

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Modelagem Numérica de uma Estaca Prensada e Concretada *in situ* Instalada em um Perfil de Solo Tropical

Bismarck Chaussê Oliveira

Mestrando, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, bismarckchausse@discente.ufg.br

Maurício Martines Sales

Professor Titular, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, mmartines@ufg.br

Renato Resende Angelim

Professor Adjunto, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, angelim@ufg.br

Luiz Carlos Galvani Junior

Engenheiro Civil, SETE Engenharia, Goiânia, Brasil, luizgalvanijr@gmail.com

RESUMO: A instalação de estacas de grande deslocamento, tais como as estacas prensadas e concretadas *in situ* (PCIS), altera a densidade e o estado de tensões do material adjacente à estaca. As mudanças induzidas pelo procedimento executivo desses elementos influenciam diretamente seu comportamento sob a ação de cargas externas, de modo que a correta modelagem numérica dessas estruturas prescinde da consideração desses efeitos. Nesse sentido, esse trabalho se propõe a simular numericamente uma prova de carga estática à compressão conduzida em uma estaca PCIS instrumentada e instalada em um perfil de solo tropical. O comportamento do solo é descrito com o modelo constitutivo *Hardening Soil*. As análises foram realizadas no *software* de elementos finitos Plaxis 2D. Foi empregada uma abordagem baseada nos conceitos de expansão de cavidade cilíndrica que permite incorporar os efeitos de instalação dessas estacas suprimindo distorções excessivas da malha de elementos finitos. Verificou-se que as previsões de recalques obtidas com a abordagem numérica adotada foram razoáveis. Em termos de capacidade de carga o modelo foi bastante eficaz na obtenção da carga de ruptura e das resistências lateral e de ponta da estaca. Dadas as limitações do método dos elementos finitos em sua formulação tradicional na análise de problemas de grandes deformações, considera-se que a abordagem numérica empregada foi satisfatória na consideração dos efeitos de instalação de estacas de deslocamento.

PALAVRAS-CHAVE: Efeitos de instalação, Análise numérica, Elementos finitos, Solos tropicais, Estacas de deslocamento.

ABSTRACT: The installation of full displacement piles, such as driven cast-in-situ piles (DCIS), affects the density and stress conditions in the surrounding soil. The changes induced by the technology of pile installation directly influence its behavior under external loads, so that the correct numerical modeling of these structures must considerate these effects. In this sense, this paper aims to numerically simulate a static load test on an instrumented DCIS pile installed in a tropical soil profile. The behavior of the soil is described with the *Hardening Soil* constitutive model. Analyzes were performed using the finite element software Plaxis 2D. An approach based on the concepts of cylindrical cavity expansion was employed, which allows incorporating the installation effects of these piles suppressing excessive distortions in the finite element mesh. It was found that the obtained settlement with the numerical approach adopted were reasonable. In terms of load capacity, the model was very effective in obtaining the total load, the shaft friction, and the base resistance of the pile. Taking into account the limitations of the classical finite element method in the analysis of large deformation problems, it is considered that the numerical approach employed was satisfactory in considering the installation effects of displacement piles.

KEYWORDS: Installation effects, Finite Element, Numerical analysis, Tropical soils, Displacement piles.



1 Introdução

O comportamento de um sistema de fundação é diretamente influenciado pelos efeitos que seu procedimento executivo induz ao solo. Nesse sentido, é possível agrupar fundações em estacas em três categorias: estacas sem deslocamento; estacas de pequeno deslocamento; e estacas de grande deslocamento. Os efeitos observados vão depender de fatores como o procedimento de instalação da estaca e o tipo e estado do solo, mas de modo geral, os procedimentos executivos do primeiro grupo tendem a causar um alívio das tensões do solo. Já a instalação de estacas de deslocamento tende a provocar uma densificação do solo adjacente ao fuste e abaixo da base desses elementos, proporcional à magnitude do deslocamento induzido.

As estacas prensadas e concretadas *in situ* (PCIS) são um tipo de fundação profunda que devido ao seu procedimento executivo são classificadas como estacas de grande deslocamento, mas compartilham alguns aspectos com estacas sem deslocamento, como a concretagem *in situ* e a consequente superfície rugosa gerada na interface solo-estaca (FLYNN; MCCABE, 2016).

