

# Estudo Numérico de Estacas Ensaçadas por Carregamento no Topo e pelo Método Bi-direcional

Leandro Soares Lima

Mestrando, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, eng.leandrosoares@gmail.com

Francisco de Rezende Lopes

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, flopes@coc.ufrj.br

**RESUMO:** O trabalho analisa duas estacas próximas, uma submetida a prova de carga bidirecional (carregamento por célula expansiva) e outra a prova convencional (carregamento no topo). O caso foi apresentado por Alonso e Silva (2000) e descreve testes em duas estacas hélice contínua, com 60 cm de diâmetro, distantes 2,5 m, sendo a primeira com 15,50 m de comprimento, com a célula instalada a 14 m de profundidade, e a segunda com 16,00 m de comprimento, submetida a prova convencional. O presente estudo faz uso do Método dos Elementos Finitos, através do software SigmaW, em solução axissimétrica. Foi utilizado o modelo de comportamento do solo elasto-plástico Mohr-Coulomb, com parâmetros de resistência e deformabilidade dos solos estimados a partir da sondagem local, mas após estudo de sensibilidade. Os campos de tensões e deformações nos dois tipos de provas previstos nas análises numéricas são analisados. Busca-se identificar as diferenças nos mecanismos de mobilização da resistência lateral da estaca nos dois modos de carregamento. São comparadas as curvas carga-deslocamento obtidas na análise numérica e experimentalmente. Os resultados das análises permitem fazer algumas sugestões para a extrapolação de resultados de provas bi-direcionais ao comportamento das estacas quando carregadas pelo topo – condição da obra –.

**PALAVRAS-CHAVE:** Prova de carga em estacas, Método Bidirecional, Modelagem numérica, Método dos Elementos Finitos.

**ABSTRACT:** The work analyzes two neighboring piles, one subjected to a bidirectional load test (loading by an O-cell) and the other to a conventional (top loading) test. The case was presented by Alonso and Silva (2000), and describes tests on two continuous auger piles, 60 cm in diameter, 2.5 m apart, the first being 15.50 m long, with an O-cell installed at 14 m, and the second being 16.00 m long, subjected to conventional test. The study made use of the Finite Element Method, through the SigmaW software, in an axisymmetric solution. The Mohr-Coulomb elasto-plastic soil behavior model was used, with soil stress-strain-strength parameters were estimated from a close SPT test, but after sensitivity studies. The stress and strain fields in the two types of tests produced in the numerical analyzes are analyzed. The main objective was to observe the differences in shaft friction mobilization in the two loading modes. The load-displacement curves obtained in numerical analysis and experimentally are compared. The results of the analyzes allow us to make some suggestions for extrapolating the results of bi-directional tests to the behavior of the piles when loaded from the top – which is the actual loading condition of the work –.

**KEYWORDS:** Pile load test, Bidirectional Method, Numerical modeling, Finite Element Method.

## 1 INTRODUÇÃO

Na prova de carga estática (PCE) pelo método bidirecional, o carregamento ocorre por uma célula expansiva, conhecida como *O-cell* em inglês, localizada no fuste da estaca em geral mais próxima a ponta, e dispensando um sistema de reação. Do ensaio, são obtidas a curva carga-deslocamento (ascendente) do segmento superior e a curva carga-deslocamento (descendente) do segmento inferior. A sua interpretação precisa incluir a construção da curva carga-recalque equivalente ao ensaio convencional, que representaria o comportamento da estaca na obra.

## 2 CASO DE OBRA ESTUDADO

O caso real analisado, foi apresentado por Alonso e da Silva (2000) e descreve as provas de carga nas estacas hélice contínua E46-A e E46, de uma obra em Belo Horizonte, conforme Figura 1. As estacas estão distantes entre si 2,5 m. Segundo os autores, não foi possível executar as duas estacas com o mesmo comprimento devido a uma camada compacta encontrada próximo da base das estacas.

