

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÃO DIRETA ASSENTE EM SOLO SILTE ARGILOSO

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF DIRECT FOUNDATION BASED ON CLAYEY SILT SOIL

Soares de Carvalho, Thalita, *Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, thalita.sdc@gmail.com*

Fábio Porto de Aguiar, Marcos, *Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br*

Feitosa Monteiro, Fernando, *UNICHRISTUS/Universidade de Brasília, Fortaleza, Brasil, fernando.monteiro@unichristus.edu.br**

Fernandes, Igor, *Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, igorfernandes.eng@gmail.com*

RESUMO

As fundações diretas são sujeitas a deslocamentos verticais e o monitoramento desses recalques são essenciais para analisar e verificar o desempenho e comportamento estrutural. O ensaio de prova de carga estática é um dos principais ensaios utilizados para desempenho de fundações. Por meio de retroanálises das curvas carga-recalque é possível estimar parâmetros de resistência e deformabilidade do solo. Entendendo como de grande importância a análise e simulação numérica desse ensaio em programas de métodos dos elementos finitos, o presente trabalho tem como objetivo realizar análises numéricas no *software* PLAXIS 2D, utilizando parâmetros obtidos de correlações semiempíricas e a partir de retroanálise com o módulo de elasticidade, e comparar com dados do ensaio experimental de prova de carga executado em sapata assente em solo silte argiloso. Observou-se que os resultados decorrentes da simulação numérica, que se baseou no modelo linear elástico perfeitamente plástico, denominado como Mohr-Coulomb no *software*, foram similares aos obtidos no ensaio de campo, apresentando diferenças percentuais satisfatórias e indicando que a modelagem na análise numérica pode possibilitar comparações e estimativas eficazes de deslocamentos verticais em fundações diretas.

ABSTRACT

Shallow foundations are subject to vertical displacements and the monitoring of these settlements is essential to analyze and verify the performance and structural behavior. One of the main tests used to estimate soil deformability and strength parameters and monitor displacements is the static load test. Understanding as of great importance the analysis and numerical simulation of this test in finite element methods programs, the objective of this work was to perform numerical analyzes in the *software* PLAXIS 2D, using parameters obtained from semi-empirical correlations and from back-analysis with the modulus of elasticity, and compare it with data from the load test experimental test performed on a shoe set in clayey silt soil. It was observed that the results resulting from the numerical simulation, which was based on the Mohr Coulomb model, were similar to those obtained in the field trial, showing satisfactory percentage differences and indicating that the modeling in numerical analysis can enable effective comparisons and estimates of vertical displacements on direct foundations.

1. INTRODUÇÃO

As fundações são sujeitas a movimentos verticais que podem ser deslocamentos verticais descendentes, chamados de recalques, ou ascendentes, no caso levantamentos (ABNT, 2019a). O desempenho de uma fundação, segundo ABNT (2019a), é analisado por meio de, pelo menos, o monitoramento dos recalques que são medidos.

Para um projeto de fundações diretas, a grandeza fundamental é a tensão admissível. Esta é máxima tensão que pode ser aplicada no terreno pela fundação, de modo a atender aos estados limites últimos e de serviço, considerando os fatores de segurança predeterminados. A tensão admissível depende significativamente das dimensões das fundações e sua determinação deve ser fixada e interpretada a partir de métodos teóricos, métodos semiempíricos ou prova de carga sobre placa (ABNT, 2019a).

A prova de carga sobre placa é um ensaio descrito pela ABNT (2019b) e visa determinar a curva tensão-deslocamento, para estimar os parâmetros de deformabilidade e resistência do solo, ou seja, analisar a capacidade de carga e a tensão admissível do solo em análise.

Para prever os recalques das fundações existem três metodologias, segundo Velloso e Lopes (2010): os métodos racionais, semiempíricos e empíricos. De acordo com os autores, os métodos racionais são aqueles em que os parâmetros de deformabilidade, obtidos em laboratório ou in situ são relacionados a modelos para prever recalques teoricamente exatos. Nos métodos semiempíricos, esses parâmetros são obtidos por correlações com ensaios in situ de penetração, como SPT, CPT, estática ou dinâmicas, e são combinados à modelos de previsão. E os métodos empíricos utilizam tabelas de valores de tensões admissíveis e estes dados são associados a recalques usualmente aceitos.

