

Revista **f**undações & **g**Obras eotécnicas



Ano 4
Nº 46
R\$ 27,00

Julho de 2014
Rudder
editores
www.rudders.com.br



ALPHA SIGMA TOWERS: COM O INTUITO DE SUPORTAR CARGAS SUPERIORES, O EMPREENDIMENTO EMPREGARÁ 114 ESTACAS BARRETE CADA UMA COM 32 M DE PROFUNDIDADE

ENSAIO DE INTEGRIDADE (PIT) – INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS PARA OS CASOS DE ESTACAS DOS TIPOS HÉLICE CONTÍNUA MONITORADA E RAIZ



ENSAIO DE INTEGRIDADE (PIT) – INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS PARA OS CASOS DE ESTACAS DOS TIPOS HÉLICE CONTÍNUA MONITORADA E RAIZ

Felipe Carvalho Bungenstab

(felipebungenstab@gmail.com)

M.Sc. Engenheiro na Brascontec Engenharia e Tecnologia Ltda., Serra/ES, Brasil

Jorge W. Beim

(jorgebeim@terra.com.br)

Engenheiro, Diretor da JB Instrumentação Eletrônica Ltda., Rio de Janeiro/RJ, Brasil

1. INTRODUÇÃO

O Ensaio de Integridade em Estacas ou PIT (*Pile Integrity Test*) é um ensaio não destrutivo também conhecido como ensaio de baixa deformação (*Low Strain Test*), que vem provando ser uma ferramenta valiosa na avaliação do comprimento e da integridade de estacas (Morgano, 1996).

O ensaio tornou-se popular no Brasil apenas na década passada sendo que, atualmente, mais de vinte empresas vêm atuando na execução do PIT no país. Entretanto, essa crescente demanda do mercado brasileiro vem acompanhada de algumas críticas da comunidade geotécnica e dúvidas sobre a real eficácia dessa metodologia em sua aplicação para cada tipo de estaca. Além disso, a falta de uma norma técnica regulamentadora específica no Brasil, como a americana ASTM (*American Society for Testing and Materials*) D5882, cria uma situação de desconforto, no que tange a padronização da execução do ensaio e a análise dos resultados, que muitas vezes não é em parte ou totalmente conclusiva por limitações da própria metodologia.

Nesse cenário, o compartilhamento de experiências de ensaios em diferentes casos de obra é certamente de grande valia para gerar discussões sobre a melhor aplicação e aproveitamento da técnica. Alguns trabalhos no Brasil são: Figueiredo, 2003; Beim *et al.*, 2006; Valinho *et al.*, 2006; Zaeyen e Lopes 2006; Alonso, 2007 e Mucheti, 2008.

Além de comentar brevemente sobre a avaliação de integridade, este artigo apresenta uma discussão sobre a aplicação do ensaio e interpretação de resultados para dois tipos de estacas: hélice contínua monitorada e raiz.



Figura 1 – Ensaio PIT. (a) Execução no campo; (b) Representação esquemática (adaptado de Rausche *et al.*, 1992)

2. A AVALIAÇÃO DOS SINAIS DE VELOCIDADE NO DOMÍNIO DO TEMPO

Apresenta-se neste item uma breve revisão sobre a avaliação dos sinais de velocidade do PIT para a interpretação do comprimento e da integridade de estacas, partindo dos conceitos da teoria de mecânica de ondas, que não é objeto deste artigo, pois já foi extensamente apresentada em outros trabalhos, como em Rausche *et al.* (1988).

A interpretação dos reflectogramas deve sempre ser realizada com registros de boletins de sondagem do solo, relatórios de execução das estacas e o projeto geotécnico das fundações (PIT Manual, 2005; Alonso, 2007), para que o resultado final seja compatibilizado e coerente.

Os perfis de sondagem devem auxiliar na detecção da influência da resistência do solo que, geralmente atua de maneira gradual no sinal (baixa frequência), mas que também pode atuar de maneira localizada, como no caso de uma camada de solo fraca sobre uma camada muito resistente, que pode ser interpretado como um aumento de impedância local.

Os boletins de execução, por exemplo, no caso de estacas do tipo hélice contínua monitorada, podem informar dados como o volume de concreto injetado e a velocidade de retirada do trado no momento da concretagem, que fornecem indícios sobre a condição da estaca executada, como será discutido adiante.

O projeto de fundações deve ser consultado para a obtenção de dados nominais das estacas (tipo, diâmetro, comprimento e nomenclatura) e demais especificações de conformidade.

2.1 Avaliação da integridade das estacas

A avaliação da integridade de estacas, no domínio do tempo, é realizada por meio da análise das variações de impedância ao longo do sinal de velocidade obtido do ensaio. A impedância de uma estaca (Z) relaciona-se com a sua seção transversal (A), o módulo de elasticidade (E) e o peso específico (ρ) do concreto de acordo com a equação 1. Apesar da relação de maior peso entre (Z) e (A), diretamente proporcionais, no caso de uma variação de impedância não é possível avaliar qual o fator determinante, o que é uma limitação do ensaio.

$$Z = A\sqrt{E\rho}$$

Equação 1

A ocorrência de dano na estaca é verificada através da detecção de reduções de impedância, realizada basicamente pela busca de pulsos no sinal de velocidade, no mesmo sentido do pulso inicial, no intervalo de tempo entre o pulso inicial e o retorno previsto da onda (reflexão da ponta). Já pulsos no sentido oposto ao pulso inicial significam aumentos de impedância. Pulsos no sentido oposto ao pulso inicial seguidos de pulsos no mesmo sentido do pulso inicial devem ter as magnitudes comparadas, pois podem indicar um aumento de impedância seguido de um retorno à impedância normal (exemplo da figura 7).

Variações progressivas do sinal de velocidade no sentido

oposto ao do pulso inicial representam, geralmente, o efeito de resistência por atrito lateral do solo em contato com o fuste da estaca.

Todas as avaliações de variação de impedância devem ser realizadas a partir da adoção de uma linha de referência “*baseline*”, que deverá ser prevista considerando o efeito gerado pela resistência do solo.

