



# O EFEITO DE FISSURAS NA INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE INTEGRIDADE DE BAIXA DEFORMAÇÃO (PIT)

**Carlos Augusto Malachias Filho** –  
Diretor  
Fundatest – Projetos e Ensaios Geo-  
técnicos Ltda.  
carlos@fundatest.com.br

**Jorge William Beim** – Diretor  
JB Instrumentação Eletrônica Ltda.  
jorgebeim@terra.com.br

**Sérgio Paulino Mourthé de  
Araujo** – Diretor  
Fundatest – Projetos e Ensaios Geo-  
técnicos Ltda.  
sergio@fundatest.com.br

## RESUMO

O ensaio de integridade de baixa deformação (também conhecido como “Ensaio pelo Método Sônico” ou PIT – *Pile Integrity Test*) é um ensaio não destrutivo usado em estacas moldadas *in loco* (hélice contínua, escavadas e estacões) ou pré-moldadas de concreto (cravadas), com o objetivo de detectar a existência de possíveis danos estruturais (seccionamentos, estrangulamentos, segregações ou contaminações do concreto etc.) e, às vezes, para confirmação ou verificação do comprimento efetivo das estacas. É um ensaio muito rápido, de baixo custo, e não necessita qualquer preparo especial durante a instalação das estacas. Contudo, é um ensaio que

tem algumas limitações, entre elas a sua talvez excessiva sensibilidade a fissuras, que muitas vezes não são capazes de afetar o desempenho da estaca para cargas compressivas. O presente trabalho apresenta alguns exemplos em que o ensaio mostrou defeitos que posteriormente constatou-se que tratava-se de fissuras, detectadas através da realização de ensaio de carregamento dinâmico e/ou escavação.

## ABSTRACT

The low strain integrity test (also known as “Sonic Method Test” or PIT – *Pile Integrity Test*) is a non-destructive test used in cast-in-place piles (CFA, bored piles, drilled shafts, caissons) or pre-cast concrete piles (driven). Its main objective is to detect the possible existence of structural damage (sectioning, necking, segregation or contamination of the concrete etc.), and sometimes to confirm or verify the effective length of the piles. It is a very fast and low cost test, and it does not require any special preparation during the installation of the piles. The test, however, has some limitations, among them its perhaps excessive sensitivity to cracks, which many times are not capable of affecting the performance of the pile for compressive loads. The present paper shows some examples where the test showed defects that later demonstrated were cracks, detected by Dynamic Load Tests or by excavation.

## INTRODUÇÃO

O ensaio de integridade de baixa deformação (PIT – *Pile Integrity Test*) consiste na instalação de um acelerômetro de alta sensibilidade em geral no topo da estaca a ser ensaiada, fixado com uma cera adesiva especial. Em seguida são aplicados golpes com um martelo de mão, com massa em geral entre 450 g e 4.500 g. O sinal de aceleração em função do tempo, obtido pelo acelerômetro, é enviado a uma unidade coletora de dados, onde é integrado para obtenção do sinal de velocidade em relação ao tempo. Após a determinação da média de vários sinais de velocidade, para filtragem de ruídos randômicos, os sinais são armazenados para posterior análise. A análise dos sinais é feita com base na teoria da propagação da onda de tensão (Liang e Rausche, 2011). Essa onda, provocada pelo impacto do martelo, se propaga com uma velocidade constante dada por:

$$C = \sqrt{\frac{g \cdot E}{\gamma}} \quad (1)$$

Onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\gamma$  é o peso específico do material da estaca. A onda sofre reflexões sempre que encontra variação na propriedade da estaca chamada impedância ( $Z$ ), dada pela expressão a seguir:

$$Z = \frac{E \cdot A}{C} = \rho \cdot C \cdot A \quad (2)$$

Onde  $A$  é a área de seção transversal e  $\rho$  é a densidade de massa do material da estaca.

Uma redução de impedância causa uma reflexão trativa da onda de tensão, a qual resulta em um pico de velocidade na mesma direção do pico inicial. Medindo-se o tempo entre o início do pico inicial e o início do pico referente à reflexão é possível determinar a distância entre o acelerômetro e a redução de impedância, considerando que a onda trafega com uma velocidade fixa dada pela expressão (1).

No final da estaca, a impedância se reduz praticamente a zero, o que é visto portanto como um pulso no mesmo sentido do pulso inicial, sendo que o tempo entre o impacto e o início da reflexão de ponta é dado pela expressão:

$$t = \frac{2 \cdot L}{c} \quad (3)$$

Onde  $L$  é o comprimento da estaca abaixo do acelerômetro, e  $c$  é a velocidade de propagação da onda dada pela expressão (1).