Entende-se, portanto, como de grande importância, a avaliação dos deslocamentos verticais. Tendo em vista a necessidade de compreender o comportamento mecânico do subsolo, visou este trabalho, que consistiu em realizar análise numérica, utilizando o *software* PLAXIS 2D e parâmetros estimados a partir de correlações com base no ensaio de SPT, e comparar os resultados de deslocamentos estimados com os dados experimentais, obtidos em prova de carga estática em placa executada sobre terreno de fundação em solo silto-argiloso na cidade de Fortaleza.

2. ESTUDO DE CASO

2.1. Local da obra

A prova de carga estática (PCE) ocorreu em uma edificação residencial na cidade de Fortaleza, estado do Ceará. O empreendimento possui 130 unidades habitacionais, 2 por pavimento, distribuídas em 5 torres de 13 pavimentos tipos cada. O ensaio de PCE foi executado na área da Torre 5 (TECNOL, 2020).

2.2. Características do terreno da obra

O perfil estratigráfico do solo foi obtido através da sondagem SP-02, mais próxima ao ensaio PCE. Identificou-se, no nível do ensaio, uma camada de solo silte argiloso com lentes de areia, de consistência média a dura, cinza, amarelo e vermelho, variegado, com pedregulhos e concreções. Ademais, a cota de assentamento das fundações da Torre 5 era de 3,8 m (TECNOL, 2020). Na Figura 1 apresenta-se o perfil estratigráfico do solo.

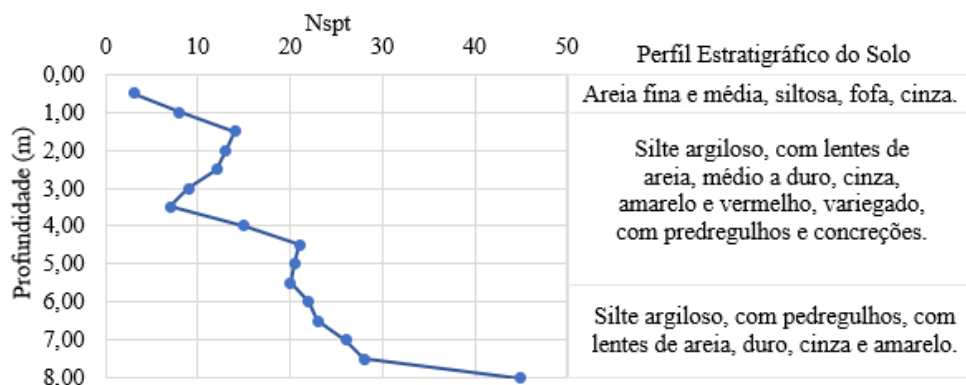


Figura 1 – Perfil estratigráfico do solo

2.3. Ensaio de prova de carga estática direta

No ensaio de PCE, a estrutura de reação utilizada foi um caminhão Volvo VM 270 (Figura 2). Os recalques foram lidos em extensômetros apoiados sobre a placa de área equivalente a 0,16 m². As cargas foram aplicadas empregando macaco hidráulico com 500 kN de capacidade.

No ensaio aplicaram-se dez estágios de carga com incrementos de tensão no solo equivalentes a 100 kPa até à tensão máxima de 1000 kPa. O descarregamento foi realizado em quatro estágios de 250 kPa cada. A curva carga-recalque obtida na prova de carga é apresentada na Figura 3. As características do ensaio e os resultados dos recalques são apresentadas no Quadro 1.

