

Análise Prática de Resultados de Ensaios Bidirecionais

Falconi, Frederico Fernando

ZF & Engenheiros Associados S/S, São Paulo, Brasil, fred@zfsolos.com.br

Maset, Virgínia Lucchesi

ZF & Engenheiros Associados S/S, São Paulo, Brasil, virginia@zfsolos.com.br

RESUMO: O objetivo do presente artigo é apresentar os resultados de 11 ensaios bidirecionais e introduzir uma abordagem simples para analisar o desempenho das estacas em condições reais de carregamento. São 5 ensaios em estacas escavadas de grande diâmetro com fluido estabilizante e 6 ensaios em estacas hélice contínua monitorada, realizados nas cidades de São Paulo, Barueri e Curitiba. Os diâmetros das estacas variam de 60 a 100 cm; seus comprimentos, de 13,00 a 50,00 m.

PALAVRAS-CHAVE: teste bidirecional, prova de carga estática, estaca hélice contínua, estaca escavada de grande diâmetro.

1 INTRODUÇÃO

Para avaliação do desempenho de estacas moldadas in loco, tem sido bastante utilizado o ensaio com célula expansiva hidrodinâmica denominado teste bidirecional, internacionalmente conhecido como O-Cell. Neste ensaio, simplificado, uma ou mais células de carga são previamente posicionadas dentro do fuste da estaca, engastadas na armação, e são concretadas junto com a estaca. Através de sistema de injeção a célula é expandida, fazendo com que o fuste reaja sobre a ponta da estaca.

Para o correto posicionamento da célula ao longo do comprimento da estaca, busca-se o ponto de equilíbrio entre a resistência ao atrito lateral do fuste mais o peso próprio da estaca acima da célula e o atrito lateral do fuste abaixo da célula mais a resistência de ponta:

$$Al_{fuste} + PP_{fuste} = Al_{ponta} + Q_p \quad (1)$$

Desta maneira, a própria estaca atua como sistema de reação da prova de carga.

Todos os ensaios bidirecionais apresentados neste trabalho, provenientes de acervo dos autores, foram executados pela Arcos Engenharia de Solos.

As leituras de deslocamentos, em geral, são realizadas utilizando-se deflectômetros posicionado no topo da estaca, que medem o movimento ascendente do fuste, e tell-tales posicionados na base da célula de carga, que medem o movimento descendente da ponta da estaca. É esse o caso em quase todos os ensaios apresentados neste trabalho – apenas em um foram realizadas medições adicionais em outras posições ao longo da estaca.

É comum, na construção das curvas carga x deslocamento do ensaio bidirecional, utilizar a carga corrigida, descontando-se da carga aplicada no fuste o peso próprio da estaca acima da célula e acrescentando à carga da ponta o peso próprio da estaca abaixo da célula. Porém, os gráficos apresentados neste trabalho foram construídos utilizando a carga aplicada pela célula no fuste e na ponta em cada estágio, sem nenhum tipo de correção.

2 MOTIVAÇÃO

A interpretação dos resultados dos ensaios com célula expansiva tem sido muito debatida, principalmente quanto à combinação das duas curvas obtidas no ensaio (fuste e ponta) em uma única curva carga x recalque, representativa de

toda a estaca. A metodologia aplicada usualmente é a soma das cargas da ponta e do fuste para o mesmo deslocamento, conforme proposto por da Silva no VIII COBRAMSEF (1986). Essa abordagem vem sendo muito criticada por ser demasiadamente simplificada e, em grande parte dos casos, não conduzir a resultados satisfatórios. Isso ocorre porque o método não considera, no deslocamento total da estaca, a parcela do encurtamento elástico.

Na grande maioria dos ensaios, os deslocamentos do fuste são medidos por deflectômetros posicionados no topo da estaca, e os deslocamentos da ponta são medidos por tell-tales posicionados na base da célula de carga. Quando isso ocorre, o encurtamento elástico da parcela da estaca abaixo da célula, denominada “ponta” da estaca, está embutido na leitura do tell-tale. Assim, é necessário contabilizar na construção da curva equivalente o encurtamento elástico da parcela da estaca acima da célula, denominada “fuste”.

No que diz respeito ao ensaio bidirecional,

para estacas rígidas, a metodologia usual parece conduzir a resultados satisfatórios. Isto ocorre porque o encurtamento elástico, neste caso, não é significativo – a maior parte dos deslocamentos apresentados pela estaca são devidos aos deslocamentos das camadas de solo adjacentes. Já no caso de estacas compressíveis, o encurtamento elástico representa quase que a totalidade dos deslocamentos medidos. Assim, faz-se necessário desenvolver abordagens que avaliem o desempenho das estacas em situação real de carregamento (ou seja, no topo da estaca) com a consideração do encurtamento elástico.

