

Interpretação dos Resultados de Ensaios Bidirecionais

Maset, Virgínia Lucchesi

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

Falconi, Frederico Fernando

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

Hachich, Waldemar Coelho

Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, whachich@usp.br

RESUMO: O objetivo do presente artigo é analisar e interpretar os resultados de um ensaio bidirecional realizado em estaca escavada de grande diâmetro com fluido estabilizante na cidade de Curitiba. Tal análise tem como base o método apresentado por Massad no SEFE 8 (2014) e detalhado na revista Soils and Rocks (2015). Em seu artigo, Massad aplica a metodologia a um ensaio apresentado por Alonso e da Silva no SEFE 4 (2000), realizado em estaca hélice contínua monitorada em Belo Horizonte. Serão discutidas as hipóteses adotadas e os resultados obtidos por Massad.

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.

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. No caso apresentado neste trabalho 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 vem sendo 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).

Foi desenvolvida por Massad uma metodologia que permite a combinação das duas curvas com a introdução do encurtamento elástico do fuste da estaca, corrigido por coeficientes que relacionam o encurtamento elástico da estaca no teste convencional (com carga aplicada para baixo) com o encurtamento elástico no teste bidirecional (com carga aplicada para cima). Essa metodologia foi apresentada no SEFE 8 e, posteriormente, detalhada em artigo na revista *Soils and Rocks*. Será feita uma análise crítica do método, visando aplicá-lo ao ensaio apresentados neste artigo.

Tabela 1. Características dos ensaios analisados.

Obra	Local	Estaca	Tipo de estaca	Diâmetro (cm)	Comprimento (m)	
					Fuste	Ponta
Alonso e da Silva (2000) Batel	Belo Horizonte	E-46A	Hélice contínua	60	14,00	1,50
	Curitiba	Teste	Estacão	100	21,00	3,00

3 ENSAIOS ANALISADOS

3.1 E46-A

A Figura 1 apresenta a curva do ensaio bidirecional realizado na estaca E46-A e apresentado por Alonso e da Silva no SEFE 4, em 2000. A estaca ensaiada é do tipo hélice contínua, com 60 cm de diâmetro e 15,50 m de comprimento.

A análise deste ensaio e a construção da curva carga x recalque equivalente do topo da estaca foi escopo do trabalho de Massad.

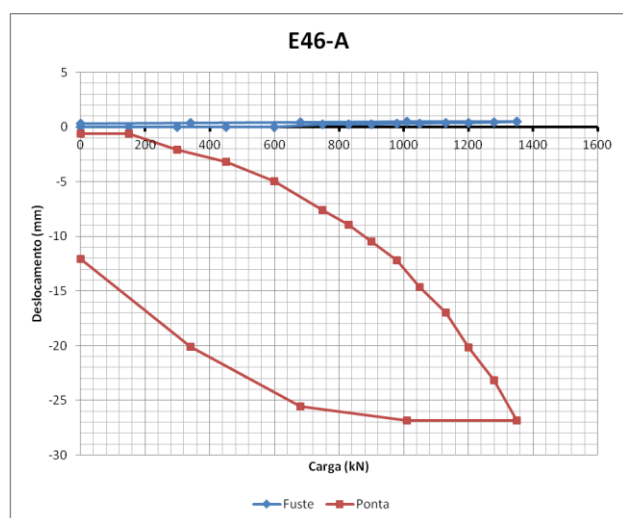


Figura 1. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio E46-A.

3.2 Batel

Para a aplicação do método de Massad, objetivo desse artigo, foi utilizado um ensaio em estaca escavada com fluido estabilizante que faz parte da fundação de um edifício residencial localizado no Batel, em Curitiba, PR. A PCE-02 foi executada em estaca de 100 cm de diâmetro e 24,00 m de comprimento.

Esse ensaio foi escolhido por ter tell-tales instalados em algumas posições ao longo do fuste, em particular, no topo da célula. A sondagem mais próxima da estaca ensaiada está apresentada na Figura 3.