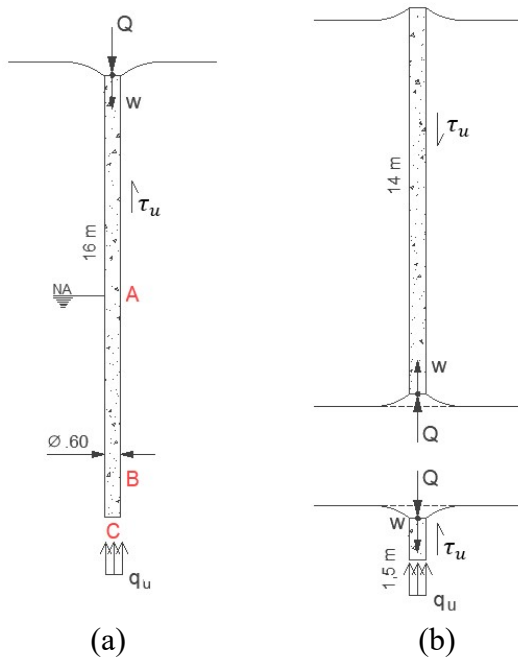


Figura 1. Estacas do caso de obra: (a) E-46 em prova convencional e (b) E-46A em prova bidirecional (os pontos **A**, **B** e **C** indicados serão usados no estudo de caminhos de tensão).

Na estaca E-46A foi instalado um extensômetro na base da célula (*tell-tale*), que fornece o recalque do segmento inferior, e um extensômetro no topo da estaca, que fornece o deslocamento para cima do segmento superior. Não foi instalado um tell-tale no topo da célula para obtenção direta do encurtamento elástico do segmento superior. A Figura 2 apresenta os resultados das duas provas de carga.

Massad (2015) interpretou esse caso de obra e concluiu que ambas as estacas se comportam como longas ou compressíveis. Dada (2019) também analisou este caso, e concluiu que o atrito lateral máximo  $A_{l,ult}$  para a estaca submetida a prova convencional seria de 1900 kN, obtido por interpretação da curva carga-recalque. Além disso, a resistência de ponta apresentaria um crescimento contínuo com o recalque, ultrapassando 2.400 kN. Esses valores foram confirmados por Massad (2015) em uma análise com o solo representado pelo modelo de Camberfort. Ainda segundo Dada (2019), na prova bidirecional, o atrito lateral máximo mobilizado pelo solo foi de 1440 kN.

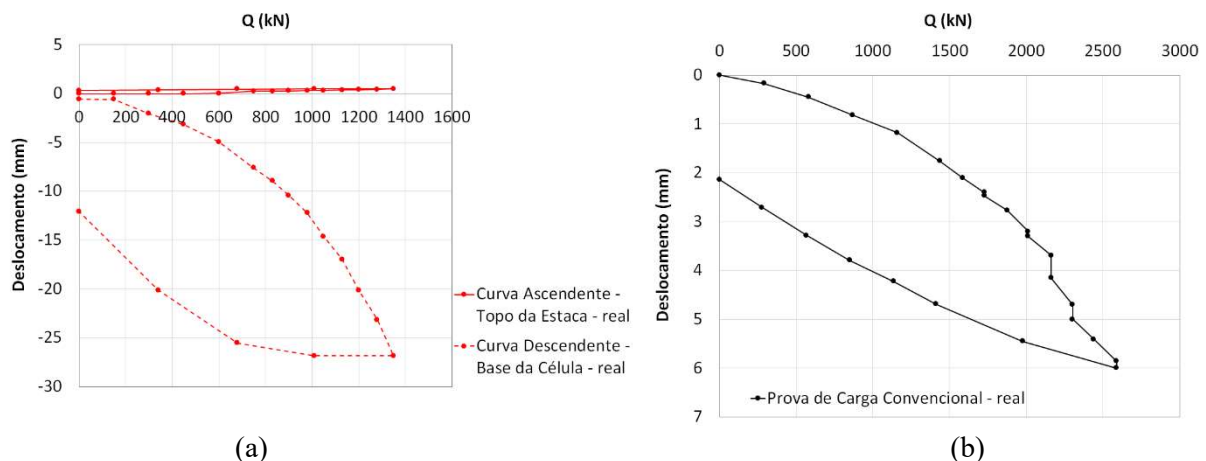


Figura 2. (a) Curvas ascendentes e descendentes da E-46A e (b) curva carga recalque da E-46.

### 3 MODELAGEM NUMÉRICA (MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS)

O software SigmaW da Geoslope foi utilizado em uma solução axissimétrica. O modelo elasto-plástico Mohr-Coulomb de comportamento do solo foi adotado. A partir de correlações com resultados do SPT, e após breve estudo de sensibilidade (que indicou  $E' \sim 6$  a  $10 N_{SPT}$ , compatível com pequenas deformações), foram escolhidos os parâmetros da Tabela 1. O comportamento do solo foi considerado drenado uma vez que o NA está a cerca de 8 metros de profundidade e abaixo desse nível não há solos predominantemente argilosos.

Tabela 1. Propriedades dos materiais após estudos de sensibilidade.

