

Avaliação da carga de segurança por meio de interpretação da curva equivalente obtida do ensaio bidirecional

Felipe Vianna Amaral de Souza Cruz

Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Rio de Janeiro, Brasil, felipe@geoestatica.com.br

Alessandra Conde de Freitas

Professora Adjunta, Escola Politécnica da UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, alessandracruz@poli.uff.br

Tiago de Jesus Souza

Engenheiro Civil, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, Brasil, tiagojs@ita.br

RESUMO: Busca-se nesse artigo avaliar o trecho pseudoelástico das curvas equivalentes obtidas por meio de ensaios bidirecionais, comparando as cargas de segurança com as obtidas em provas de carga estática, realizadas pelo método convencional. A curva equivalente proposta por Silva (1983) fornece uma rigidez inicial bastante semelhante a da curva carga *versus* recalque fornecida pelo ensaio convencional de prova de carga estática, possibilitando, assim, a avaliação da carga de segurança, independentemente do método de prova de carga utilizado. Nesse contexto o objetivo deste artigo foi de estudar a técnica do ensaio Bidirecional, com destaque a aplicação prática dos métodos de interpretação dos resultados. São apresentados três locais em que foram executadas provas de carga realizadas pelos métodos convencional e bidirecional, em estacas moldadas “*in loco*”, executadas em solos com capacidade de suporte semelhante, comparando-as quanto às cargas de segurança obtidas.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio Bidirecional, Carga de Segurança, Prova de Carga Estática.

ABSTRACT: This paper intends to evaluate the pseudoelastic stretch of the equivalent curves obtained by means of bidirectional tests, comparing the safety loads with those obtained in static load tests, carried out by the conventional method. The equivalent curve proposed by Silva (1983) provides an initial stiffness very similar to the load versus settlement curve provided by the conventional static load test. Thus, enabling the evaluation of the safety load, regardless of the load proof method used. In this context, the purpose of this paper was to study the technique of the Bidirectional test, with emphasis on the practical application of the methods of interpretation of the results. Three locations are presented in which load tests carried out by conventional and bidirectional methods were carried out on piles molded “*in loco*”, carried out on soils with similar support capacity, comparing them as to the security loads obtained.

KEYWORDS: Bidirectional Test, Safety Loads, Static Load Test.

1 Introdução

Uma modalidade de prova de carga em estacas tem ganhado espaço ultimamente: o chamado “método bidirecional”. Nessa modalidade, uma célula expansiva é instalada no fuste da estaca, que, ao ser pressurizada e expandindo-se, carrega os dois segmentos de estaca (um servindo de reação ao carregamento do outro). Esse ensaio tem sido designado, internacionalmente, como Método Bidirecional (embora essa expressão não seja correta do ponto de vista da terminologia da Física). O apelo desse tipo de prova de carga é o menor custo em relação à prova de carga convencional, em que o macaco carrega o topo da estaca. A redução de custo se deve à dispensa do sistema de reação da prova convencional (por tirantes ou estacas de tração), que é o principal item de custo desses ensaios. Em relação ao assunto supracitado são relevantes os

trabalhos de Campos *et al.*, (2015) e Wolney (2013 e 2014), além de Silva (1983) que descrevem a metodologia e a praticidade desta modalidade de prova de carga. Em ensaios de estacas de grande diâmetro (em que duas ou três células são colocadas lado a lado para causar a expansão de uma seção da estaca) – que precisam ser ensaiadas a grandes cargas – a diferença de custo é enorme.

Essa modalidade de prova de carga foi proposta na mesma época (anos 1980) – porém de forma independente – pelo brasileiro Silva (1983) e posteriormente pelo norte americano Osterberg (1989). Ensaios desse tipo estão sendo feitos no mundo todo e há uma discussão sobre as condições em que esse tipo de prova substitui o ensaio convencional e como interpretar seus resultados. Segundo Silva (1983), no ensaio bidirecional, a própria estaca é o elemento de reação, o que foi viabilizado pela inserção da célula hidroexpansiva dentro do elemento de fundação. Nas palavras de Wolney (2013), este método está fundamentado na aplicação direta da terceira Lei de Newton, uma vez que a carga é aplicada na célula, solicitando a base e a parte do fuste abaixo da mesma, fazendo-a reagir contra a parte do fuste acima da célula, com uma força de mesma intensidade, porém de sentido contrário.