A magnitude dos possíveis danos encontrados só pode ser estimada quando a ponta da estaca está aparente no sinal. Nesse caso, as amplitudes de reflexão da ponta e do pulso inicial devem ser igualadas e a intensidade da variação de impedância pode ser calculada pelo método *Beta*. De maneira simplificada, β é a razão da variação de impedância Z_2 para Z_1 (Rausche e Goble, 1979):

$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1} = \left(\frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \right)$$

Equação 2

onde: α é a amplitude da reflexão do dano dividida por duas vezes a amplitude do pulso inicial, em relação à linha de referência adotada.

A análise *Beta* aplicada ao PIT permite apenas uma estimativa da magnitude do dano, devido a limitações da teoria de ondas aplicada ao ensaio e da influência da resistência do solo, não levada em consideração na equação 2. Sempre que necessário, uma melhor avaliação deve ser obtida através do ensaio de carregamento dinâmico (alta deformação).

É importante observar ainda que a existência de dano, desde que não comprometa a capacidade estrutural da estaca, não impede necessariamente a sua utilização. Isso porque o ensaio PIT (baixa deformação) não é capaz de avaliar a capacidade de carga geotécnica dos elementos. Outra vez, o ensaio de carregamento dinâmico é indicado para uma análise mais acurada.

2.2 Avaliação do comprimento das estacas

A avaliação do comprimento só pode ser realizada quando há indicação clara da reflexão de onda correspondente à ponta da estaca.

Ao atingir a ponta, a impedância é nula, $Z_2=0$, e a onda é refletida integralmente em tração (com mesmo sentido do pulso inicial); exceto para o caso de estacas com ponta em rocha, onde se pode ter $Z_2 > Z_1$, devido à resistência da rocha, ou seja, a onda é refletida em compressão (velocidade em sentido oposto ao pulso inicial).

Como a velocidade da onda no concreto aplicado nas estacas (c) não é exatamente conhecida, a sua profundidade (L) não pode ser determinada, mas apenas estimada.

Os softwares de análise, como o PIT-W[®], disponibilizam um gráfico *velocidade x tempo*, com uma escala de comprimento, baseada na velocidade da onda assumida. Ou seja, ao variar a velocidade da onda, a escala de comprimento percorre o eixo do tempo, até que a indicação

da ponta da estaca (existente na escala) coincida com a reflexão da ponta no sinal de velocidade. Nesse caso, deve ser admitida uma variação de 10% para a velocidade média de 4.000 m/s no concreto e a provável ponta da estaca deve ser avaliada dentro desse intervalo. Se a reflexão de ponta ocorrer para velocidades fora da margem de 10% da média, o comprimento da estaca é questionável (Likins e Rausche, 2000). Reflexões de ponta visualizadas para velocidades inferiores a 3.600 m/s indicariam estacas mais longas (ou deficiência na qualidade do concreto) e para velocidades superiores a 4.400 m/s estacas mais curtas ou danificadas.

Johnson e Rausche (1996) mostraram que a execução do ensaio PIT utilizando dois acelerômetros posicionados em profundidades distintas permite a determinação da velo-

cidade de propagação da onda no concreto, na região de instalação dos acelerômetros. Nesse caso, a profundidade da estaca, desde que a reflexão da ponta esteja visível, pode ser determinada, em geral, com maior precisão. Essa técnica não é muito utilizada no Brasil.

2.3 Avaliação final da estaca

A avaliação final da estaca pode se tornar tarefa difícil face às limitações do ensaio. Em alguns casos, os sinais obtidos não permitem concluir sobre a integridade de parte da estaca ou mesmo de toda ela.

Para os sinais com clara reflexão de ponta e com ausência de grandes interferências (alargamentos e/ou reflexões devidas a atrito lateral), Rausche e Goble (1979) classificaram qualitativamente a severidade do dano, dado pela redução de impedância observada, em função do valor de β calculado (tabela 1).

Entretanto, essa situação ideal nem sempre é possível. A padronização da apresentação dos resultados dos ensaios certamente reduz as dúvidas de interpretação e já é um indicativo, aos projetistas menos conhecedores da técnica de suas limitações.

Nesse intuito, Webster *et al.* (2011) propuseram uma classificação geral, apresentada na tabela 2, para a avaliação das estacas, baseando-se na qualidade das informações obtidas dos sinais de velocidade.

Tabela 1 – Classificação da severidade do dano em função do valor de Beta (Rausche e Goble, 1979)

Beta (β)	Severidade do dano
1,0	Íntegra
0,8 - 1,0	Dano leve
0,6 - 0,8	Danificada significativo
< 0,6	Seramente danificada

Tabela 2 – Classificação recomendada para a qualidade de estacas avaliadas pelo ensaio PIT (Webster *et al.*, 2011)

Classe	Nome da classe	Comentários
AA	Indicação de integridade	Uma clara reflexão de ponta pode ser identificada, correspondendo a uma velocidade de onda na faixa aceitável. Indicação de variações normais na qualidade do material ou seção transversal da estaca.
AB	Nenhum dano maior indicado	Os sinais não revelam nem reflexões de significativas reduções de seção transversal ou qualidade do material nem indicação de ponta. Sinais como esses não indicam dano significativo; entretanto, não indicam evidência positiva de integridade.
ABx	Nenhum dano maior indicado até a prof. de x (m)	Devido às limitações do método, a interpretação do sinal para todo o fuste da estaca não é possível. São exemplos: estacas longas em solo resistente e/ou com grandes reflexões intermediárias.
PFx	Indicação de provável dano em aprox. x (m).	A reflexão da ponta é aparente e há pelo menos uma reflexão correspondendo a uma redução de seção ou qualidade do material. Análise quantitativa adicional pode ajudar a identificar a severidade do dano.
PDx	Indicação de provável dano em aprox. x (m).	Os sinais mostram uma grande reflexão correspondendo a uma redução de seção transversal ou qualidade do material, mas o sinal claro de ponta não está aparente.
IVx	Sinal inconclusivo abaixo da prof. de x (m) devido a vibrações	Os dados são inconclusivos devido às vibrações geradas por maquinário ou armadura densa se estendendo sobre o topo da estaca; o reensaio é aconselhável sob certas circunstâncias.
IR	Sinal inconclusivo	Duas situações podem ocorrer: * Qualidade ruim do material no fuste da estaca ou concreto com baixa resistência (ensaio realizado muito cedo). É aconselhável reensaiar após nova preparação do topo da estaca ou após esperar a cura do concreto. * Variações de impedância esperadas ou juntas podem gerar sinais que não indicam a identificação da presença de ponta.