Dentre os possíveis métodos de análise do desempenho de fundações, a modelagem numérica configura-se como uma poderosa ferramenta de previsão e compreensão da complexa interação solo-estrutura. No que tange à análise de estacas, é fundamental que os efeitos de instalação sejam incorporados na modelagem. Cumprir este requisito pode ser uma tarefa complexa no caso de estacas de grande deslocamento. Por ser tratar de um problema que envolve deformações consideráveis na massa de solo, nem todo método numérico disponível é adequado para análise. A exemplo, o método dos elementos finitos (MEF) em sua abordagem Lagrangiana tradicional apresenta limitações no dimensionamento desses elementos devido a distorções da malha de elementos finitos, que resultam em soluções imprecisas ou divergentes (ENGIN; BRINKGREVE; VAN TOL, 2015).

Existem métodos mais apropriados para a análise de problemas de grandes deformações, tais como o método dos elementos discretos, o método do ponto material e até mesmo o método dos elementos finitos, com formulação Lagrangiana-Euleriana arbitrária e Euleriana-Lagrangiana acoplada. Apesar da eficiência desses métodos em simular a instalação de estacas de deslocamento, o MEF tradicional requer uma demanda computacional menor e é bastante difundido e utilizado na prática da engenharia geotécnica. Todavia, dadas suas limitações, os efeitos de instalação precisam ser considerados de forma indireta ou idealizados. Há diversos trabalhos nesse sentido, que recorrem a abordagens variadas para incorporação dos efeitos de instalação de estacas de deslocamento via MEF (SAID; DE GENNARO; FRANK, 2009; KRASINSKI, 2014; ENGIN; BRINKGREVE; VAN TOL, 2015; SCHMÜDDERICH *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o presente trabalho analisa o comportamento de uma estaca PCIS instalada em um perfil de solo tropical por meio de uma abordagem numérica baseada nos conceitos de expansão de cavidade cilíndrica via método dos elementos finitos tradicional.

2 Caso Analisado

2.1 Características do Perfil Geotécnico

A prova de carga estática à compressão analisada foi realizada no Campo Experimental da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás, localizado na cidade de Goiânia, Goiás. O perfil geológico da área é composto por uma camada superficial de solo tropical transportado altamente laterizado sobreposta a uma camada de solo residual de alteração de micaxisto.

A análise tátil-visual e o perfil de sondagem SPT obtido por Rezende e Rocha (2020) e apresentado na Figura 1 revelam que o primeiro metro do perfil de solo apresenta maior resistência que as camadas subsequentes (até 3,5 m), o que indica uma camada superficial mais ressecada e altamente intemperizada. O nível d'água não foi encontrado na ocasião do ensaio. No campo experimental foram também realizados ensaios pressiométricos do tipo Ménard (PMT) nas profundidades de 0,5, 1,5, 2,5, 3,5, 4,5 e 5,5 m (MACHADO, 2020).

Nascimento (2019) determinou a distribuição granulométrica (realizada com e sem defloculante na fase de sedimentação) e a classificação MCT (conforme o método expedito da pastilha) do perfil de solo do campo experimental (Figura 1). Verifica-se que o perfil é predominantemente arenoso e laterítico, com alto teor de



agregação das partículas de argila e presença de pedregulhos. A partir da profundidade de 7,0 m o solo perde o caráter laterítico, sugerindo o início do horizonte saprolítico do perfil.