Esse trabalho tem como objetivo demonstrar que a rigidez inicial da curva equivalente bidirecional, proposta por Silva (1983), propicia resultados, em termos de carga de segurança, convergentes com os obtidos a partir rigidez inicial da curva carga-recalque obtidos pelo ensaio de prova de carga estática, realizado pelo método convencional.

1.1 Tipos de provas de carga estática em estacas e seus resultados diretos

A Figura 1 apresenta os dois tipos de provas de carga estática em estacas e seus resultados diretos. Como pode ser observado na Figura 1b, a carga máxima aplicada pela célula expansiva é o limite das curvas carga-deslocamento dos dois segmentos de estaca. A instrumentação padrão no “Método Bidirecional” é constituída por extensômetros no topo da estaca, como nas provas convencionais, e mais extensômetros de hastes (*tell-tales*) indo até o topo e base da célula.

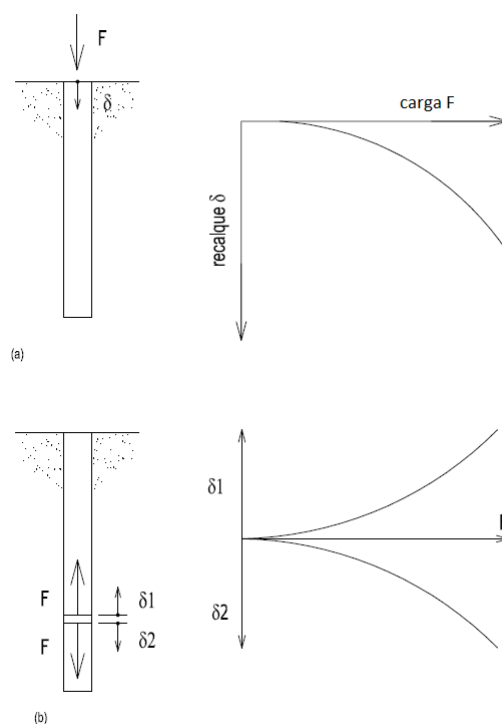


Figura 1. Tipos de provas de carga estática em estacas e seus resultados diretos; (a) prova convencional e (b) com célula expansiva (Cruz, 2019).

Uma interpretação mais refinada dos resultados da prova bidirecional é aquela em que se leva em conta o peso próprio da estaca, o que reduz o deslocamento da curva do segmento superior e aumenta o da curva do segmento inferior (Figura 2). Outra correção usualmente feita é do encurtamento elástico, que pode ser medido ou estimado (ver, p. ex., Massad, 2015).

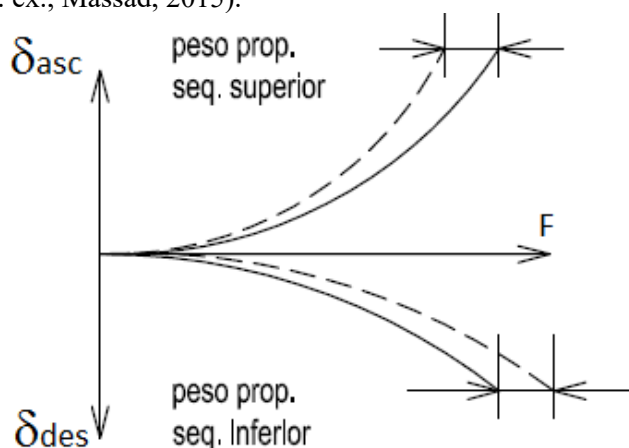


Figura 2. Interpretação da prova bidirecional levando em conta o peso próprio da estaca, com curva corrigida em tracejado (Cruz, 2019).

Desde que (i) a célula tenha sido posicionada em um nível tal que a capacidade de carga do segmento inferior seja próxima da capacidade de carga do segmento superior e (ii) o carregamento tenha ido até a ruptura, a Figura 2 permite a obtenção da capacidade de carga total da estaca.

