

SIMULAÇÃO NUMÉRICA NÃO LINEAR DE PROVA DE CARGA BIDIRECIONAL EM ESTACAS ESCAVADAS

Hemilly C. L. Fernandes

hemilly.fernandes@aluno.ufop.edu.br

Universidade Federal de Ouro Preto

Campus Universitário s/n Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro preto - MG, Brasil

Rose C. R. Elias

Leandro N. Duarte

rcre.1904@gmail.com

leandro.duarte@ufsj.edu.br

Universidade Federal de São João Del Rei

Campus Alto Paraopeba Rodovia MG 443 km 7, 36420-000, Ouro Branco - MG, Brasil

Rafael C. Barros

rafael.barros@ufop.edu.br

Universidade Federal de Ouro Preto

Campus Universitário s/n Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro preto - MG, Brasil

Abstract. For the foundation design development it is essential to determine the allowable load capacity and the prediction of the foundation elements displacements. Thus, it is known that the load test is a suitable way to establish the load-displacement characteristics. In this context, the bidirectional test is used for performance evaluation of in-situ molded piles by applying load to an expansive cell located within the pile. However, these geotechnical tests can present high cost and long execution process, which sometimes make their application unfeasible. Thus, these procedures can be represented by mathematical models, provided that the initial and boundary conditions of the problem are known. PLAXIS 3D, a software that uses the Finite Element Method, is intended for three-dimensional deformation analysis and stability in Geotechnical Engineering and can be used to simulate pile behaviour under bidirectional load tests. Therefore, this work proposes to perform a nonlinear numerical analysis of bidirectional load tests on drilled piles using the PLAXIS 3D software and the results are compared with those obtained through on-site tests, where a good approximation in the load-displacement curve can be observed.

Keywords: Geotechnics, Drilled piles, Foundations, Numerical simulations, Bidirectional test.

1 Introdução

Para o desenvolvimento de um projeto de fundações, sabe-se que, são imprescindíveis a determinação da capacidade de carga admissível e a previsão dos recalques dos elementos de fundação.

Segundo Decourt *et al.* [1], há um consenso na engenharia de fundações de que o ensaio de prova de carga constitui a maneira mais adequada para se estabelecer as características carga-recalque. Porém, esses ensaios não possuem uma utilização tão frequente devido ao desafio cada vez maior de reduzir o tempo de execução de obras, já que levam um longo tempo de execução, e pelo fator econômico, pois apresentam alto custo que impedem que sejam feitos em uma quantidade com validade estatística, gerando limitações de ordem técnica.

Esses ensaios geotécnicos, podem ser representados por modelos matemáticos definidos por equações diferenciais, desde que conhecidas as condições iniciais e de contorno do referido problema. Essas equações diferenciais são obtidas através da aplicação das leis e princípios fundamentais da natureza para um sistema, representando o balanço de massa, força e energia [2].

Em alguns casos, a previsão do comportamento pode ser alcançada pela solução exata destas equações em conjunto com condições de contorno impostas. Filho [2] também define que as soluções analíticas são compostas de duas partes: (a) uma parte homogênea e (b) uma parte particular. Em se tratando de modelagem numérica, o que define a solução de um problema é um procedimento aproximado que visa representar o comportamento real. Para tais procedimentos, existem vários softwares que utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF) na solução desses problemas, o que torna relevante o uso desta ferramenta pelo engenheiro na tarefa de realização de estudos de projetos de engenharia.

O MEF consiste em um procedimento numérico para se determinar soluções aproximadas de fenômenos que são descritos através de equações diferenciais parciais em determinadas condições, chamadas condições de contorno.

O principal objetivo deste trabalho é desempenhar simulações numéricas não-lineares de prova de carga bidirecional de estacas escavadas através do software PLAXIS 3D Foundation, em sua versão introdutória, destinado a análise tridimensional de deformação e estabilidade na engenharia geotécnica, buscando descrever de forma satisfatória, o comportamento da estaca durante o processo de aplicação da carga. Neste contexto, os resultados aqui obtidos foram confrontados com aqueles determinados em ensaio realizado no campo experimental da Universidade Federal de São João del Rei, Campus Alto Paraopeba, localizado na cidade de Ouro Branco – MG.

2 Referencial teórico

Engin *et al.* [3] modelaram duas provas de carga estáticas à tração em estacas escavadas instaladas em areias cimentadas a partir do software PLAXIS. Os resultados mostraram que os elementos modelaram bem o comportamento real das estacas, em específico a interação entre seus fustes e o solo. Os autores também modelaram uma prova de carga estática à compressão numa estaca escavada de grande diâmetro instalada em argilas sobre-adensadas, instrumentada com uma célula de carga em sua ponta. Os resultados apresentados também mostram que os elementos modelaram o comportamento real da estaca razoavelmente bem.