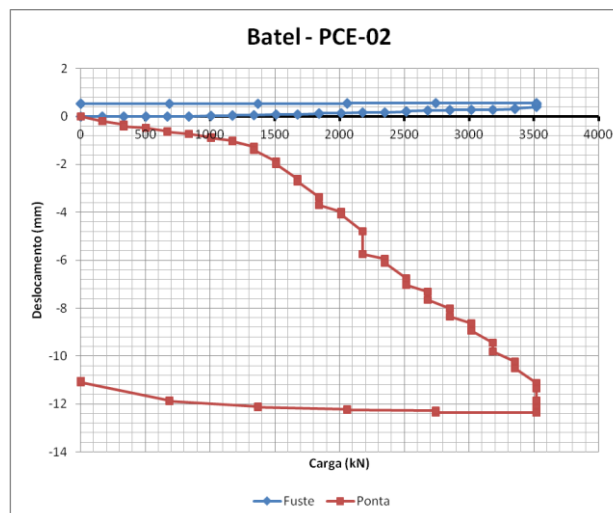


Figura 2. Curvas carga x deslocamento do fuste e da ponta para o ensaio Batel - PCE-02.

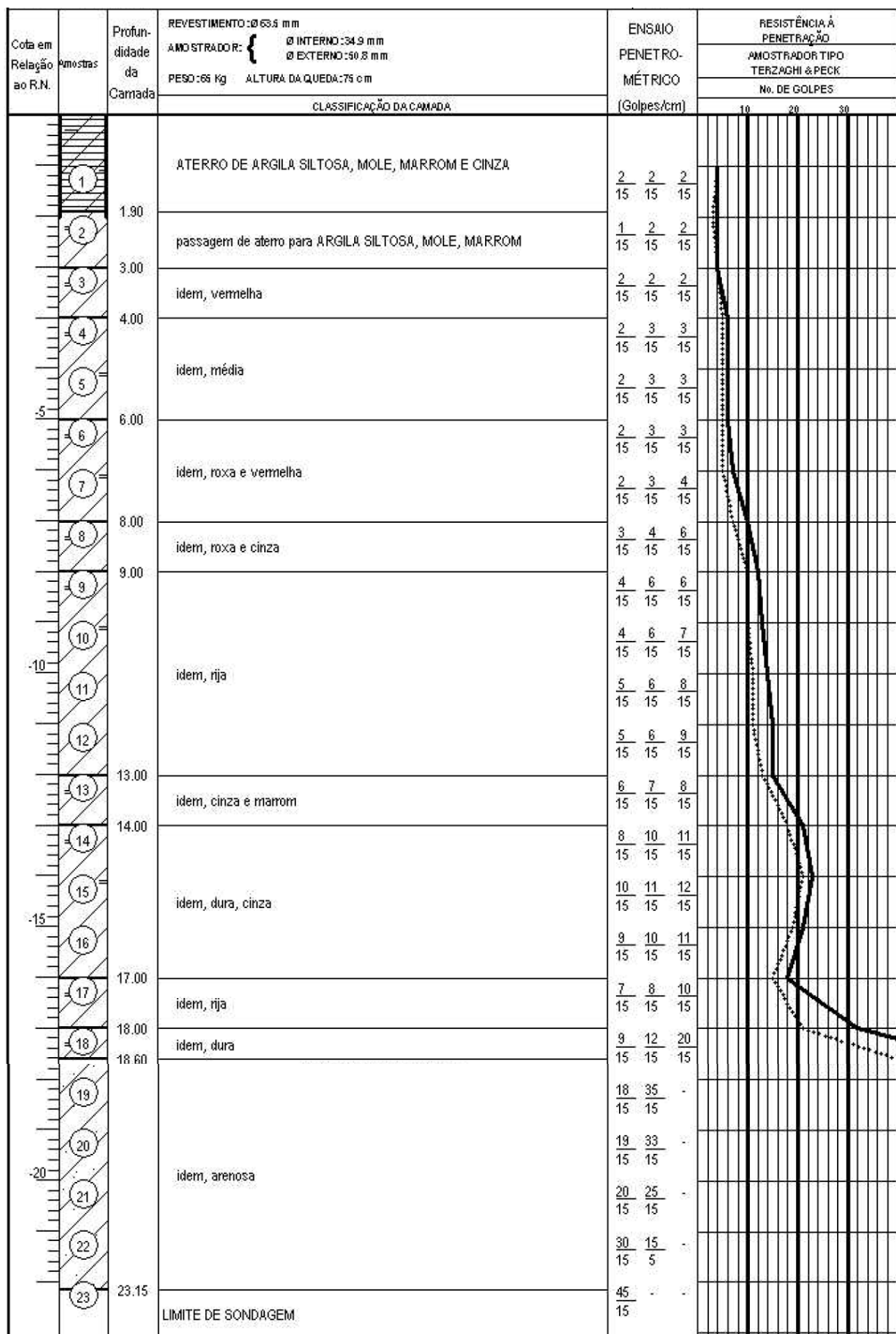


Figura 3. Sondagem da obra Batel.

4 DETERMINAÇÃO DA CURVA EQUIVALENTE DA PROVA DE CARGA ESTÁTICA CONVENCIONAL A PARTIR DOS RESULTADOS DO TESTE BIDIRECIONAL

A metodologia aplicada usualmente – soma das cargas da ponta e do fuste para o mesmo deslocamento – 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.

Em artigo apresentado ao Congresso Panamericano de Geotecnia, em 1995, Massad introduziu o coeficiente k , que mede a rigidez do conjunto estaca-solo.

$$k = \frac{A_{lr}}{K_r \cdot y_1} \quad (2)$$

A_{lr} : atrito lateral máximo mobilizado pelo solo [kN];

K_r : rigidez do fuste da estaca [kN/mm];

y_1 : deslocamento necessário para mobilizar o atrito lateral máximo da camada de solo [mm].

$$K_r = \frac{ES}{h} \quad (3)$$

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

S : área da seção da estaca [mm²];

h : comprimento da estaca acima da célula (fuste) [mm].

Tal coeficiente permite classificar a estaca como rígida ($k \leq 2$), intermediária ($2 < k < 8$) ou compressível ($k \geq 8$).

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. Foi necessário desenvolver metodologias que adaptassem o método apresentado por da Silva, considerando as deformações elásticas da estaca.