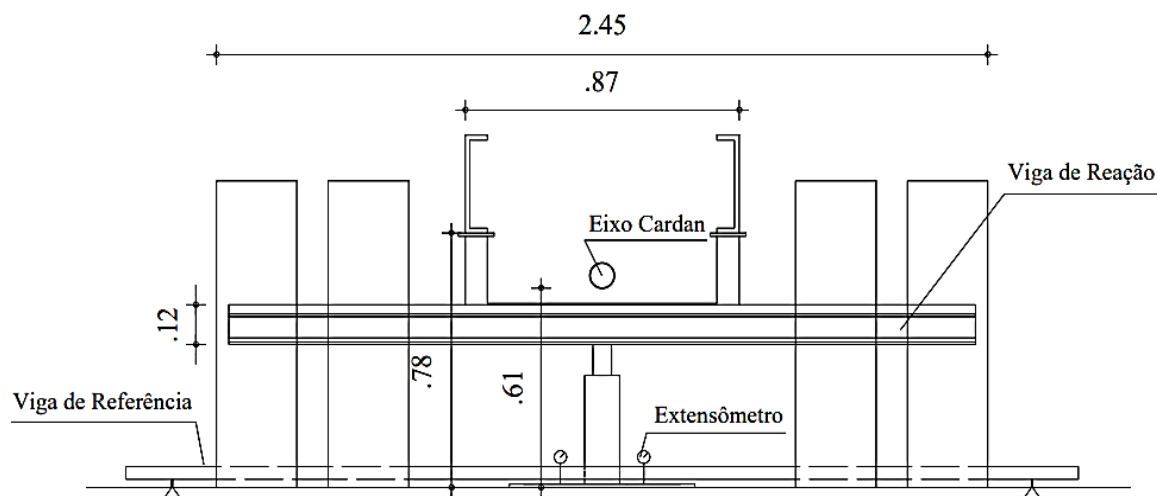


Figura 2 – Sistema de reação da prova de carga em placa (Tecnol, 2020)

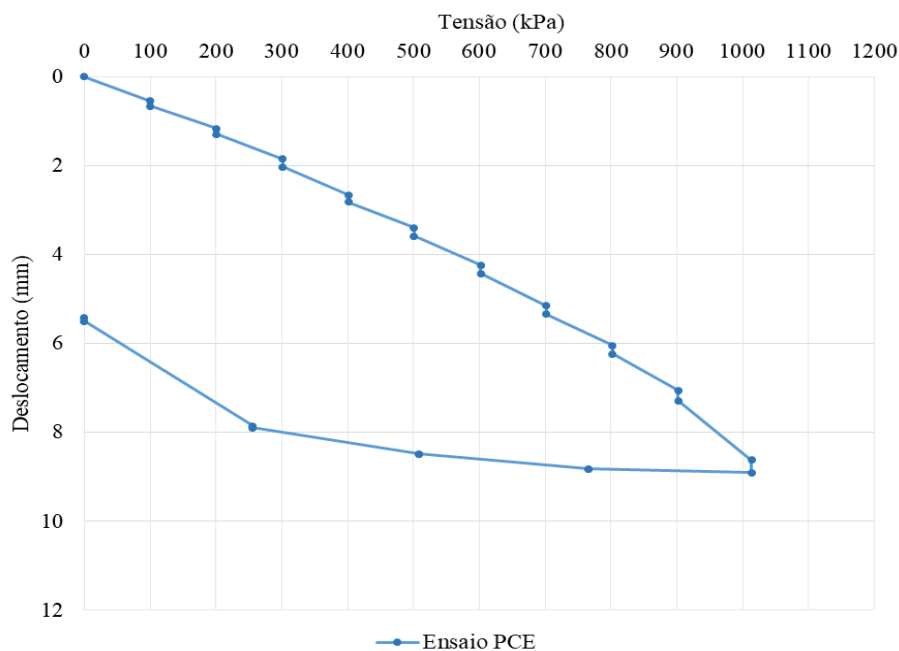


Figura 3 – Curva tensão *versus* deslocamento da prova de carga em placa

Quadro 1 – Características da prova de carga em placa

Descrição	Valor	Unidade
Diâmetro da Placa	450	mm
Área da Placa	0,16	m ²
Tensão de Trabalho	500	kPa
Tensão de Ensaio	1000	kPa
Cota do Ensaio (PCE)	7,008	m
Cota do furo do SP-02	10,996	m
Cota Sapata da Torre 5	3,80	m
Recalque Máximo	8,91	mm
Recalque Residual	5,42	mm

3. DESCRIÇÃO DA ANÁLISE NUMÉRICA

3.1. Software PLAXIS 2D

O *software* utilizado na análise numérica foi o PLAXIS, um programa de elementos finitos que foi desenvolvido com o objetivo de realizar análises de deformação, estabilidade e escoamento de águas subterrâneas em projetos de engenharia geotécnica. O *software* começou a ser desenvolvido em 1987 na Universidade Técnica de Delft em 1987 com a finalidade inicial de analisar aterros em solos moles das terras baixas da Holanda e, posteriormente, o programa foi estendido para diversas áreas da engenharia geotécnica. A primeira versão do PLAXIS 2D foi lançada em 1998 e em 2010 foi lançado o PLAXIS 3D.

