



O Benefício do PDA na Redução de Custos em Obras de Pequeno Porte

Daniel Kina Murakami
Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, daniel.murakami@benaton.com.br

Jean Felix Cabette
Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, jeancabette@benaton.com.br

RESUMO: O PDA (Pile Driving Analyzer) é utilizado em diversas regiões do mundo como uma alternativa à tradicional prova de carga estática, apresentando vantagens em relação ao prazo e custo de execução. A NBR 6122 estabelece a obrigatoriedade da realização de provas de carga ou ensaios dinâmicos, dependendo do número de estacas ou tensão admissível das estacas. Em obras de pequeno porte é comum a não realização de tais ensaios, uma vez que não seria obrigatório. Entretanto, este artigo mostra um caso de obra de pequeno porte em Piracicaba, SP, onde a realização do ensaio dinâmico não seria obrigatório. O projeto original previa estacas pré-moldadas de concreto para carga de trabalho de até 20tf, com diâmetro de 38cm e comprimento de 5m. Uma retro análise verificou a possibilidade da utilização de uma estaca de seção menor, 17x17cm, com comprimento de 6m. Foram realizadas estacas provas e os ensaios dinâmicos confirmaram a possibilidade de utilização destas estacas com o fator de segurança mínimo estabelecido pela NBR 6122. Os ensaios possibilitaram uma redução de volume de concreto de 57%, enquanto que o consumo de aço reduziu 50%. O PDA possibilitou redução de custos mesmo em obras de pequeno porte onde não seria obrigatório.

PALAVRAS-CHAVE: PDA, estaca pré-moldada, Redução de Custos, Métodos Semi-Empíricos, Correlação

ABSTRACT: The PDA (Pile Driving Analyzer) is used in different regions around the world as an alternative to the traditional static load test, offering advantages in terms of execution time and cost. NBR 6122 establishes the obligation to carry out load tests or dynamic tests, depending on the number of piles or admissible stresses of the piles. In small project sites, it is common not to carry out such tests, since it would not be mandatory. However, this paper shows a case study of a small project site in Piracicaba, SP, where the performance of the dynamic test would not be mandatory. The original design of deep foundations foresaw precast concrete piles for a workload of 20tf, with a diameter of 38cm, and a length of 5m. A back analysis verified the possibility of using a pile with a smaller section, 17x17cm, with a length of 6m. Test piles were carried out and dynamic tests confirmed the possibility of using these piles with the minimum factor of safety established by NBR 6122. The tests enabled a reduction in the volume of concrete by 57%, while the consumption of steel reduced by 50%. The PDA made it possible to reduce costs even in small project sites where its use was not mandatory.

KEYWORDS: PDA, precast concrete piles, Cost Reduction, Semi-Empiric Methods, Correlation

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

No Brasil, a grande maioria dos projetos de fundações profundas são realizados através de estimativas de capacidade de carga através de métodos semi-empíricos. Tais métodos utilizam os resultados das sondagens de simples reconhecimento do solo (SPT) e as características da estaca, tais como diâmetro, profundidade e tipo de estaca.

Desde 1975, quando surgiu o primeiro método brasileiro para a estimativa da capacidade de carga de estacas, proposto por Aoki e Velloso (1975), vários outros autores, seguindo a mesma linha de raciocínio, apresentaram métodos semelhantes, existindo hoje uma experiência bastante razoável no meio técnico nacional.

Esses métodos de previsão de capacidade de carga foram realizados através da comparação dos resultados da sondagem SPT com provas de carga estática. Para as provas de carga que não atingiram a ruptura os autores adotaram critérios para definição da carga de ruptura através de extrapolação (Aoki e Velloso, 1975) ou convenção (Decourt e Quaresma, 1978). Na época não eram realizadas provas de carga instrumentadas, dessa forma os autores utilizaram critérios para separação da parcela do atrito lateral e carga de ponta.