Algumas metodologias para introdução do encurtamento elástico na curva carga-recalque equivalente do ensaio estático convencional foram discutidas por Alonso e da Silva (2000) e Massad (2015). O objetivo deste trabalho é propor uma rotina simples e direta, que possa ser aplicada no dia a dia de projeto.

Tabela 1. Características dos ensaios bidirecionais apresentados.

Obra	Local	Ensaio	Estaca	Tipo de estaca	Diâmetro (cm)	Comprimento (m)	
						Fuste	Ponta
Barueri	Barueri	PCE-01	P27B	Estação	100	19,50	4,43
Brooklin	São Paulo	PCE-01	P6+PR11	Hélice contínua	90	12,00	6,00
		PCE-02	P50B	Hélice contínua	60	10,00	4,00
Vila Andrade I	São Paulo	PCE-01	P142A	Hélice contínua	60	10,00	4,00
		PCE-02	P206B	Hélice contínua	80	12,00	4,00
Vila Andrade II	São Paulo	PCE-01	P242	Hélice contínua	80	9,00	4,00
		PCE-02	P142	Hélice contínua	80	8,80	5,20
Consolação	São Paulo	PCE-01	PC1	Estação	80	25,00	13,00
		PCE-02	PC2	Estação	80	35,00	15,00
Batel	Curitiba	PCE-01	P25A	Estação	90	20,20	4,00
		PCE-02	Teste	Estação	100	21,00	3,00

3 OBRAS

3.1 Barueri

Em dezembro de 2011 foi realizado ensaio em uma estaca escavada de grande diâmetro de 100cm de diâmetro e 23,93m de comprimento, parte da fundação de um edifício residencial localizado em Barueri, SP.

Após 18 estágios de carregamento, observou-se a não estabilização dos deslocamentos da ponta e a dificuldade de manter a pressão no manômetro, caracterizando ruptura geotécnica. Assim, o ensaio foi descarregado e finalizado.

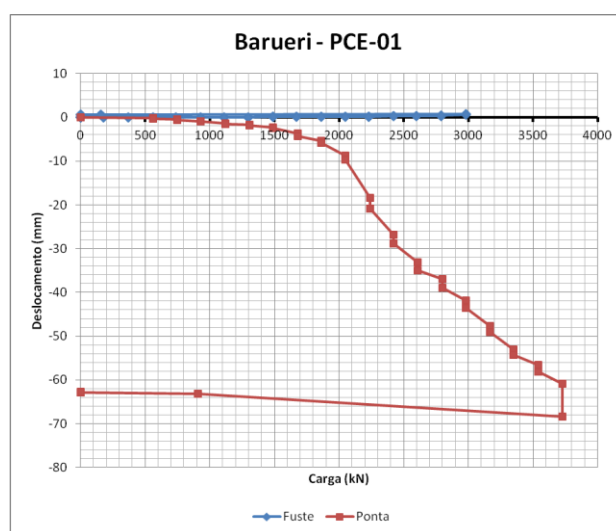


Figura 1. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Barueri - PCE-01.

3.2 Brooklin

Em janeiro de 2012 foram realizados dois ensaios em estacas hélice contínua que fazem parte da fundação de um edifício residencial localizado no Brooklin, em São Paulo, SP.

A PCE-01 foi executada em estaca de 90cm de diâmetro e 18,00m de comprimento. A PCE-02 foi executada em estaca de 60cm com 14,00m de comprimento.

Em ambos os ensaios observou-se a não estabilização dos deslocamentos do fuste e a dificuldade de manutenção da pressão no manômetro, o que provavelmente configura ruptura geotécnica por atrito lateral. A partir daí procedeu-se ao descarregamento da estaca e à finalização do ensaio.

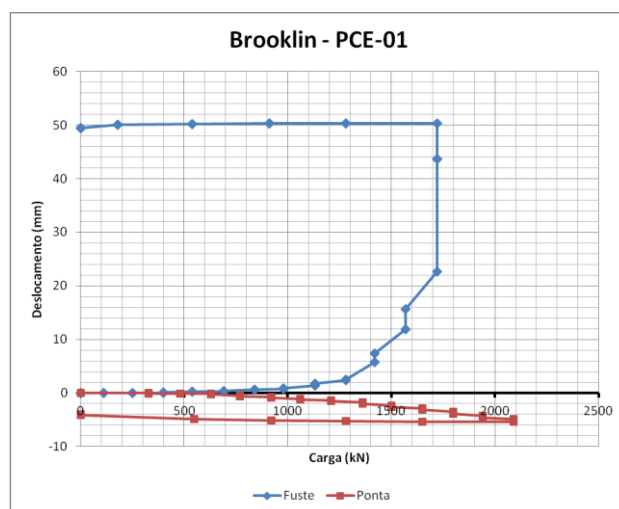


Figura 2. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Brooklin - PCE-01.