Um sinal típico do PIT para uma estaca hélice contínua com 19 m de comprimento, velocidade de onda de 4.000 m/s e sem variações significativas de impedância entre o topo e a ponta (Bungenstab e Beim, 2014) é mostrado na Figura 1.

A Figura 2 ao lado mostra a simulação em computador do sinal de velocidade que seria obtido no topo de uma estaca também com 19 m e velocidade de propagação da onda de 4.000 m/s, porém que apresenta uma fissura com 0,05 mm de espessura 10 m abaixo do acelerômetro.

A linha azul tracejada vertical representa o tempo dado pela expressão (3), e seria portanto onde se esperaria o primeiro pico positivo após o pico inicial à esquerda. Como pode ser visto, há uma forte reflexão antes da ponta, provocada pela fissura. A existência de uma forte reflexão provocada pela fis-

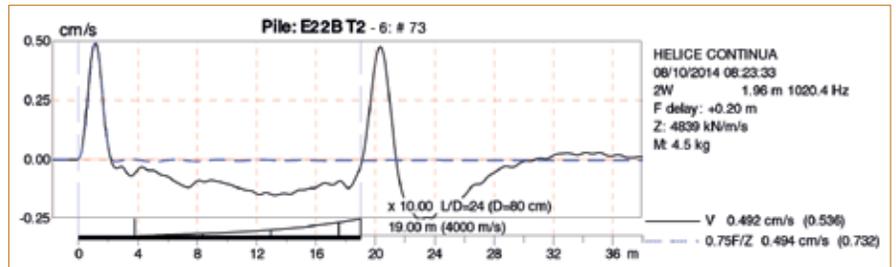


Figura 1 – Sinal típico de estaca íntegra

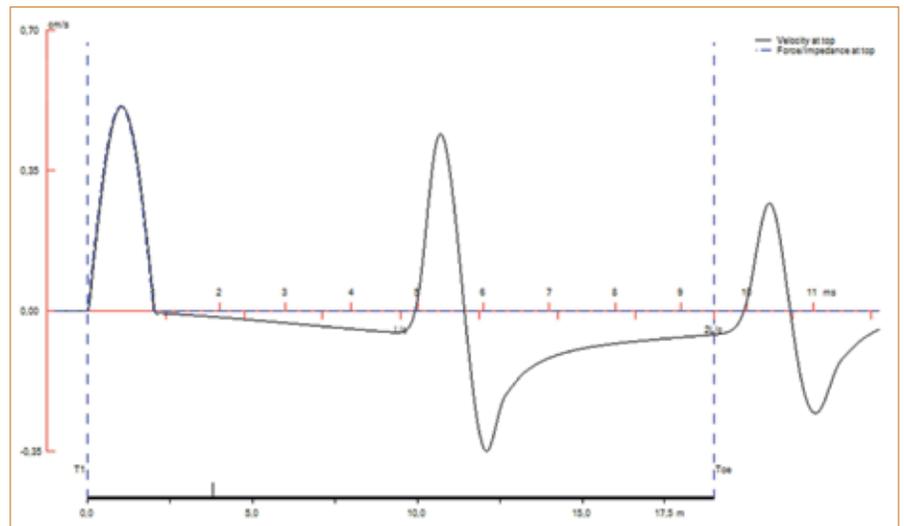


Figura 2 – Simulação de sinal em estaca com fissura

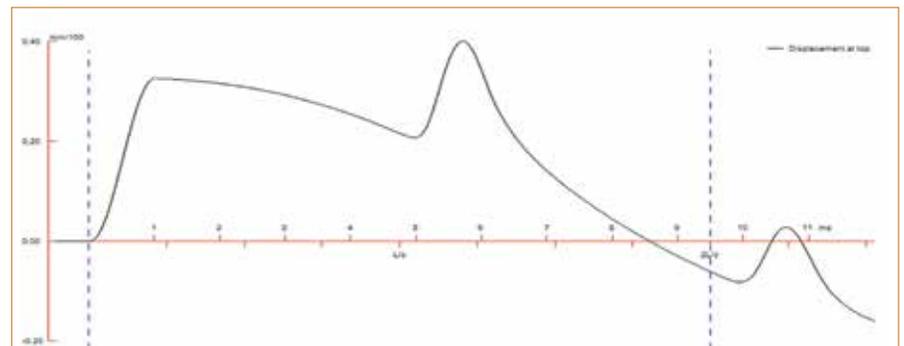


Figura 3 – Curva de deslocamento na cabeça para o golpe com martelo de 4 kg

sura de apenas 0,05 mm é compreensível tendo em vista os ínfimos deslocamentos provocados pelo golpe do martelo de mão, como pode ser visto na Figura 3.