Solo	Prof. final (m)	$N_{SPT}$ médio	$E'$ (MPa)	$\nu'$	$c'$ (kPa)	$\phi'$	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )
Aterro (argiloso escuro)	1,8	15	84	0,4	20	32	19
Argila siltosa, pouco arenosa, muito mole a média, vermelha	6,7	3	16	0,3	18	23	15
Silte argiloso, muito rijo, amarelo e vermelho	7,8	28	175	0,3	10	39	21
Silte argiloso pouco arenoso, muito mole a rijo, amarelo	10,7	11	94	0,4	9	30	19
Silte arenoso, medianamente compacto, cinza amarelo (solo residual)	16,9	25	250	0,3	10	37	20
Silte arenoso com pedregulhos (solo residual)	25,0	40	400	0,3	5	43	21

As redes de elementos finitos estão na Figura 3, nas quais foi feito um refinamento nas regiões de maiores gradientes de tensões.

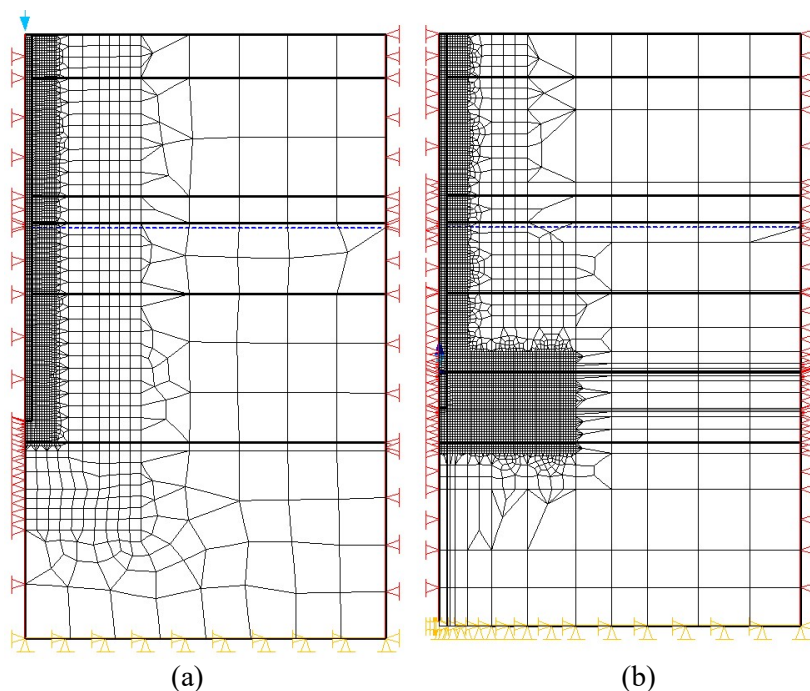


Figura 3. Rede de elementos finitos: (a) prova convencional e (b) prova bi-direcional.

## 4 CAMINHOS DE TENSÃO E DESENVOLVIMENTO DA PLASTIFICAÇÃO

### Caminhos de tensão

Para se entender o processo de mobilização da resistência do solo é preciso examinar os caminhos de tensão em elementos junto da estaca. A Figura 4 apresenta caminhos de tensão efetiva (CTE) de 3 pontos, indicados na Figura 1: **A** ao lado do fuste da estaca, próximo à meia altura do segmento superior, **B** ao lado do segmento inferior do fuste, a meia altura do segmento inferior, e **C** sob a ponta (próximo ao eixo) da estaca. Os caminhos de tensões totais (CTT) não são apresentados porque são paralelos aos efetivos, distantes da poro-pressão inicial no ponto, já que não há geração de poro-pressões (as análises são drenadas).