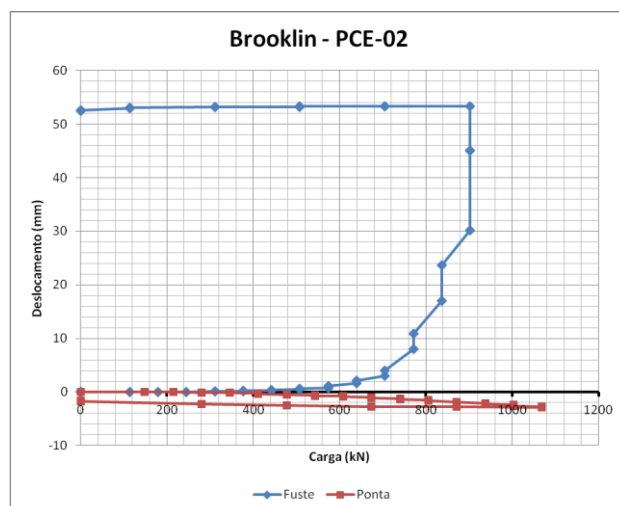


Figura 3. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Brooklin - PCE-02.

3.3 Vila Andrade I

Em junho de 2014 foram realizados dois ensaios em estacas hélice contínua que fazem parte da fundação de dois edifícios residenciais localizados na Vila Andrade, em São Paulo, SP.

A PCE-01 foi executada em estaca de 60cm de diâmetro e 14,00m de comprimento. A PCE-02 foi executada em estaca de 80cm com 16,00m de comprimento.

Os ensaios transcorreram normalmente até atingir o 21º estágio, sem que houvesse ruptura. A partir daí, procedeu-se ao descarregamento da estaca, finalizando o ensaio.

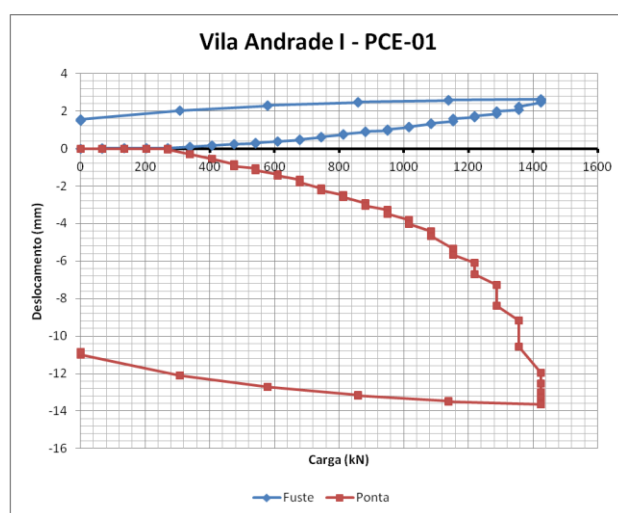


Figura 4. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Vila Andrade I - PCE-01.

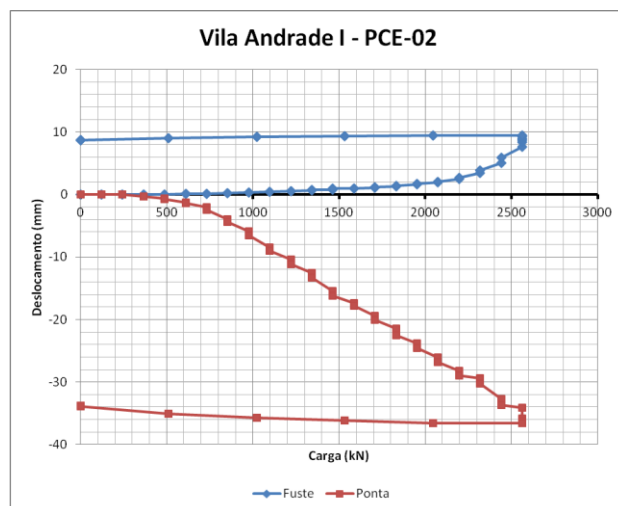


Figura 5. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Vila Andrade I - PCE-02.