Basicamente o atrito lateral calculado através destes métodos depende do valor do N_{spt} e da área lateral da estaca, enquanto que a carga de ponta depende do N_{spt} e da área da ponta da estaca. Decourt e Quaresma (1978) não considera a influência do tipo de solo no valor do atrito lateral, enquanto que no método Aoki e Velloso (1975) há a influência do tipo de solo no valor do atrito lateral. Para a carga de ponta, os dois métodos consideram a influência do tipo de solo. Esses métodos apresentaram atualizações em relação à publicação original (Decourt e Quaresma, 1982; Aoki e Velloso, 1985).

As figuras 1 e 2 ilustram a correlação entre provas de carga estática e os métodos semi-empíricos através da formulação original proposta pelos autores.

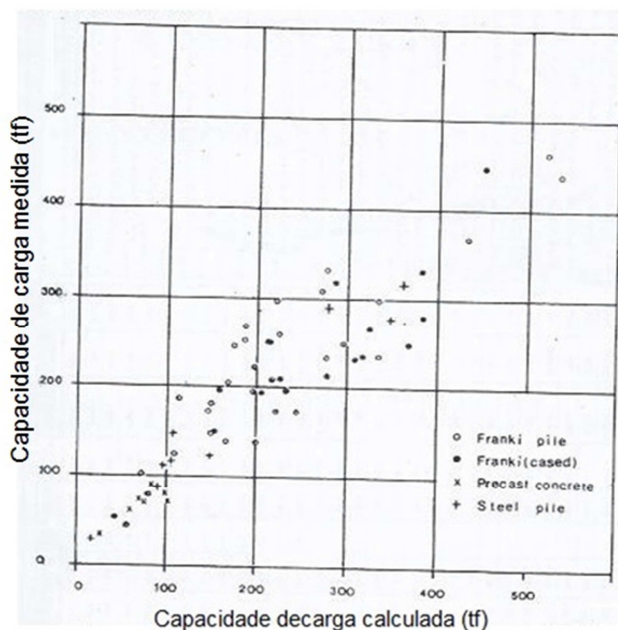


Figura 1. Correlação do Método Aoki & Velloso (1975) com provas de carga estática.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



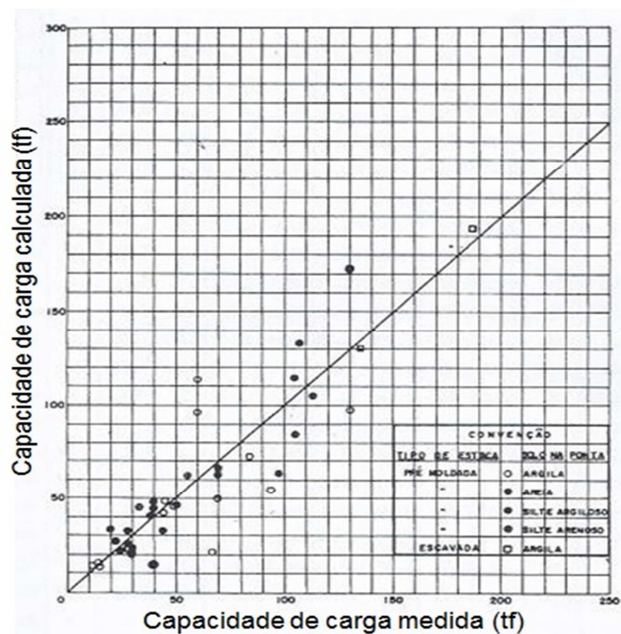


Figura 2. Correlação do Método Décourt & Quaresma (1978) com provas de carga estática.

A norma brasileira de fundações NBR 6122:2022 estabelece a obrigatoriedade de provas de carga estática (PCE) em alguns casos específicos. No caso da estaca pré-moldada, por exemplo, quando o número de estacas do projeto de fundações exceder 100 unidades ou a tensão admissível das estacas exceder 7,0 MPa há a obrigatoriedade de realização de provas de carga estática. A norma brasileira permite a substituição da PCE por ensaios de carregamento dinâmico (ECD) quando o número de estacas estiver entre 100 e 200 unidades.