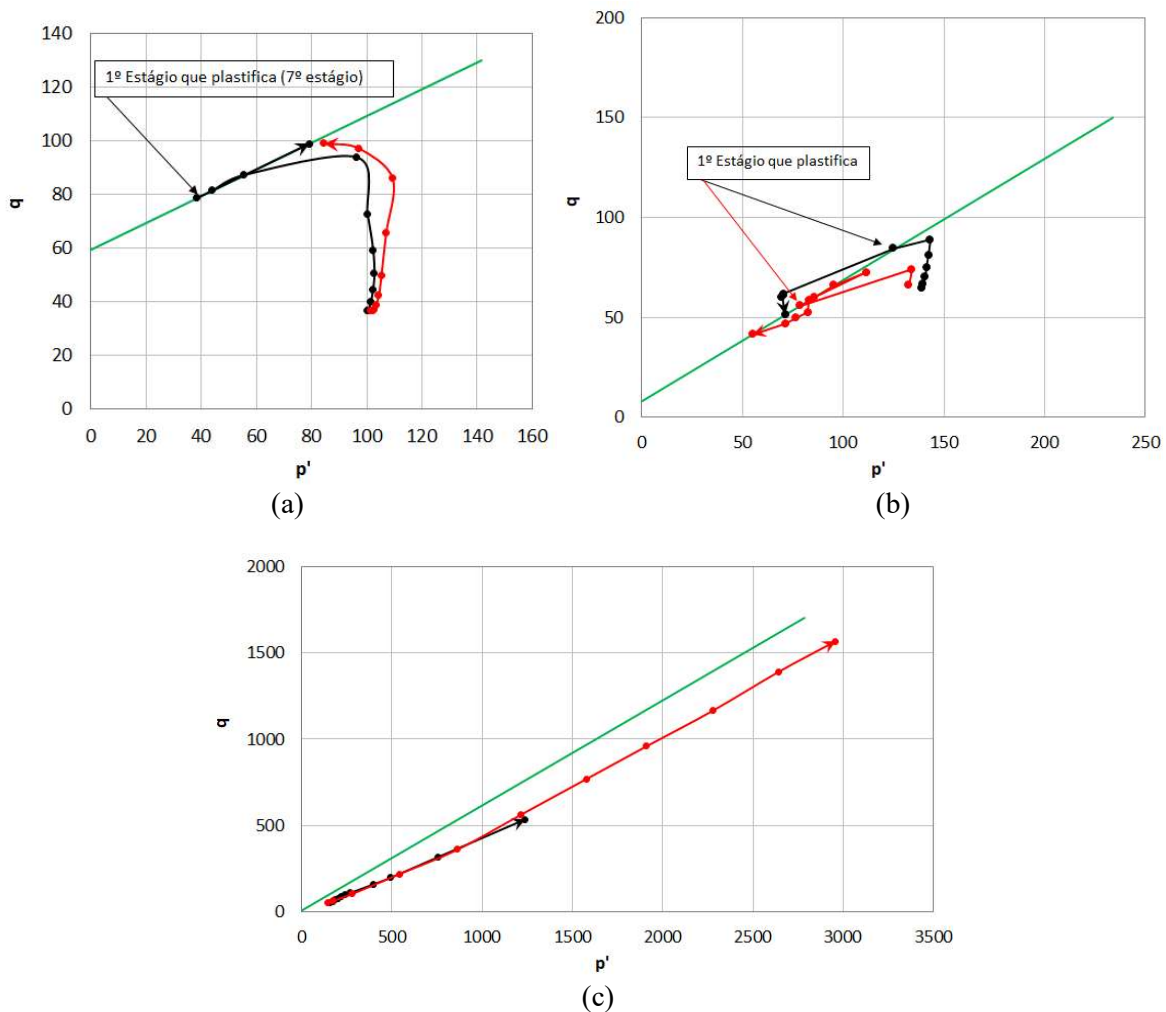


Figura 4. Caminhos de tensão nos pontos (a) **A**, (b) **B** e (c) **C**, com linhas vermelhas para prova bi-direcional, linhas pretas para prova convencional e linhas verdes para envoltória de resistência.

Independente do sentido em que o segmento da estaca é carregado, os caminhos de tensão de pontos ao redor da estaca são verticalizados, característicos do cisalhamento simples. Um pequeno desvio do CTE ao lado do segmento inferior do fuste na prova bi-direcional é notado, indicando uma resistência ao cisalhamento naquele trecho um pouco menor do que na prova convencional (Figura 4b). Uma explicação seria que, na prova bi-direcional, por conta do carregamento ascendente do solo pelo segmento superior da estaca, há uma redução nas tensões verticais ao lado do fuste no segmento inferior e, conseqüentemente, uma redução na resistência ao cisalhamento (e atrito lateral). Outro aspecto interessante, é que os caminhos de tensões dos segmentos inferior e superior atingem a envoltória de resistência no estágio em que ocorre o início da

plastificação nos modelos numéricos em ambas as provas de carga. E os caminhos de tensões se mantêm verticalizados até o último carregamento antes do estágio da plastificação. A pequena diferença no ponto de partida dos caminhos de tensão se deve à diferença na profundidade do ponto B na prova convencional e na bidirecional. Algumas oscilações observadas na Figura 4b se devem à solução numérica, que depende não só do modelo de comportamento do solo, mas também do algoritmo: uma pequena violação da envoltória de resistência (“overshooting”) na prova convencional, corrigida no estágio seguinte, e uma reversão no CTE da prova bi-direcional.

