \quad (2)$$

Onde: E: módulo de elasticidade;

$N_{\text{SPT}, 60}$: representa o N_{SPT} na energia de 60% conforme Ruver (2005);

$N_{\text{SPT médio da camada}}$: valor médio do SPT.

Quanto ao PMT utilizou-se da proposição de Angelim (2011), onde:

$$E = 1,32 \times E \quad (3)$$

Onde: E: módulo de elasticidade

E_M : módulo pressiométrico médio da camada em estudo relativo ao ensaio de PMT.

Para DMT utilizou-se duas propostas:

$$E = F \times E_D \quad (4)$$

$$E = E_D \times (1+v) \times (1 - 2 \times v)/(1-v) \quad (5)$$

Onde: E: módulo de elasticidade;

F: Fator de correção, igual 10 de acordo com Robertson et al. (1989);

E_D : módulo dilatométrico médio da camada em estudo relativo ao ensaio de DMT;

v: coeficiente de poisson, igual a 0,33 de acordo com Briaud e Miran (1992).

3 RESULTADOS

3.1 Ensaio de Resistência

Na Tabela 1, estão apresentados os resultados dos ensaios triaxiais tipo CD, para tensões de confinamento: 50, 100 e 200 kPa, obtidos do Corpo de Prova 01 (CP-01).

Tabela 1. Resultado do ensaio de Triaxial-CD

Ensaio de Triaxial-CD				
Prof. (m)	Umidade Natural	Peso específico aparente natural (kN/m ³)	Coesão (c' kPa)	Ângulo de atrito interno (φ °)
0,55	30,5	14,85	39,4	27

3.2 Ensaios de Campo

Conforme o esquema apresentado na Figura 1, a seguir nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, são apresentados os resultados dos ensaios de PMT, DMT e SPT respectivamente.

Tabela 2. Resultado do ensaio de PMT

Ensaio Pressiométrico de Ménard	
Prof. Camada (m)	PMT 01
	E _M (Mpa)
1	1375,60
2	2048,98
3	5278,77
4	4050,38

Tabela 3. Resultado do ensaio de DMT

Ensaio Dilatométrico de Marchetti		
Prof. Camada (m)	E _D (kPa)	
	DMT 01	DMT 02
0,6	3100	12900
0,8	1300	15500
1,0	1300	15500
1,2	3100	6400
1,4	2700	7100
1,6	3800	12200
1,8	4600	10000
2,0	6000	10000
2,2	5300	7800

Continuação. Tabela 3. Resultado do ensaio de DMT

Ensaio Dilatométrico de Marchetti		
Prof. Camada (m)	E _D (kPa)	
	DMT 01	DMT 02
2,4	8600	8200
2,6	12600	12200
2,8	10500	16900
3,0	500	16200

Tabela 4. Resultado do ensaio de Sondagem a Percussão

Sondagem a Percussão – SPT 01		
Prof. Camada (m)	N _{SPT-30cm}	Tipo de Solo
1	8	Argila arenoso rija cor marrom
2	9	
3	15	
4	17	
5	16	
6	11	Argila silto arenosa rija cor V.g.
7	11	
8	9	

Tabela 5. Resultado do ensaio de Sondagem a Percussão

Sondagem a Percussão – SPT 03		
Prof. Camada (m)	N _{SPT-30cm}	Tipo de Solo
1	6	Argila arenosa consistência m cor Marrom
2	6	
3	7	
4	14	
5	23	Argila arenosa dura cor Marrom
6	23	

3.3 Parâmetros de entrada no modelo de Mohr-Coulomb.

Na Tabela 6 são mostrados os parâmetros geotécnicos usados na obtenção da curva carga x recalque padrão, oriunda da simulação numérica e posteriormente plotada em conjunto com a curva obtida no ensaio de prova de carga.

Tabela 6. Parâmetros de entrada no modelo numérico calibrado (padrão).