2 Objetivos

Este artigo tem como objetivo apresentar um caso de obra de pequeno porte em estacas pré-moldadas de concreto de seção circular de $\phi 38\text{cm}$ para até 20tf, com comprimentos estimados de 5m. Segundo a norma brasileira NBR 6122:2022 não haveria a necessidade de realização de provas de carga estática ou ensaios de carregamento dinâmico. Entretanto, uma retroanálise do projeto original através de métodos semi-empíricos consagrados no meio técnico nacional possibilitou uma redução de seção transversal da estaca original de projeto para uma estaca quadrada 17x17cm, de menor seção transversal, e comprimento estimado de 6m. A comprovação da capacidade de carga das estacas quadradas de 17x17cm foi realizada através de ensaios dinâmicos. Os resultados das análises CAPWAP foram correlacionados com as previsões de capacidade de carga obtidos através dos métodos semi-empíricos.

3 Metodologia

Serão apresentadas as estimativas de capacidade de carga das estacas do projeto original (seção circular $\phi 38\text{cm}$ e comprimento estimado de 5m) e da solução alternativa (seção quadrada

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





17x17cm e comprimento estimado de 6m). Para esta finalidade, serão utilizados métodos semi-empíricos consagrados na literatura nacional, como por exemplo, Décourt e Quaresma (1982) e Aoki e Velosso (1985). Esses resultados serão comparados com os ensaios dinâmicos.

4 Caso de Obra

4.1 Descrição da obra

O caso de obra se refere à construção de um edifício comercial de pequeno porte localizado em Piracicaba, SP. O projeto inicial previa fundações através de estacas pré-moldadas de concreto, conforme indicado abaixo:

- 35 estacas de seção $\phi 38\text{cm}$ para até 20tf;
- Comprimento estimado de 5m;
- Execução das estacas com comprimentos definidos, sem critério de paralisação por nega;

A retroanálise do projeto original propôs a seguinte configuração:

- 35 estacas de seção 17x17cm para até 20tf;
- Comprimento estimado de 6m;
- Execução das estacas através de paralisação por nega;

Segundo a NBR 6122:2022, com base no número de estacas do projeto de fundações não haveria a obrigatoriedade da realização de PCEs ou ECD, muito menos com base na tensão admissível da estaca, tanto para o projeto original (estaca de seção circular $\phi 38\text{cm}$) e para a solução alternativa (estaca de seção quadrada 17x17cm).

4.2 Descrição do solo

As sondagens do local indicaram a presença de argila siltosa pouco arenosa, muito mole a mole até cerca de 4m de profundidade, seguida de uma camada de mesmo material de consistência dura até 8,15m de profundidade. O nível d'água foi encontrado a cerca de 5m de profundidade.

4.3 Estimativas Decourt & Quaresma (1982) e Aoki & Velosso (1985)

A tabela 1 indica a previsão de capacidade de carga da seção de projeto ($\phi 38\text{cm}$ e comprimento de 5m). Já a tabela 2 indica a previsão para a seção alternativa (17x17cm e 6m de comprimento)

Tabela 1. Previsão de capacidade de carga – seção de projeto ($\phi 38\text{cm}$ e comprimento de 5m)

Estaca	Décourt & Quaresma (1982)				Aoki & Velosso (1985)			
	Ponta (tf)	Atrito (tf)	Ruptura (tf)	Admissível (tf)	Ponta (tf)	Atrito (tf)	Ruptura (tf)	Admissível (tf)
$\phi 38\text{cm}$ – 5m	65,8	28,7	94,4	47,2	73,0	18,8	91,8	45,9

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Tabela 2. Previsão de capacidade de carga – seção alternativa (17x17cm e comprimento de 6m)

Estaca	Décourt & Quaresma (1982)				Aoki & Velloso (1985)			
	Ponta (tf)	Atrito (tf)	Ruptura (tf)	Admissível (tf)	Ponta (tf)	Atrito (tf)	Ruptura (tf)	Admissível (tf)
17x17cm – 6m	13,6	26,1	39,7	19,9	31,5	24,1	55,6	27,8

Com base na previsão de capacidade de carga realizada através dos métodos semi-empíricos Décourt & Quaresma (1982) e Aoki & Velloso (1985), foi observado que os valores obtidos através desses métodos foram muito próximos para a estaca do projeto original de seção transversal de $\phi 38\text{cm}$ (47,2tf e 45,9tf, respectivamente). Tecnicamente a solução do projeto original ($\phi 38\text{cm}$) está correta, porém com maior margem de segurança.

