

MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ESTACAS – CONCEITOS BÁSICOS E DESENVOLVIMENTOS RECENTES

Gina Beim, Pile Dynamics, Inc. e Jorge Beim, Pile Dynamics, Inc.*

(* Este artigo foi condensado, traduzido e adaptado por Gina Beim e Jorge Beim a partir do trabalho Rausche, F., Robinson, B., April, 2010. Advances in the Evaluation of Pile and Shaft Quality. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP): Keystone, CO; 325-334).

Este artigo discute quatro tipos de avaliações da qualidade das fundações profundas utilizando-se métodos conhecidos como “dinâmicos”, ou baseados na teoria de propagação da onda:

- Monitoração da instalação;
- Avaliação da capacidade de carga do elemento de fundação, após a construção;
- Avaliação da integridade estrutural do elemento de fundação, após a construção;
- Avaliação da qualidade e profundidade de fundações de estruturas já existentes (“fundações desconhecidas”).

A monitoração das estacas cravadas (avaliação tipo a), os ensaios de carregamento dinâmico (avaliações tipos b e c) e os ensaios de integridade de baixa deformação (conhecidos como ensaio sônico ou PIT, avaliação tipo c) se

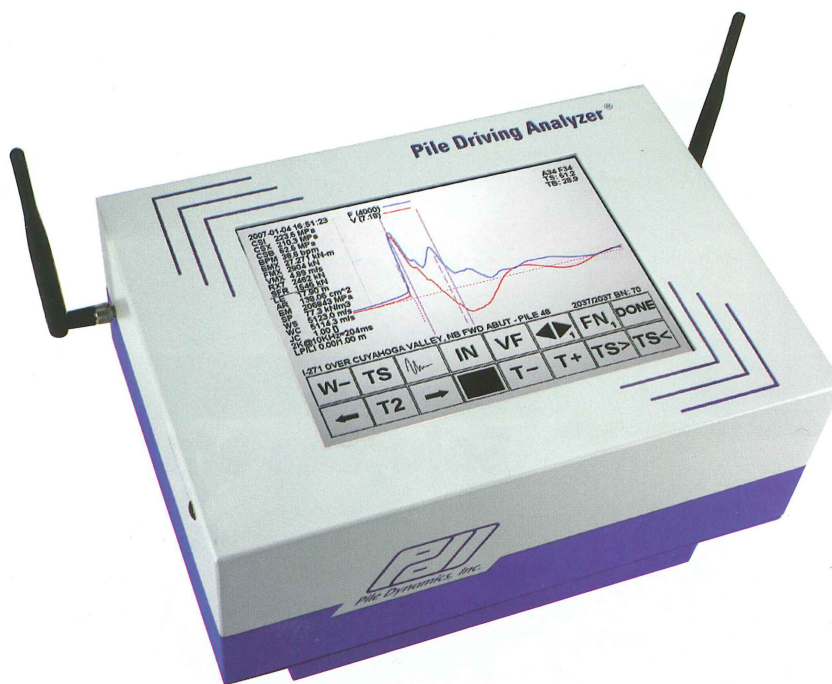


Figura 1 - Analisador de Cravação de Estacas (PDA)

baseiam em medições de força e movimento, através das quais são determinadas a velocidade de onda e/ou a resposta da estaca a um impacto. Embora a maneira mais conveniente de obter estas medições seja através de sensores instalados próximo ao topo da estaca, ocasionalmente são utilizados sensores embutidos ao longo do fuste ou na ponta, com o objetivo de avaliar a qualidade do concreto ou a resposta da ponta da estaca. O quarto tipo de avaliação descrito acima, a avaliação da profundidade e das características das

fundações sob estruturas existentes, é geralmente executado por ensaios PIT.

Passamos agora a descrever os métodos utilizados nos quatro tipos de avaliações:

MONITORAÇÃO (OU INSTRUMENTAÇÃO) DA CRAVAÇÃO DE ESTACAS

Dentre todos os métodos de ensaios dinâmicos de fundações, este é o mais importante e o utilizado com mais frequência. As medições de tensão (ou for-

