

# Desempenho de Estacas Hélice Contínua por meio de Resultados de Provas de Carga Instrumentadas em Profundidade e de Simulação Numérica

Thaís Maria Leite Paludeto

Engenheira Geotécnica MSc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, tmpaludeto@gmail.com

David de Carvalho

Professor, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, david@unicamp.br

**RESUMO:** A estaca tipo hélice contínua apresenta-se como solução para grande parte dos casos de fundação profunda, devido a sua aplicabilidade em diversos tipos de solos e sua alta produtividade. Sendo assim, conhecer o comportamento deste tipo de estaca tem grande relevância para a engenharia geotécnica. Com esse objetivo, analisou-se quatro provas de carga estática à compressão, com carregamento lento, em estacas tipo hélice contínua de 30cm de diâmetro com comprimentos variados (7,0m, 9,0m e 11,0m) executadas no município de Campinas - SP - Brasil. As estacas foram instrumentadas em profundidade com extensômetros elétricos de resistência (strain gages), em três níveis, sendo o primeiro próximo ao topo, o segundo em uma profundidade média e o último próximo a ponta. A instrumentação permitiu a análise da transferência de carga em profundidade. Considerando o avanço da utilização de programas computacionais para análise e dimensionamento de estruturas geotécnicas, as curvas carga vs recalque obtidas, por meio da prova de carga estática, foram comparados com os resultados da modelagem e simulação numérica, no software PLAXIS 2D. Por meio das simulações foi possível analisar a aplicabilidade das correlações com o ensaio SPT para obter parâmetros dos solos, e utilização do software para simulação prévia de prova de carga estática.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estaca Hélice Contínua, Prova de Carga Estática Instrumentada, Transferência de Carga, Modelagem Numérica

**ABSTRACT:** The Continuous Flight Auger pile is presented as a solution for deep foundations due to its applicability in various types of soils and its high productivity. Therefore, knowing the behaviour of this type of pile has great relevance for geotechnical engineering. With this goal, four Continuous Flight Auger piles were tested under compression with static load tests. The piles had 30cm of diameter and varying lengths (7.0m, 9.0m and 11.0m). The tests were performed in Campinas - SP - Brazil. The piles were instrumented in depth with electrical strain gages, at three levels, the first near the top, the second at a medium depth and the last near the tip. The instrumentation allowed the analysis of load transfer in depth. Considering the advances in computational software for analysis and dimensioning of geotechnical structures, the results obtained were also compared with the results of the modelling and numerical simulation of the load test in the PLAXIS® software. Through the simulations it was possible to analyse the applicability of correlations with the SPT test, to obtain soil parameters, and the usefulness of the software for simulation of static load tests.

**KEYWORDS:** Continuous Flight Auger Pile; Instrumented Static Load Test; Load Transfer; Numerical Modelling

## 1 INTRODUÇÃO

A definição da capacidade de carga é um aspecto básico para análise e projeto de fundações profundas em estacas. A execução de uma prova de carga estática é a forma mais confiável para determinar a capacidade de carga de uma estaca (Fellenius, 2004; Fellenius, 2021).

No entanto, uma prova de carga estática pode ser representada por um modelo matemático e solucionado por meio de um método numérico, como o método de elementos finitos (MEF). O modelo estabelece a representatividade física da solução enquanto o método define a precisão com que o modelo pode ser aproximado da realidade. (SIROIS e GRILLI, 2015).

A modelagem e a simulação numérica são ferramentas que têm sido cada vez mais empregadas na engenharia geotécnica, com um desenvolvimento acelerado nos últimos anos com o avanço das técnicas computacionais. Dessa forma, a modelagem de problemas geotécnicos tem desempenhado papel cada vez mais importante na obtenção de uma melhor compreensão do comportamento dos geomateriais e geoestruturas e na garantia da segurança e sustentabilidade de projetos complexos de geotecnia (Zhang et al, 2013).

Assim, o objetivo principal deste estudo é verificar a aplicabilidade da modelagem e simulação numérica na análise do comportamento de estacas hélice contínua executadas em solo residual. Para isto os resultados de simulações numéricas não lineares obtidas com um software comercial, destinado a análise bidimensional de deformação e estabilidade de problemas geotécnicos, foram comparados com resultados de quatro provas de carga estáticas instrumentadas em profundidade em estacas hélice contínua.

## 2 ENQUADRAMENTO DA OBRA E PERFIL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

As quatro estacas hélice contínua analisadas são estacas testes executadas ainda na fase de projeto para realização de provas de carga estáticas prévias na Rua 5, nº 48, Quadra A, Lote 01, Loteamento Residencial Vila Park, Campo Redondo, em Campinas, São Paulo, Brasil (latitude 22°57'53"S e longitude 47°10'14"W). O subsolo do local é residual de diabásio e pertence subgrupo de Itararé (Gon, 2011).