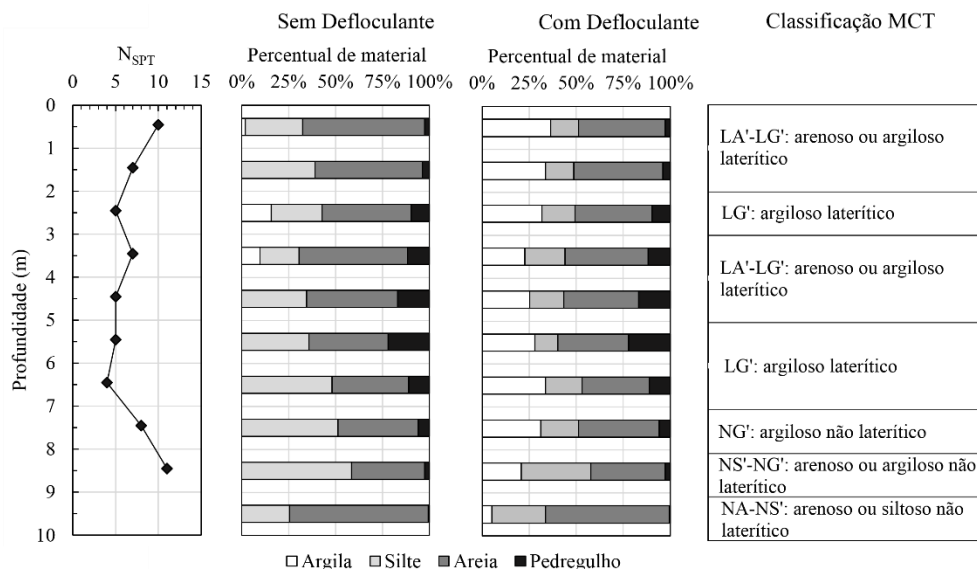


Figura 1. Perfil de sondagem SPT, distribuição granulométrica e classificação MCT do perfil de solo.

2.2 Características da Estaca

A estaca PCIS possui 165,1 mm de diâmetro e 3,5 m de comprimento e foi instrumentada com extensômetros elétricos de resistência posicionados a 100 mm do topo e da base da estaca. O procedimento executivo (Figura 2) se inicia pelo macaqueamento de um tubo metálico de ponta fechada de 165,1 mm de diâmetro externo. Após a extração do tubo, a armadura com os extensômetros é posicionada na cavidade anteriormente formada e então realiza-se a concretagem. Ressalta-se que houve uma escavação superficial de 0,50 m antes da instalação da estaca, haja vista a grande quantidade de matéria orgânica presente nesta camada.

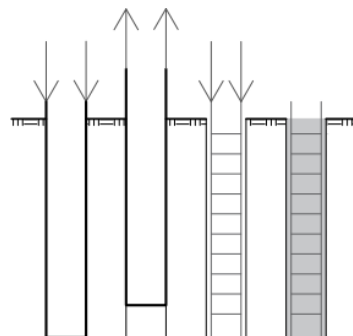


Figura 2. Processo executivo de estacas PCIS.

3 Modelagem Numérica

3.1 Descrição do Modelo

A análise numérica foi realizada no *software* de elementos finitos Plaxis 2D. Na modelagem do problema foi utilizado um modelo axissimétrico bidimensional. O domínio possui limites lateral e inferior iguais a $3L$ e $4L$ (L = comprimento da estaca), respectivamente, definidos por meio de análise de sensibilidade. A malha é composta por elementos triangulares de 15 nós e sua densidade também foi determinada por meio de análise de sensibilidade, possuindo maior refinamento na região próxima à estaca (Figura 3).



Para a correta modelagem da interação solo-estrutura são utilizados elementos de interface ao longo do fuste e da base da estaca. O comportamento da interface é descrito por um modelo elastoplástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Um dos fatores que controlam esses elementos é o fator de redução de resistência na interface (R_{inter}), que reduz a coesão e o ângulo de atrito do solo na interface solo-estaca, o que possibilita capturar, por exemplo, uma possível degradação do atrito lateral devido à instalação da estaca.

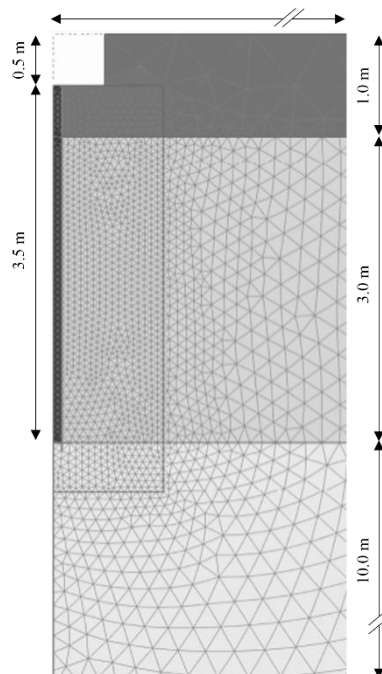


Figura 3. Discretização da malha do modelo numérico.