Neste trabalho, as limitações gerais metodológicas do ensaio PIT não são apresentadas ou discutidas, exceto as aplicáveis aos casos específicos das estacas analisadas.

3. AVALIAÇÃO APLICADA DOS SINAIS DE VELOCIDADE

Busca-se neste item uma discussão sobre as principais particularidades executivas que podem influenciar na interpretação dos sinais de velocidade do PIT, para os casos de estacas do tipo hélice contínua monitorada e do tipo raiz.

3.1 Estacas tipo hélice contínua monitorada

Este é atualmente o tipo de estacas mais utilizado no Brasil. O fato de o processo de execução ser monitorado eletronicamente é um grande atrativo de sua utilização e gera certa confiança sobre sua qualidade executiva. Entretanto, falhas advindas do funcionamento dos sensores de monitoração (correta manutenção e calibração) e da operação dos equipamentos (fator humano) podem resultar em estacas com qualidade e informações executivas duvidosas.

Almeida Neto (2002) apresenta extensa discussão sobre a metodologia executiva de estacas hélice contínua, inclusive sobre a validade e confiabilidade dos dados obtidos da monitoração.

Nessas estacas, o processo de concretagem é o maior fator influente na integridade. Segundo Almeida Neto (2002), a concretagem é feita sob pressão positiva da ordem de 50 a 100 kPa, visando manter a integridade da estaca durante o processo, sendo que, para isso dois fatores devem ser observados:

- O trado tem de ter atingido um solo que permita a formação da “bucha”, para que o concreto injetado se mantenha abaixo da ponta do trado, evitando que ele suba pelo espaço entre o trado e o solo.
- A velocidade de subida do trado deve ser controlada de modo que seja garantido o sobreconsumo de concreto.

Outro fator de extrema importância é garantir que a estaca seja concretada de forma contínua e ininterrupta para que as paredes da perfuração sejam mantidas estáveis, seja acima da ponta do trado, pelo solo entre as pás, ou abaixo da ponta pelo concreto já injetado.

Os sensores de monitoração existentes possuem capacidade para medir: a profundidade e a verticalidade do trado, tempo de execução, pressão do concreto injetado, velocidade do trado (durante perfuração e retirada) e o torque da perfuratriz.

O volume de concreto injetado é calculado através dos dados (picos) de pressão de injeção da bomba, que são medidos na curva do mangote, no topo do trado. Almeida Neto e Kochen (2003) comentaram que fatores como: a calibração dos sensores, danos, bombas com muita utilização ou sem manutenção, entre outros, são limitantes para a confiabilidade do volume de concreto injetado calculado.

Almeida Neto (2002) relatou ainda casos reais em que a taxa de sobreconsumo de concreto calculada, apesar de normal, não indicava a integridade das estacas, com danos avaliados por meio de escavação do solo para exposição de fuste e inspeção visual. Em casos como esses, os sobrecon-

sumos de concreto incoerentes podem estar associados ao concreto que sobe pelas pás da hélice (até a superfície do terreno), além dos fatores expostos anteriormente.

Alguns dos principais problemas de integridade encontrados neste tipo de estaca são referentes à:

- Redução da seção transversal efetiva, devido à ausência de concreto ou contaminação por detritos de solo advindos da parede da perfuração;
- Deficiência na qualidade do concreto, devido à dosagem inadequada, que pode ocasionar, entre outros, segregação de agregados e exsudação.

A ocorrência de variações de seção transversal é comum, pois existe variação da pressão de injeção do concreto e da tensão radial aplicada pelo solo. Uma superfície perfeitamente cilíndrica da estaca só poderia ser conseguida caso o solo aplicasse uma tensão radial constante durante a concretagem, o que não ocorre (Alonso, 2007).

Um grande indicador de não integridade, nos boletins de execução das estacas, é dado pelo aumento da velocidade de subida do trado simultâneo à redução da pressão da injeção no momento da concretagem, o que pode permitir que o espaço entre o trado e o solo não seja completamente preenchido pelo concreto. Para reduzir o problema, o operador da perfuratriz deve estar atento ao processo para garantir que haja sempre sobreconsumo de concreto da ordem de pelo menos 20%.

Como recomendação geral, o contratante deve exigir certificados de calibração e manutenção dos sensores e avaliar a qualidade da equipe técnica de operação da perfuratriz. Quanto ao concreto, devem ser respeitadas as especificações de projeto, principalmente quanto à dimensão máxima do agregado graúdo, consumo mínimo de cimento e trabalhabilidade.

A seguir são discutidas algumas questões do processo executivo das estacas que podem trazer particularidades na interpretação dos sinais coletados pelo PIT.

3.1.1 Influência e interferência da armadura das estacas nos sinais de velocidade

As estacas do tipo hélice contínua não são armadas integralmente, por limitações do próprio processo executivo. Usualmente utiliza-se armadura padrão de até 6 m de comprimento.

Nesse caso, as ondas de compressão do ensaio trafegam parte no concreto armado e parte no concreto simples devendo, então, ocorrer uma redução de impedância no trecho de transição. Entretanto, tal redução é mínima, não representando reflexão significativa no sinal de velocidade. Por exemplo, para uma estaca, com \varnothing 50 cm, comprimento de 10 m, armada com uma “gaiola” de 6 m de comprimento, composta por 06 barras longitudinais de aço \varnothing 16,0 mm, o valor de beta na transição, é de aproximadamente, $\beta \approx 0,97$.

Outra questão interessante diz respeito à influência do comprimento livre das armaduras longitudinais das estacas acima do topo arrasado, que podem causar ruídos de vibração nos sinais de velocidade. A figura 2 mostra um sinal indicando presença de ruído, proveniente da vibra-

ção da armadura longitudinal exposta, que possuía cerca de 2 m de comprimento acima da cota de ensaio. A análise do sinal é bastante prejudicada, sendo necessária a utilização de filtros passa-baixa para a tentativa de eliminação do ruído.