1.2 Interpretação dos resultados em termos de recalques

Buscando construir uma curva carga-recalque equivalente à prova convencional, Silva (1983) propôs um procedimento em que se escolhe um valor de deslocamento de cada vez e as cargas na curva superior e inferior a ele correspondente são obtidas. Essas cargas são somadas e levadas a um outro gráfico como correspondentes ao dobro do valor do deslocamento escolhido (Figura 3). Para essa construção, as curvas carga-deslocamento completas (até o final da prova) precisam estar disponíveis. Cruz (2019) propôs outro processo em que a construção da curva equivalente é feita à medida que o ensaio progride, portanto, permitindo uma avaliação do comportamento da estaca à medida em que a prova evolui, inclusive indicando a proximidade da ruptura. Nesse procedimento, os deslocamentos ao final de cada estágio de carga são somados, assim como as cargas naquele estágio, e as somas levadas a um gráfico (Figura 4).

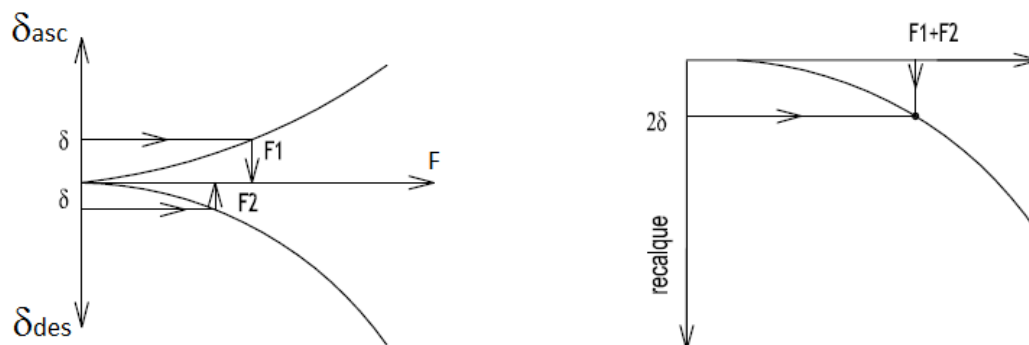


Figura 3. Construção da curva carga-recalque equivalente segundo Silva (1983) (Cruz, 2019).



Figura 4. Construção da curva carga-recalque equivalente segundo Cruz (2019).

Essa proposta de construção de curva equivalente é conveniente nos ensaios em que haja dificuldade de instrumentação com *tell-tales*, o que ocorre, por exemplo, no caso de estacas pré-moldadas cravadas. Nesse caso, a construção da curva equivalente por estágios pode ser feita utilizando-se o volume de fluido que sai da bomba para se estimar o deslocamento da célula expansiva, consequentemente da estaca, a cada incremento de carregamento. Consegue-se, assim, obter uma curva equivalente sem a necessidade dos deslocamentos parciais (descendente e ascendente). A utilização dos *tell-tales* deve ser preferida, pois fornece importantes informações, sem as quais não é possível saber se, por exemplo, a ponta da estaca não suportou o carregamento e/ou se não foi mobilizado plenamente o fuste.

Vale ressaltar que, as cargas totais devem considerar o peso próprio da estaca, submerso quando for o caso (para o segmento acima da célula, carga ascendente – peso próprio do segmento, e para o segmento abaixo da célula, carga descendente + peso próprio do segmento).

2 Comparação entre as Curvas Carga-Recalque de Ensaios Convencionais e Bidirecionais

Quando se examinam os resultados das provas de carga bidirecionais e as curvas equivalentes construídas, nota-se que, em função dos deslocamentos atingidos pelos segmentos superior e inferior, ocorrem três situações:

- (i) quando os deslocamentos dos dois segmentos são da mesma ordem de grandeza;
- (ii) quando os deslocamentos do segmento superior são muito menores;
- (iii) quando os deslocamentos do segmento inferior são muito menores.