Almeida *et al.* [4] realizaram estudo sobre interação solo-estaca por meio da utilização do MEF, sendo simulado o comportamento para estacas de pequeno diâmetro executadas em concreto moldado no local, sem bloco de capeamento rígido e construídas por sistema utilizando trado mecânico helicoidal, estando sujeitas, exclusivamente, à ação de carregamentos verticais de compressão. Para tal, foram desenvolvidas simulações numéricas a partir do programa de elementos finitos SAP 2000, validadas neste estudo através de comparações com resultados de ensaios de provas de carga realizadas “in situ”. Neste estudo, comprovou-se que há convergências satisfatórias entre os resultados teóricos e os apurados por meio dos ensaios.

Freitas [5] estudou o efeito de instalação de estacas cravadas em areia em conjunto com o efeito de grupo, com objetivo de se quantificar a melhoria após a instalação desse grupo de estacas. Para a utilização desse procedimento, a autora propôs correlações para o módulo de Young do solo em função

da resistência à penetração N_{SPT} . Para a análise, foi utilizado o software PLAXIS calibrado através da reprodução de um caso de instrumentação de um grupo de estacas na argila rija de Londres. Os resultados das simulações, realizadas com parâmetros obtidos da literatura se ajustaram muito bem aos resultados experimentais, seja nos valores de recalque, seja nos diagramas de transferência de carga. A comparação dos resultados experimentais com os simulados numericamente sinaliza para o potencial do programa PLAXIS na reprodução do comportamento das estacas.

Carvalho *et al.* [6] compararam o valor da capacidade de carga em estacas escavadas obtidos em ensaios de provas de cargas estática com as cargas últimas determinadas através de métodos semi-empíricos e por meio de modelagem numérica no software PLAXIS. Os resultados apontaram uma boa aproximação entre os métodos propostos, e na utilização do software, obteve-se resultados mais precisos e seguros quando comparados aos métodos semi-empíricos.

Macedo *et al.* [7] analisaram fundações em radier estaqueado, em solo arenoso, realizando análises comparativas de provas de carga com auxílio do software PLAXIS. Com os resultados desse estudo, os autores perceberam uma satisfatória aproximação das curvas carga-recalque resultantes da plataforma numérica para todas as fundações simuladas.

Demais pesquisas sobre simulações numéricas de provas de carga podem ser vistos em Fontes [8] e Oliveira [9].

3 Prova de carga bidirecional

O ensaio de prova de carga estática através do método bidirecional foi criado no início da década de 80, pelo engenheiro civil Pedro Elísio Chaves Alves Ferreira da Silva, como uma forma de tornar o teste de capacidade de carga convencional mais seguro, rápido e econômico [10]. Este ensaio consiste basicamente na instalação das células de carga, previamente aferidas, dentro do fuste da estaca, engastadas na armação.

A instrumentação é feita por um tubo hidráulico ligado a uma bomba sob pressão, que se conecta à uma célula expansiva hidrodinâmica descartável, instalada ao longo do fuste da estaca. Este tubo é conectado a uma haste metálica, que fica apoiada no fundo da célula. Cria-se assim um gradiente hidráulico, possuindo-se um circuito fechado e um sistema estanque a cada estágio de pressão.

As células usam água em sua pressurização, o que possibilita o preenchimento das fissuras ocasionadas pelo ensaio bidirecional com o preenchimento da célula com calda de cimento. Com a entrada da calda de cimento, tem-se assim a saída de impurezas, visto que o sistema funciona em circuito fechado.

Silva [11] destacou que, a aplicação de carga numa célula colocada em estaca, solicita a parte superior do fuste com força que reage contra a parte inferior do mesmo, juntamente com a base. Este princípio elementar de ação e reação é mantido em equilíbrio, na medida em que a solicitação aumenta, até observar-se que uma dada pressão no manômetro da bomba dispara um dos deflectômetros (medidores de deslocamento). Isto indica a ruptura da parte superior ou inferior do elemento teste e permite constatar que, durante o deslocamento observado, a pressão no manômetro se mantém constante. A célula também permite deslocar grandes cargas, desde que, para isto, possa contar com áreas de seus cilindros compatíveis com as cargas de testes.