3.4 Vila Andrade II

Em julho de 2014 foram realizados dois ensaios em estacas hélice contínua que fazem parte da fundação de dois edifícios residenciais localizados na Vila Andrade, em São Paulo, SP.

A PCE-01 foi executada em estaca de 80cm de diâmetro e 13,00m de comprimento. A PCE-02 foi executada em estaca de 80cm com 14,00m de comprimento.

Em ambos os ensaios observou-se a não estabilização dos deslocamentos do fuste, o que provavelmente caracteriza ruptura geotécnica por atrito lateral. A partir deste momento, procedeu-se ao descarregamento da estaca, finalizando o ensaio.

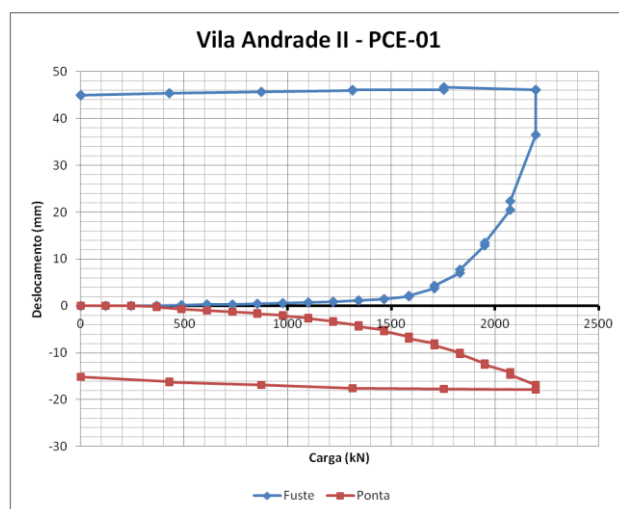


Figura 6. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Vila Andrade II - PCE-01.

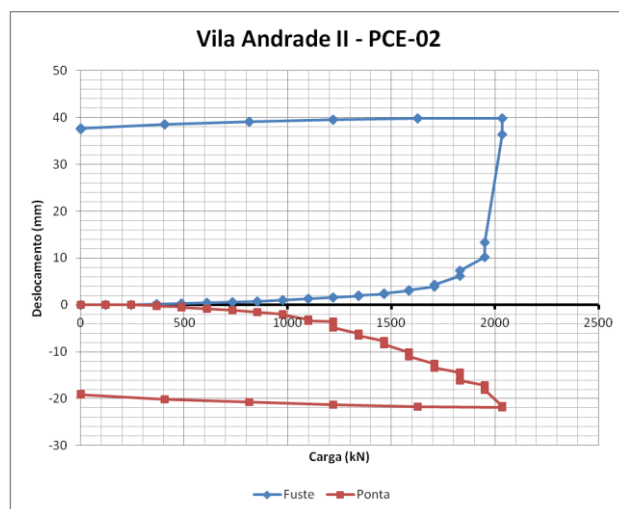


Figura 7. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Vila Andrade II - PCE-02.

3.5 Consolação

Em outubro de 2014 foram realizados dois ensaios em estacas escavadas de grande diâmetro com polímero que fazem parte da fundação de um edifício localizado no Centro, em São Paulo, SP.

A PCE-01 foi executada em estaca de 80cm de diâmetro e 38,00m de comprimento. A PCE-02 foi executada em estaca de 80cm com 50,00m de comprimento.

Ambas as estacas foram solicitadas por 36 estágios sem que ocorresse ruptura. Após descarregamento, os ensaios foram finalizados.

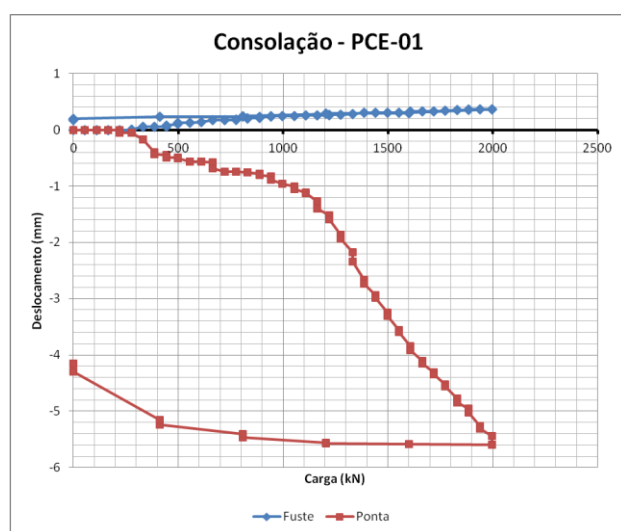


Figura 8. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Consolação - PCE-01.