Para evitar esse tipo de interferência, orienta-se o corte das armaduras longitudinais expostas, em no máximo 1 m de comprimento, caso possível. Em casos onde tal corte não seja desejável, deve-se avaliar a interferência gerada pela vibração na qualidade da interpretação dos sinais.

3.1.2 Indicação de ponta da estaca

Na maioria dos casos, quando é respeitada a relação aproximada $L/D < 30$, a reflexão de ponta das estacas é clara e geralmente dada com pico do sinal de velocidade no mesmo sentido do pulso inicial. Entretanto, devido a fatores como: solos com elevada resistência por atrito lateral ou presença de ruídos de vibração no sinal, a ponta pode não estar visível (figura 4), o que não deve geralmente significar indício de falta de integridade.

Indicações de aumento de impedância na região da ponta da estaca (quando a reflexão está aparente) podem indicar a existência da bucha de concreto, desde que o solo próximo à ponta permita essa formação durante a concretagem. A figura 5 ilustra um sinal típico.

Em outros casos, onde não há formação da bucha, as reflexões de ponta podem ser precedidas de redução gradual de impedância. Tal reflexão pode estar associada ao processo executivo, em que o trado em formato de hélice pode não garantir uma perfeita conformação da ponta do elemento. Como a NBR 6.122/2010 limita a resistência na ponta de estacas hélice contínua, para casos normais a, no máximo, 20% da resistência geotécnica admissível da estaca, esse tipo de reflexão não deve, em geral, ser interpretada como dano.

3.1.3 Variações características de impedância

Conforme comentado anteriormente, a ocorrência de variações de

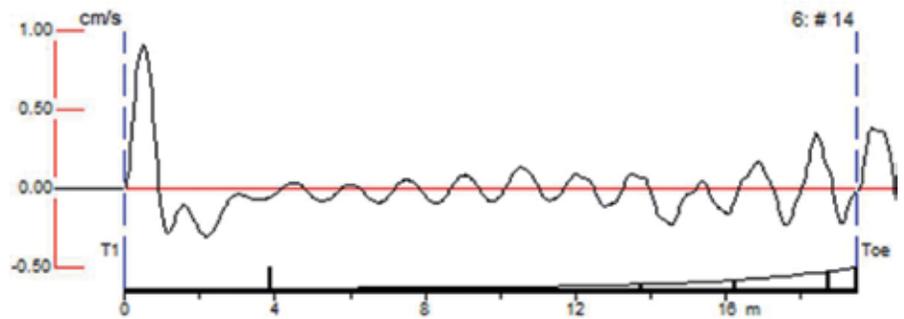


Figura 2 – Estaca hélice contínua, Ø 50 cm, L = 19,5 m, com indicação de ruído proveniente da armadura longitudinal

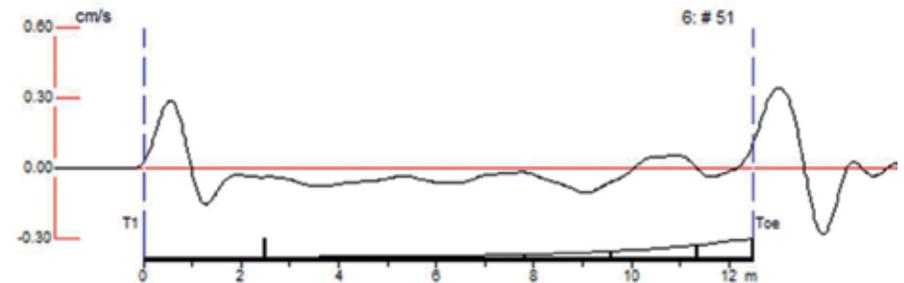


Figura 3 – Estaca hélice contínua, íntegra e com presença de reflexão da ponta

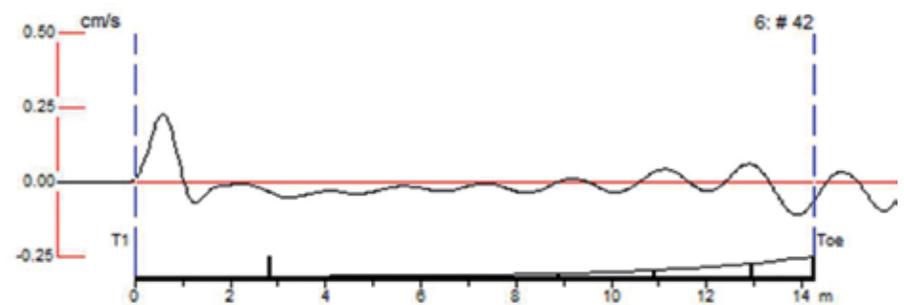


Figura 4 – Estaca hélice contínua, íntegra e sem a presença de reflexão da ponta

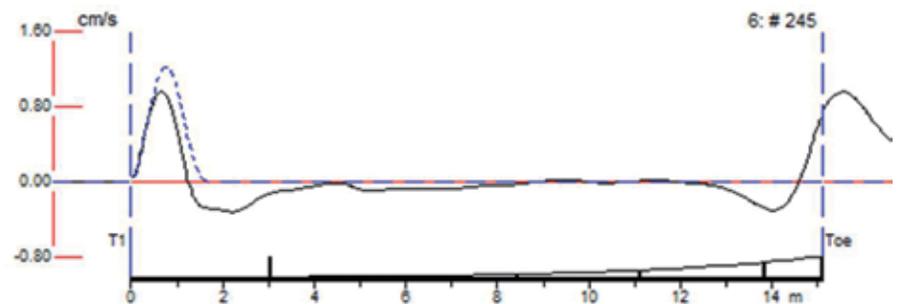


Figura 5 – Estaca hélice contínua, íntegra, com possíveis indicações de formação da bucha e reflexão da ponta

impedância ao longo do fuste é comum para este tipo de estaca. São possíveis formações de bulbos em solos de baixa resistência, estrangulamentos de seção (quando não se aplica pressão de injeção ade-

quada), ou danos por contaminação ou variações nas propriedades do concreto.