Como pode ser visto, o deslocamento máximo previsto na cabeça da estaca é de 0,004 mm, e é de se esperar que o deslocamento máximo provocado pelo golpe na região da fissura seja ainda menor. Assim, a fissura é vista pelo ensaio PIT como uma interrupção total da estaca neste ponto.

O objetivo deste trabalho é mostrar alguns casos de obras cujos procedimentos de escavação dos blocos das estacas “hélice” e/ou arrasamento das mesmas podem ter sido o principal protagonista das anomalias encontradas nos ensaios PIT.

## CASO DE OBRA 1

Uma das obras-objeto deste estudo é de um edifício comercial localizado no bairro de Lourdes, na cidade de Belo Horizonte (MG). Foram



Figura 4 – Ensaio de Integridade PIT

realizadas sondagens à percussão antes e após a construção das contenções, e após a escavação foram executadas estacas hélice contínua monitorada com diâmetro de 500 mm e 800 mm.

O perfil geotécnico característico no local é composto por silte argiloso em toda sua extensão, observando-se a ocorrência de solo pouco resistente até 6 metros de profundidade e em seguida solo de resistência maior e constante. O nível do lençol freático encontra-se 1,65 metros abaixo da cota da boca do furo.

Foram executados ensaios de integridade PIT e ensaios de carregamento dinâmico usando o equipamento PDA (Pile Driving Analyser).

No ensaio PIT foi utilizado um equipamento modelo FV fabricado pela Pile Dynamics, Inc. (PDI) dos Estados Unidos, um martelo instrumentado de mão de peso igual a 4.100 gramas (9 lbs), e um sensor (acelerômetro piezoelétrico de alta sensibilidade) fixado ao topo da estaca com uma resina adesiva, colocado em diferentes posições (Figura 4).

As Figuras 5, 6, 7 e 8 adiante mostram os sinais de velocidade *versus* tempo referentes a quatro estacas, os quais apresentam reflexões indicativas de grandes variações brus-