No PLAXIS 2D, pode-se calcular tensões do solo, deformações, pressões, cargas e forças estruturais, fluxos de água e modelar comportamentos específicos de cada solo, analisando carregamentos e descarregamentos no solo. Ademais, pelo programa é possível gerar tabelas, gráficos e imagens para interpretação dos resultados dos

modelos. Para a análise do comportamento do solo, o PLAXIS 2D também apresenta diversos modelos constitutivos que podem ser empregados: Linear Elástico, Linear Elástico Perfeitamente Plástico (denominado como Mohr-Coulomb pelo *software*), Soft Soil, Hardening Soil e Cam-Clay.

3.2. Características do Modelo e do Solo

O modelo de comportamento do solo utilizado neste trabalho no PLAXIS 2D foi o linear elástico perfeitamente plástico, ou Mohr-Coulomb, que possui uma modelagem não linear e baseada nos parâmetros de resistência do solo. Para realizar a modelagem, é necessário definir os seguintes parâmetros: peso específico saturado (γ_{sat}), peso específico natural (γ_n), coeficiente de Poisson (ν), módulo de elasticidade (E), coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). O peso específico saturado (γ_{sat}) e peso específico natural (γ_n) foram definidos a partir de correlações com o ensaio SPT propostas por Godoy (1972), enquanto o coeficiente de Poisson (ν) foi estimado de acordo com Teixeira e Godoy (1996). O ângulo de atrito (ϕ) foi estimado a partir de correlação, utilizando os valores de índice de resistência a penetração do ensaio SPT (N_{SPT}) conforme proposto por Teixeira (1996), ao passo que o módulo de elasticidade (E_s) e a coesão (c) foram determinados a partir de retroanálises no PLAXIS 2D. A partir da Figura 1 e da estimativa da extensão do bulbo de tensões, pode-se determinar um N_{SPT} médio de 14 para a camada de solo de silte argiloso, na qual a fundação foi assentada e o teste de PCE executado.

3.3. Descrição da Malha

O PLAXIS 2D permite gerar automaticamente a malha de elementos finitos. Para modelagem do trabalho, optou-se por um modelo axissimétrico e elementos de 15 nós em formato triangulares quadráticos. Além disso, realizou-se um refinamento do tipo fino ao gerar a malha global do modelo.

3.4. Geometria da simulação numérica

Para simular o ensaio de prova de carga estática, definiu-se a geometria da placa com 0,45 m de diâmetro e aplicou-se uma tensão de 1000 kPa sobre a placa, conforme mostrado na Figura 4. Essa modelagem visou representar o ensaio realizado sobre terreno de fundação com as características descritas no Quadro 1.

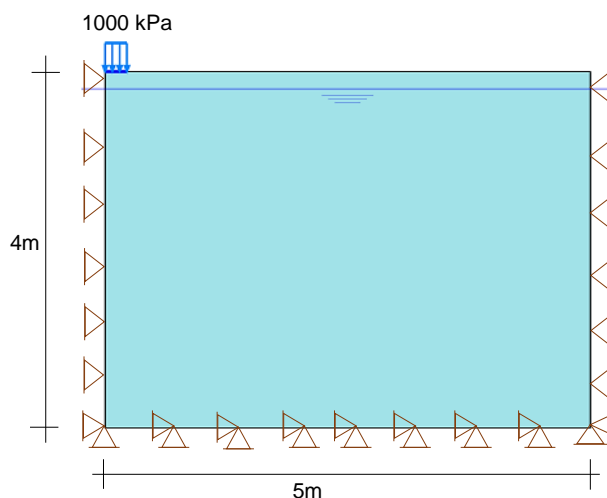


Figura 4 – Geometria e condições de contorno da simulação numérica

3.5. Etapas da retroanálise

A modelagem do problema consistiu inicialmente em definir os parâmetros geotécnicos com base na literatura e no perfil estratigráfico do solo. Posteriormente, averiguou-se qual valor de coesão (c) melhor se adequaria ao tipo de solo onde foi realizado o ensaio. Desta análise, notou-se que o valor de coesão da ordem de 1 kPa retratou de maneira satisfatória o comportamento geotécnico do material ensaiado. Definida a coesão, prosseguiu-se para verificação do módulo de elasticidade (E_s). Realizou-se, para esta etapa, uma retroanálise no PLAXIS 2D e definiu-se que módulos de elasticidade 12500 kPa (E_{s1}) e 15000 kPa (E_{s2}), apresentaram comparativamente mais similiaridade, quanto à curva carga-recalque, com o módulo de elasticidade decorrente da correlação de Teixeira e Godoy (1996), sendo 17500 kPa (E_{s3}). Então, comparou-se a curvas geradas por estes módulos com a curva tensão *versus* deslocamento da PCE mostrada na Figura 3. No Quadro 2, tem-se o resumo dos parâmetros utilizados na análise numérica.