A Figura 4c mostra caminhos de tensão de um ponto abaixo da ponta da estaca, inclinados nos dois tipos de prova de carga, como esperado. Os caminhos de tensões de um ponto no centro da base não atingem a envoltória de resistência, porque ali há um forte aumento da tensão confinante e se forma um cone de solo comprimido. A ruptura se dá na região que contorna esse cone e fica abaixo dele (Figura 5).

### Plastificação

Ainda sobre a evolução da plastificação do solo ao redor da estaca se observa que:

- (i) na prova convencional, inicia-se a plastificação do solo junto ao fuste em direção ao topo a partir do 2º estágio de carregamento; observa-se o início da plastificação abaixo da base da estaca a partir do 6º estágio; e é possível também notar que não há plastificação do solo no topo da estaca nos primeiros 4 estágios de carregamento.
- (ii) na prova bidirecional, há plastificação desde o início na região da trinca (que representa a célula expansiva) e inicia-se a plastificação junto ao fuste no segmento inferior; também se inicia a plastificação na região da base da estaca a partir do 2º estágio; e é possível também notar que não há plastificação do solo no topo da estaca nos primeiros 6 estágios de carregamento.

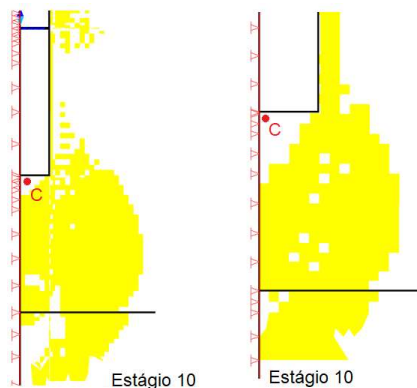


Figura 5. Plastificação na região da ponta da estaca (próxima do ponto C), para a prova bidirecional e convencional, observando-se um cone de material não rompido.

## 5 OUTROS RESULTADOS

### Deslocamentos: vetores e curvas de iguais valores

Na Figura 6, são vistos os deslocamentos verticais obtidos na modelagem da prova convencional e na prova bidirecional, como curvas de iguais valores de deslocamentos e vetores de deslocamentos. Na Figura 6a, tem-se isolinhas de deslocamentos verticais obtidas na modelagem numérica da prova convencional, e também vetores de deslocamentos. Observa-se que toda a região ao redor da estaca tem deslocamento para baixo. Já na Figura 6b, tem-se isolinhas de deslocamentos verticais obtidas da prova bidirecional e vetores de deslocamentos. Vale notar, junto a célula, vetores horizontalizados. Um aspecto interessante é que a fronteira entre a região que se desloca para cima e a que se desloca para baixo na prova bi-direcional – a superfície de deslocamento zero – não é um plano horizontal, mas se apresenta curva. Deslocamentos mais significativos formam um bulbo (ou um elipsoide) na vizinhança do segmento inferior da estaca.