O caso (ii) corresponde a estacas cujas bases estão assentes em material não muito mais resistente que o material do fuste. Como se sabe, para um mesmo material, a relação carga-deslocamento do fuste é muito mais rígida que a mesma relação para carregamento da base. O caso (iii) ocorre quando a base da estaca está em solo muito competente/alteração de rocha. No conjunto de provas analisado, não houve nenhum caso do terceiro tipo.

Observa-se que as curvas equivalentes propostas por Silva (1983) e Cruz (2019) têm como objetivo obter resultados semelhantes à curva carga-recalque obtida pela prova de carga realizada pelo método convencional.

As Figuras 05 e 06 apresentam, para uma estaca escavada e para uma estaca hélice contínua (Cruz, 2019), além da curva equivalente segundo Silva (1983), as curvas carga-recalque de provas de carga convencionais executadas em estacas próximas e com as mesmas características.

A estaca escavada PC-22B (Cruz, 2019) possui 700 milímetros de diâmetro e comprimento de 30 metros, sendo que desse comprimento total, 25 metros se encontram acima do conjunto de células expansivas instaladas e 5 metros abaixo desse conjunto. Foi ensaiada pelo método bidirecional, na cidade de Niterói no Rio de Janeiro.

Já a estaca hélice contínua 16B (Cruz, 2019) possui 600 milímetros de diâmetro e comprimento de 15,47 metros, sendo que desse comprimento total, 14 metros se encontram acima da célula expansiva instalada e 1,47 abaixo da mesma. Foi ensaiada pelo método bidirecional, na cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais.

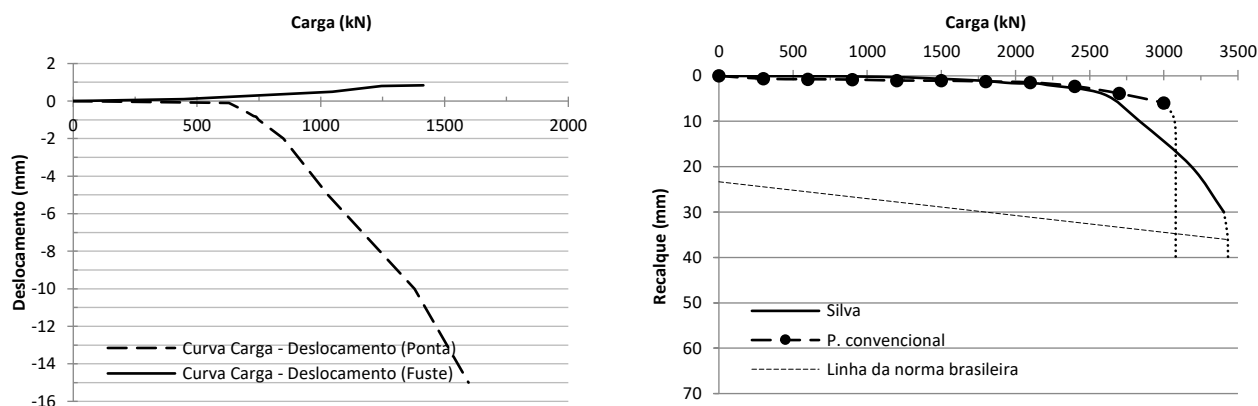


Figura 5. (a) Curvas da prova bidirecional da estaca escavada PC-22B e (b) Curva carga-recalque equivalente segundo Silva (1983) e de prova convencional, com determinação da carga de ruptura pela norma brasileira. (Cruz, 2019)