Wolney [10] relatou que o maior problema em relação as provas de carga em estacas está relacionado com o sistema de reação. A célula expansiva hidrodinâmica dispensa qualquer sistema externo de reação, comprimindo a parte de cima da estaca contra a parte de baixo, obtendo-se duas provas de carga. A parte superior refere-se a uma estaca de atrito puro, pois não tem nenhuma reação de ponta, enquanto a parte inferior é uma estaca convencional, com atrito lateral e de ponta.

Para realização da prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica, é necessário que a célula de carga, previamente aferida, seja instalada dentro do fuste da estaca e engastada na armação, como demonstrado na Figura 1.

Silva [11] citou que o ensaio bidirecional nos fornece três tipos de gráficos distintos. O primeiro fornece uma curva carga-recalque do topo (fuste) da estaca, o segundo uma curva carga-recalque da base (fuste + ponta) da estaca e o último uma curva carga-recalque da estaca, na qual se somam causa e efeitos.

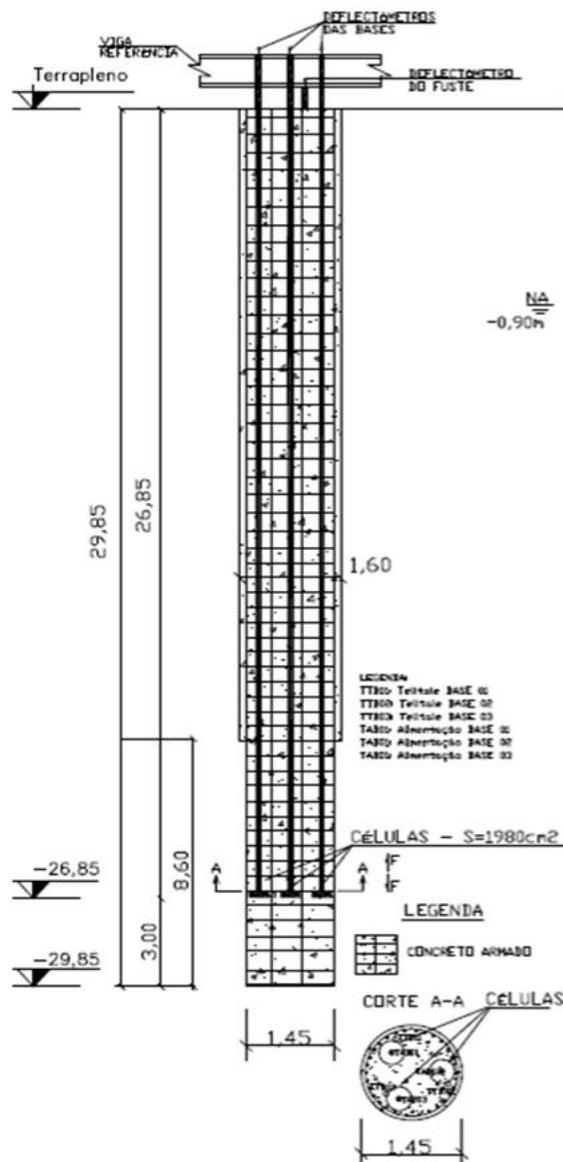


Figura 1. Esquemática do ensaio de prova de carga bidirecional [12]

4 Parâmetros utilizados na simulação

Através de correlações com os ensaios geotécnicos de campo, foram calculados parâmetros de resistência e deformabilidade do solo, a partir dos resultados obtidos do relatório de sondagem [12], seguindo como referência tabelas e estudos encontrados na literatura [13-17], que serviram de base para a entrada de dados na alimentação do modelo numérico.

Devido às limitações do software na versão introdutória, necessitou-se de algumas adaptações nos dados para compilação. Como não é possível trabalhar com mais de uma camada de solo, optou-se em considerar a média ponderada dos parâmetros utilizados.

4.1 Módulo de elasticidade

O Módulo de Elasticidade ou módulo de Young (E_S) é uma das constantes elásticas definidas pela Lei de Hooke, que governa o comportamento tensão \times deformação de materiais isotrópicos, elásticos e lineares. As demais constantes são o módulo cisalhante (G) e coeficiente de Poisson (ν).

Foi realizado o cálculo do E_s do solo pelo método de Teixeira & Godoy [13], que estabelece a seguinte relação para fundações diretas:

$$E_s = \alpha K N_{SPT} \quad (1)$$

onde α é o coeficiente que correlaciona a resistência de ponta do cone (q_c) com o *Standard Penetration Test* (SPT), K é um coeficiente determinado em função do tipo de solo e N_{SPT} é o índice de resistência à penetração do solo que corresponde ao número de golpes necessários para a cravação de 30 cm de um amostrador padrão de sondagem a percussão. Os coeficientes K e α , ambos adimensionais, foram extraídos de Monteiro [14], que estabelece correlações para uma gama de tipologias de solos.