3.2 Modelo Constitutivo e Definição dos Parâmetros do Solo

O comportamento do concreto é descrito por um modelo linear elástico, cujos parâmetros são: o peso específico ($\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$); o coeficiente de Poisson ($\nu_c = 0,2$); e o módulo de deformabilidade ($E_c = 21,2 \text{ GPa}$).

O comportamento do solo é descrito pelo modelo constitutivo elasto-plástico *Hardening Soil* (HS). Este modelo requer onze parâmetros de entrada, que podem ser divididos entre parâmetros de resistência, de rigidez e avançados. A primeira categoria compreende a coesão (c), o ângulo de atrito interno (ϕ) e o ângulo de dilatância (ψ) do solo. Os parâmetros de rigidez são o expoente m , que relaciona o nível de tensão e a deformabilidade do solo, e os módulos de deformabilidade de referência relacionados ao carregamento desviatório primário (E_{50}^{ref}), à compressão primária (E_{oed}^{ref}) e ao recarregamento/descarregamento (E_{ur}^{ref}).

Os parâmetros avançados do modelo HS são a tensão de referência (p^{ref}), o coeficiente de Poisson em recarregamento/descarregamento (ν_{ur}), a razão de ruptura (R_f) e o coeficiente de empuxo em repouso do solo normalmente adensado (K_0^{NC}). Para esses parâmetros foram adotados valores *default* do programa Plaxis 2D.

Com base em sua caracterização geotécnica, o perfil de solo do campo experimental pode ser dividido em quatro camadas: uma camada superficial altamente intemperizada (0,0 a 1,0 m); uma camada de solo laterítico (1,0 a 4,0 m); uma camada de transição (4,0 a 7,0 m); e uma camada de solo residual (7,0 a 10,0 m). Todavia, conforme será discutido adiante, alguns parâmetros foram estimados com base nos resultados das sondagens PMT, as quais foram realizadas até 5,5 m de profundidade, de forma que não se dispunha de dados para a estimativa dos parâmetros abaixo dessa cota. Portanto, para efeitos de modelagem numérica, adotou-se uma camada homogênea de 4,0 a 14,0 m de profundidade. Ressalta-se que devido ao comprimento da estaca (3,5 m), a variação de parâmetros do que seria a quarta camada possui pouca influência nos resultados.

O ângulo de dilatância é considerado igual a zero para todo o perfil, suposição em acordo com solos semelhante aos do perfil do campo experimental (REBOLLEDO; LEÓN; CAMAPUM DE CARVALHO, 2019; BERNARDES *et al.*, 2021).



Os parâmetros c , ϕ e E_{50}^{ref} foram determinados por meio do método de interpretação numérica de ensaios pressiométricos proposto por Goulart (2021). O método consiste em uma retroanálise de ensaios PMT por meio do ajuste entre curvas pressiométricas calculadas nas modelagens e obtidas experimentalmente e permite estimar o módulo de deformabilidade, a coesão total e o ângulo de atrito do solo.

Os demais parâmetros de rigidez foram estimados através de relações consideradas válidas para solos arenosos (SCHMÜDDERICH *et al.*, 2020) e para o perfil de solo estudado no presente trabalho (BERNARDES *et al.*, 2021): os módulos E_{ur}^{ref} e E_{oed}^{ref} são obtidos respectivamente pelas relações $E_{ur}^{ref}/E_{50}^{ref} = 3$ e $E_{oed}^{ref}/E_{50}^{ref} = 1$, e o expoente m é adotado igual a 0,5. Por fim, o peso específico natural do solo (γ_{nat}) foi obtido experimentalmente por Machado (2020). Um resumo dos parâmetros do modelo é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do modelo *Hardening Soil* estimados para o perfil de solo do campo experimental.