A figura 7 ilustra um caso de estaca íntegra, com aumento de impedância localizada entre aproximadamente

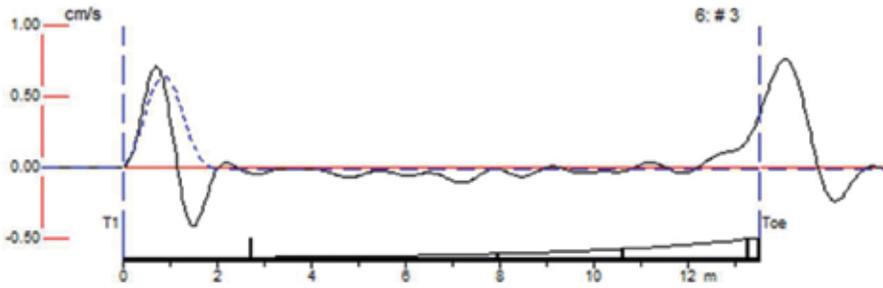


Figura 6 – Estaca hélice contínua, íntegra, com redução de impedância próximo à ponta a partir de aproximadamente 12 m

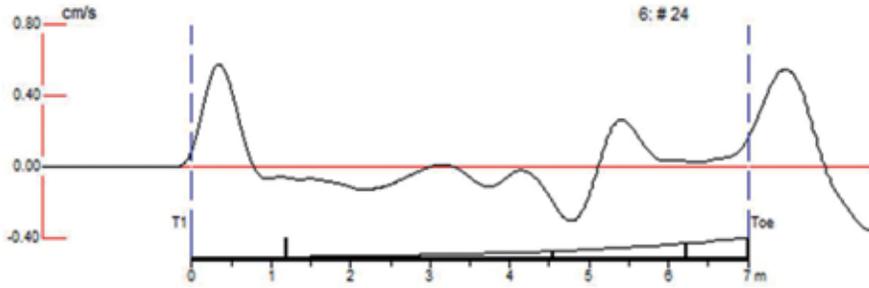


Figura 7 – Estaca hélice contínua, Ø 40 cm, L= 7 m, com aumento de impedância localizado

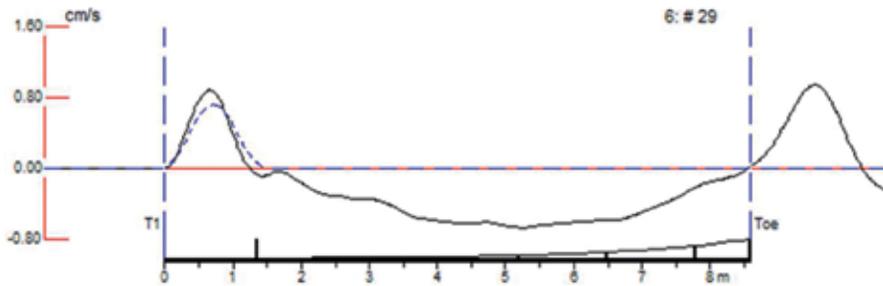


Figura 8 – Estaca hélice contínua, Ø 50 cm, L= 8,6 m, com possível indicação da atuação da resistência do solo

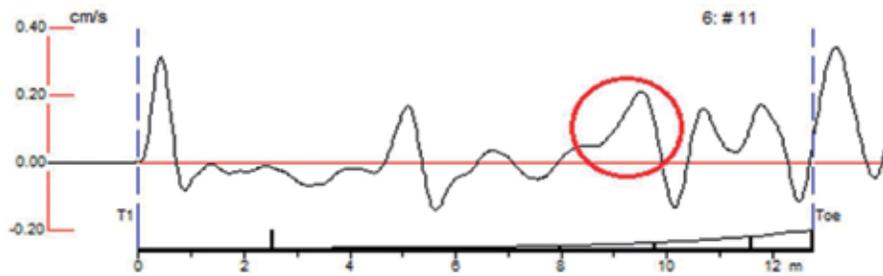


Figura 9 – Estaca hélice contínua, Ø 60 cm, L= 12,8 m, indicando dano em 4,5 m e reflexão secundária em 9 m

4,3 m e 5,3 m, seguido de retorno à impedância normal e indicação clara de reflexão da ponta.

A figura 8 apresenta um exemplo de variação progressiva de impedância, refletida no sinal de velocidade, que pode

ser atribuída à variação de resistência por atrito lateral do solo.

Exemplos de reduções de impedância são apresentados nas figuras 9 e 10. Na primeira situação, ilustra-se um caso onde a estaca apresenta

uma redução de impedância entre aproximadamente 4,5 m e 5,2 m, com β calculado de 0,6. Interessante notar também a presença da reflexão secundária do dano, em aproximadamente 9 m, e a indicação clara da reflexão de ponta.

Já a figura 10 apresenta uma estaca ensaiada com apenas 20 cm de arrasamento a partir de sua cota de execução. A reflexão positiva a cerca de 1 m de profundidade indica provável dano local, mas as reflexões secundárias e a dissipação do sinal no dano impedem a avaliação do restante da estaca, inclusive da reflexão da ponta.

Apesar de não existirem indicações contrárias sobre a execução do PIT em estacas que não estejam na cota de arrasamento de projeto, orientase que sejam ensaiadas estacas já arrasadas ou, pelo menos, escavadas cerca de 1 m de profundidade a partir de sua cota de execução. Isso ajuda a eliminar o concreto de má qualidade do trecho inicial da estaca, geralmente executado sob pressão reduzida ou nula (menor confinamento do solo), passível da ocorrência de contaminação com detritos do solo e do fenômeno de exsudação.

3.2 Estacas tipo raiz

Neste tipo de estacas, a capacidade de carga e a integridade do fuste são extremamente dependentes do processo executivo, que pode ser resumido nas seguintes etapas: - Perfuração revestida, com posterior lavagem interna do revestimento; - Instalação da armadura; Preenchimento com argamassa e aplicação de golpes de ar comprimido simultaneamente à remoção de composições do revestimento.

O processo executivo não é monitorado eletronicamente e os boletins de registro são bastante simplificados contendo, basicamente: a profundidade da estaca (e de eventuais trechos em solo e rocha), volume de argamassa injetado e pressão de injeção. Nesse caso, a pressão de injeção é verificada através de manômetro acoplado à mangueira de injeção, devendo estar com manutenção e calibração adequadas.