Parâmetros	Valor	Unidade
E	6200	kPa
φ	13	°
c	19700	kPa
v	0,33	-
ψ	0	°
γ _{nat}	14,85	kN/m ³
γ _{sub}	14,85	kN/m ³

3.4 Módulo de Elasticidade

Os Módulos de Elasticidade obtidos mediante descrito no item 2.2 estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores dos Módulos de Elasticidade

Ensaio	Valor médio Da camada homogênea		E (kPa)	
SPT 01	N _{SPT}	13,0	Ruver (2005)	29484,00
PMT 01	E _M (kPa)	3288,4	Angelim (2011)	4340,70
DMT 01	E _D (kPa)	4880,0	Robertson et al. (1989)	48800,00
DMT 01	E _D (kPa)	4880,0	Briaud e Miran (1992)	5658,12

Continuação. Tabela 7. Valores dos Módulos de Elasticidade

Ensaio	Valor médio Da camada homogênea		E (kPa)	
SPT 03	N _{SPT}	11,2	Ruver (2005)	25402
DMT 02	E _D (kPa)	11608,0	Robertson et al. (1989)	116080
DMT 02	E _D (kPa)	11608,0	Briaud e Miran (1992)	18342

3.5 Curva carga x deslocamento para modelo calibrado (padrão)

Dispondo da curva carga x deslocamento, da prova de carga realizada no campo experimental e denominada PC-01, realizou-se a calibração do modelo numérico, por “n” tentativas iniciando com os resultados dos ensaios apresentados na Tabela 1. A curva padrão ajustou-se utilizando 50% do valor apresentado para c' e ϕ' utilizando um E igual a 6200 kPa, conforme Figura 2 e 3.

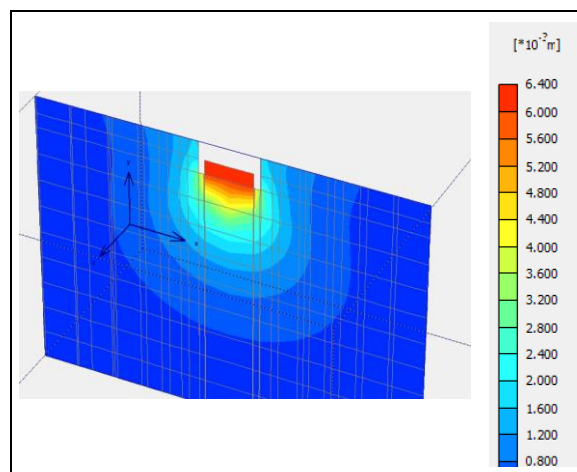


Figura 2. Resultado da análise numérica apresentada no Plaxis.

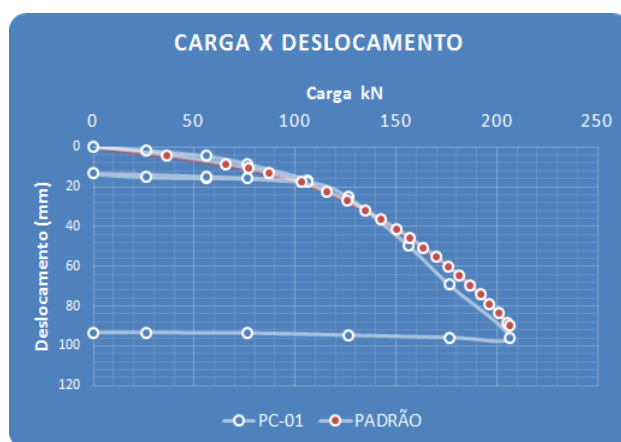


Figura 3. Curva carga x deslocamento da prova de carga 01 (PC-01) e da curva padrão obtida por tentativa.

3.6 Verificação do comportamento do modelo de acordo com as diferentes proposições de E.

A Figura 4 contém plotado o resultado da carga x deslocamento para as diferentes proposições de E, contrastadas com a curva padrão.