Já em relação à solução alternativa (17x17cm), o método Décourt & Quaresma (1982) se mostrou mais conservador e a rigor não haveria o atendimento da carga admissível de 20tf, uma vez que o valor calculado pelo método seria de 19,9tf. Entretanto, o método Aoki & Velloso (1985) indicou uma carga admissível um pouco maior, com valor de 27,8tf, o que atenderia a carga admissível de projeto de 20tf.

Com base na experiência em obras anteriores com tipo de solo semelhante, os autores deste artigo optaram por seguir o método Aoki & Velloso (1985), que se confirmou como sendo o método que melhor se adequou para este tipo de solo. Entretanto, para comprovação das premissas da retroanálise, foram realizados ensaios de carregamento dinâmico para sanar qualquer dúvida quanto a qual método semi-empírico que estaria mais próximo da carga admissível idealizada em projeto de 20tf. Os resultados dos métodos semi-empíricos foram comparados com as análises CAPWAP, conforme mostrado a seguir.

Em campo, as estacas foram cravadas com um martelo do tipo queda livre de massa igual a 2800kg. Com base na experiência em obras anteriores, onde foram realizados ensaios dinâmicos para comprovação da capacidade de carga, foi estabelecido um critério de cravação para a obra em questão. Sendo assim, foi adotado como critério valores de nega inferior a 20mm/10 golpes com altura de queda de 30cm. Os comprimentos obtidos na cravação das estacas ficaram muito próximos de 6m de profundidade, conforme previsto pelos métodos semi-empíricos.

4.4 Resultados dos Ensaios de Carregamento Dinâmico

Os ensaios de carregamento dinâmico (ECD) foram realizados com energia crescente, conforme proposto por Aoki (1989, 1997). As alturas de queda utilizadas foram: 30cm, 40cm e 50cm.

Foram escolhidas duas estacas de seção 17x17cm para a realização do ensaio de carregamento dinâmico (PDA). Na tabela 3 estão indicados os resultados das análises CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) (Pile Dynamics Inc., 2006) referentes ao golpe de maior energia (altura de queda de 50cm), onde se verificou maior carga mobilizada. Nesta tabela também estão as previsões obtidas pelos métodos semi-empíricos para os comprimentos destas

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



estacas, obtidos através da interpolação entre as profundidades de 5m e 7m, apresentando melhor precisão para a comparação dos resultados do PDA.

Tabela 3. Comparação entre PDA e métodos semi-empíricos

Esta ca	Com p. (m)	PDA (tf)			D & Q (1982)			A & V(1985)		
		Atrito (tf)	Ponta (tf)	Ruptura (tf)	Atrito (tf)	Ponta (tf)	Ruptura (tf)	Atrito (tf)	Ponta (tf)	Ruptura (tf)
E24	6,2	31,5	22,5	54,0	28,0	13,7	41,7	26,3	31,5	57,8
E25	5,9	31,1	21,0	52,1	25,1	14,0	39,0	23,0	30,6	53,6

Durante os ensaios dinâmicos, os valores de nega por golpe foram entre 6mm e 7mm para altura de queda de 50cm. Neste caso, os resultados do PDA podem ser considerados como carga de ruptura por terem apresentado no mínimo uma nega de 2mm por golpe (Fellenius et. al., 1992). Além disso, com base nas curvas RMX (máxima carga estática mobilizada) vs. DMX (deslocamento dinâmico máximo) se observou ruptura geotécnica (Figura 3).