Ademais, na Figura 5, pode-se verificar os resultados de deslocamentos gerados no PLAXIS 2D, mostrando o bulbo de tensões para a modelagem realizada. De acordo com Cintra et al. (2011), para efeitos práticos, em sapata circular ou quadrada a profundidade do bulbo de tensões pode ser considerada como 2B (duas vezes o tamanho da base da fundação) onde a tensão atingiria 10% do seu valor. Observa-se que, no modelo simulado, considerando a cota de assentamento da placa ensaiada, a profundidade, de fato, foi em torno de 2B, no caso 1 m. Ainda, acrescenta-se que no interior do bulbo de tensões se desenvolvem a superfícies potenciais de ruptura (Cintra et al., 2011).

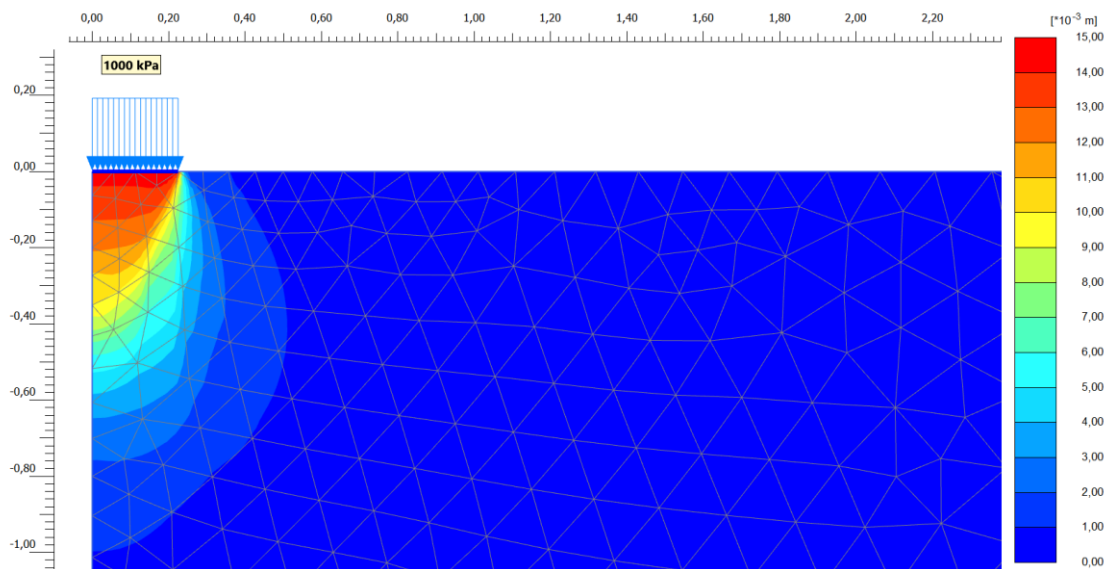


Figura 5 – Bulbo de deslocamentos

Quadro 2 – Resumo dos parâmetros usados no PLAXIS 2D

Descrição	Valor	Unidade	Método
N_{SPT}	14	-	Sondagem à percussão
v	0,3	-	Teixeira e Godoy (1996)
γ_{sat}	20	kN/m ³	Godoy (1972)
γ_n	19	kN/m ³	Godoy (1972)
ϕ	31,7	°	Teixeira (1996)
Coesão (c)	1	kPa	Retroanálise no PLAXIS
E_{s1}	12.500	kPa	Retroanálise no PLAXIS
E_{s2}	15.000	kPa	Retroanálise no PLAXIS
E_{s3}	17.500	kPa	Teixeira e Godoy (1996)

4. RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

Na Figura 6, apresenta-se a comparação das curvas tensão *versus* recalque empregando diferente módulos de elasticidade obtidos por retroanálise e por correlações com base no N_{SPT} , com a curva experimental.