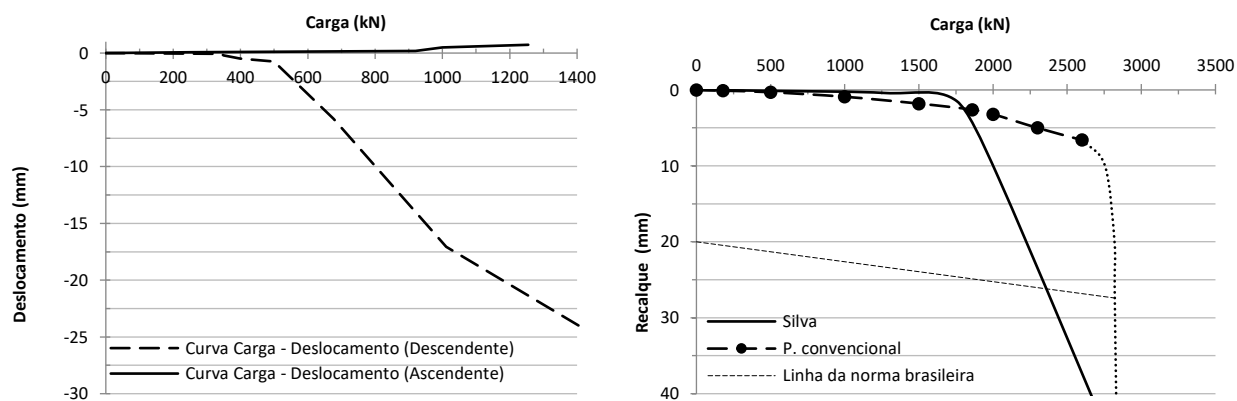


Figura 6. (a) Curvas da prova bidirecional da estaca hélice contínua PC-16B e (b) Curva carga-recalque equivalente segundo Silva (1983) e de prova convencional, com determinação da carga de ruptura pela norma brasileira (Cruz, 2019)

A Figura 7 também apresenta, para uma estaca escavada, a curva equivalente construída a partir da prova bidirecional e o resultado de prova de carga convencional. Para esse caso, primeiro, realizou-se a prova bidirecional e, depois de oito meses, a prova convencional na mesma estaca. Provas de carga convencionais e bidirecionais, quando realizadas na mesma estaca, costumam fornecer resultados bastante diferentes, como ocorreu no presente caso.

A estaca escavada PC-07B (Cruz, 2019) possui 1000 milímetros de diâmetro e comprimento de 24,30 metros, sendo que desse comprimento total, 20,70 metros se encontram acima do conjunto de células expansivas instaladas e 3,60 metros abaixo desse conjunto. Foi ensaiada pelo método bidirecional, no campo experimental de Araquari, em Santa Catarina.

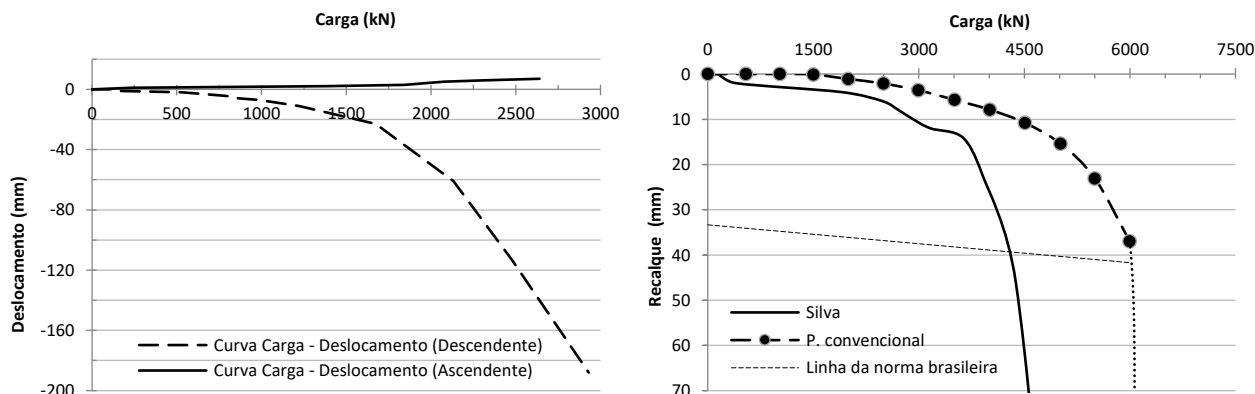


Figura 7. (a) Curvas da prova bidirecional da estaca escavada PC-07B e (b) Curvas carga-recalque equivalentes segundo Silva (1983) e Cruz (2019), e de prova convencional, com determinação da carga de ruptura pela norma brasileira.