Estes parâmetros foram calculados juntamente com a média ponderada do N_{SPT} de cada camada de solo conforme relatório de sondagem. Os dados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Cálculo do módulo de elasticidade

Camada	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Tipo de Solo	Rachão	Argila Plástica pouco Arenosa	Areia argilosa	Silte Arenoso
Classificação	Areia	Argila arenoso	Areia argilosa	Silte argilo-arenoso
Profundidade (m)	1,25	2,10	1,85	22,4
Média Ponderada N_{SPT}	3,21	3,21	11	51,026
α	2,1	3,2	2,8	3,2
K	7,3	4,4	5,4	4,5
E_s (kN/m²)	4.920,93	4.519,68	16.632,0	73.477,44
Es total = 61.315,45 kN/m²				

4.2 Coeficiente de Poisson

O cálculo do coeficiente de Poisson (ν) foi determinado com base nos valores sugeridos por Teixeira & Godoy [13], correlacionados com a média ponderada do N_{SPT} obtido do relatório de sondagem [12]. Os resultados para o cálculo do ν são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Cálculo do coeficiente de Poisson

Camada	Classificação	ν
Camada 1	Areia pouco compacta	0,2
Camada 2	Argila saturada	0,45
Camada 3	Areia compacta	0,4
Camada 4	Silte	0,4
$\nu = 0,40$		

4.3 Coesão e ângulo de atrito

A coesão (c) é definida pela interação físico-química real entre partículas do solo e o ângulo de atrito (ϕ), é formado pelo eixo das tensões normais pela tangente à circunferência de Mohr, representativa das resistências ao cisalhamento da rocha, sob diferentes tensões normais.

Os parâmetros de c e ϕ foram determinados com base em Teixeira & Godoy [13] e Cintra *et al.* [15], respectivamente, conforme as correlações:

$$c = 10N_{SPT} \quad (2)$$

$$\phi = 28^\circ + 0,4N_{SPT} \quad (3)$$

Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Cálculo da coesão e ângulo de atrito do solo

Camada	Média		
	Ponderada N_{SPT}	c (kPa)	ϕ (°)
Camada 1	3,21	32,1	29,28
Camada 2	3,21	32,1	29,28
Camada 3	11,0	110,0	32,4
Camada 4	51,026	510,26	48,41
		$c = 425,39$ kPa	
		ϕ total = 45 °	

4.4 Peso Específico

O peso específico natural (γ) é dado pela relação entre o peso das partículas e o seu volume, foi determinado através dos valores típicos encontrados nos estudos de Holtz & Kovacs [16], onde se obteve os valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Cálculo do peso específico

Camada	Peso Específico (kN/m ³)
Argila Plástica pouco Arenosa	12,5 – 17,5
Areia Argilosa	13,5 – 20,5
Silte Arenoso	11,5 – 17,5
$\gamma = 17,5$ kN/m³	

4.5 Índice de Vazios

O índice de vazios (e) é a relação entre o volume de vazios e o volume de partículas sólidas. O parâmetro de índice de vazios foi obtido através dos valores típicos sugeridos por Benjamin K. Hough [17], correlacionados com os tipos de solos apresentados pelo relatório de sondagem [12]. Devido às limitações do software na versão introdutória, onde só é possível trabalhar com, apenas, uma camada de solo, considerou-se a camada de Silte Arenoso, que apresenta a maior profundidade, para se obter esse parâmetro. O valor utilizado na simulação foi de 0,75.

4.6 Parâmetros do concreto armado

Na falta de ensaios ou valores fornecidos, o módulo de elasticidade do aço em estudo foi de 200 GPa, conforme orienta a NBR 6118 [18]. Adotou-se, também, 25 kN/m³ para o peso específico do concreto armado.

4.7 Resistência lateral e de ponta da estaca

Adotou-se, baseado nos estudos de Cintra *et al.* [15] como resistência unitária por atrito lateral para a estaca de concreto armado, 300 kN/m e, como resistência de ponta, 9755 kN.

5 Modelagem numérica computacional

O PLAXIS foi desenvolvido para análises de problemas geotécnicos com base no MEF. Neste programa, os materiais são representados por elementos ou zonas de tal forma que a malha gerada pode se adequar perfeitamente às condições de contorno do problema em questão. As malhas de elementos finitos são geradas automaticamente, considerando-se as restrições impostas pela geometria do problema.