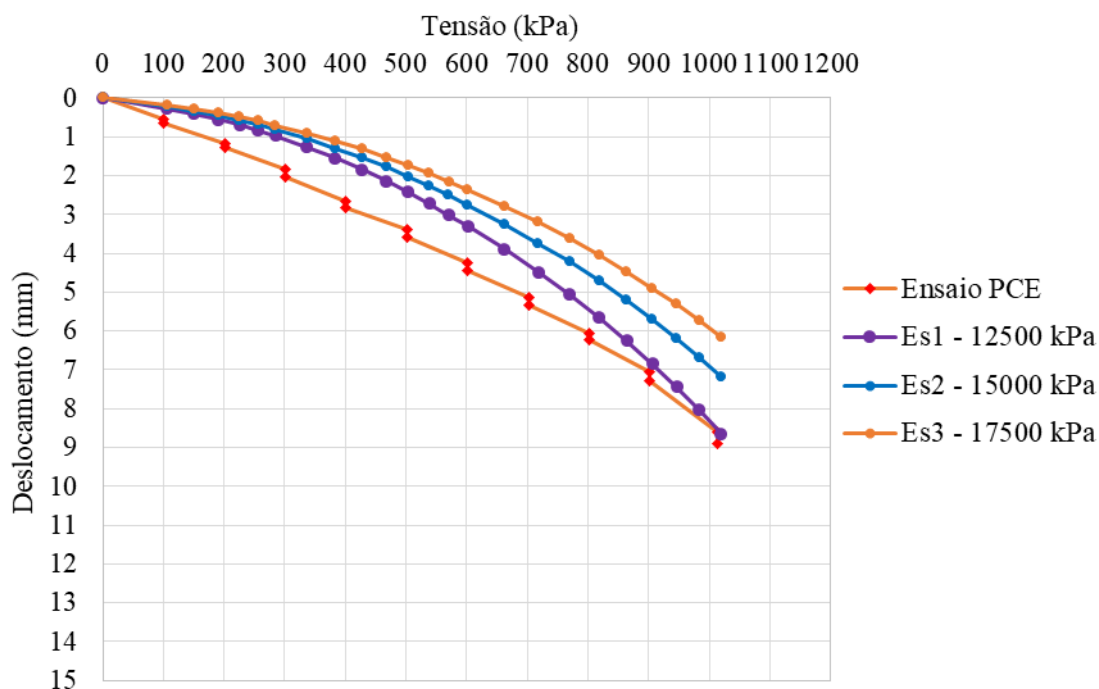


Figura 6 – Comparação das curvas carga-recalque numéricas e experimentais

Para verificar o deslocamento (δ) gerado no software e compará-lo com o deslocamento experimental do ensaio, buscou-se analisar as tensões quando estavam em diferentes estágios, no caso, em torno de 20%, 50%, 70% e 100% do seu valor. Desta forma, pode-se averiguar os resultados e encontrar diferenças percentuais entre os dados para fins de análise comparativa.

Nos Quadros 3 e 4 são evidenciados os resultados dos deslocamentos obtidos a partir das análises empregando o *software* PLAXIS 2D e os provenientes do ensaio de PCE.

Ademais, no Quadro 3, apresenta-se as diferenças percentuais entre os valores obtidos no software e o ensaio, para analisar o comportamento da fundação de forma numérica e experimental.

Quadro 3 – Deslocamentos e diferenças percentuais para diferentes estágios de tensão

Descrição	σ	δ	$\Delta\%$	σ	δ	$\Delta\%$	σ	δ	$\Delta\%$	σ	δ	$\Delta\%$
	(kPa)	(mm)		(kPa)	(mm)		(kPa)	(mm)		(kPa)	(mm)	
	20%			50%			70%			100%		
PCE		1,29	0%		3,59	0%		5,34	0%		8,91	0%
p/Es1		0,69	47%		2,42	33%		4,48	16%		8,64	-3%
p/Es2	201	0,57	56%	501	2,02	44%	702	3,73	30%	1014	7,20	19%
p/Es3		0,49	62%		1,73	52%		3,20	40%		6,17	31%