Na investigação do subsolo local, foram realizados quarenta ensaios tipo SPT (Standard Penetration Test). As estacas testes 01 e 02 foram executadas próximas ao furo de sondagem SPT-08 e as estacas testes 03 e 04 próximas ao furo SPT-03. Por esse motivo, os perfis do subsolo obtidos nas sondagens SPT-08 e SPT-03, foram os perfis selecionados para as análises do presente trabalho.

## 3 ESTACAS TESTES INSTRUMENTADAS

Foram executadas quatro estacas testes tipo hélice contínua monitoradas, com 30cm de diâmetro e comprimentos variados, sendo uma estaca com 7,00m, duas estacas com 9,00m e uma estaca com 11,00m. A argamassa utilizada para preenchimento das estacas testes e de reação apresenta as seguintes características:  $f_{ck} \geq 20\text{MPa}$ ; adição de cimento  $\geq 400\text{kg/m}^3$ ; fator água/cimento  $\leq 0,6$ . Utilizou-se areia como agregado e um hiper plastificante foi adicionado na argamassa. Neste caso, utilizou-se argamassa para o preenchimento das estacas para facilitar a introdução da armadura com as instrumentações instaladas.

As estacas testes foram instrumentadas ao longo da profundidade em três níveis: o primeiro próximo ao topo, o segundo em uma profundidade intermediária e o último próximo a ponta. A instrumentação é composta, em cada nível, por quatro extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*) de  $350\Omega$  instalados em ponte completa. Na figura 1, estão apresentadas as estacas tipo hélice contínua instrumentadas em profundidade implantadas no perfil de subsolo da sondagem mais significativa.

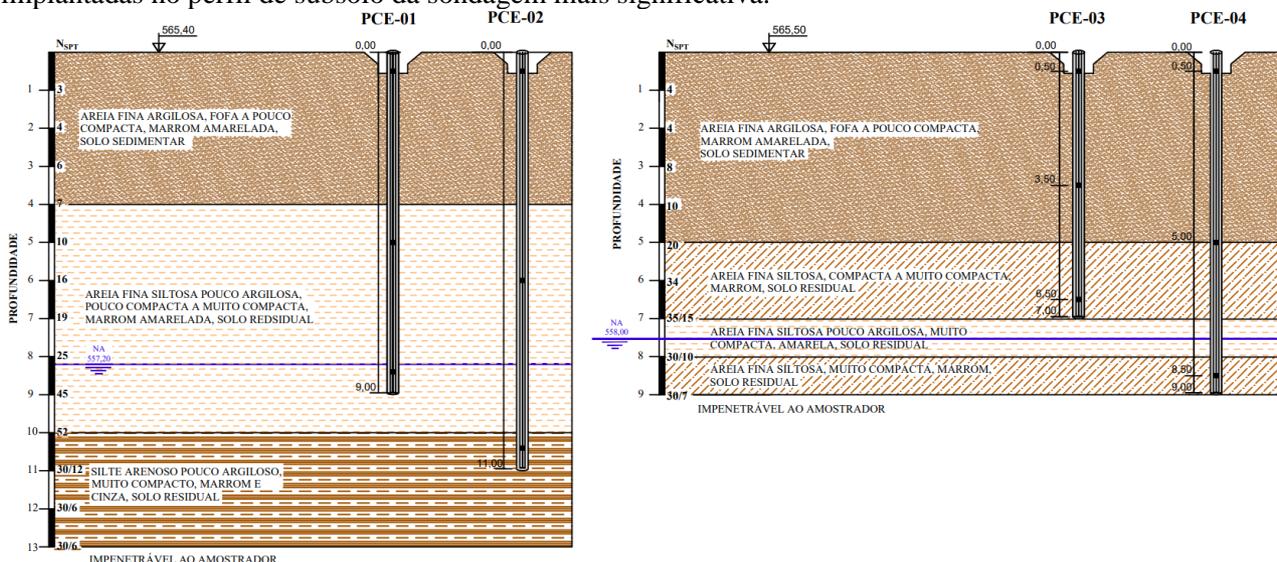


Figura 1 – Perfil do subsolo e estacas das PCE-01, PCE-02, PCE-03 e PCE-04.

Para introduzir a instrumentação nas estacas, os *strain gages* foram instalados em três barras de aço CA-50 com 20mm de diâmetro e revestidos com resina epóxi. As barras foram protegidas com tubo de PVC tipo conduíte de 25,4 mm, de forma a garantir proteção mecânica, impermeabilização e isolamento elétrico. Assim, a instrumentação foi inserida centralizadas junto com a armação das estacas.