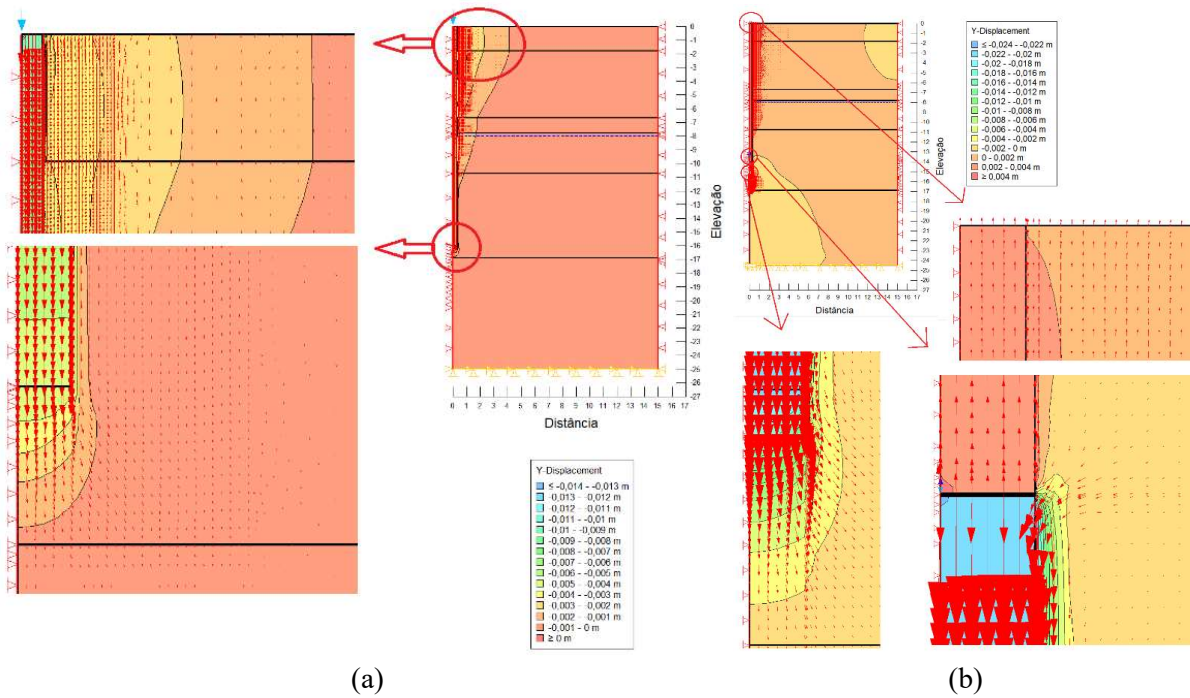


Figura 6. Resultados de curvas de iguais valores de deslocamentos verticais e vetores de deslocamentos: (a) da prova convencional E-46 e (b) da prova bidirecional E-46A.

### Curvas carga-deslocamento

No início das análises foi realizado um estudo de sensibilidade para os parâmetros de resistência e deformabilidade dos solos, buscando atender ao mesmo tempo a correlações com o SPT e o nível dos deslocamentos medidos. Na Figura 7 são apresentadas as curvas medidas e obtidas nas modelagens numéricas, tanto para PCE convencional quanto para a PCE pelo método bidirecional.

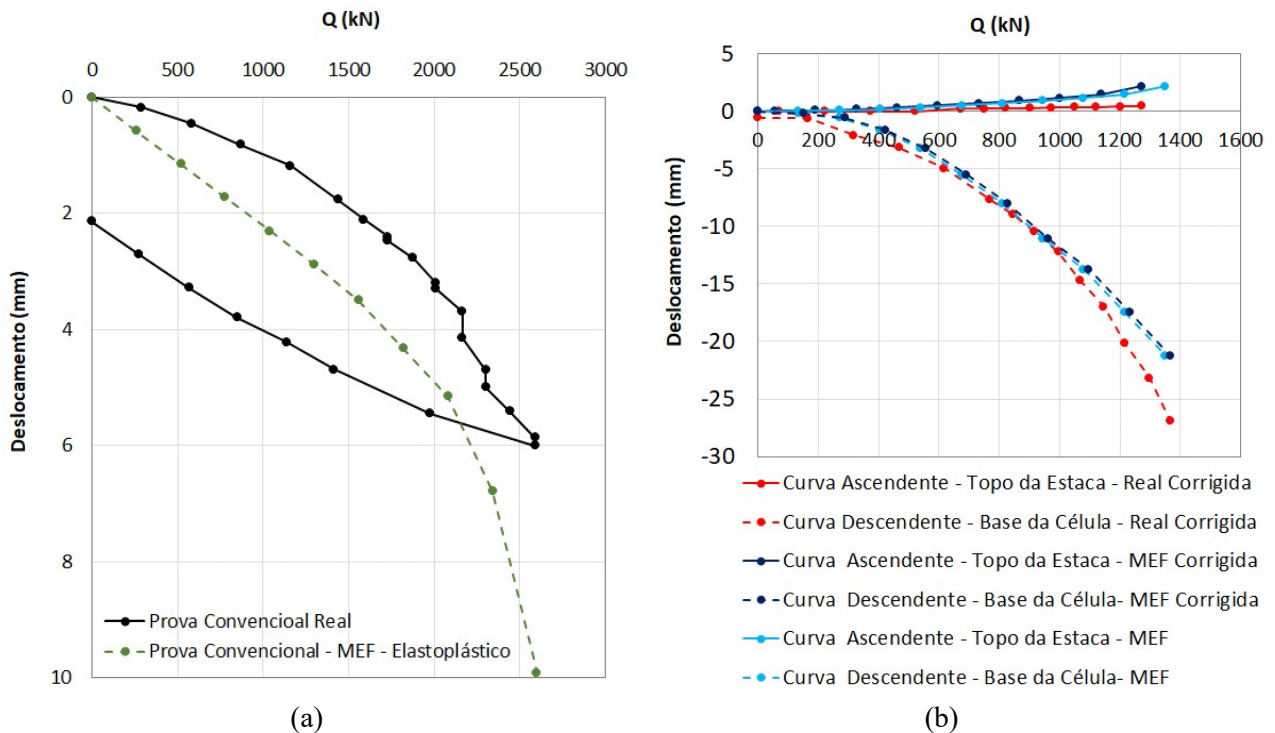


Figura 7. Curvas carga - deslocamento: (a) E46 (real e pelo MEF), (b) E46A (curvas reais corrigidas e pelo MEF).