Durante o SEFE 8, realizado em São Paulo, Massad apresentou metodologia que permite a combinação das duas curvas do ensaio bidirecional, com a introdução do encurtamento elástico do fuste da estaca. Este valor, por sua vez, é corrigido pelos coeficientes c e c' – introduzidos por Leonards e Lovell em 1979 – que relacionam o encurtamento elástico da estaca no teste convencional, com carga aplicada para baixo, com o encurtamento elástico no teste bidirecional. Tais coeficientes são governados, principalmente, pela distribuição do atrito lateral ao longo do fuste da estaca. Em setembro de 2015, Massad detalhou o método em artigo na *Soils and Rocks*, aplicando-o a seis casos de obra.

Um dos casos de obra analisados foi apresentado por Alonso e da Silva em 2000, no SEFE 4. Na obra, localizada em Belo Horizonte, duas estacas hélice contínua executadas com 3,00m de distância entre elas foram submetidas a ensaios de carregamento estático: uma a ensaio bidirecional e outra a prova de carga convencional. Assim, foi possível comparar a curva construída a partir do teste bidirecional com a curva real da prova de carga estática.

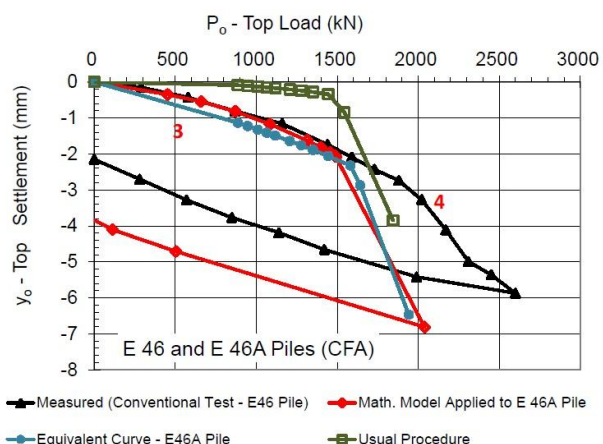


Figura 4. Comparação das curvas carga x recalque do caso apresentado por Alonso e Da Silva e analisado por Massad.