3 Avaliação da Rigidez das Curvas Equivalentes até a Carga de Segurança

Para o desenvolvimento deste artigo é feita uma comparação de valores de rigidez (relação carga/deslocamento) até a carga de segurança obtida com as duas curvas carga-recalque (obtida pelo método convencional e obtida pela curva equivalente proposta por Silva (1983)). Para carga de segurança, adotou-se a carga de ruptura (convencionada) dividida pelo coeficiente de segurança global (usual) 2,0. Os recalques obtidos das duas curvas carga-recalque foram usados para se obter a rigidez. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos através da análise das provas de carga.

Tabela 1. Análise dos Resultados Obtidos nas Provas de Carga.

Prova de Carga	Convencional			Bidirecional		
	$Q_{segurança}(kN)$	$r (mm)$	Rigidez (kN/mm)	$Q_{segurança}(kN)$	$r (mm)$	Rigidez (kN/mm)
PC07B	3000	3,6	833	2150	5	430
PC16B	$Q_{segurança}(kN)$	$r (mm)$		$Q_{segurança}(kN)$	$r (mm)$	
	1410	1,5	940	1310	0,85	1541
PC22B	$Q_{segurança}(kN)$	$r (mm)$		$Q_{segurança}(kN)$	$r (mm)$	
	1545	1,04	1486	1710	1,01	1693

A Figura 8 apresenta uma comparação entre as rigidezes obtidas para resultados obtidos através do método convencional e bidirecional de prova de carga estática.

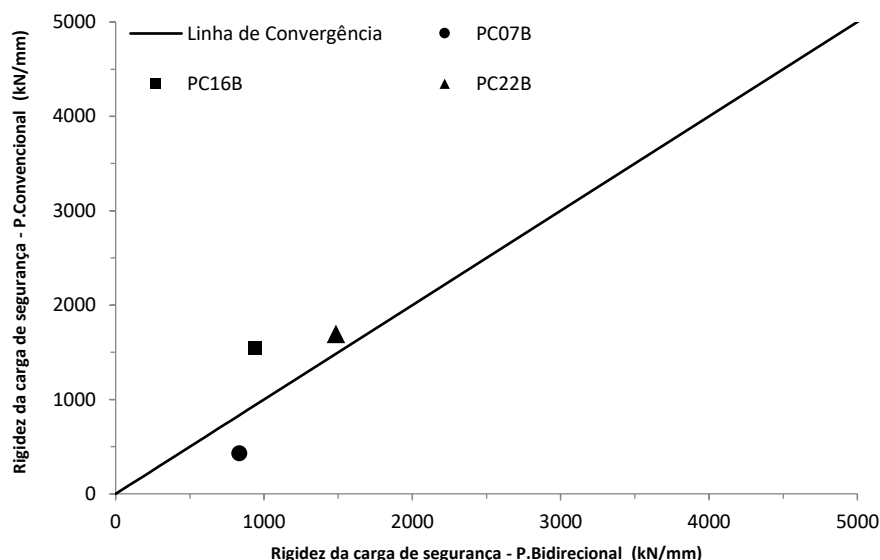


Figura 8. Comparação entre rijeza na carga de segurança entre as provas de carga, realizadas pelo método convencional e bidirecional.

4 Considerações Finais

Não há dúvidas de que a prova de carga pelo método bidirecional é uma solução interessante do ponto de vista de custos e prazos. No caso de obras portuárias e offshore é, frequentemente, a única solução viável para um ensaio estático em estacas de grande capacidade. Nessas obras, há a opção de ensaios dinâmicos, mas que devem ser correlacionados/complementados com alguns ensaios estáticos.

Para que a prova de carga pelo método bidirecional seja capaz de indicar a capacidade de carga (na ruptura) da estaca ensaiada é necessário, inicialmente, que a célula tenha sido posicionada em um nível tal que a capacidade de carga do segmento inferior seja próxima da capacidade de carga do segmento superior. O nível da célula é escolhido a partir da estimativa da capacidade de carga (ao longo) do fuste e da base da estaca, um exercício nem sempre trivial. Caso a escolha não tenha sido acertada, a capacidade de carga de um segmento se esgota antes do outro, e a prova se encerra, sendo necessária uma extrapolação da curva que terminou precocemente.