A deficiência na integridade desses elementos é geralmente resultado de:

- Limpeza inadequada do interior do revestimento; - Pressão de injeção e controle da retirada das composições metálicas inadequados, que pode gerar desconfinamento do solo em algum trecho, expondo a estaca à contaminação por detritos de solo. Algumas particularidades interessantes dessas estacas que podem ser evidenciadas nos sinais de velocidade do PIT são:

3.2.1 Verificação da pressão de injeção

É característica das estacas do tipo raiz a formação de bulbos/alargamentos de seção, devido à aplicação da pressão de injeção, principalmente, para o caso de solos pouco resistentes. Nesses casos, apesar de não quantificável previamente ao ensaio, essas indicações de aumento de impedância devem ser observadas pelos sinais do PIT. Em caso contrário, para situações onde deveriam ser esperadas as formações de bulbos e esses não estejam presentes, pode-se suspeitar da pressão efetiva de injeção aplicada durante a execução dos elementos, sendo indicável a realização de uma inspeção no campo para verificação de conformidade do processo executivo.

3.2.2 Estacas engastadas em rocha (com trecho em solo e rocha)

A avaliação dos sinais nesse caso é mais difícil, e deve ser dividida para os trechos em solo e em rocha. Para o trecho em solo valem as observações gerais. Quando a onda de compressão atinge o trecho em rocha, é caracterizado um aumento de impedância, provocado pelo aumento da resistência por atrito lateral na estaca (transição do solo para rocha). A avaliação dessa transição é dificultada pelo fato de que nesse local agem acumuladamente: possíveis aumentos anteriores de impedância (alargamentos de seção da estaca no trecho em solo e aumento da resistência por atrito lateral na transição solo-rocha) e a redução de impedância devido à redução da seção transversal da estaca, pela introdução do martelo de fundo. A ava-

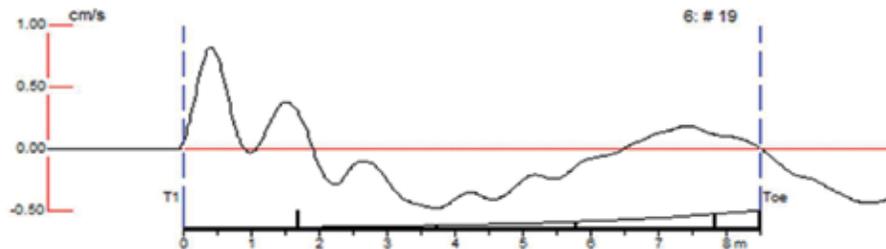


Figura 10 – Estaca hélice contínua, com indicação de dano a aproximadamente 1 m de profundidade

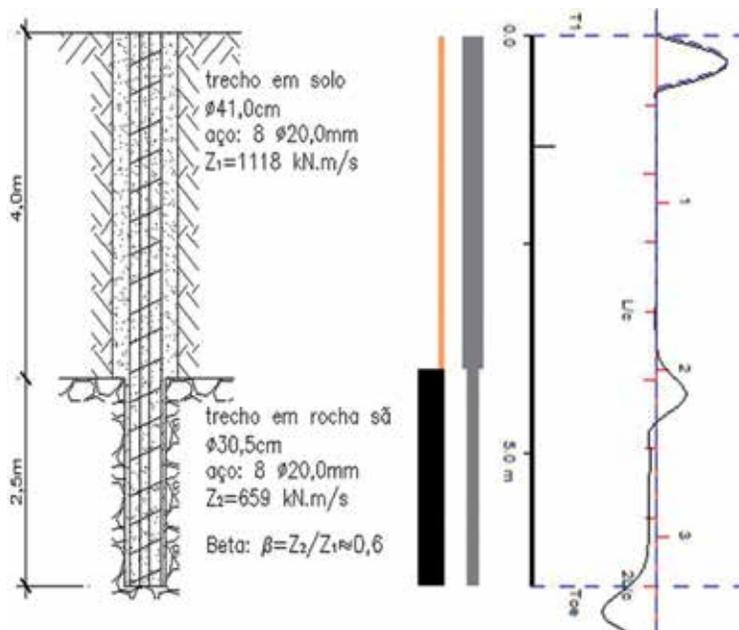


Figura 11 – Sinal simulado de estaca raiz, engastada em rocha, considerando somente o efeito de variação de impedância devido à seção transversal (trecho em rocha)

liação separada de todos os efeitos não é possível de ser realizada. No trecho em rocha, é bastante difícil observar danos localizados, devido à dissipação da onda no trecho em solo e isso deve ser entendido como uma limitação do ensaio. A reflexão da ponta da estaca por vezes é aparente e nesse caso pode-se ter maior certeza sobre a qualidade do restante do sinal. Com relação à ponta das estacas engastadas em rocha, são esperadas reflexões de velocidade com sentido oposto ao do pico inicial. Reflexões no mesmo sentido do pico inicial nesse caso podem indicar: - Limpeza inadequada da perfuração, especial-

mente no fundo, onde a presença de detritos de solo ou rocha pode dissipar a onda ao chegar à ponta; - Qualidade questionável da rocha sob a ponta da estaca. A figura 11 ilustra uma simulação do sinal de velocidade para o caso de uma estaca raiz engastada em rocha, considerando apenas o efeito de redução de impedância ($\beta \approx 0,6$) devido à seção transversal, no trecho em rocha. Esse sinal é raramente observado na prática. As figuras 12 e 13 apresentam sinais obtidos em casos reais de obra, onde ainda é possível visualizar a redução de impedância devido à

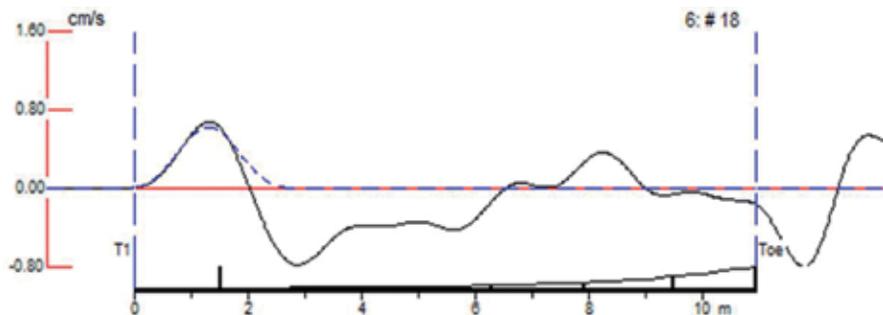


Figura 12 – Estaca raiz, Ø 41 cm, L= 11 m, engastada em rocha (8 m em solo e 3 m em rocha sã), íntegra e com reflexão de ponta negativa