Segundo Brinkgreve *et al.* [19] o PLAXIS é um programa de elementos finitos tridimensional cujo objetivo principal é a realização de análises de deformação e de estabilidade para vários tipos de estruturas de fundações e escavações em solos e rochas.

Foi realizada, no PLAXIS, uma modelagem numérica de prova de carga estática bidirecional em estacas escavadas com 1,45 m de diâmetro e comprimento de fuste de 29,85 m. De início, foram especificadas as propriedades geométricas da estaca estudada e os parâmetros geotécnicos apresentados na Seção 3.2 para o solo. Em seguida, foi escolhido o modelo constitutivo dos materiais, adotando-se para o solo, o modelo de Mohr-Coulomb, considerando comportamento drenado. Para o concreto armado, foi escolhido o modelo linear-elástico.

As condições de contorno devem ser definidas de forma que os limites do cubo modelado, considerados supostamente não deslocáveis, não causem interferência no bulbo de tensões gerados pelo carregamento na estaca. Para isso, foram adotados os limites equivalentes a vinte vezes o diâmetro da estaca para o plano horizontal, em ambas as direções, e uma profundidade de extrusão da malha tridimensional equivalente a 2 vezes o comprimento da estaca, conforme se pode observar na Figura 2. Tais valores foram definidos conforme estudos realizados por Almeida *et al.* [4].

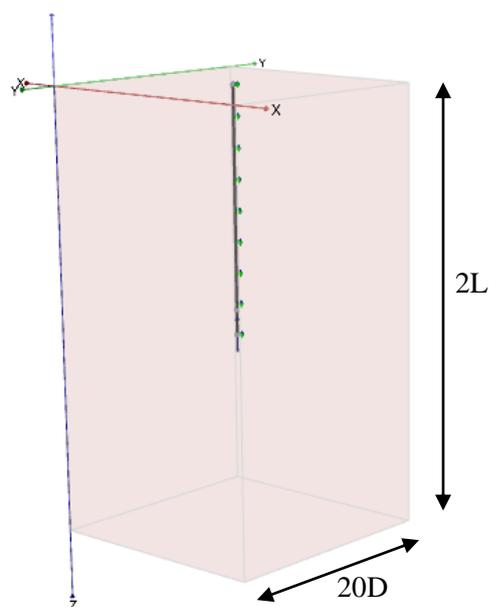


Figura 2. Geometria do modelo estudado

A discretização utilizada para a geração da malha de elementos finitos no PLAXIS são os elementos tetraédricos de 10 nós. Além disso, o comportamento da interação da estrutura com o solo é simulada através de elementos de interface de 12 nós.

A estaca foi simulada com elementos de viga denominados *embedded pile* (Figura 3). O elemento *embedded pile* representa uma estaca composta por elementos de viga e que pode ser posicionado em qualquer direção na massa de solo. A interação com o subsolo é feita através de elementos especiais de interface e um modelo elasto-plástico é definido para descrever o seu comportamento. Segundo o manual referencial do PLAXIS [19], este tipo de seleção para modelagem de estaca (*embedded pile*) deve ser uma opção para estacas que envolvam pouca perturbação na região de solo em seu entorno, isto é, deve ser usada preferencialmente para estacas escavadas. Foram fornecidos os valores de atrito lateral e de ponta conforme Seção 4.7.

A interação entre o topo da estaca e o solo não é diretamente acoplada ao material, não sofrendo portanto restrições ao deslocamento no topo mas tendo a interação nos elementos de interface presentes. Um modelo elasto-plástico é definido para descrever o comportamento desta interface. Tanto para a resistência por atrito quanto para a resistência de ponta, um critério de falha é definido para diferenciar entre um comportamento elástico da interface e um comportamento plástico [5].

Adicionalmente, o carregamento foi aplicado por meio de uma carga concentrada vertical direcionada para cima de 8546,5 kN, localizada na base do fuste a 3,0 m da base da estaca.

6 Análises e discussões

Foram realizadas simulações numéricas de uma prova de carga estática bidirecional de uma estaca escavada com 1,45 m de diâmetro e comprimento de fuste de 29,85 m, todas executadas em concreto. Nas simulações o solo foi discretizado com 17729 elementos tetraédricos de 10 nós, com 3 graus de liberdade por nó. A estaca foi simulada com 47 elementos de viga denominados *embedded pile*.

A carga máxima aplicada na estaca foi de 8546,5 kN conforme consta na tabela de carregamento do ensaio realizado no campo experimental, que pode ser vista em Silva [12]. A Figura 3 apresenta tridimensionalmente vistas em transparência do modelo usado para a análise.