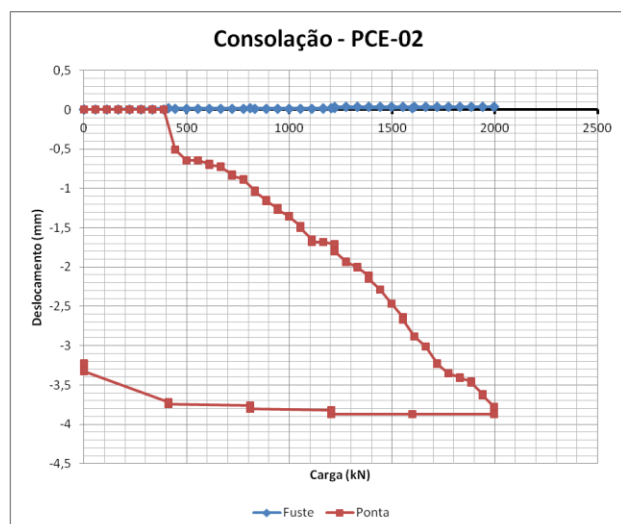


Figura 9. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Consolação - PCE-02.

3.6 Batel

Foram realizados dois ensaios em estacas escavadas com fluido estabilizante – uma faz parte da fundação de um edifício residencial localizado no Batel, em Curitiba, PR, e a outra é uma estaca teste executada no mesmo local. Em ambas foram instalados dispositivos de leitura em quatro posições: deflectômetros no topo da estaca e tell-tales na cota de arrasamento, no topo e na base da célula. As leituras apresentadas nas curvas do fuste são referentes ao topo da estaca.

A PCE-01 foi executada em estaca de 90cm de diâmetro e 24,20m de comprimento. A PCE-02 foi executada em estaca de 100cm com 24,00m de comprimento.

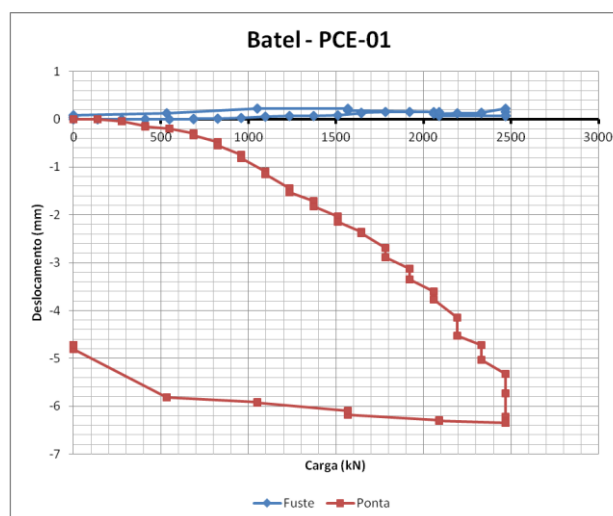


Figura 10. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Batel - PCE-01.

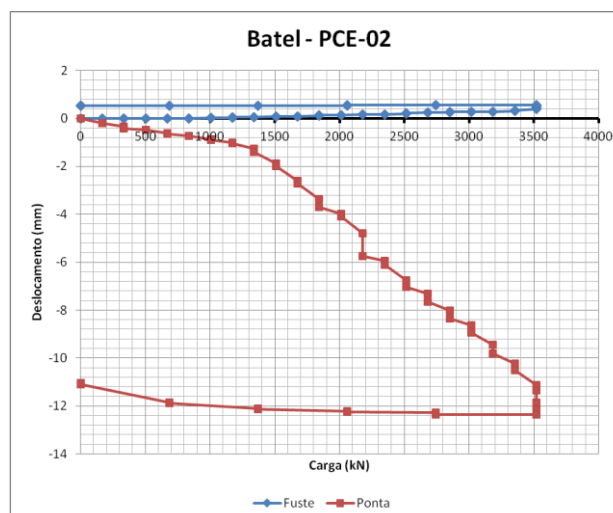


Figura 11. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Batel - PCE-02.

4 METODOLOGIA E RESULTADOS OBTIDOS

O encurtamento elástico de uma peça estrutural não confinada submetida a uma carga P é dado pela equação:

$$\Delta e = \frac{Ph}{ES} \quad (1)$$

P : carga aplicada [kN];

h : comprimento da peça [mm];

E : módulo de elasticidade do concreto [kN/mm²];

S : área da seção transversal [mm²].