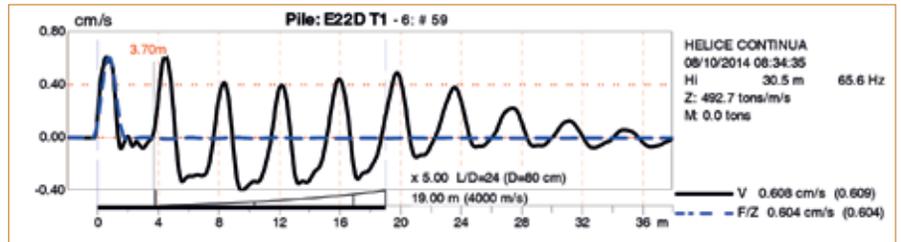


Figura 5 – Sinal PIT – Estaca com comprimento de 19 m

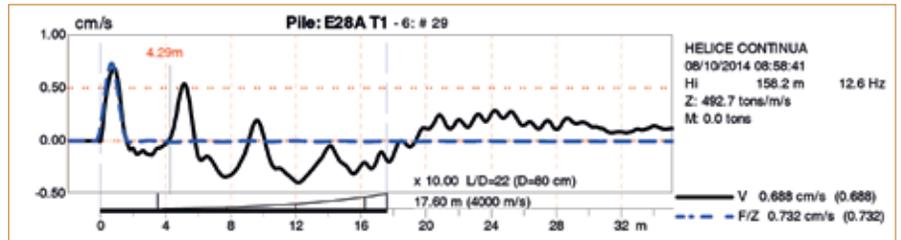


Figura 6 – Sinal PIT – Estaca com comprimento de 17,6 m

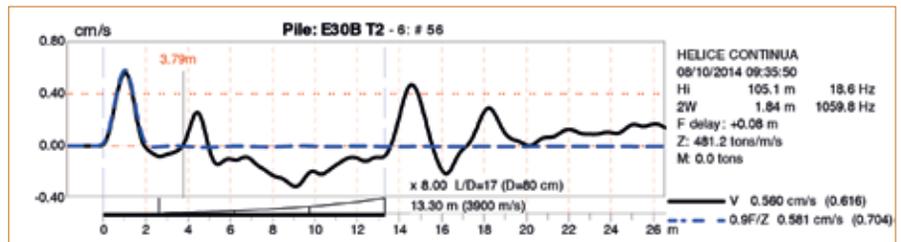


Figura 7 – Sinal PIT – Estaca com comprimento de 13,3 m

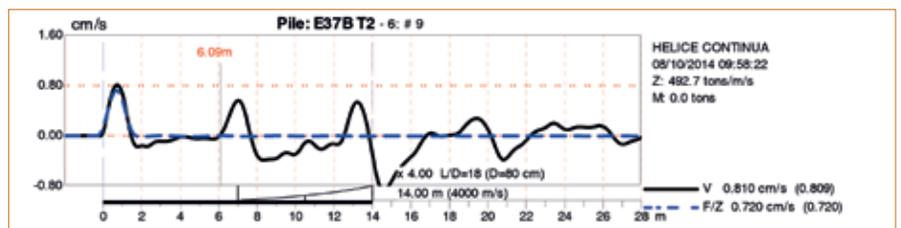


Figura 8 – Sinal PIT – Estaca com comprimento de 14 m

cas de impedância nas profundidades de 3,7 m, 4,3 m, 3,8 m e 6,1 m, bem antes do comprimento esperado para estas estacas.

Em contraste, a Figura 9 abaixo mostra o sinal de velocidade *versus* tempo de outra estaca na mesma obra, com indicação típica de estaca íntegra (compare-se com o sinal mostrado na Figura 1). Como o lençol freático impossibilitava a escavação para verificação do dano informado pelo ensaio PIT, foi sugerido ao contratante a execução de ensaios de alta deformação, ou seja, ensaios de carregamento dinâmico usando o equipamento PDA nestas estacas.

O ensaio de carregamento dinâmico PDA consiste da aplicação de energia cinética no topo da estaca, através de golpes de um martelo pesado, com altura de queda variável e crescente até a mobilização da carga máxima na interação estaca-solo ou no limite das tensões dinâmicas que a estaca pode suportar.

Para o ensaio PDA foi utilizado um equipamento modelo PAX também de fabricação da PDI, um martelo do tipo queda livre com peso igual a 10.200 kg (Figura 10) da empresa Fundatest, quatro pares de sensores posicionados diametralmente opostos a cada 90 graus, sendo quatro medi-

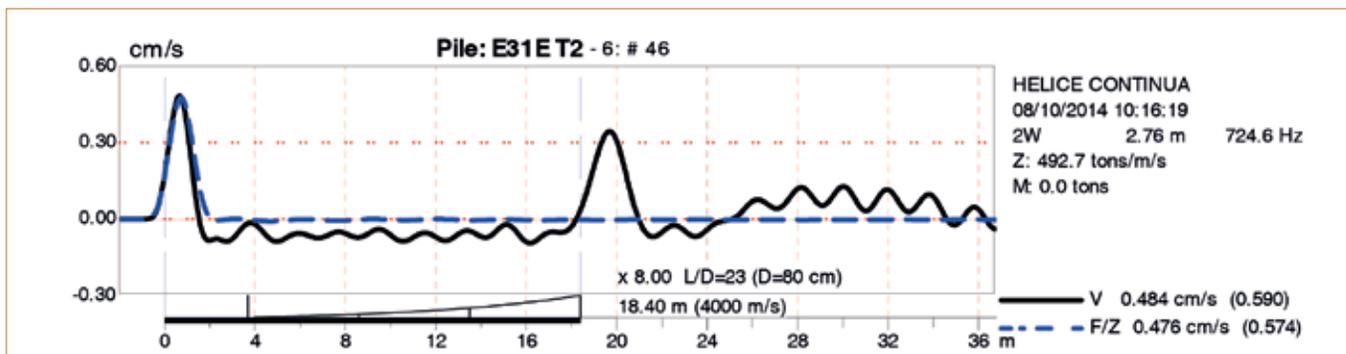


Figura 9 – Sinal PIT – Estaca com 18,4 m de comprimento

dores de deformação e quatro acelerômetros, devidamente calibrados. A fixação destes sensores ocorreu a uma distância de 1,60 metro do topo da estaca impossibilitando a ocorrência de danos aos sensores.