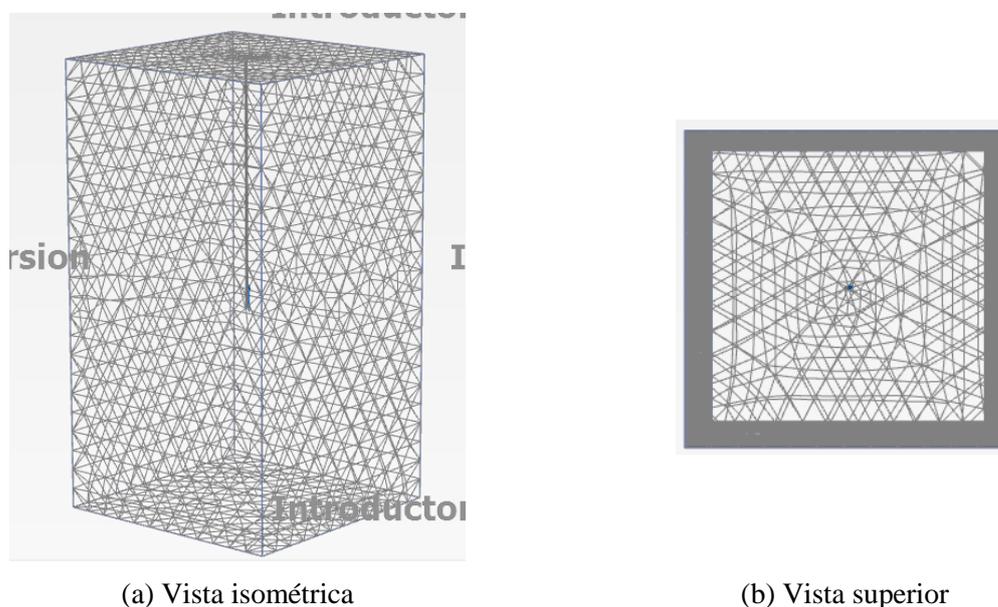


Figura 3. Vistas em transparência do modelo

Cabe ressaltar ainda que as simulações foram realizadas com carregamento rápido, com apenas um estágio, atingindo a carga máxima de 8546,5 kN.

A seguir, serão apresentadas as respostas resultantes da carga máxima aplicada no fuste da estaca, aplicada verticalmente na base da mesma.

Inicialmente, foi realizada a análise numérica aplicando-se os parâmetros apresentados na Seção 4, obtidos através das correlações. O resultado da primeira simulação (S1) está ilustrado na Figura 4.

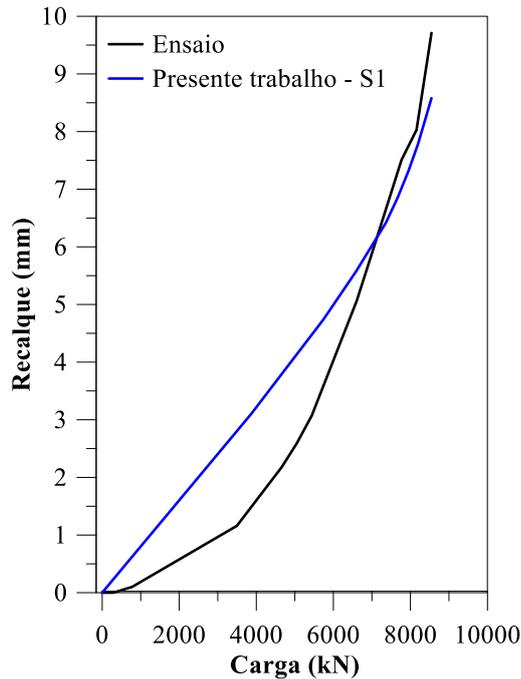


Figura 4. Curva carga x recalque da primeira simulação

Como demonstrado, o resultado da primeira simulação do modelo, considerando os parâmetros calculados pelas correlações, não se aproximaram de forma satisfatória do resultado do ensaio de prova de carga realizado no campo experimental.

Desta forma, pelo fato da versão introdutória do software apresentar limitações e também pelos parâmetros terem sido obtidos através de correlações, foi realizado um estudo paramétrico na tentativa de se melhorar os resultados do modelo, variando-se os parâmetros E , c , ϕ , resistência de ponta e lateral da estaca, conforme discriminado na Tabela 5. Os resultados deste estudo encontram-se representados, graficamente, na Figura 5a.