Sabe-se que o encurtamento elástico de uma estaca confinada em solo é menor do que o encurtamento elástico teórico, dado pela equação (1). Sabe-se também que, no teste bidirecional, o encurtamento elástico da estaca é menor do que seria no teste convencional, partindo do pressuposto de que a resistência do solo em que a estaca está instalada cresce com a profundidade. Assim, acrescentar à curva equivalente o encurtamento elástico teórico do fuste da estaca, dado pela equação (1), é uma maneira de introduzir essa grandeza a favor da segurança.

Cada ponto da curva carga x recalque é construído a partir da soma das cargas aplicadas no fuste e na ponta, para o mesmo deslocamento, mais o encurtamento elástico do fuste.

A metodologia descrita anteriormente foi aplicada a todos os ensaios, com o intuito de se avaliar o desempenho da estaca na carga de trabalho sob condições reais de carregamento, ou seja, carga aplicada de cima pra baixo. Os resultados estão explicitados nas figuras e tabela a seguir.

Não foi possível aplicar para os ensaios Consolação – PCE-01 e PCE-02 e Batel – PCE-01. Nos dois primeiros, o fuste apresentou deslocamentos inferiores a 0,3 mm, e a extrapolação das curvas por uma exponencial não se aplica. No último, as leituras da parte superior da estaca (topo da estaca, topo da célula e cota de arrasamento) apresentaram variações de medição devido à movimentação

de máquinas próximo ao local do teste – assim, esses valores não foram considerados.

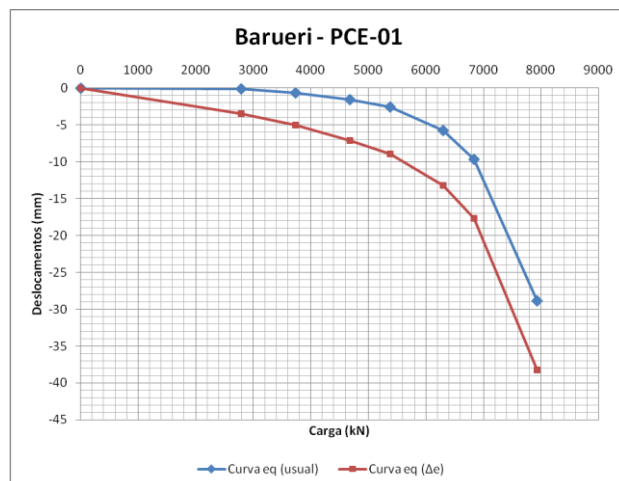


Figura 12. Curvas equivalentes do topo da estaca do ensaio Barueri – PCE-01, com e sem consideração do encurtamento elástico.

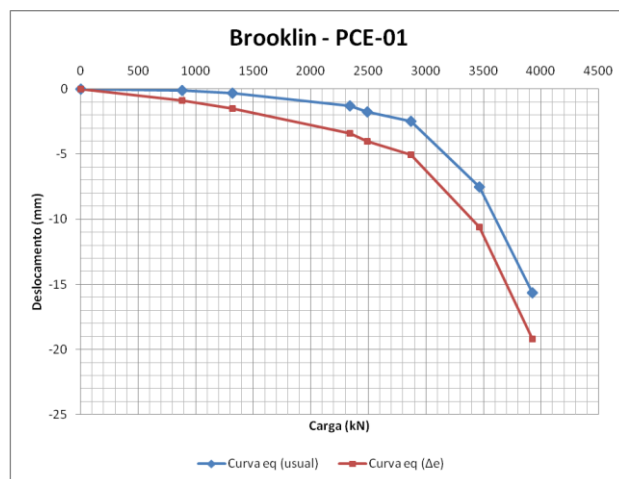


Figura 13. Curvas equivalentes do topo da estaca do ensaio Brooklin – PCE-01, com e sem consideração do encurtamento elástico.

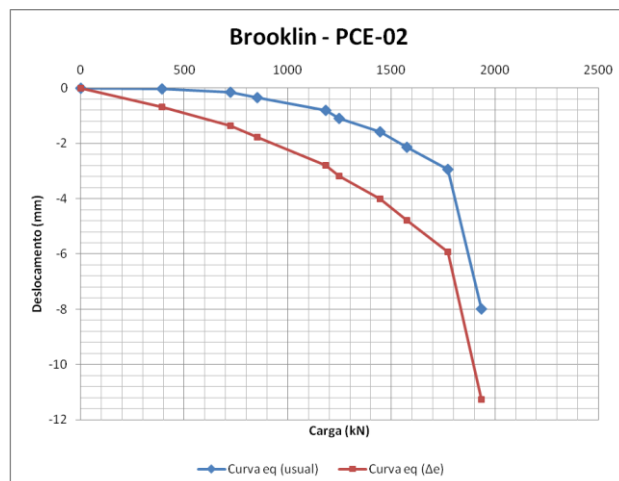


Figura 14. Curvas equivalentes do topo da estaca do ensaio Brooklin – PCE-02, com e sem consideração do encurtamento elástico.