#### 4 PROVA DE CARGA E SISTEMA DE REAÇÃO

Para a execução das quatro provas de carga estáticas (PCE-01, PCE-02, PCE-03 e PCE-04), foram executadas doze estacas de reação (ER) tipo hélice contínua com 40cm de diâmetro, seguindo os mesmos procedimentos de execução das estacas teste (ET). As estacas de reação ER1 a ER6 apresentam 12m de comprimento e as estacas ER7 a ER12 possuem 10m de comprimento.

A montagem do sistema de reação das provas de carga consistiu em duas vigas de reação. As vigas de reação foram ancoradas verticalmente por quatro estacas de reação armadas adicionalmente com uma monobarra centralizada em todo o comprimento das estacas.

O carregamento aplicado foi do tipo lento e o incremento de carga aplicado em cada estágio foi inferior a 20% da carga de trabalho prevista para a estaca ensaiada. Em cada estágio de carregamento, a carga foi mantida até a estabilização dos deslocamentos ou durante um período mínimo de 30 minutos, seguindo a Norma NBR 12131/2006- Prova de carga estática: método de ensaio, norma em vigor na data de execução do ensaio. Atingida a carga máxima do ensaio, realizou-se o monitoramento por 12 horas mantendo-se a carga. Após esse período, realizou-se o descarregamento em quatro estágios com períodos mínimos de 15 minutos. Nos casos em que a estaca rompeu estruturalmente, procedeu-se diretamente ao descarregamento sem monitoramento. As curvas carga-deslocamento obtidas nas provas de carga estão apresentadas na Figura 2a-d. As provas de carga PCE-01 (Figura 2a) e PCE-03 (Figura 2c) atingiram a carga máxima do ensaio, com a fase de descarregamento subsequente. Por outro lado, as provas de carga PCE-02 (Figura 2b) e PCE-04 (Figura 2d) foram interrompidas sem atingir a carga máxima devido a uma ruptura estrutural da estaca.

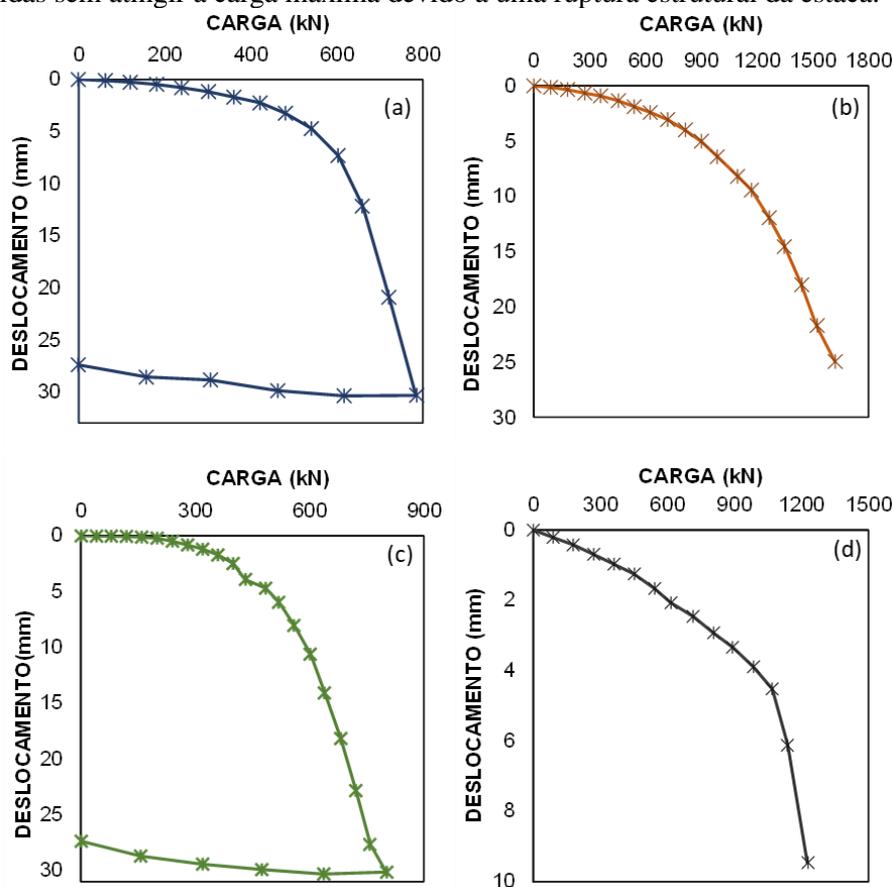


Figura 2 - Curvas carga-deslocamento obtidas nas provas de carga: (a) Prova de carga 1 (PCE-01); (b) Prova de carga 2 (PCE-02); (c) Prova de carga 3 (PCE-03); (d) Prova de carga 4 (PCE-04)