Camada	Prof. (m)	γ_{nat} (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	E_{50}^{ref} (kPa)	E_{oed}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)	K_0^{NC}
1	0 - 1	14,5	35	29	18534	18534	55602	0,51
2	1 - 4	15,4	22	30	7787	7787	23362	0,50
3	4 - 14	16,0	58	30	14440	14440	43319	0,50

Nota: parâmetros constantes para o perfil: $\psi = 0^\circ$; $m = 0,5$; $p^{ref} = 100$ kPa; $v_{ur} = 0,2$; $R_f = 0,9$; $K_0^{NC} = 1 - \sin(\phi')$.

3.3 Abordagens para a simulação de estacas PCIS

A abordagem proposta neste trabalho é resultado de modificações incorporadas a um método pré-existente, denominado método de expansão de cavidade associado a subcamadas (CE-SL), inicialmente empregado por Schmüdderich *et al.* (2020) na análise de estacas Ômega. As etapas de cálculo das abordagens original e modificada são apresentadas na Figura 4.

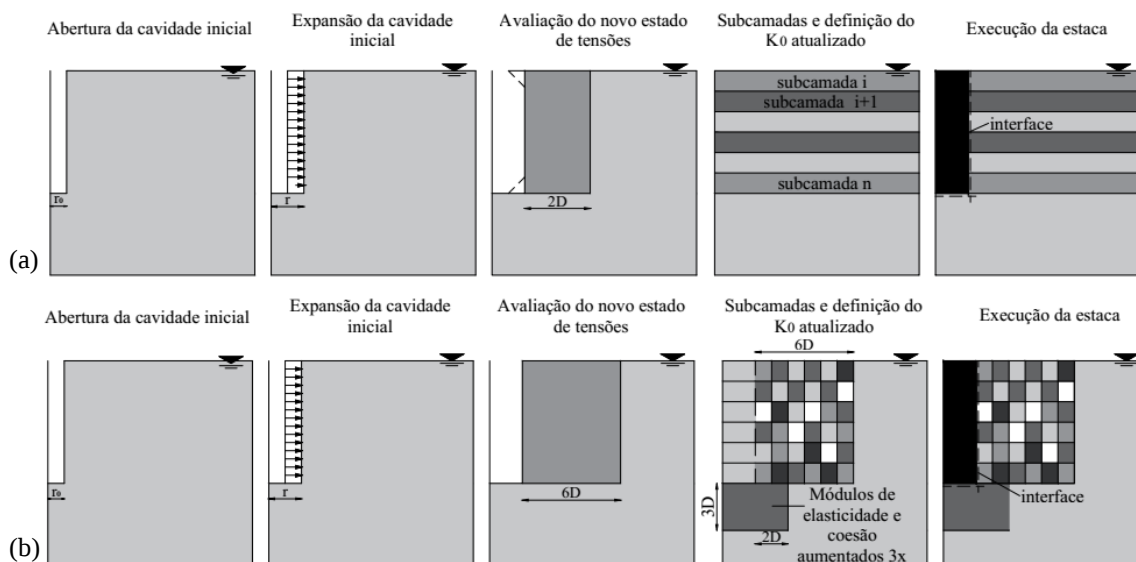


Figura 4. Etapas de instalação da estaca PCIS pelo método CE-SL (a) original e (b) modificado.

3.3.1 Método CE-SL original

A abordagem original simula o processo de instalação da estaca e a subsequente prova de carga em dois modelos numéricos distintos, de modo que os efeitos de instalação são considerados de forma indireta em um modelo que não sofreu deformações da malha de elementos finitos (Figura 4a). No primeiro modelo, o deslocamento radial de solo provocado pela instalação da estaca é simulado como a expansão de uma cavidade cilíndrica, aplicando deslocamentos radiais na parede de uma cavidade pré-existente de raio inicial r_0 até que seja atingido o raio da estaca (r). Esta etapa utiliza o recurso de *mesh updated* do Plaxis 2D devido as deformações geradas. O aumento de tensão radial induzido pela expansão é avaliado em uma zona de $2D$



(D = diâmetro da estaca) ao redor do fuste da estaca e com essas informações calcula-se um perfil de coeficiente de empuxo em repouso (K_0) atualizado.

Em um segundo modelo, o solo ao redor do fuste da estaca é dividido em subcamadas de 1 m de espessura e a cada subcamada é atribuído um valor de K_0 médio obtido do modelo anterior. Em seguida, as propriedades do material da estaca são atribuídas à região geométrica que a representa e os elementos de interface são ativados. Por fim, deslocamentos verticais são aplicados no topo da estrutura para simular uma prova de carga.