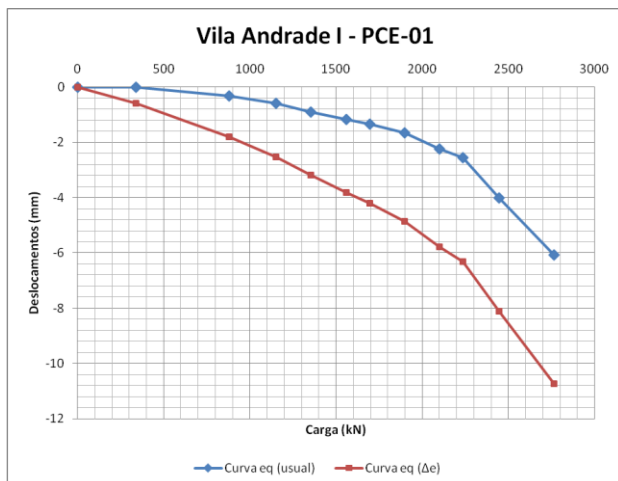


Figura 15. Curvas equivalentes do topo da estaca do ensaio Vila Andrade I – PCE-01, com e sem consideração do encurtamento elástico.

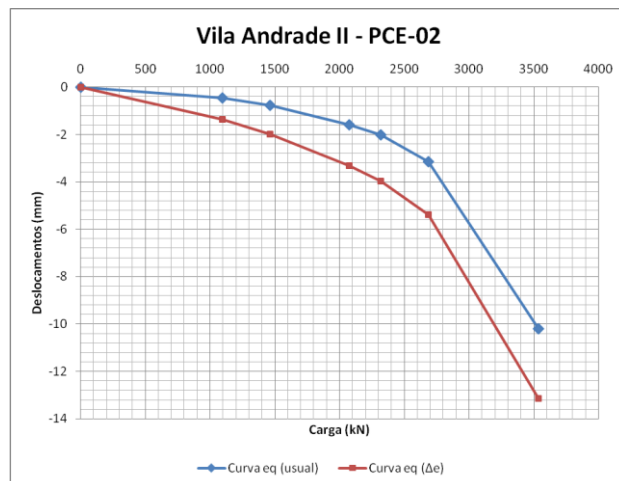


Figura 18. Curvas equivalentes do topo da estaca do ensaio Vila Andrade II – PCE-02, com e sem consideração do encurtamento elástico.

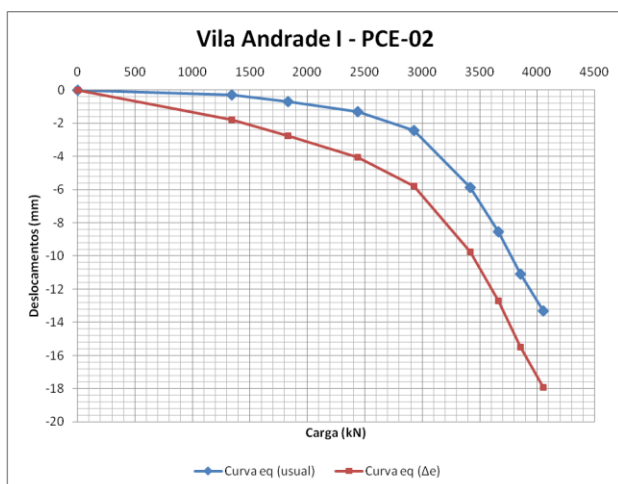


Figura 16. Curvas equivalentes do topo da estaca do ensaio Vila Andrade I – PCE-02, com e sem consideração do encurtamento elástico.