Os sinais obtidos nos ensaios PDA foram analisados pelo programa CAPWAP®. Este programa usa um processo interativo para modelar o solo a partir dos sinais de força e velocidade coletados pelo PDA. Para modelagem da estaca, o programa a divide em elementos de aproximadamente 1 m, cada um com sua respectiva impedância (o que permite a modelagem de estacas não-uniformes). Adicionalmente, é possível a modelagem de emendas e fissuras através de um modelo não-linear (“slack”), consistindo de uma distância inicial e uma eficiência (percentual de força que é capaz de atravessar a fissura mesmo sem contato entre as partes). Adicionalmente, a versão 2014 do programa acrescentou a possibilidade de modelar alterações na velocidade de propagação da onda ao longo do tempo durante um golpe. Isso permite modelar melhor o comportamento de estacas de concreto com fissuras ao longo do fuste, em que estas fissuras permanecem “fechadas” durante o início do golpe, quando a força ao longo da estaca é compressiva, porém se abrem (retardando assim a propagação da onda) posteriormente quando a estaca é submetida a esforço de tração.

A Tabela 1 abaixo mostra os resultados de interesse das análises CAPWAP. Como pode ser visto, as quatro primeiras estacas, que no ensaio PIT apresentaram reflexões indicativas de grandes variações bruscas de

impedância, no ensaio de carregamento dinâmico mostraram estarem contínuas, porém apresentaram indícios de diversas fissuras ao longo do fuste, algumas modeladas através de “slacks” de tração, e que em todos os casos provocaram substancial redução da velocidade de propagação da onda quando as estacas foram submetidas a esforço de tração durante o golpe. Em contraste, a estaca 31E, que no ensaio PIT não mostrou qualquer anormalidade, tampouco apresentou indícios de fissuras no ensaio de carregamento dinâmico. Ficou assim confirmado que as reflexões indicadas nos ensaios PIT neste caso particular foram causadas por fissuras, e as estacas poderiam, portanto, ser usadas para cargas compressivas, a critério do projetista.

O desafio para este caso é saber exatamente qual foi a origem dessas fissuras. Em pesquisa realizada pelo executor dos ensaios junto ao engenheiro e mestre de obras, há indícios de que as fissuras podem ter sido causadas pelo esbarrão do braço de uma retroescavadeira utilizada na escavação dos blocos das estacas.



Figura 10 – Martelo THOR 102

## CASO DE OBRA 2

Outro caso interessante é o de uma estaca que havia sido usada como reação em prova de carga estática.

Tabela 1 – Resultados das análises CAPWAP

Estaca Nº	Contínua	Capacidade total (kN)	Velocidade de onda (m/s)		Nº de fissuras (“slacks”) modeladas
			Inicial	Mínima	
22D	Sim	3.682	3.650	1.825	8
28A	Sim	3.101	3.750	1.630	2
30B	Sim	3.287	3.750	1.680	Indeterminado
37B	Sim	2.057	3.500	1.458	4
31E	Sim	3.736	3.550	3.550	0



As Figuras 11a e 11b mostram a parte exposta desta estaca no dia do ensaio PIT e locação do bloco, podendo-se ver a monobarra Incotep usada para a prova de carga.

As estacas de reação ( $\varnothing = 600$  mm) foram armadas com tirantes do tipo monobarra Inco 60D em toda sua extensão, com carga de ensaio igual a 105 toneladas para força de trabalho provisória igual à força de ensaio dividida por 1,50, conforme Figura 12.

O sinal do ensaio PIT apresentou reflexão típica de grande redução de impedância a cerca de 4,2 m do sensor, como pode ser visto na Figura 13.

Neste caso foi possível fazer-se uma escavação, que revelou tratar-se de fissura (certamente provocada pelo carregamento durante a prova de carga estática), como mostrado na Figura 14.

### CASO DE OBRA 3

Outro caso particular e muito interessante ocorreu também em Belo Horizonte em obra situada no bairro Castelo. Tratam-se de três estacas hélice contínua monitoradas na seção 600 mm com anomalias apontadas pelo ensaio PIT e dois diagnósticos diferentes, a primeira estaca E49B com o sinal mostrado na Figura 15.

E a segunda e a terceira estaca, E55G e E55H, respectivamente, cujos sinais estão apresentados nas Figuras 16 e 17.

Como o subsolo desta obra não apresentava lençol freático foi possível fazer a escavação e detectar com precisão as anomalias mostradas pelo ensaio PIT. As fotos em seguida mostram claramente os danos nas Figuras 18 (E49B), 19 e 20 (E55G e E55H).