Tabela 5. Dados utilizados no estudo paramétrico

Simulação	γ (kN/m^3)	e	E (kN/m^2)	ν	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	Resistência lateral da estaca (kN/m)	Resistência de ponta da estaca (kN)
S1	17,5	0,75	61.315,45	0,40	425,39	45	300	9755
S2	17,5	0,75	83.916,00	0,40	250,00	35	300	9755
S3	17,5	0,75	83.916,00	0,40	24,17	70	300	9755
S4	17,5	0,75	100.000,00	0,40	100,00	40	300	4500
S5	17,5	0,75	120.000,00	0,40	100,00	35	300	4500
S6	17,5	0,75	120.000,00	0,40	100,00	35	250	9755
S7	17,5	0,75	120.000,00	0,40	100,00	35	280	4500
S8	17,5	0,75	120.000,00	0,40	30,00	35	270	9755

Analisando-se os resultados do estudo paramétrico, a curva carga x recalque obtida na modelagem realizada que melhor se aproximou da curva do ensaio de prova de carga estática bidirecional realizado em campo foi a S8, como evidenciado na Figura 5b.

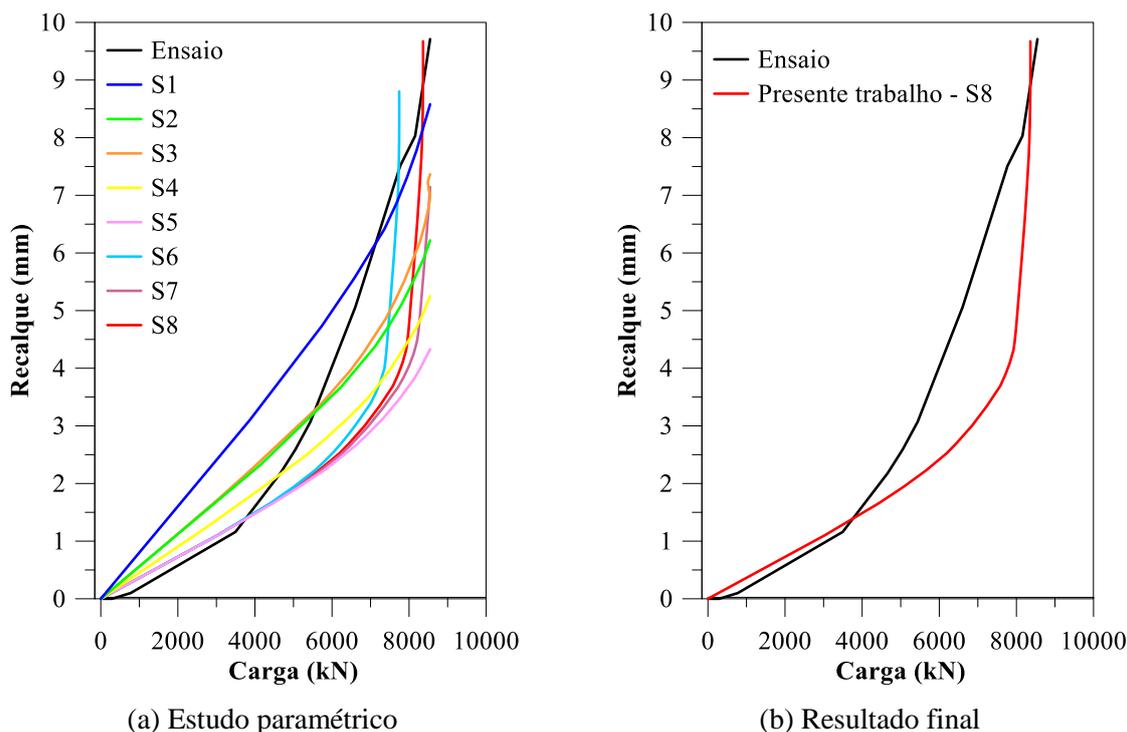


Figura 5. Curvas carga x recalque

Pode-se observar que, mesmo utilizando-se a versão introdutória do software, o modelo apresentou boa aproximação para valores iniciais de carregamento (região definida entre 0 a 4000 kN), caracterizando o regime elástico do modelo, bem como uma convergência satisfatória em relação ao recalque total da estaca no final do ensaio.

7 Conclusões

As modelagens numéricas realizadas no software PLAXIS, utilizando os parâmetros geotécnicos correlacionados com os resultados do ensaio de sondagem, bem como aqueles definidos no estudo paramétrico, representaram, de forma satisfatória, o comportamento da estaca para valores iniciais de carregamento, assim como o resultado final do recalque total sofrido pela estaca.