A partir da Figura 6, nota-se que a curva tensão *versus* recalque obtida da retroanálise utilizando o módulo de elasticidade E_{s1} apresentou melhor ajuste em comparação com a curva do ensaio. Destaca-se, ainda, menores diferenças percentuais entre os resultados dos deslocamentos das curvas experimentais e estimadas a partir de um módulo de elasticidade retroanalizado da ordem de 12500 kPa. Observa-se que as curvas obtidas a partir das simulações numéricas, de uma forma geral, subestimam os recalques nas mais diversas faixas de tensões, quando comparadas com as curvas experimentais obtidas na prova de carga em placa. Nota-se ainda que no trecho elástico das curvas tensão *versus* recalque, ou seja, referente as possíveis tensões de trabalho, as diferenças percentuais de estimativa de recalque variam entre 32 e 69% quando comparadas com os valores medidos de recalque. Contudo, em termos absolutos, identifica-se diferenças de recalque estimados e medidos para tensões de trabalho em magnitudes equivalentes a 0,71 e 1,88 mm, que apesar de indicarem diferenças porcentuais razoáveis, situam-se dentro de uma margem admissível em termos de valores de engenharia.

Verifica-se também que, para o solo estudado neste trabalho com o perfil estratigráfico indicado na Figura 1, quanto maior o módulo de elasticidade, menores foram os recalques estimados, conseqüentemente, nota-se maiores diferenças percentuais entre os resultados experimentais e numéricos, observando assim uma subestimação dos recalques a partir das simulações numéricas para o mesmo estágio de tensão verificado na prova de carga em placa.

Outros pesquisadores obtiveram estimativas de recalque satisfatórias empregando o mesmo modelo constitutivo para simulações numéricas de provas de carga em estaca e placa (Campos, 2017; Martins e Fagundes, 2020) em perfis estratigráficos arenosiltosos e argilo-arenosos. Observa-se que o modelo empregado neste trabalho pode conduzir a estimativas razoáveis do deslocamento em simulações de prova de carga em placa, apesar das limitações do modelo constitutivo empregado e da obtenção de parâmetros de entrada a partir de correlações com índice de resistência a penetração do ensaio SPT (N_{SPT}). Além disso, destaca-se a influência dos parâmetros de resistência do solo adotados, bem como da utilização de um módulo de elasticidade do solo representativo das condições de contorno e estado de tensões de campo.

5. CONCLUSÕES

Com base na simulação numérica do ensaio de PCE no *software* PLAXIS 2D, conclui-se que os resultados obtidos demonstraram estimativas aproximadas em comparação dados experimentais. Ademais, notou-se que a curva com o módulo de elasticidade da ordem de 12500 kPa apresentou comportamento similar e diferenças percentuais menores em relação à curva do ensaio. Indicando, portanto, que para o solo estudado, os parâmetros determinados por correlações semiempíricas e retroanálise mostraram-se satisfatórios.

Ainda, constata-se que a análise numérica por métodos de elementos finitos pode apresentar estimativas eficazes na análise e monitoramento de deslocamentos verticais em fundações diretas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade de Brasília (UnB), pela disponibilização da licença do *software* PLAXIS 2D para simulações numéricas e uso acadêmico, bem como a empresa Tecnologia em Concreto, Solo e Pavimentação (TECNOL) pela disponibilização dos dados de prova de carga em placa e de ensaios do tipo SPT.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2019a). NBR 6122. Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2019b). NBR 6489. Solo – Prova de carga estática em fundação direta. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2020). NBR 6484. Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- Campos, D. D. (2017). *Análise Numérica da Capacidade de carga de Sapatas isoladas*. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso superior em Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 60 p.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N., Albiero, J. H. (2011). *Tensão Admissível em Fundações Diretas*. São Carlos RiMa, p.142.
- Godoy, N. S. (1972). Notas de Aula-Fundações, Escola de Engenharia de São Carlos –USP. São Carlos, SP.
- Martins, P. F.; Fagundes, D. F. (2020). *Simulação Numérica de Ensaio de Prova de Carga Estática em uma Estaca Utilizando o PLAXIS 2D*. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 8 p.
- TECNOL - Tecnologia em concreto, solo e pavimentação (2020). Relatório de prova de Carga Estática direta sobre Terreno de fundação, PCE-01, Torre 05.
- Teixeira, A. H.; Godoy, N. S. (1996). *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: Pini. p. 227-264.

Teixeira, A. H. (1996). Projeto e execução de fundações. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE, São Paulo, v.1, p. 33-50.

Velloso, D.A.; Lopes, F.R. (2010). *Fundações: Critérios de projeto – Investigação do Subsolo – Fundações Superficiais*. São Paulo, p.583.