No caso da estaca E49B não há dúvida que houve um problema executivo durante sua concretagem, e para as outras duas as fissuras e/ou trincas vistas foram geradas durante o arrasamento de ambas. A equipe da obra quebrou a cabeça das estacas com a utilização de um martelo, tirando parte do concreto que envolvia a armação das estacas, e em seguida amarrou um cabo de aço na cabeça da estaca e a outra ponta numa retroescavadeira, gerando uma componente horizontal no topo das estacas e que-

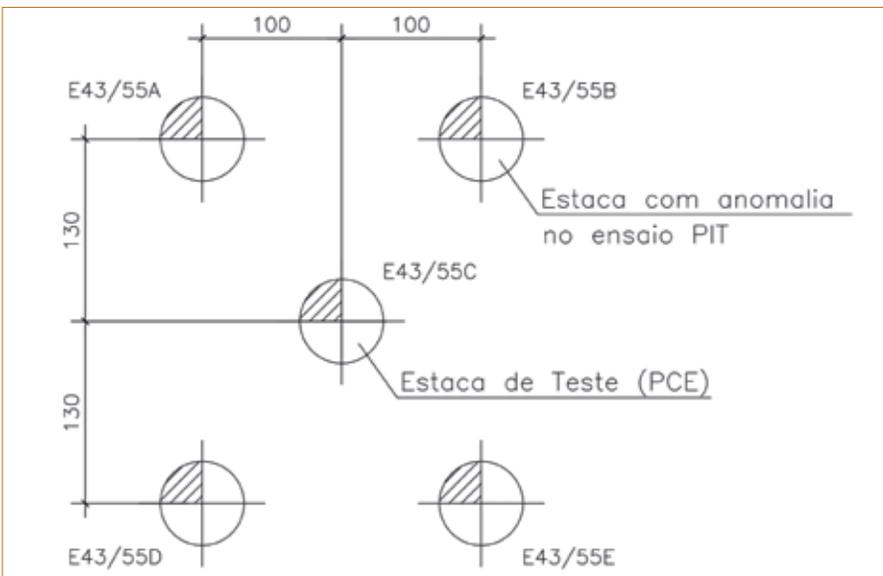


Figura 11a – Estaca no dia do ensaio PIT e 11b – locação do bloco de fundação

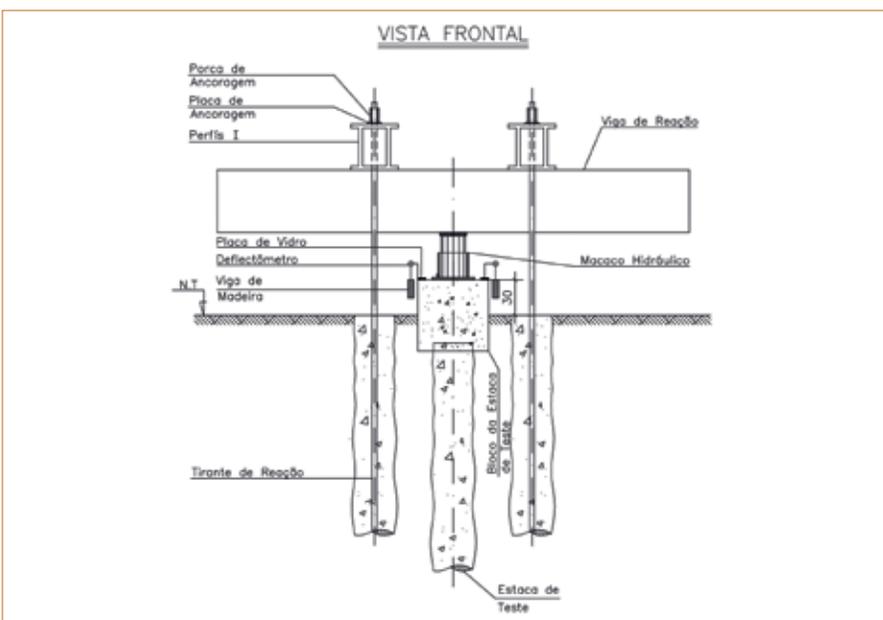


Figura 12 – Montagem da prova de carga a compressão E43/55C

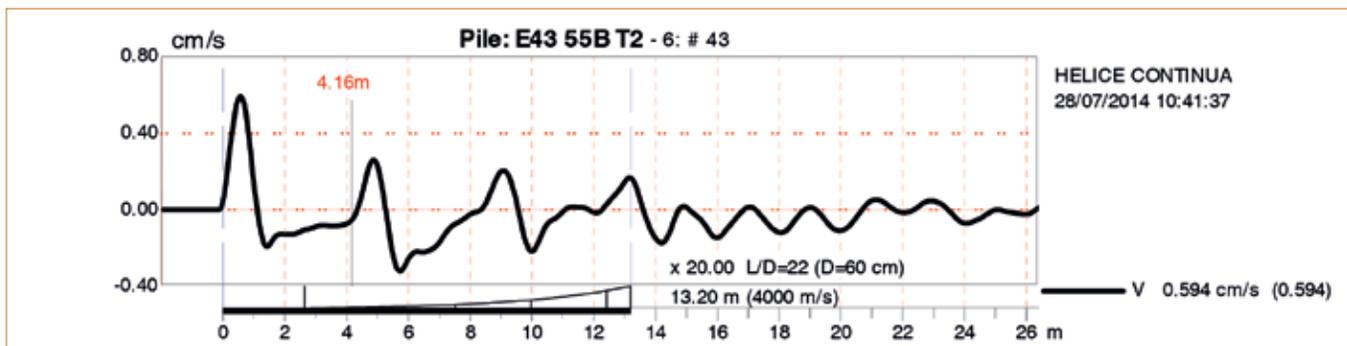


Figura 13 – Sinal do ensaio PIT



Figura 14 – Fissura verificada após escavação

brando-as imediatamente abaixo de sua armação, seccionando-as assim em duas partes, uma com armação (parte superior) e outra sem armação (parte inferior).