## 6 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO POR MEIO DE CORRELAÇÕES COM O ENSAIO SPT OU CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

Parâmetros do solo como coesão ( $c$ ), ângulo de atrito ( $\Phi$ ), peso específico ( $\gamma$ ), e módulo de elasticidade ( $E$ ) são determinados idealmente por ensaios de laboratório. Quando não são determinados em laboratório é comum a estimativa dos parâmetros do solo por meio de correlações com os valores do índice de resistência à penetração do solo ( $N_{SPT}$ ) obtido no ensaio sondagem de simples reconhecimento (SPT). Na literatura brasileira, existem equações e tabelas que correlacionam os parâmetros do solo com os valores do índice de resistência à penetração do solo ( $N_{SPT}$ ). Assim, para determinar os parâmetros para as análises deste trabalho, foi calculado o valor do índice de resistência à penetração médio ( $N_{SPT\ MED}$ ) de cada camada do solo, e as correlações foram definidas a partir desse valor.

Na Tabela 1 e Tabela 2 estão apresentados os parâmetros do solo estimados por meio de correlações, para a cada camada do perfil de subsolo da sondagem SPT 08 e SPT-03, respectivamente. Estes parâmetros foram os parâmetros de entrada para a simulação numérica das provas de carga.

Tabela 1 – Parâmetros estimados para modelagem – SPT-08

SOLO	Prof. da camada	$N_{med}$	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\Phi$ [graus]	$E$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\nu$
Areia Fina Argilosa	-4	5	18	19	5	28	40000	0,2
Areia Fina Siltosa Pouco Argilosa	-7	15	19	20	7,5	32	83000	0,2
Areia Fina Siltosa Pouco Argilosa	-10	40	20	21	10	35	146000	0,2
Silte Arenoso Pouco Argiloso	-13	125	21	21	300	28	250000	0,3

Tabela 2 – Parâmetros estimados para modelagem – SPT-03

SOLO	Prof. da camada	$N_{med}$	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\Phi$ [graus]	$E$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\nu$
Areia Fina Argilosa	-5	9	19	20	7,5	30	50000	0,2
Areia Fina Siltosa	-7	52	20	21	10	38	190000	0,2
Areia Fina Siltosa Pouco Argilosa	-8	90	20	21	10	38	200000	0,2
Areia Fina Siltosa	-9	128	20	21	100	38	200000	0,2

## 7 DEFINIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO MATERIAL DA ESTACA

O módulo de elasticidade da estaca foi definido através da instrumentação na cabeça da estaca (seção de referência – sem contato com o solo), por meio da Equação 1.

$$E = \frac{(Q/A)}{\epsilon} \quad (1)$$

Na tabela 3 estão apresentados os módulos de elasticidade obtidos para cada estaca e os restantes parâmetros do material necessários para a modelagem numérica.

Tabela 3 – Parâmetros do material da estaca utilizados no modelo.

Prova de Carga	$F_{ck}$ [Mpa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\nu$
PCE-01	20	24	14,6x10 <sup>6</sup>	0,2
PCE-02			16,8x10 <sup>6</sup>	
PCE-03			14,3x10 <sup>6</sup>	
PCE-04			14,8x10 <sup>6</sup>	

## 8 MODELAGEM NUMÉRICA - PLAXIS 2D

O modelo de cálculo escolhido para a simular o comportamento do solo foi o modelo linear elástico perfeitamente plástico de Mohr-Coulomb. Este modelo de Mohr-Coulomb representa uma aproximação de “primeira ordem” do comportamento do solo ou da rocha. Para simular o comportamento da estaca foi utilizado o modelo linear elástico, o qual é baseado na Lei de Hooke, da elasticidade isotrópica.

## 9 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

### 9.1 PCE-01 e PCE-02

As curvas carga-deslocamento obtidas nas simulações comparadas com as curvas obtidas no ensaio para as provas de carga PCE-01 e PCE-02 estão apresentadas na Figura 3a e na Figura 3b, respectivamente.