A princípio, o método original foi aplicado na simulação da prova de carga da estaca PCIS com apenas duas pequenas alterações. A primeira foi em relação ao raio inicial da cavidade. Originalmente, esse parâmetro é calculado com base na geometria da ferramenta de perfuração da estaca Ômega e, portanto, a lógica de cálculo não se aplica à estaca PCIS. Dessa forma, foi adotado um valor de $r_0 = r/2$. Além disso, a abordagem original reduz gradualmente os deslocamentos horizontais aplicados na expansão em um trecho de 0,5 m do topo e da base da estaca, visando evitar concentrações de tensões nessas regiões. Em função do pequeno diâmetro da estaca analisada (165,1 mm), esse procedimento não se mostrou necessário para o caso em estudo.

3.3.2 Método CE-SL modificado

Visando tornar o método CE-SL mais representativo do procedimento executivo de estacas PCIS, foram introduzidas algumas modificações ao método original, aplicadas no segundo modelo numérico. As etapas de cálculo da nova abordagem são ilustradas na Figura 4b. A primeira modificação visa incorporar os efeitos de densificação do solo abaixo da base da estaca. Para tanto, os módulos de deformabilidade e a coesão do solo foram majorados em três vezes dentro de uma zona abaixo da ponta da estaca limitada em $3D$ na vertical e $2D$ radialmente, a partir do fuste da estaca. A magnitude da majoração foi determinada de modo a obter uma resistência de ponta condizente com o valor medido experimentalmente.

As demais modificações estão relacionadas à forma como são incorporadas as alterações nas tensões radiais do solo adjacente ao fuste da estaca após a expansão. A zona de análise de tensões para cálculo de K_0 foi expandida para $6D$ a partir do fuste da estaca. O solo adjacente ao fuste da estaca foi dividido em subcamadas de 0,5 m de espessura, alteração que foi motivada pelo menor comprimento da estaca em análise (3,5 m) em comparação com os 9,5 m de comprimento da estaca analisada por Schmüdderich *et al.* (2020). Para além disso, a região à qual é atribuída os coeficientes de empuxo em repouso atualizados foi limitada radialmente em $6D$ a partir do fuste da estaca, com subdivisões a cada $1D$. A cada subcamada assim obtida foi atribuído um K_0 médio calculado de acordo com as tensões radiais avaliadas na mesma região. O limite dessa zona foi determinado após avaliação da zona de influência nas tensões induzidas pela expansão de cavidade.

4 Resultados e Discussões

Os resultados numéricos obtidos com as abordagens original e modificada são apresentados em conjunto com os dados medidos em campo na Figura 5. A análise do trecho inicial da curva carga-recalque (Figura 5a) indica que ambas as abordagens resultaram em um comportamento bastante semelhante até aproximadamente 140 kN, com o método modificado indicando uma rigidez ligeiramente superior. Após um nível de carga entre 60-70 kN, as curvas numéricas passam a indicar um comportamento mais rígido do que o verificado experimentalmente, com recalques inferiores aos medidos considerando o mesmo nível de carga.

Com a abordagem original, foi necessário reduzir a coesão e o ângulo de atrito da interface em 30% ($R_{inter} = 0,70$) para obter a carga de ruptura medida experimentalmente. Todavia, ao analisar as curvas de distribuição de cargas (Figura 5b), verifica-se que o modelo numérico superestimou o atrito lateral da estaca e subestimou a resistência de ponta. A parcela de ponta na ruptura obtida numericamente (33 kN) foi cerca de 52% inferior ao valor medido em campo (68 kN).

Uma provável causa do comportamento observado é a forma como as subcamadas são divididas na abordagem original, abrangendo todo o domínio do modelo (Figura 4a). Além disso, o perfil de K_0 atualizado é calculado com as tensões observadas numa zona de $2D$ ao redor da estaca, região em que ocorrem os maiores aumentos de tensões radiais. Dessa forma, o solo adjacente à estaca acaba sendo demasiadamente melhorado, ao passo que não há nenhuma incorporação dos efeitos de instalação abaixo da base da estaca.