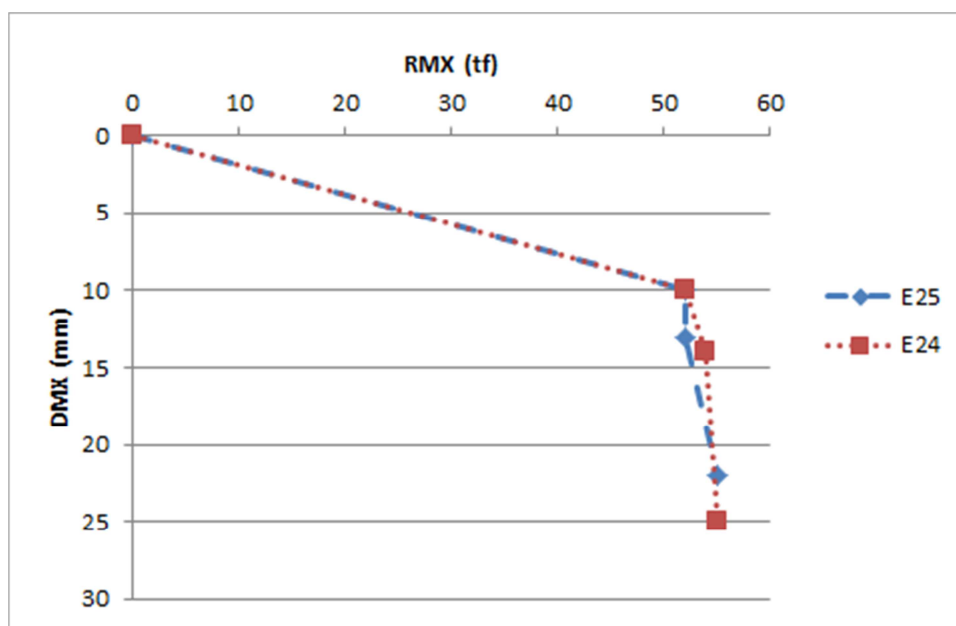


Figura 3. Curvas RMXvs. DMX das estacas ensaiadas

Neste caso de obra, o Método Aoki & Velloso (1985) mostrou uma melhor previsão de capacidade de carga entre os métodos semi-empíricos analisados, apresentando melhor correlação com as cargas obtidas pelo CAPWAP, conforme indicado na figura 4. Notam-se na figura 4 que os pontos do Método Aoki & Velloso estão mais próximos da reta a 45°, enquanto que o Método Décourt & Quaresma (1982) se distanciou da reta a 45°, mostrando-se mais conservador.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