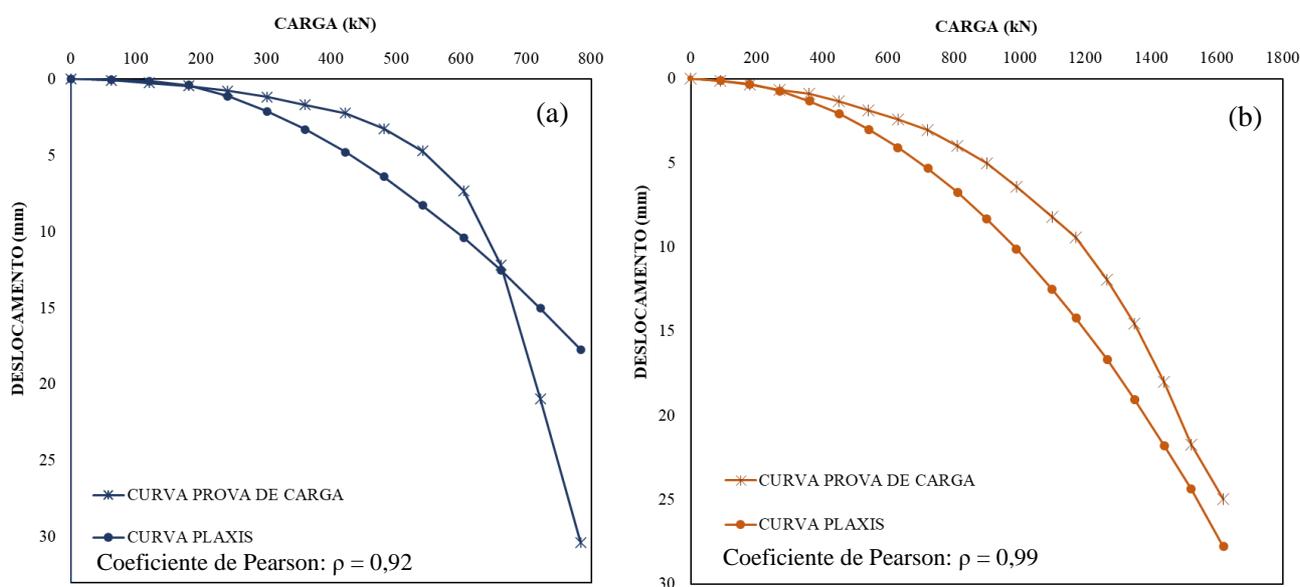


Figura 3 – Comparação entre curvas carga vs recalque obtidas por modelagem numérica com curva obtida por meio de prova de carga estática - (a) PCE-01 (b) PCE-02

Comparando-se as curvas da prova de carga PCE-01, os valores dos deslocamentos apresentam valores próximos até a carga equivalente a 80% da carga máxima do ensaio, com os deslocamentos obtidos na simulação maiores que os obtidos no ensaio. A partir do estágio equivalente a 80% da carga máxima do ensaio os deslocamentos obtidos na simulação passaram a ser menores que os obtidos no ensaio. Observa-se que na curva gerada na simulação o valor de deslocamento é progressivo, apresentando certa linearidade. A curva obtida na prova de carga apresentou deslocamentos com variações maiores entre os estágios de carga, apresentando um comportamento não linear, sendo de simulação de maior complexidade, principalmente, nos estágios finais próximos a uma possível ruptura.

Para a prova de carga PCE-02, os deslocamentos na simulação foram maiores que os deslocamentos obtido na prova de carga em todos os estágios de carregamento, com a diferença se tornando mais significativa a partir do estágio 6. Porém a curva apresentou o mesmo comportamento que a curva obtida na prova de carga. Ainda assim, em uma situação em que se pretenda obter uma estimativa do resultado da prova de carga, a simulação mostrou-se eficaz por ter uma curva com um comportamento próximo da realidade e a favor da segurança, já que foram obtidos valores de deslocamento maiores na simulação da PCE-02.

No PLAXIS, há outras análises que podem ser feitas além das curvas carga- deslocamento. A análise dos *stress points* é interessante e pode explicar os valores dos deslocamentos finais. Assim, torna-se possível verificar os pontos plásticos, ou seja, os pontos de tensão do regime plástico, apresentados em um gráfico de geometria não deformada.

Apresentam-se nas Figuras 4a-d os modelos para a PCE-01 com os pontos plásticos para a carga de projeto (estágio 5), 50% da carga máxima (estágio 7), para 80% da carga máxima (estágio 11) e para a carga máxima (estágio 13), respetivamente. E apresentam-se nas Figuras 5a-d os pontos plásticos do modelo da PCE-02. Os pontos vermelhos nos gráficos correspondem aos pontos de falha, indicando que as tensões estão na superfície da região onde ocorrem as falhas. Os pontos brancos correspondem a ponto de tensão de corte (tensão limite), indicando que foi aplicado o critério de tensão de corte.

Observa-se que os pontos de falha ocorreram ao longo do fuste da estaca, o que indica a utilização da parcela de atrito lateral na resistência da estaca. Além disso, com os incrementos carga, nota-se o aumento dos pontos de falha na ponta, o que representa a contribuição da parcela de ponta na resistência da estaca. Nos últimos estágios, há um aumento significativos dos pontos de falha indicando uma plastificação da ponta e uma possível ruptura.