Pode-se observar, comparando-se a curva “Measured (Conventional test – E46 Pile)” com

a curva “Equivalent curve – E46A Pile”, que elas possuem muito boa aderência até cerca de 1500 kN de carregamento. Porém, a partir deste ponto, a curva obtida pelo modelo segue a tendência de uma ruptura típica de ponta com cerca de 2000 kN, enquanto que a curva do ensaio convencional continua mobilizando carga até cerca de 2500 kN.

Para a aplicação do método, algumas hipóteses foram feitas por Massad. Entre elas:

- A curva carga x deslocamento do fuste, por não ter atingido valores consideráveis de deslocamento – menos de 1 mm, enquanto a ponta deslocou 25 mm – foi extrapolada até atingir a carga de ruptura por esgotamento do atrito lateral, calculada por Décourt-Quaresma (1978);
- y_1 , deslocamento do solo que causa a mobilização máxima do atrito lateral, foi considerado como 0,35 mm. Este valor decorre, provavelmente, do ponto da curva carga x recalque do ensaio estático convencional realizado na mesma obra, a partir do qual o atrito lateral máximo do solo começa a ser progressivamente mobilizado, de cima para baixo.

5 ANÁLISE DO ENSAIO PCE-02

5.1 Aplicação do método de Massad para determinar a curva equivalente da prova de carga estática

As curvas do ensaio bidirecional PCE-02 apresentam comportamento similar às do ensaio apresentado por Alonso e da Silva e analisado por Massad: o fuste apresentou deslocamentos muito pequenos, inferiores a 1 mm, enquanto que a ponta apresentou deslocamentos de até 12 mm.

Os pequenos deslocamentos apresentados pelo fuste da estaca dificultam a construção da curva equivalente, pois só há pontos medidos para uma pequena magnitude de recalques. Assim, a exemplo do que Massad fez em seu artigo, a curva carga x deslocamento do fuste foi extrapolada através de uma exponencial até atingir a ruptura aos 4260 kN – valor, por sua

vez, calculado pelo método Décourt-Quaresma (1978) aplicado à parcela da estaca acima da célula de carga.

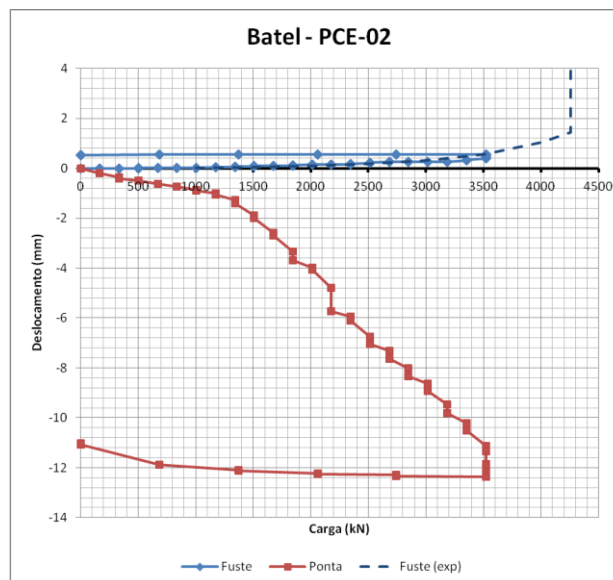


Figura 5. Curvas carga x deslocamento, com o fuste extrapolado por uma exponencial.

K_r foi determinado pela equação (3), adotando-se $E = 25 \text{ kN/mm}^2$. Os valores de c e c' foram determinados utilizando a distribuição da resistência por atrito lateral das camadas de solo ao longo do fuste da estaca, de acordo com a sondagem apresentada nos anexos deste artigo. y_1 foi adotado como 0,50 mm.