Ao analisar os resultados da prova convencional, Figura 7a, observa-se uma maior rigidez da prova real comparada à análise numérica e um menor recalque total. Uma possível explicação seria o alargamento do fuste de estacas hélice em solos de baixa resistência.

Já na Figura 7b, são vistas as curvas ascendentes e descendentes corrigidas para o peso próprio da estaca, do ensaio realizado, bem como, para a modelagem numérica.

Importante ressaltar que no caso real avaliado, ocorreu o esgotamento da resistência da ponta prematuramente. E é um problema para interpretação quando o trecho que não rompeu tem um deslocamento muito pequeno. No caso presente (Figura 2a e 7b), a curva carga-deslocamento ascendente é aproximadamente linear, o que indica que a resistência do solo não foi mobilizada. Nestes casos não é recomendável uma extrapolação. Apenas uma estimativa das capacidades de carga limites pode ser feita por meio de métodos semiempíricos (Dada, 2019).

Na extrapolação das curvas do fuste e da ponta foi aplicado o Método de Chin, que supõe a curva como hiperbólica.

### Construção da curva carga-recalque equivalente

Dois propostas de construção da curva carga-recalque equivalente à do método convencional, a partir da prova bidirecional, são avaliadas: (i) a de Silva/Osterberg e (ii) a de Massad. As curvas equivalentes obtidas para as modelagens numéricas pelas duas propostas são apresentadas na Figura 8, juntamente com as curvas para a prova de carga bi-direcional real. Mais detalhes podem ser vistos em Lima (2024), inclusive com a aplicação de outros métodos de construção da curva carga-recalque equivalente.

O método de Massad, que considera o encurtamento elástico, indicou recalques próximos tanto para a prova real como para a modelagem pelo MEF. A curva da modelagem numérica apresentou rigidez menor do que a curva real, mas ficou relativamente próxima. As curvas equivalentes de Massad não são próximas daquelas de Silva-Osterberg. Uma vez que o caso analisado possui rigidez relativa do sistema estaca-solo que caracteriza a estaca como longa, não seria de se esperar uma proximidade dos resultados, como verificado, mas sim um distanciamento dos resultados.

Pode ser notado que, ao contemplar o encurtamento elástico da estaca, as curvas equivalentes apresentaram recalques maiores e rizezas menores. Já que as estacas são longas, o efeito do encurtamento elástico é considerado.

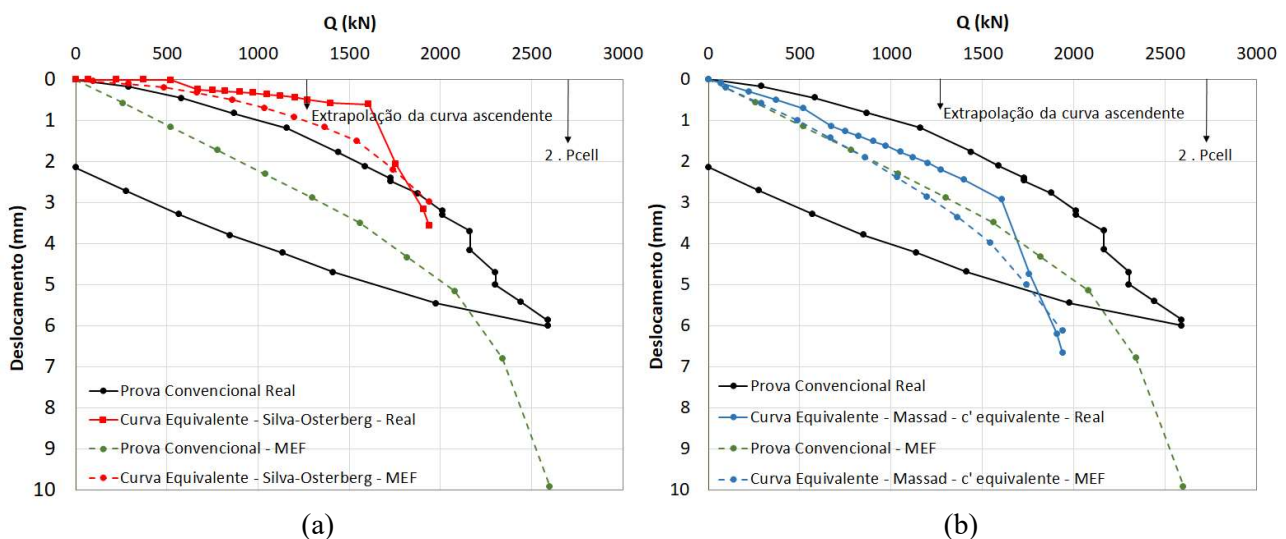


Figura 8. Curvas da prova convencional e equivalentes, MEF e experimental: (a) Silva-Osterberg e (b) Massad.