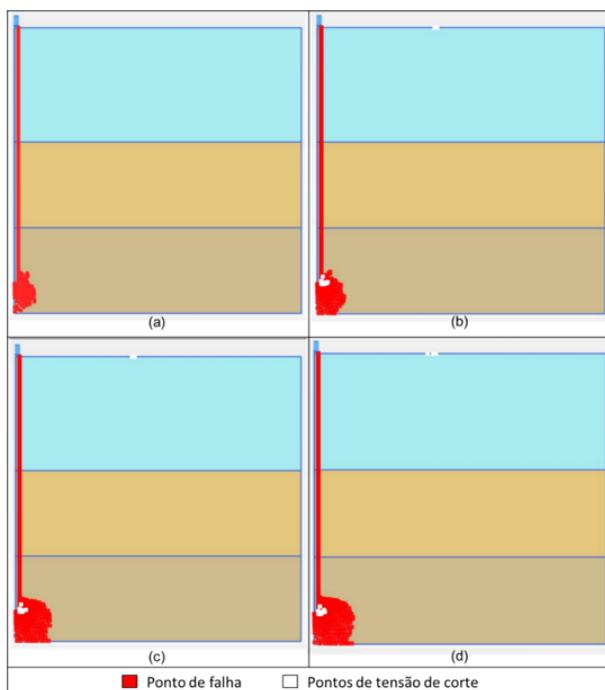


Figura 4 – Pontos plásticos nos estágios de carregamento a) 5, b) 9, c) 14 e d) 18 -PCE-01

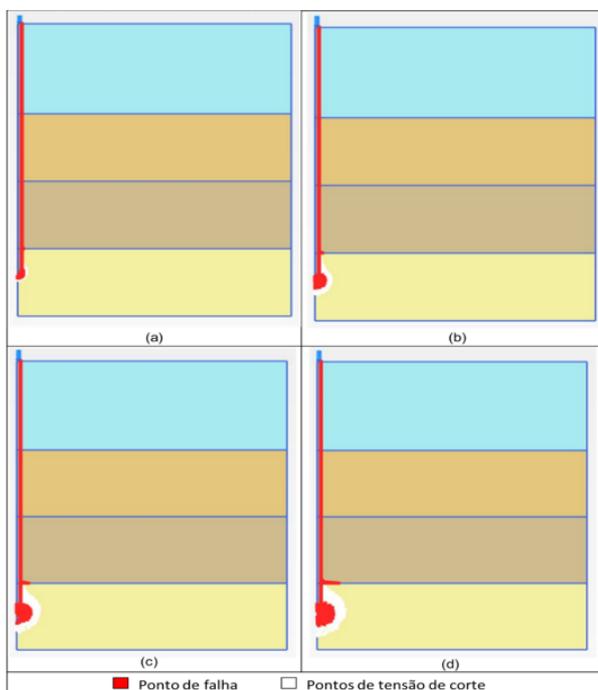


Figura 5 – Pontos plásticos nos estágios de carregamento a) 5, b) 9, c) 14 e d) 18 -PCE-02

## 9.2 PCE-03 e PCE-04

As curvas carga-deslocamento obtidas nas simulações comparadas com as curvas obtidas no ensaio para as provas de carga PCE-03 e PCE-04 estão apresentadas na Figura 6a e na Figura 6b, respectivamente. As curvas da simulação das PCE-03 e PCE-04 apresentaram o mesmo comportamento das curvas das PCE-01 e PCE-02. Comparando-se as curvas da prova de carga PCE-01, os valores dos deslocamentos apresentam valores próximos até a carga equivalente a 80% da carga máxima do ensaio, com os deslocamentos obtidos na simulação maiores que os obtidos no ensaio. A partir do estágio equivalente a 80% da carga máxima do ensaio os deslocamentos obtidos na simulação passaram a ser menores que os obtidos no ensaio.

Para a prova de carga PCE-04, os deslocamentos na simulação foram maiores que os deslocamentos obtido na prova de carga em todos os estágios de carregamento, com a diferença se tornando mais significativa a partir do estágio 6. Porém a curva apresentou o mesmo comportamento que a curva obtida na prova de carga.

Apresentam-se nas Figuras 7a-d os modelos para a PCE-01 com os pontos plásticos para a carga de projeto (estágio 5), 50% da carga máxima (estágio 7), para 80% da carga máxima (estágio 11) e para a carga máxima (estágio 13), respetivamente. E os pontos plásticos do modelo para a PCE-02 estão apresentados nas Figuras 8a-d.

Assim como nos resultados da modelagem numérica das provas de carga PCE-01 e PCE-02, observa-se, nos resultados das provas PCE-03 e PCE-04, que os pontos de falha ocorreram ao longo do fuste da estaca,

o que indica a utilização da parcela de atrito lateral na resistência da estaca. Além disso, com os incrementos carga, nota-se o aumento dos pontos de falha na ponta, o que representa a contribuição da parcela de ponta na resistência da estaca.