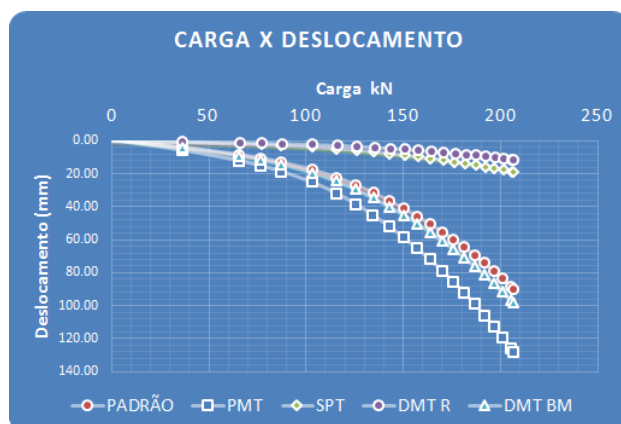


Figura 4. Curva carga x deslocamento da curva padrão obtida por tentativa e das demais obtidas em função do E.

3.7 Modelagem da sapata estacada

Dispondo do modelo calibrado e apresentado em 3.3 construiu-se nele uma estaca debaixo da sapata conforme Figura 5.

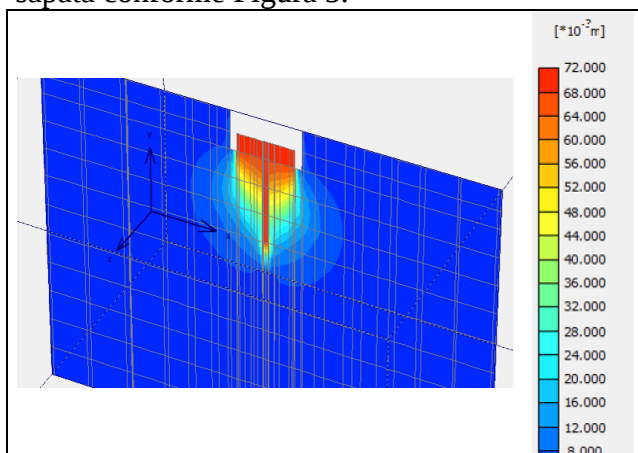


Figura 5. Resultado da análise numérica apresentada no Plaxis, para sapata estacada.

Para este novo modelo criado, verificou-se o comportamento da curva carga x deslocamento para os diferentes módulos de elasticidade encontrados para SPT 03, PMT 01, DMT 02, conforme Figura 6.

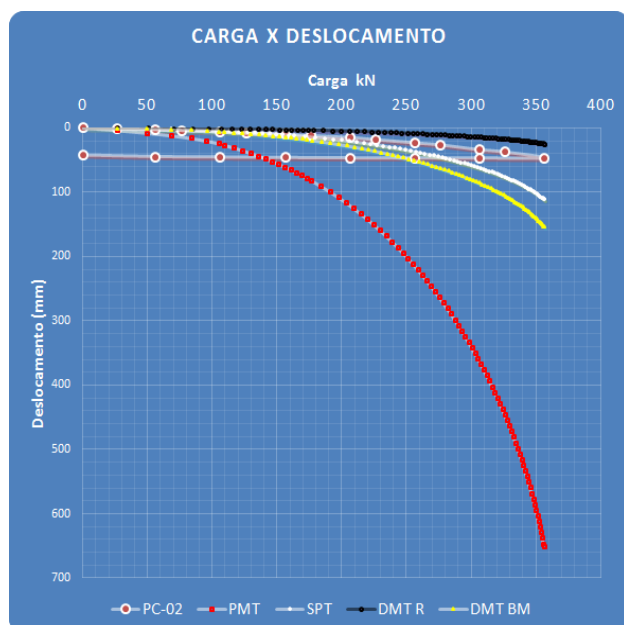


Figura 6. Curva carga x deslocamento da prova de carga 02 (PC-02) e das demais obtidas em função do E.

4 DISCUSSÕES

Conforme pode-se verificar, comparando-se as curvas carga x recalque, ao se utilizar 50% do

valor da coesão e do ângulo de atrito interno, alcançados no ensaio triaxial tipo CD, obteve-se um comportamento muito similar àquele obtido na prova de carga lenta. Isso evidencia que a redução imposta nos valores dos parâmetros de resistência c' e ϕ' foram satisfatórios no modelo numérico, podendo isto ser explicado o porquê trabalhou-se simplificadamente como se o extrato fosse uma única camada homogênea não levando em conta a variação destes parâmetros com a profundidade, entretanto, é possível verificar a grande similaridade entre a curva real obtida do campo e a obtida por meio de análise numérica, conforme consta na Figura 3.