A prova de carga realizada pelo método bidirecional fornece diretamente curvas de comportamento dos dois segmentos em que a estaca foi dividida. Se essas curvas indicarem a ruptura, o valor da capacidade de carga total pode ser obtido diretamente pela soma. Já em relação ao comportamento carga-recalque (ou a obtenção do recalque para a carga de segurança) da estaca ensaiada, que representa uma estaca que será, na obra, carregada pelo topo –, a construção das chamadas curvas equivalentes é uma questão controversa. Há a proposta de construção da curva equivalente do criador do ensaio (Silva, 1983) e uma recente de Cruz (2019). As curvas são diferentes, com a segunda proposta apresentando, na maioria das vezes, uma rigidez menor.

Foi verificada a capacidade de carga (carga de ruptura convencional) por um critério escolhido: da norma brasileira de fundações, a NBR 6122/2019. As curvas construídas pelas duas metodologias de provas de carga indicam valores próximos da capacidade de carga, como se esperaria.

Foram comparadas as rijeza das curvas carga-recalque, até a carga de segurança, ensaiadas pelos métodos convencional e bidirecional. Há uma adequação entre os resultados, mas há de se estudar mais para tirar uma conclusão final sobre esse assunto.

Neste trabalho, algumas curvas carga-recalque de provas de carga convencionais (carregamento no topo), na mesma estaca ou em estaca de mesmas características e próximas, foram comparadas com as

construções propostas das provas bidirecionais. Observou-se que os resultados das provas convencionais se aproximam mais da construção de Silva (1983).

Há um interesse internacional em normatizar a execução e interpretação do ensaio; foi criada, recentemente, a norma norte-americana ASTM D8169 (ASTM, 2018), que detalha o procedimento de ensaio, mas não indica sua interpretação. As publicações que tratam desse tipo de ensaio indicam que a interpretação dos resultados deve ser feita pelo contratante e seu(s) consultor(es).

Considera-se necessária a divulgação dessa pesquisa com o objetivo de que haja uma maior compreensão dos aspectos práticos do ensaio bem como o aprofundamento teórico. Salienta-se, também, que o ensaio bidirecional carece de normatização no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos profissionais e firmas que forneceram dados de provas de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials – ASTM D8169 / D8169M (2000). *Standard Test Methods for Deep Foundations under Bi-Directional Static Axial Compressive Load*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Campos, G. O., Silveira, J. E. S., Rodrigues, A. O., Resende, A. S. Procedimento e resultados para execução e avaliação da prova de carga com célula expansiva. Seminário de Engenharia de Fundações especiais e geotecnia. SEFE, São Paulo, SP, Brasil, 2015.
- Cruz, F. V. A. S., 2019, *Contribuição à interpretação de provas de carga em estacas, realizadas pelo método bidirecional*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Federal do Rio de Janeiro/UFRJ. 104p.
- Massad, F. (2015). *Bidirectional test with use of hydrodynamic cell - testing and its interpretation*. Anais, 8º Seminário de Engenharia de Fundações e Geotecnia, SEFE, São Paulo, Brasil, v. II, pp. 1199-1210.
- Osterberg, J. (1989). *New load cell testing device*. Proceedings - 14th Annual Conference, Deep Foundations Institute, pp. 17-28.
- Silva, P. E. C. A F. (1983). *Célula expansiva hidrodinâmica - uma nova maneira de executar provas de carga*. Publicação independente, Belo Horizonte, Brasil, 106 p.
- Wolney, D. Provas de carga: *Pormenores e comparativos técnicos*, Ano 5, nº 47, Agosto 2014, Revista Fundações & Obras Geotécnicas, Brasil, págs. 32 à 39.
- Wolney, D. *Provas de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica*, Ano 4, nº 36, Setembro 2013, Revista Fundações & Obras Geotécnicas, Brasil, págs. 24 à 32.