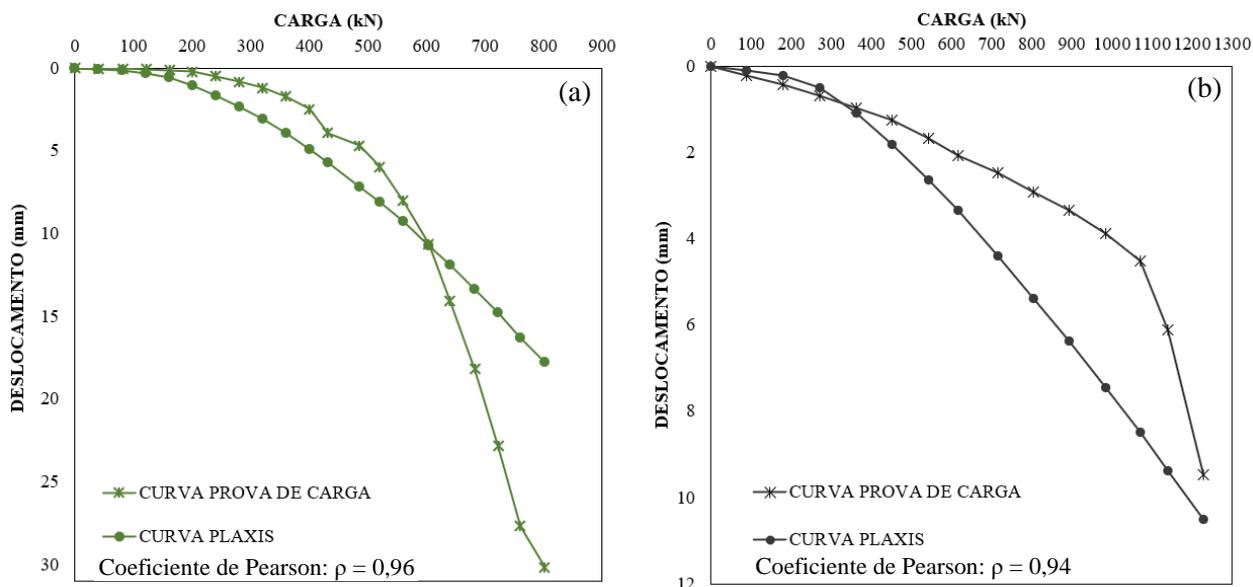


Figura 6 – Comparação entre curvas carga vs recalque obtidas por modelagem numérica com curva obtida por meio de prova de carga estática - (a) PCE-03 (b) PCE-04

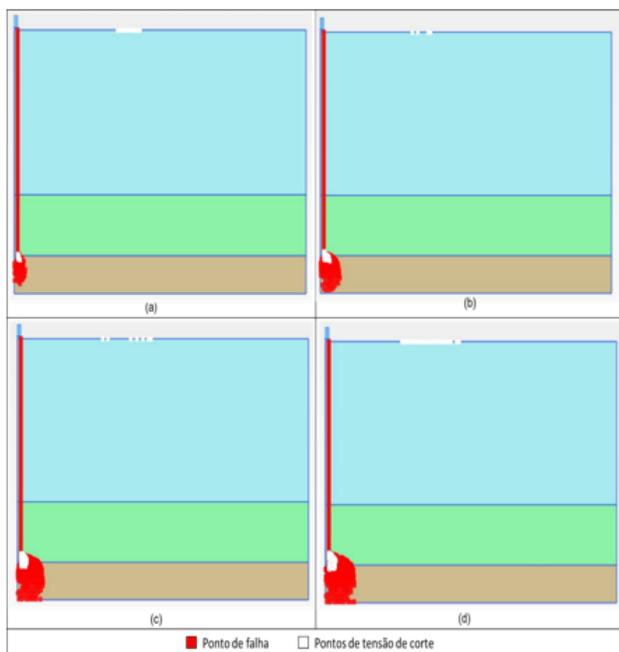


Figura 7 – Pontos plásticos nos estágios de carregamento a) 5, b) 9, c) 14 e d) 18 -PCE-01