## CONCLUSÕES

O ensaio de integridade de baixa deformação (PIT) é certamente útil, haja visto a abundante quantidade de casos descritos na literatura em que este foi capaz de detectar importantes falhas em estacas, contribuindo assim para o aumento da segurança dos estaqueamentos (Morgano, 1989; Hussein e Garlanger, 1992; Hussein e Morgano, 1993; Massoudi e Teferra, 2004). Uma limitação do ensaio, porém, é que este em muitos casos não permite distinguir entre uma microfissura e um dano grave. Assim, nos casos

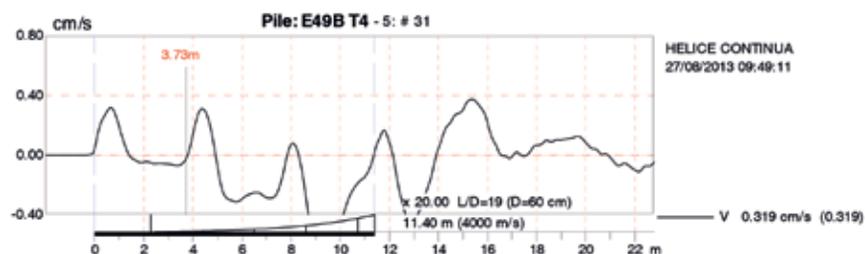


Figura 15 – Sinal PIT – Estaca com 11,4 m de comprimento

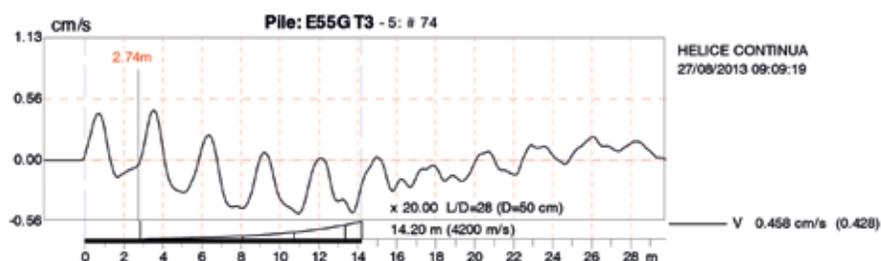


Figura 16 – Sinal PIT – Estaca com 14,20 m de comprimento

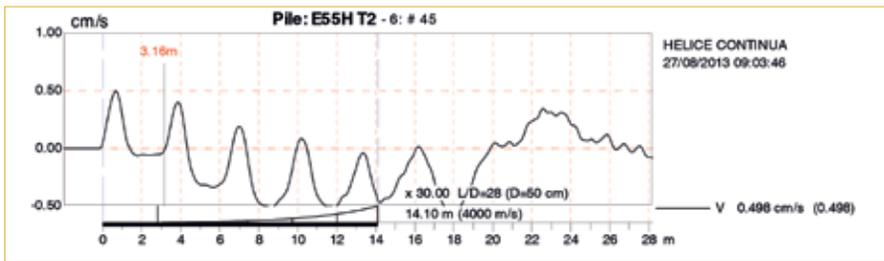


Figura 17 – Sinal PIT – Estaca com 14,10 m de comprimento



Figura 20 – Dano (trinca) confirmado após escavação da estaca E55H



Figura 18 – Dano confirmado após escavação da estaca E49B



Figura 19 – Dano (trinca) confirmado após escavação da estaca E55G

onde há suspeita de que um eventual dano apontado pelo ensaio PIT possa ser uma fissura, dois tipos de procedimento são recomendados:

- Se for possível efetuar uma escavação até o local apontado pelo PIT, é necessário limpar e verificar cuidadosamente ao longo de todo o perímetro da estaca nesta região, em busca de alguma fissura, possivelmente de espessura muito pequena.
- Se a escavação não for possível, executar um ensaio de carga-

mento dinâmico, para confirmação. Esse procedimento tem a vantagem adicional de também verificar a capacidade de carga do elemento de fundação, e diferenciar o dano apontado pelo PIT, se a fissura ou uma broca como apresentado no caso 3 deste artigo.

Caso constatada a fissura, a utilização da estaca poderá ser possível exclusivamente para cargas compressivas, desde que, a critério do projetista, não houver risco de comprometimento de

longo prazo (corrosão da ferragem, por exemplo). 🌀

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bungenstab, F. C. I., Beim, J.W., Julho 2014. *Ensaio de Integridade (PIT) – Interpretação de Resultados Obtidos Para os Casos de Estacas Dos Tipos Hélice Contínua Monitorada e Raiz*. Fundações & Obras Geotécnicas; 60-68.
- Liang, L., Rausche, F., October 2011. *Quality Assessment Procedure and Classifications of Cast-In-Place Shaft using Low Strain Dynamic Test*. Proceedings from Deep Foundation Institute 36th Annual Conference; 553-562.
- Morgano, C.M., June 1989. *Capabilities of Pile Integrity Testing*. PDA User's Day: Cleveland, OH.
- Hussein, M.H., Garlanger, J., June 1992. *Damage Detection for Concrete Piles Using a Simple Nondestructive Method*. Proceedings of the First International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures: Breckenridge, CO.
- Hussein, M.H., Morgano, M., June 1993. *Structural Integrity Evaluatiou of Concrete Piles from Stress Wave Measurements*. Society for Experimental Mechanics Conference on Nondestructive Testing of Concrete in the Infrastructure: Dearborn, MI.
- Massoudi, N., Teferra, W., April 2004. *Non-Destructive Testing of Piles Using the Low Strain Integrity Method*. Proceedings of the Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering: New York, NY. (CD-ROM)

Dezembro / 2015

Agenda 2015

Novembro / 2015

**fundações**  
& **Obras**  
**geotécnicas**

Seção "Em Foco" Edição 62

**Túneis em Solo e Rocha**

Material: 20/10/2015  
Circulação: 05/11/2015

### Participação na matéria

Manifestações de interesse em participar com conteúdo, entrevistas ou fotos devem ser enviadas para o e-mail: [glessia@rudders.com.br](mailto:glessia@rudders.com.br) - Tel: (11) 3596-8094 (Os interessados em participar nas matérias de cada edição receberão posteriormente por e-mail as orientações da redação da revista)

### Participação com anúncio especial na edição

Manifestações de interesse em participar com anúncio especial na edição devem ser enviadas para o e-mail: [publicidade@rudders.com.br](mailto:publicidade@rudders.com.br)  
Tel: (11) 2641-0871

## Prepare-se para participar!

### Calendário Anual de Pautas 2015 da revista *Fundações & Obras Geotécnicas*

A revista *Fundações & Obras Geotécnicas* dispõe da seção "Em Foco" – editoria mensal e fixa na publicação – que tem um viés didático, com informações detalhadas sobre alguma técnica utilizada na área, explicadas por dois ou mais profissionais especialistas do setor. Com uma abordagem explicativa e com teor técnico, a matéria explana ao leitor a metodologia executiva da tecnologia, quando ela chegou ao Brasil, como foi sua evolução no mercado nacional, qual é a sua aplicabilidade, qual é a avaliação dela pelo setor, entre outros. A editoria tem o objetivo de orientar empresas e engenheiros que procuram conhecer mais sobre os sistemas em pauta. A matéria também exhibe registros fotográficos que possam ilustrar o tema abordado naquela edição.



**Rudder**  
editora

Tels: (11) 3467-8770 / 2641-0871

[www.rudders.com.br](http://www.rudders.com.br)