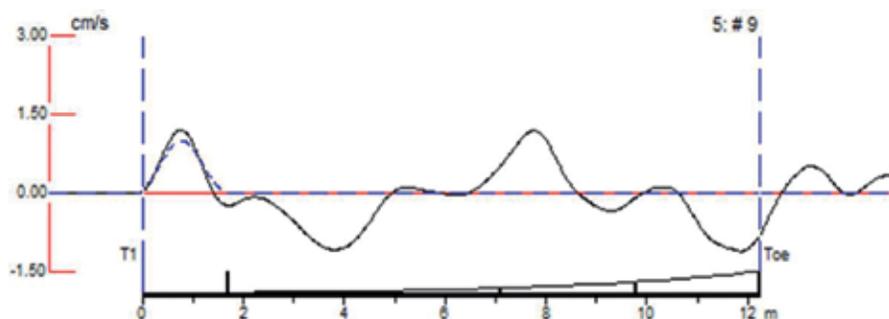


Figura 13 – Estaca raiz, Ø 41 cm, L= 12,3 m, engastada em rocha (9,3 m em solo e 3,0 m em rocha sã), íntegra e com reflexão de ponta positiva

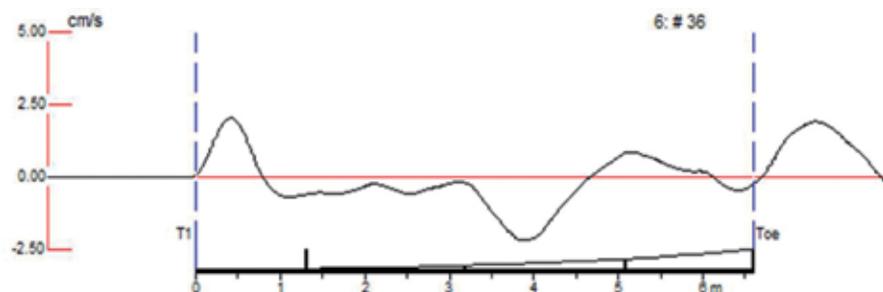


Figura 14 – Estaca raiz, Ø 41 cm, L= 6,6 m, engastada em rocha, (3 m em solo de baixa resistência/fraco e 3,6 m em rocha), íntegra e com reflexão de ponta positiva

seção transversal da estaca (trecho em rocha). No primeiro caso, a reflexão positiva em aproximadamente 8 m indica tal redução, e a reflexão da ponta é negativa. Já no segundo caso, a redução de impedância aparece em cerca de 9 m, precedida de claro aumento de impedância no trecho em solo, devido a um provável alargamento de seção transversal (entre aproximadamente 2 m e 6 m), com reflexão de ponta positiva.

A figura 14 apresenta um caso de estaca executada num perfil geotécnico caracterizado pela presença de solo de baixa resistência sobre rocha, onde as seguintes observações po-

dem ser feitas: - O sinal indica integridade da estaca; - No trecho em solo não existe indicação de aumento de impedância (possíveis formações de bulbos/alargamentos de seção) indicando que a pressão de injeção pode não estar adequada; - A indicação da entrada do trecho em rocha é caracterizada somente pelo aumento abrupto de impedância (provável resistência da interface solo-rocha) a partir de aproximadamente 3,3 m. Não é observada a redução de impedância referente à redução do diâmetro da estaca; - A presença da ponta é clara, dada por uma reflexão positiva do sinal de velocidade.

3.2.3 O sinal de velocidade pode resultar inconclusivo

Uma das características executivas das estacas tipo raiz é a grande variação de seção ao longo do fuste, no caso de trecho em solo. Para casos onde a variação é dada próximo ao topo da estaca e possui grande intensidade, as reflexões secundárias geradas por essa variação podem tornar a interpretação uma tarefa difícil. Além disso, a dissipação da onda devido a essa variação pode prejudicar a interpretação abaixo dela. Muitas vezes não é possível interpretar o sinal de velocidade e isso não significa que a estaca não esteja íntegra. Essa é a maior limitação do ensaio PIT aplicado ao caso de estacas tipo raiz.

As figuras 15 e 16 mostram casos de sinais parcialmente inconclusivos, onde se observa uma grande variação de impedância (provável alargamento de seção entre 1,5 m e 3,5 m), seguido de sinal inconclusivo. A interpretação do trecho abaixo dessa variação é questionável.

4. CONCLUSÕES

Devido a inúmeras limitações existentes e, por vezes, à subjetividade da análise dos sinais de velocidade em casos mais complexos, o PIT tem sido alvo de críticas na comunidade geotécnica.

A aplicação do ensaio para cada tipo de estaca deve ser analisada e discutida à priori, estando os interessados cientes das limitações da técnica aplicada ao caso específico. Não é possível esperar mais do que o ensaio pode oferecer. A compreensão dessas limitações deve ser buscada para que a comunidade geotécnica aprenda a conviver com elas, assim como já o faz com outros tantos ensaios de campo que possuem os seus fatores limitantes específicos, mas que são imprescindíveis para o nosso dia a dia profissional.