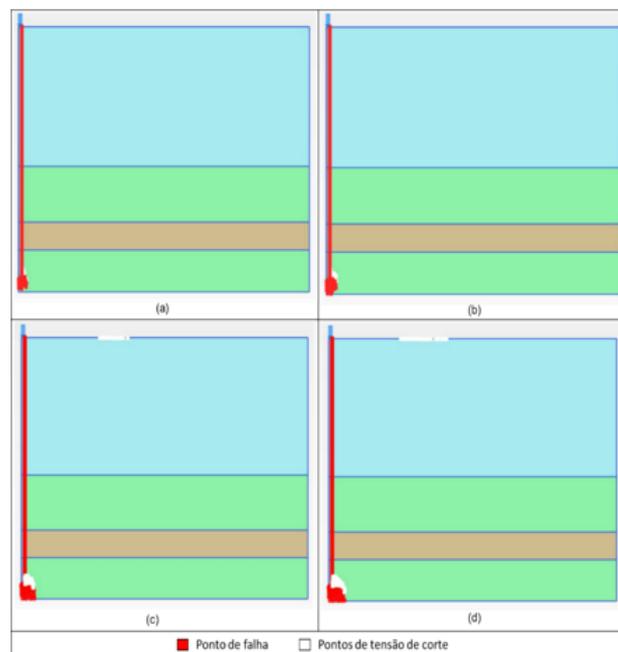


Figura 8 – Pontos plásticos nos estágios de carregamento a) 5, b) 9, c) 14 e d) 18 -PCE-02

## 10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, tem-se observado um avanço nos métodos computacionais para análise e dimensionamento de obras geotécnicas. O presente trabalho mostrou curvas resultantes da modelagem e simulação numérica obtidas com o *software* comercial, o PLAXIS 2D. De uma forma geral, pode-se observar

que as curvas carga-descolamento obtidas na simulação apresentaram comportamento similar às curvas obtidas nas provas de carga, mesmo com os parâmetros do solo sendo definidos por meio de correlações com o ensaio SPT, na ausência de ensaios de laboratório e outros ensaios de campo.

O trabalho mostrou que a curva carga-deslocamento obtida na simulação da PCE-01 e PCE-03 possuem comportamentos semelhantes. As provas de carga PCE-01 e PCE-03 seguiram até a fase de descarregamento, atingiram deslocamentos mais elevados e uma possível ruptura, o que justifica o fato de, na simulação, os deslocamentos dos últimos estágios serem menores que os deslocamentos obtidos em campo.

As provas de carga PCE-02 e PCE-04 foram interrompidas precocemente por uma ruptura estrutural da estaca. As curvas obtidas por simulação também apresentaram comportamento semelhante. Diferentemente das curvas da PCE-01 e PCE-03, os deslocamentos da simulação da PCE-02 e PCE-04 foram maiores que os deslocamentos reais para os últimos estágios de carregamento. Essa análise ficou comprometida devido às provas de carga PCE-02 e PCE-04 terem sido interrompidas, o que justifica o comportamento diferente em relação as provas de carga PCE-01 e PCE-03.

Para os pontos analisados (carga de trabalho de projeto, 50% da carga máxima de ensaio da estaca e 80% da carga máxima do ensaio), as curvas obtidas pela simulação, de maneira geral, apresentaram comportamentos semelhantes. Os deslocamentos obtidos são maiores que os obtidos no ensaio, principalmente para a carga de projeto e para a carga equivalente a 50% da carga máxima do ensaio, sendo a favor da segurança de projeto. Por fim, os resultados mostraram que a simulação por meio do PLAXIS 2D pode ser aplicada para uma análise prévia da curva carga-deslocamento ainda durante a fase de projeto da fundação.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pela oportunidade de realizar o mestrado na instituição. À Gebase e à construtora HM pelo fornecimento dos dados das provas de carga instrumentadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019) NBR 6122, *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. *Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Dias, A. D. et al. (2019) Estudo de Tensão-Deformação e Simulação Numérica via Método dos Elementos Finitos a partir de Prova de Carga em Estaca Hélice Contínua Monitorada. In: X SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO CENTRO-OESTE. Brasília. *Anais...*
- Fellenius, B.H., 2004. Unified design of piled foundations with emphasis on settlement analysis. Honoring George G. Goble—Current Practice and Future Trends in Deep Foundations. Geo-Institute Geo-TRANS Conference, Los Angeles, July 27-30, 2004, Edited by J.A. DiMaggio and M.H. Hussein. ASCE Geotechnical Special Publication, GSP125, pp. 253-275.
- Fellenius, B.H., 2021. *Basics of foundation design—a textbook*. Electronic Edition, www.Fellenius.net, 534 p.
- GON, F. S. *Caracterização geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo de diabásio da região de Campinas/SP*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- PLAXIS 2D CONNECT Edition. V22. Bentley Systems, 2022.
- PLAXIS 2D Material Models Manual, 2021
- Sirois, F, Grilli, F. Potential and limits of numerical modelling for supporting the development of HTS devices. *Superconductor Science and Technology*. v.28, n. 043002, 2015.
- Zhang, G., Fu, P.; Liang, F. Mathematical and Numerical Modelling in Geotechnical Engineering. *Journal of Applied Mathematics*, v. 2013, n. 123485, p. 1, 2013. Editorial.