Quanto ao comportamento da curva, carga x deslocamento, obtida pela aplicação dos diferentes Módulos de Elasticidades relacionados e pelos itens 2.3 e 3.4, respectivamente, pode-se verificar que, para as condições geotécnicas e cargas aplicadas, o ensaio de DMT, com modelo Briaud e Miran (1992), obteve a melhor resposta, seguido do ensaio de PMT com o modelo de Agelim (2011), vislumbrados na Figura 3.

No que se refere às sapatas estacadas, podemos verificar que o incremento da estaca broca foi capaz de reduzir os deslocamentos, conforme resultados encontrados para a prova de carga 02, entretanto, a capacidade das formulações de previsão baseadas nos ensaios de campo para obtenção dos módulos de elasticidade, utilizadas neste trabalho, não apresentaram, de modo geral, boa similaridade na comparação entre as diferentes curvas. Das curvas obtidas, a que melhor descreveu o comportamento foi aquela obtida para o ensaio de DMT, utilizando-se proposição de Robertson et al. (1989), mas que se apresentou subestimada, já que o recalque foi inferior ao obtido pela prova de carga, em torno de duas vezes menor.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados alcançados por este trabalho, sugere-se que, para as condições de campo similar às apresentadas em 2.1 e 3.1, seja feita a utilização do ensaio de DMT para previsibilidade do comportamento real de

campo, face à aplicação de modelos numéricos, sendo que, para as condições de sapatas não estaqueadas, A redução de 50% dos parâmetros de resistência c' e ϕ' mostraram-se satisfatórias em termos de análises numéricas para as condições de contorno descritas neste trabalho. Elege-se a metodologia Briaud e Miran (1992) na determinação do E, e para o caso de sapata estaqueada, a metodologia de Robertson et al. (1989), porém para o último caso, deve-se empregar um fator de segurança igual a 2 para os resultados encontrados.

Ainda é possível verificar que a adição de estaca broca eleva a tensão de ruptura e diminui os recalques, sendo, portanto uma importante alternativa para solução de recalques em fundações superficiais.

REFERÊNCIAS

- Angelim, R. P. (2011) *Desempenho de ensaios Pressiométricos em Aterros Compactados de Barragens de Terra na Estaiativa de Parâmetros Geotécnicos*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 316 p.
- Antoniazzi, J. P. (2011) *Interação Solo-estrutura de Edifícios com Fundações Superficiais*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS.
- Briaud, J.L. Miran, J. (1992) *The Flat Dilatometer Test*, Washington: Federal Highway Administration, Office of Technology Applications, 102 p.
- Duarte, L. N. (2012) *Avaliação do Comportamento Solo-estrutura de Elementos de Fundação tipo Sapata Estaqueada*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG.
- Medonça, H. M. X. (2005) *Sobre a Modelagem de Problemas da Engenharia Geotécnica pelo Método dos Elementos Finitos*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP.
- Ruver, C. A. ; CONSOLI, N. C. (2006) Estimativa do Módulo de Elasticidade em Solos Residuais através de Resultados de Sondagens SPT. Anais do COBRANSEG 2006, In: COBRAMSEG 2006 - XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba/PR.: ABMS, São Paulo/SP, 6 p.
- Ruver, A. R. (2005) Determinação do comportamento carga-recalque de sapatas em solos residuais a partir de ensaios SPT, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 182 p.
- Robertson, P. K. Davies, M. P. Campanella, R. G. (1989) Design of laterally loaded Driven Piles Using the Flat Dilatometer, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 12, No. 1, 1989, pp. 30-38, ISSN 0149-6115.
- Sales, M. M. (2000) *Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD/002A, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Brasília 2000, Brasília /DF.