Como as curvas ascendente e descendente da modelagem numérica (MEF) são próximas das suas correspondentes experimentais, era de se esperar uma aproximação das curvas equivalentes pelos 2 métodos de construção propostos entre a numérica e experimental. A construção proposta por Massad para a curva equivalente, aplicada aos resultados da modelagem numérica da prova bi-direcional, apresentou rigidez menor quando comparada à sua correspondente experimental, mas com recalques finais próximos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Nas provas de carga pelo método bidirecional busca-se posicionar a célula expansiva numa profundidade tal que as capacidades de carga dos dois segmentos sejam atingidas praticamente junto. No caso estudado, a capacidade de carga do segmento inferior se esgotou antes do superior.
- A modelagem numérica teve foco na evolução das tensões ao redor da estaca – e nas resistências mobilizadas –, não tendo buscado acertar simultaneamente as curvas carga-deslocamento nos dois tipos de provas de carga. Assim, com um conjunto de parâmetros estimados a partir de sondagem SPT disponível, chegou-se a curvas próximas na prova bi-direcional e a uma curva com uma rigidez menor na prova convencional.
- Na análise da prova bidirecional pelo MEF foi criada uma pré fratura no nível da célula expansiva. Observou-se, nos resultados da análise, que a fronteira entre a região que se desloca para cima e a que se desloca para baixo (superfície de deslocamento zero) não é um plano horizontal, mas ligeiramente curva.
- O estudo de caminhos de tensão (CTE) de pontos ao redor da estaca indica caminhos verticalizados no solo ao lado do fuste, característicos do cisalhamento simples. Se observa, na modelagem numérica da prova bidirecional um pequeno desvio do CTE no solo ao lado do segmento inferior, sugerindo uma resistência ao cisalhamento naquele segmento um pouco menor do que na prova convencional. Uma explicação seria uma redução na tensão vertical ao lado desse segmento por conta do carregamento vertical ascendente do solo acima da célula na prova bidirecional. Os caminhos de tensões se mantêm verticalizados até o último carregamento antes da plastificação.
- Nos casos em que a flexibilidade da estaca é considerável, são indicados métodos que levem em conta esse fator, como, por exemplo, o de Massad (2015). Os métodos de construção da curva equivalente de Silva-Osterberg são recomendados nos casos de estacas rígidas. Isso se explica pelo fato de que, para estacas rígidas, o encurtamento elástico não é significativo, e a maior parte dos deslocamentos apresentados pelas estacas devem-se aos deslocamentos do solo ao redor da estaca. Por outro lado, o encurtamento elástico pode representar parte importante dos deslocamentos medidos em estacas compressíveis; daí, a necessidade de abordagens que considerem o encurtamento elástico da estaca.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. e da Silva, P.E.C.A.F. (2000) Curva de “recalque equivalente” do topo de uma estaca hélice contínua ensaiada com célula expansiva hidrodinâmica (EXPANCELL), IV SEFE, São Paulo, vol. 1, pp. 416-425.
- Dada, T. L. (2019) Ensaio bidirecional em estacas moldadas in loco: técnicas de execução e métodos de interpretação, com aplicação a casos de obras. Dissertação MSc, Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- Lima, L. S. (2024) Sobre a construção da curva carga-recalque equivalente de prova de carga convencional a partir de prova por método bidirecional. Dissertação MSc, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Massad, F. (2015) On the Interpretation of the Bidirectional Static Load Test. *Soils & Rocks*. vol. 38, no. 3, pp. 249-262.
- Osterberg, J. O. (1998) The Osterberg load test method for bored and driven piles the first ten years. 7th. International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations, *Proceedings*, Viena, pp. 1-17.
- Silva, P. E. C. A. F. (1986) Célula expansiva hidrodinâmica: Uma nova maneira de executar provas de carga. VIII COBRANSEF, *Anais*, Porto Alegre, pp. 223-241.