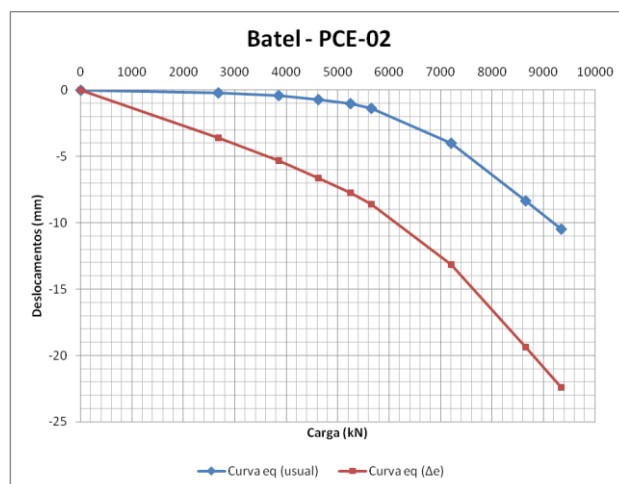


Figura 19. Curvas equivalentes do topo da estaca do ensaio Batel – PCE-02, com e sem consideração do encurtamento elástico.

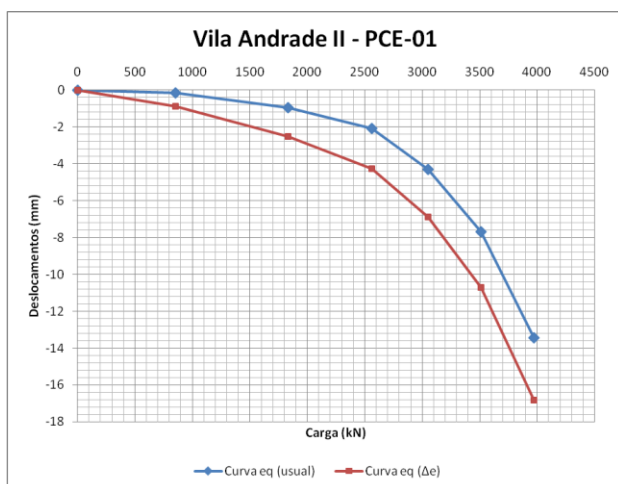


Figura 17. Curvas equivalentes do topo da estaca do ensaio Vila Andrade II – PCE-01, com e sem consideração do encurtamento elástico.

Tabela 2. Resultados das análises dos testes bidirecionais.

Obra	Ensaio	Diâmetro (cm)	Carga de trabalho (kN)	Recalque na carga de trabalho (mm)	FS
Barueri	PCE-01	100	3900	5,6	< 2
Brooklin	PCE-01	90	3100	7,2	< 2
	PCE-02	60	1400	3,8	< 2
Vila Andrade I	PCE-01	60	1400	3,3	> 2
	PCE-02	80	2500	4,4	< 2
Vila Andrade II	PCE-01	80	2500	4,0	< 2
	PCE-02	80	2500	4,8	< 2
Consolação	PCE-01	80	2500	-	-
	PCE-02	80	2500	-	-
Batel	PCE-01	90	3100	-	-
	PCE-02	100	3900	5,5	> 2

5 CONCLUSÕES

O intuito da metodologia apresentada neste trabalho não é simular a curva carga x recalque equivalente do topo da estaca – e sim, avaliar o comportamento da estaca em situação real de carregamento. Ao introduzir a parcela o encurtamento elástico do fuste, pode-se aferir o desempenho da estaca na carga de trabalho de maneira simples e com certa margem de segurança.

Pode-se afirmar que o ensaio bidirecional é excelente ferramenta para comprovação de desempenho das fundações, mas seguramente não representa a curva carga-recalque de uma prova de carga estática. As dificuldades inerentes à transformação das curvas em uma curva equivalente – como a determinação do encurtamento elástico do fuste com precisão, o correto posicionamento da célula ao longo da estaca e a sempre necessária extrapolação de uma das curvas obtidas – são os principais fatores que corroboram essa afirmação. A instalação de um ou mais tell-tales no topo da célula, além dos já presentes deflectômetros no topo da estaca, permitiriam que o encurtamento elástico do fuste no ensaio bidirecional seja medido com precisão, eliminando uma etapa de cálculo. Também pode-se instalar tell-tales adicionais na ponta da estaca para avaliar com mais precisão seu comportamento no ensaio bidirecional.

Vale ressaltar que para as 8 curvas apresentadas neste artigo, apenas em 2 se obtém fator de segurança igual ou superior a 2 para

carga de projeto.

REFERÊNCIAS

- da Silva, P.E.C.A.F. (1986) Célula expansiva hidrodinâmica – Uma nova maneira de executar provas de carga, *VIII COBRAMSEF*, p. 223-241.
- Alonso, U. 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*, Vol. 1, p. 416-425.
- Massad, F. (2015) On the interpretation of the Bidirectional Static Load Test, *Soils and Rocks*, São Paulo, Vol. 38, n. 3, p. 249-262.