Tabela 2. Coeficientes para o ensaio PCE-02.

K_r (kN/mm)	c	c'	K	Tipo de estaca
935	0,61	0,39	9,1	Longa ou compressível

Nesta obra em particular, foram instalados dispositivos de leitura em quatro posições ao longo da estaca: extensômetros no topo da estaca e tell-tales na cota de arrasamento, no topo e na base da célula. Analisando as leituras do topo da estaca e do topo da célula, pode-se medir o encurtamento elástico do fuste.

Para a construção da curva carga x recalque do ensaio convencional, foram utilizadas as equações (4) e (5), além dos valores do encurtamento elástico da estaca medidos no ensaio, ponderados pelos coeficientes c e c' .

A partir do estágio em que $y'p = 0,49 \text{ mm}$, os valores de A_l foram obtidos da curva extrapolada do fuste.

$$y_0 = y'_p + \Delta e \cdot \frac{c}{c'} + \frac{Q_p}{Kr} \quad (4)$$

$$P_0 = A_l + Q_p \quad (5)$$

Tabela 3. Aplicação do método de Massad para o ensaio PCE-02.

y'_p (mm)	Q_p (kN)	A_l (kN)	P_0 (kN)	y_0 (mm)
0,00	0	0	0	0,00
0,19	168	2610	2778	2,86
0,35	335	3110	3445	4,54
0,49	503	3390	3893	5,89
0,74	838	3720	4558	8,06
1,00	1174	3970	5144	10,18
1,40	1341	4250	5591	12,84
2,00	1509	4260	5769	13,62
4,00	2012	4260	6272	16,15



Figura 6. Curvas carga x recalque do ensaio convencional, construídas pelo método usual e pelo método de Massad.

Percebe-se que, neste caso, a diferença entre as duas curvas é bastante significativa por se tratar de estaca longa ou compressível ($k = 9,1$).

5.2 Encurtamento elástico: valores medidos x calculados

Na construção da curva carga x recalque equivalente do topo da estaca, Massad reitera que, caso estejam disponíveis, deve-se utilizar os valores de encurtamento elástico medidos no ensaio. Se não, deve-se calcular Δe para cada estágio de carregamento segundo a equação (6).

$$\Delta e = c' \cdot \frac{A_l}{Kr} \quad (6)$$

Para o caso analisado neste trabalho, os seguintes valores foram obtidos:

Tabela 4. Valores medidos e calculados de Δe , para cada estágio de carregamento.

y'_p (mm)	P_0 (kN)	Δe medido (mm)	Δe calculado (mm)
0,00	0	0,00	0,00
0,19	2778	1,59	1,09
0,35	3445	2,45	1,30
0,49	3893	3,11	1,41
0,74	4558	4,11	1,55
1,00	5144	5,06	1,66
1,40	5591	6,39	1,77
2,00	5769	6,39	1,78
4,00	6272	6,39	1,78

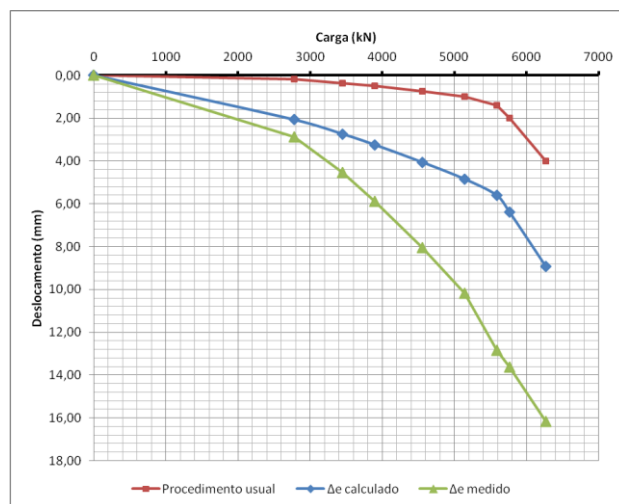


Figura 7. Curvas carga x recalque do ensaio convencional construídas pelo método usual e pelo método de Massad, para Δe medido e Δe calculado.