Cabe ressaltar que o método CE-SL foi inicialmente desenvolvido para estacas Ôegas, cujo processo executivo difere dos procedimentos de instalação das estacas PCIS. No caso de estacas cravadas ou prensadas,



a maior influência da instalação ocorre no solo abaixo da base da estaca, enquanto que no caso da estaca Ômega, o solo ao redor do fuste é mais afetado (KRASINSKI, 2014). Além disso, Flynn e McCabe (2016) relatam que os mecanismos de mobilização de atrito lateral de estacas PCIS instaladas em uma areia uniforme estão mais próximos dos de uma estaca escavada em virtude da superfície rugosa gerada pela concretagem *in situ* e da ausência de tensões residuais relacionadas à prensagem de estacas de deslocamento, visto que no caso das estacas PCIS o tubo de instalação é extraído antes da concretagem.

Em relação ao método CE-SL modificado, a análise das curvas de distribuição de cargas (Figura 5b) evidencia que as modificações feitas à abordagem original tornaram o modelo numérico muito mais assertivo na captura da evolução da mobilização das parcelas individuais de atrito lateral e de resistência de ponta da estaca, sobretudo para níveis de carregamento mais elevados. Nas condições de ruptura, o modelo numérico previu corretamente o valor da resistência de ponta medido (68 kN). Este resultado ressalta a importância de se considerar a densificação do solo abaixo da base da estaca na modelagem numérica.

Para obter a carga de ruptura total medida em ensaio com a abordagem modificada, foi necessário reduzir a coesão e o ângulo de atrito da interface em 5% ($R_{inter} = 0,95$), valor inferior ao necessário para obter a mesma carga de ruptura com o método CE-SL original. Esse resultado sugere que a degradação do atrito lateral que ocorre na interface solo-estaca devido a instalação da estaca PCIS não é tão severa como a abordagem inicial indicou. Estudos experimentais evidenciam que o ângulo de atrito da interface (δ) entre areias e superfícies rugosas se aproxima do ângulo de atrito interno da areia, de forma que o cisalhamento tende a ocorrer dentro da massa de solo adjacente ao fuste da estaca e não na interface (FROST; DEJONG; RECALDE, 2002; FLYNN; MCCABE, 2016). Dessa forma, embora não tenham sido feitos ensaios laboratoriais para determinar o valor de δ , as evidências encontradas na literatura levam a crer que as suposições feitas neste trabalho estão próximas da realidade.