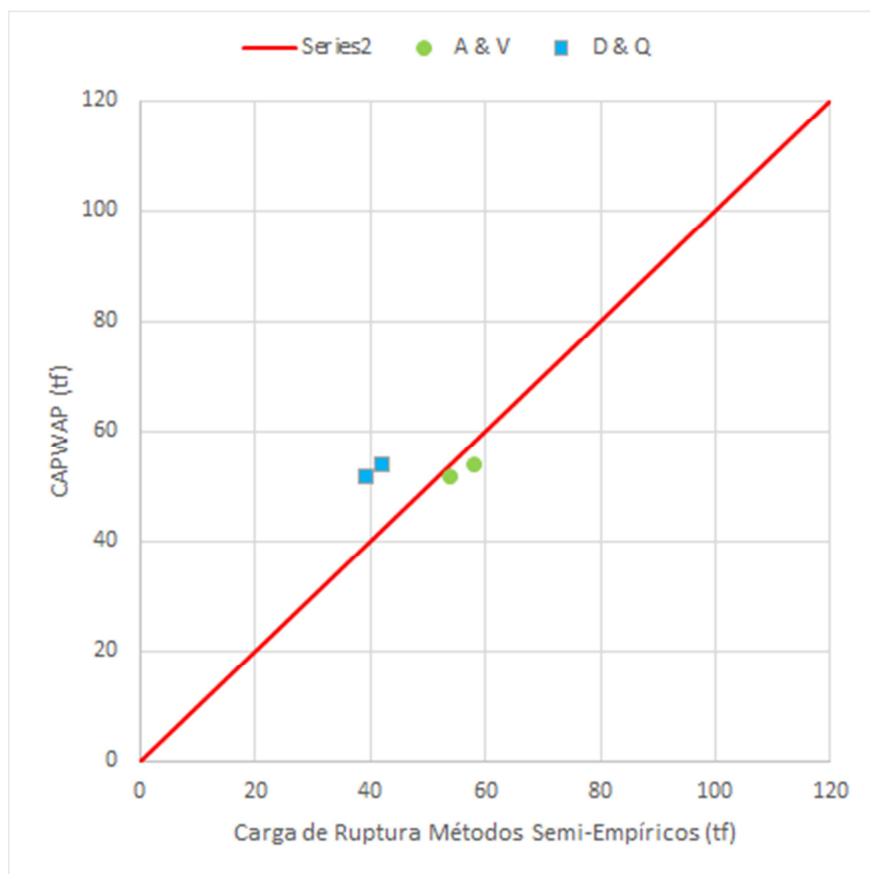


Figura 4. Correlação entre PDA e métodos semi-empíricos

Apesar de não ser obrigatório, segundo a NBR 6122:2022, o PDA possibilitou a comprovação da capacidade, atendendo ao fator de segurança mínimo igual a 2 estabelecido pela norma brasileira, garantindo maior segurança para o projeto de fundações em estacas pré-moldadas de concreto.

5 Considerações Finais

Este artigo apresentou um caso de obra em que o projeto original apresentou uma solução através de estacas pré-moldadas de concreto para carga admissível de 20tf, com seção circular de $\phi 38\text{cm}$ e comprimento definido de 5m, sem critério de paralisação por nega. Entretanto, uma retroanálise através de métodos semi-empíricos mostrou ser viável uma solução alternativa de fundações com estacas pré-moldadas de concreto de seção quadrada de $17 \times 17\text{cm}$ e comprimento de 6m, com critério de paralisação por nega.

Apesar de não ser obrigatória a execução de provas de carga estática ou ensaios dinâmicos, este caso de obra mostrou que o uso do PDA possibilitou uma redução de volume de concreto de 57%, enquanto que o consumo de aço reduziu 50%.

Poderiam haver dúvidas na retroanálise em relação a qual método semi-empírico estaria mais adequado para este caso de obra, uma vez que a rigor o método Decourt e Quaresma (1982) não atenderia a carga de projeto 20tf com fator de segurança mínimo igual a 2.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Entretanto, com base em experiência com obras anteriores, os autores adotaram o método Aoki e Velloso (1985) para este caso de obra. O PDA possibilitou redução de custos mesmo em obras de pequeno porte, comprovando as premissas da retroanálise, garantindo o atendimento do fator de segurança mínimo igual a 2 estabelecido pela NBR 6122:2022.

Neste caso de obra, o Método Aoki & Velloso (1985) mostrou uma melhor correlação da capacidade de carga das estacas pré-moldadas de concreto de seção 17x17cm com os resultados das análises CAPWAP. Já o Método Décourt & Quaresma (1982) se mostrou mais conservador.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Benaton Specialist pela autorização dos dados necessários para a elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOKI, N. e VELLOSO, D. A.; An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles.; Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, vol. 1, 1975.
- Aoki, N.; A new dynamic load test concept.; Drivability of piles (1): 1-4, Proc. Discussion Session 14, Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng. (12), Rio de Janeiro, 1989
- Aoki, N.; Determination of Pile Capacity of Driven Piles on the Dynamic Increasing Energy Test,” D.Sc. thesis, University of São Paulo at São Carlos School of Engineering, São Carlos, Brazil, 1997(in Portuguese)
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6122; Projeto e Execução de Fundações, Rio de Janeiro, 2022.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 13208; Estacas Ensaio de carregamento dinâmico, Rio de Janeiro, 2007.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. Solo- Prova de carga estática em fundação profunda. Rio de Janeiro.
- DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R. Capacidade de Carga de Estacas a partir de Valores de SPT. Anais do 6º COBRAMSEF, Rio de Janeiro, vol.1, p. 45-53, 1978.
- DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R., Como calcular (rapidamente) a capacidade de carga de uma estaca. Revista Construção São Paulo, n1800, Agosto, 1982, Separata.
- Fellenius, B.H., Edde, R.D. and Beriault, L.L., 1992. Is capacity fully mobilized? The 1990 Cleveland User's Day Seminar and Geotechnical News Magazine 12(2) 58-61
- PILE DYNAMICS, INC. CAPWAP manual, Cleveland, 2006.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