Observa-se significativa diferença entre as curvas construídas pelo método, uma com valores medidos e a outra com valores calculados do encurtamento elástico.

6 CONCLUSÕES

A metodologia de Massad apresenta resultados consistentes e é uma evolução do método de da Silva pois, além dos deslocamentos medidos no ensaio, também contabiliza os deslocamentos devidos ao encurtamento elástico da estaca. Algumas considerações porém, devem ser feitas.

No caso da PCE-02 os deslocamentos do fuste e os da ponta da estaca apresentaram ordens de grandeza bastante diferentes. Esse problema quase sempre ocorre e é causado, provavelmente, pelo posicionamento incorreto da célula de carga ao longo da estaca – posicionamento, por sua vez, baseado em métodos semi-empíricos de cálculo de capacidade de carga –, não havendo equilíbrio entre fuste e ponta. Assim, uma das duas curvas precisa ser extrapolada, para que seja possível a construção de uma curva equivalente. Essa extrapolação pode gerar erros e levar a uma interpretação incorreta do comportamento da estaca.

Vale ressaltar, também, a vantagem de se medir diretamente o encurtamento elástico do fuste da estaca. Como já discutido anteriormente, em estacas compressíveis, quase que a totalidade dos recalques decorrem das deformações elásticas – nesses casos, determinar esses valores com precisão é muito importante para a correta interpretação dos resultados do ensaio. A medição com tell-tales ainda é a melhor maneira de se determinar o valor do encurtamento elástico. Assim, é recomendável e até imperativo medir os deslocamentos do fuste também no topo da célula, conforme já assinalado por Alonso e da Silva (2000).

Outro ponto a ser levado em consideração é a determinação do valor de y_1 . Massad encontrou, na curva do ensaio estático convencional, o valor de 0,35 mm, embora ele próprio afirme, em outro ponto do artigo, que y_1 costuma ser da ordem de “alguns milímetros”. Quando não se dispõe da curva do ensaio convencional – imensa maioria dos casos –, esse valor tem de ser adotado. Em se tratando

de dado crucial para o cálculo do coeficiente k e a classificação da estaca como rígida ou compressível, a incerteza na sua determinação dificulta a aplicação do método no dia-a-dia de projeto. No caso da PCE-02, uma variação de 2 mm no valor de y_1 poderia fazer com que a estaca fosse classificada como rígida.

Por fim, no caso do ensaio analisado por Massad, apesar de a curva gerada pelo modelo simular muito bem o comportamento da estaca até a mobilização máxima do atrito lateral do fuste, o fato de a estaca romper com uma carga inferior à real permite uma interpretação subestimada da sua capacidade de carga. Ou seja: utilizando como critério de projeto a carga de ruptura obtida pela combinação das curvas do ensaio bidirecional, a estaca estaria sendo subutilizada.

Os aspectos acima mencionados mostram que, apesar de o método apresentar resultados bastante consistentes, as incertezas inerentes à sua aplicação – como o valor de y_1 e a eventual necessidade de extrapolação das curvas do ensaio – dificultam incorporá-lo ao dia-a-dia de projeto.

REFERÊNCIAS

- 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.
- Décourt, L. e Quaresma, A.R. (1978) Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT, *VI COBRAMSEF*, Vol. 1, p. 45-53.
- Leonards, G.A. e Lovell, D. (1979) Interpretation of load tests on high capacity driven piles, *Behaviour of Deep Foundations*, ASTM STP 670, p. 388-415.
- Massad, F. (1995) Pile analysis taking into account soil rigidity and residual stresses, *X Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 2, p. 1199-1210.
- Massad, F. (2015) On the interpretation of the Bidirectional Static Load Test, *Soils and Rocks*, São Paulo, Vol. 38, n. 3, p. 249-262.
- da Silva, P.E.C.A.F. (1986) Célula expansiva hidrodinâmica – Uma nova maneira de executar provas de carga, *VIII COBRAMSEF*, p. 223-241.