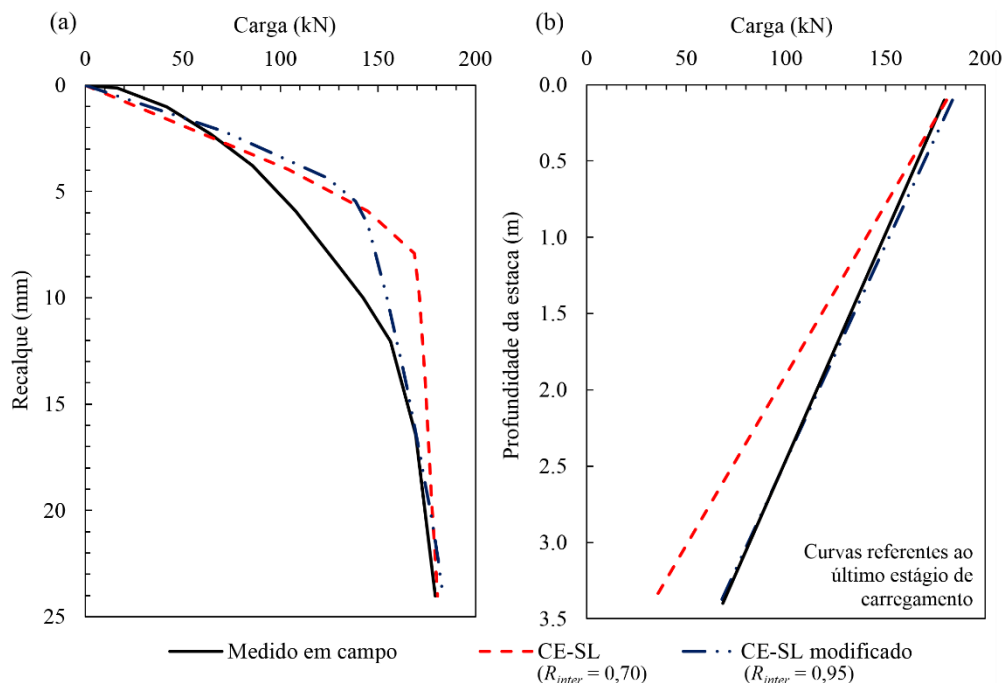


Figura 5. Comparação entre resultados medidos e obtidos com o método CE-SL original e modificado: (a) curva carga-recalque; (b) distribuição de carga ao longo da estaca.

6 Conclusões

O presente trabalho apresentou um novo método para a simulação de estacas PCIS que permite considerar os efeitos de instalação dessas estruturas de forma idealizada pelo método dos elementos finitos. A abordagem introduz uma região melhorada por compressão sob a ponta e limita o impacto da indução das tensões horizontais em sub-regiões próximas ao fuste da estaca. Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões:



1. O método CE-SL modificado foi capaz de reproduzir satisfatoriamente uma prova de carga estática à compressão conduzida em uma estaca PCIS. Nas condições de ruptura, o modelo obteve com acurácia o atrito lateral e a resistência de ponta da estaca. Quanto à rigidez do sistema solo-estaca, houve uma ligeira subestimação em estágios de carregamento intermediário.
2. Para fins de aplicação do método como forma de previsão da capacidade de carga de estacas de deslocamento, ressalta-se como limitante a necessidade de dados que sirvam de base para a determinação do fator R_{inter} e da magnitude de majoração dos parâmetros de resistência e rigidez do solo abaixo da base da estaca. Uma prova de carga instrumentada como a utilizada no presente trabalho configura-se como uma ferramenta adequada para este fim.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos e ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas, Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás pela disponibilização do *software* Plaxis 2D.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernardes, H. C., Sales, M. M., Machado, R. R., Cruz Jr, A. J. da, Cunha, R. P. da, Angelim, R. R., Rebolledo, J. F. R. (2021) Coupling hardening soil model and Ménard pressuremeter tests to predict pile behavior. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, p. 1-20.
- Engin, H. K., Brinkgreve, R. B. J., Van Tol, A. F. (2015) Simplified numerical modelling of pile penetration – the press-replace technique. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39, p. 1713-1734.
- Flynn, K. N., McCabe, B. A. (2016) Shaft resistance of driven cast-in-situ piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 53 (1), p. 49-59.
- Frost, J. D., DeJong, J. T., Recalde, M. (2002) Shear failure behavior of granular-continuum interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, 69 (17), p. 2029-2048.
- Goulart, R. L. (2021) *Análise numérica de ensaios pressiométricos do campo experimental da EECA*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás.
- Krasinski, A. (2014) Numerical simulation of screw displacement pile interaction with non-cohesive soil. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14 (1), p. 122-133.
- Machado, R. R. (2020) *Ensaio pressiométrico para estimativa de parâmetros de resistência e deformabilidade do solo do campo experimental da EECA/UFG*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, 202 p.
- Nascimento, B. B. do. (2019) *Provas de Carga Estáticas em Estacas Metálicas Tubulares de Ponta Aberta em um Solo Tropical*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, 160 p.
- Rebolledo, J. F. R., León, R. F. P., Camapum de Carvalho, J. (2019) Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília. *Soils and Rocks*, 42(1), 61–74. doi:10.28927/sr.421061
- Rezende, B. L. M., Rocha, L. B. (2020) *Influência da energia nos resultados do ensaio SPT*. Monografia, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, 66 p.
- Said, I., De Gennaro, V., Frank, R. (2009) Axisymmetric finite element analysis of pile loading tests. *Computers and Geotechnics*, 36 (1-2), 6-19.
- Schmüdderich, C., Shahrabi, M. M., Taiebat, M., Alimardani Lavasan, A. (2020) Strategies for numerical simulation of cast-in-place piles under axial loading. *Computers and Geotechnics*, 125, p. 103656.