A discussão da experiência de casos de obras com aplicações e resultados obtidos é de grande valia, como no presente caso onde se discutiu a interpretação para o caso de estacas dos tipos hélice contínua monitorada e raiz. Além disso, a sua padronização no Brasil, por meio de norma técnica específi-

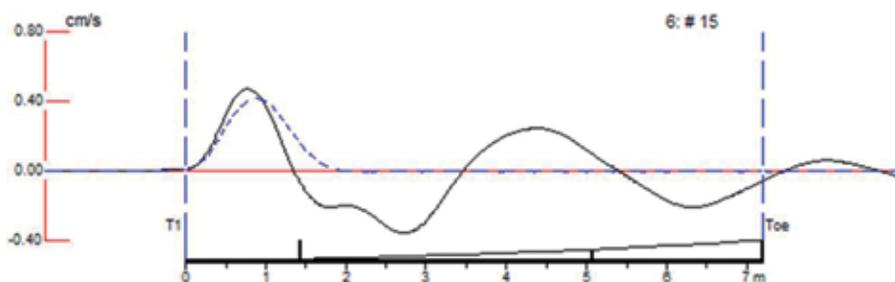


Figura 15 – Estaca raiz, Ø 45 cm, L= 7,2 m (3,5 m em solo e 3,7 m em rocha sã), indicando sinal parcialmente conclusivo

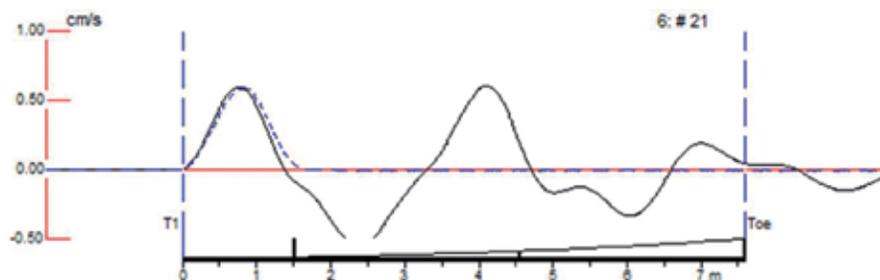


Figura 16 – Estaca raiz, Ø 45 cm, L= 10,8 m (em solo), indicando sinal parcialmente conclusivo

ca, pode trazer mais conforto aos projetistas, às empresas contratantes e às empresas responsáveis pela execução e interpretação dos ensaios.

A utilização mais eficiente do PIT deve ser obtida em conjunto com ensaios conclusivos como PCE (Provas de Carga Estática) e ECD (Ensaio de Carregamento Dinâmico). Sugere-se a realização, primeiramente, dos ensaios de integridade e, a partir da seleção das estacas avaliadas como “danificadas ou duvidosas”, se houverem, o prosseguimento com os ensaios conclusivos para dirimir ou reduzir as dúvidas iniciais. Esse cenário torna-se favorável quando se considera a revisão da NBR 6.122, em 2010, que passou a exigir a realização de ensaios de carga em praticamente todas as obras de importância com fundações profundas, validando ainda, a realização dos ensaios de carga dinâmicos, na proporção de 5 (ECD): 1 (PCE), ou seja, nessa opção mais estacas podem ser testadas. ☺

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6122 (2010). *Projeto e Execução de Fundações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

Almeida Neto, J. A. (2002). *Análise do Desempenho de Estacas Hélice Con-*

tínua e Ômega: Aspectos Executivos. Dissertação de Mestrado. EPUSP, São Paulo, SP.

Almeida Neto, J.A.; Kochen, R. (2003). *Estacas Hélice Contínua e Ômega: Aspectos Executivos*. Revista Engenharia, São Paulo. Disponível em: <<http://www.geocompany.com.br/ftp/artigo15.pdf>>. Acesso em 05 de janeiro de 2014.

Alonso, U. R. (2007). *Avaliação de Ensaios PIT nas Estacas Hélice Contínuas*. ABEF, São Paulo. Disponível em: <<http://www.abef.org.br>>. Acessado em 12 de Novembro de 2013.

ASTM D5882 (2007). *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations*. American Society for Testing Materials.

Beim, J. W.; Costa, Y.; Ferreira, A. C. (2006). *Ensaio de Integridade em Estacas Contendo Múltiplos Bulbos Utilizadas na Cidade de Maceió*. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica: Brasil; 1203-1206.

Figueiredo, C. M. M. (2003). *Ensaio de Integridade Estrutural PIT: Fundamentos Básicos, metodologias executivas e discussão de casos*. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo. 186 pg.

Johnson, M.; Rausche, F. (1996). *Low Strain Testing of Piles Utilizing Two Acceleration Signals*. Proceedings of the Fifth International Conference on the

Application of Stress-wave Theory to Piles 1996: Orlando, FL; 859-869.

Likins, G. E.; Rausche, F. (2000). *Recent Advances and Proper Use of PDI Low Strain Pile Integrity Testing*. Proceedings of the Sixth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles 2000: São Paulo, Brazil; 211-218.

Morgano, C. M. (1996). *Determining Embedment Depths of Deep Foundations Using Non-Destructive Methods*. Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles 1996: Orlando, FL; 734-747.

Mucheti, A. S. (2008). *Estacas Hélice Contínua Segmentada: Execução, Verificação de Integridade e Estudo do Comportamento*. Dissertação de mestrado, EPUSP, São Paulo. 123 p.

PIT Manual (2005). *PIT-W Manual – Software for PDI's Pile Integrity Tester*. Pile Dynamics, USA, 196 p.

Rausche, F.; Likins, G. E.; Shen, R-K. (1992). *Pile integrity testing and analysis*. Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles: The Netherlands; September. 613-617.

Rausche, F.; Likins, G. E.; Hussein, M. H. (1988). *Pile Integrity by Low and High Strain Impacts*. Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles: Ottawa, Canada; 44-55.

Rausche, F.; Goble, G. G. (1979). *Determination of Pile Damage by Top Measurements*. American Society for Testing and Materials: Philadelphia, PA; 500-506.

Valinho, R. F.; Cunha, R. P.; Maia, P. C. A.; Alves, F. (2006). *Avaliação da Integridade de Estacas Cravadas Assentes em Argila Mole da Cidade de Campos dos Goytacazes*. II GeoJovem: Nova Friburgo. (CD-ROM).

Webster, K.; Rausche, F. (2011). *Pile and Shaft Integrity Test Results, Classification, Acceptance and/or Rejection*. Compendium of Papers of the Transportation Research Board (TRB) 90th Annual Meeting: Washington, D.C. January.

Zaeyen, V. D. B.; Lopes, F. R. (2006). *Uso de Ensaios de Integridade para Controle de Qualidade de Estacas Moldadas in loco na ETE Sarapuá*. XIII COBRAMSEG, Curitiba, p. 1115-1119.