Para o regime elástico, os valores de recalque alcançados na simulação numérica se aproximaram dos resultados encontrados no ensaio de prova de carga, ou seja, para uma carga igual a 4000 kN, o deslocamento em ambos os casos foi de aproximadamente 1,5 mm. Por fim, vale destacar que o modelo ainda está passando por processos de refinamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UFOP/PROPP, UFSJ e a CAPES por todo o apoio dispensado durante a realização desse trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] Decourt, L. et al. Análise e Projeto de fundações profundas. *Fundações, Teoria e Prática*. Ed. Pini/ABMS/ABEF. Cap 8, p. 265-327, 1996.
- [2] Filho, F. C. S. Modelagem de Problemas de Engenharia: Solução de Equações Diferenciais Parciais

- Pelo Método dos Elementos Finitos, *Revista Tecnológica de Fortaleza*, Fortaleza, Vol. 26, n. 2, p. 134-144, 2005.
- [3] Engin H. K.; Septanika, E. G.; Brinkgreve, R. B. J. Improved embedded beam elements for the modelling of piles. *Proceedings of the 10th International Symposium on Numerical Models in Geotechnical Engineering - NUMOG X*, Rhodes, Greece, April, 2007.
- [4] Almeida, R.; Pinheiro, R. J. B.; Soares, J. M. D.; Nienov, F. A. Análise Numérica de Estacas Escavadas Utilizando-se o Método dos Elementos Finitos, *Engenharia Estudo e Pesquisa*, Santa Maria, Vol. 10, n. 1, p. 28-38, 2010.
- [5] Freitas, A. C. Contribuição ao estudo do efeito tridimensional de instalação e de grupo em estacas cravadas em areias, Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 232 p, 2010.
- [6] Carvalho, F. L.; Marinho, C. A.; Oliveira, T. M.; Coelho, H. P.; Silva, T. P.; Sousa, D. H. S. Comparativo da Capacidade de Suporte de Estacas Escavadas sob Ação de Carregamento Axial, *Anais do Geocentro*, Goiânia – GO, p. 365-370, 2017.
- [7] Macedo, J. W. N.; Neto, O. F.; Soares, W. C.; Coutinho, R. Q.; Cunha, R. P. Análise Numérica de Radier Estaqueado em Solo Arenoso do Nordeste do Brasil, *Anais do Geocentro*, Goiânia – GO, p. 101-106, 2017.
- [8] Fontes, G. A.; Sousa, D. H. S.; Duarte, L. N. Retroanálise do Comportamento de Fundação do Tipo Sapata Estaqueada, Utilizando Análise Não Linear por Métodos Numéricos, *Anais do Geocentro*, Goiânia – GO, p. 479-483, 2017.
- [9] Oliveira, F. S. Análise Numérica de Experimento Para Avaliação dos Efeitos de Sobrecargas Assimétricas em Estacas, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 369 p, 2015.
- [10] Wolney, Dellana. Provas de Carga Estática com Célula Expansiva Hidrodinâmica, *Revista Fundações & Obras Geotécnicas*, Brasil, Ano 4, n. 36, p. 24-32, 2013.
- [11] Silva, P. H. C. A. F. Célula Expansiva Hidrodinâmica – Uma Nova Maneira de Executar Provas de Carga, Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, COBRAMSEG, Porto Alegre – RS, 1986.
- [12] Silva, P. H. C. A. F. Relatório Técnico de Ensaio de Prova de Carga Bidirecional, Arcos Engenharia, Belo Horizonte – MG, 2013.
- [13] Teixeira, A. H.; Godoy, N.S. Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. *Fundações: Teoria e prática*, Hachich et al. (editores). Ed. Pini, São Paulo, Cap. 7, p.227- 264, 1996.
- [14] Monteiro, P. F. Capacidade de carga de estacas – método Aoki-Velloso, Relatório interno de Estacas Franki Ltda, 1997.
- [15] Cintra, J. C. A.; Aoki, N.; Albiero, J.H. *Fundações diretas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 104 p, 2011.
- [16] Holtz, R. D.; Kovacs, W. D. *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice Hall, Englewood, New Jersey, USA, 733 p, 1981.
- [17] Hough, B. K. *Basic Soils Engineering*. Ronald Press Co, New York, NY, USA, 513 p, 1957.
- [18] NBR 6118. *Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.
- [19] Brinkgreve, R. B. J. *et al.* Plaxis 3D Foundation. Version 2. Netherlands: Plaxis BV, 5v, 2007.