ça) e aceleração de uma estaca cravada, tomadas durante a cravação, formam a base de cálculo deste método. O método é normalizado nos Estados Unidos, pelo *standard* da American Society of Testing and Materials ASTM D4945-12 e no Brasil pela NBR-13208. A análise dos dados coletados consiste na resolução da Equação da Onda Unidimensional pelo Método *Case*. Este processo de solução faz parte integrante do instrumento Pile Driving Analyzer®, ou PDA, conhecido no Brasil também como Analisador de Cravação de Estacas (Figura 1). O impacto do martelo de cravação gera uma onda de compressão que se propaga ao longo da estaca e sofre reflexões durante o seu trajeto. Em um ponto qualquer do fuste há, portanto, uma onda ascendente e uma onda descendente. A tensão e a aceleração medidas num certo ponto da estaca ao longo do tempo permitem não só plotar força contra tempo e velocidade contra tempo, mas também permitem identificar a componente de força da onda ascendente da componente de força da onda descendente. A capacidade de carga, as tensões de cravação e a integridade do fuste podem ser avaliadas a partir da onda ascendente (Likins et al, 2008, Rausche et al, 1988). Além disso, a eficiência do martelo de cravação pode ser avaliada, dada a energia transferida para o topo da estaca (medida) e as características do martelo (conhecidas).

Nos Estados Unidos, o cálculo pelo método de fatores de carregamento e resistência (LRFD) é obrigatório nos projetos estruturais financiados pelo Governo Federal (por exemplo, AASHTO, 2009). Para satisfazer os requerimentos deste código de obras, é comum que 2% a 5% das estacas de um dado projeto sejam instrumentadas e monitoradas pelo PDA. Por razões de segurança, rapidez do ensaio, e conveniência, os sensores que medem a força e a velocidade na estaca atualmente transmitem os dados medidos para o PDA por radiotransmissão eletrônica (no passado estes sensores eram acoplados ao PDA via cabos). Nos Estados Unidos e em algumas outras partes do mundo o monitoramento remoto vem ganhando popularidade, já que esta



Figura 2 - E-Saximeter

tecnologia permite reduzir o custo do ensaio e o tempo decorrido entre a decisão de executar o ensaio e a obtenção de um relatório. O monitoramento remoto consiste em delegar a instalação dos sensores para uma equipe de campo, permitindo que o engenheiro responsável pelo ensaio acompanhe o mesmo em tempo real, via internet, do seu escritório. Este processo elimina os custos e o tempo de viagem do engenheiro para o campo, já que somente o PDA e os sensores são despachados.

A monitoração da cravação de estacas é ocasionalmente complementada por instrumentações adicionais. Uma destas instrumentações consiste na avaliação das vibrações do solo causadas pela cravação, sendo inclusive possível enviar os dados obtidos por geofones ao próprio PDA (Robinson, 2006, Rausche and Robinson 2010). Outro exemplo é a instrumentação do martelo de crava-

ção. Como as características dos vários martelos são muito variáveis, e novos martelos são introduzidos no mercado a cada ano, é útil verificar a eficiência do martelo utilizado numa obra. Para tanto, o martelo é equipado com sensores de proximidade, e os dados obtidos pelos mesmos são processados por um instrumento portátil (E-Saximeter, Figura 2) que calcula a energia cinética do martelo. O mesmo instrumento inclui acessórios que produzem um registro automático do processo de cravação (penetração versus número de golpes).

ENSAIOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO

Os ensaios de carregamento dinâmico são uma extensão natural do processo de instrumentação de cravação de estacas. Estes ensaios, normalizados nos Estados Unidos pela ASTM D4945-08, e no Brasil pela NBR-13208, consistem na

obtenção de medidas de força e aceleração no topo de uma estaca submetida a um impacto de alta deformação. Os dados obtidos são analisados pelo programa CAPWAP®, que calcula uma curva carga-recalque de uma prova de carga estática. Este método de ensaio, tendo sido inicialmente aplicado às estacas cravadas, foi generalizado e atualmente é rotineiramente aplicado, tanto nos EUA como no Brasil, às estacas moldadas *in loco*, de tubulões de grande diâmetro a pequenas estacas de hélice contínua e até mesmo a estacas raiz. Um marte-

lo especial é utilizado para o impacto. O sistema APPLE mede a desaceleração do pilão durante o impacto, e com isso pode determinar a força no topo da estaca sem depender de medição da deformação do material da estaca. O uso de um transdutor de força no topo da estaca é outro avanço recente.

A norma brasileira NBR 6122 exige que sejam efetuadas provas estáticas em cerca de 1% das estacas da obra, sendo que as mesmas podem ser substituídas por ensaios de carregamento dinâmicos na proporção de cinco para um.

Um número pequeno de golpes é aplicado à estaca durante o processo de ensaio de carregamento dinâmico. Rausche et al., (2007) discute como selecionar o melhor golpe para análise, uma vez que tanto a energia do martelo como a resistência do terreno variam de golpe para golpe. A Figura 3 mostra as curvas obtidas durante um ensaio realizado com um pilão de 60 toneladas num tubulão de 1,8 m de diâmetro. Quatro golpes consecutivos foram analisados com o programa CAPWAP, e as curvas carga-recalque resultantes foram plotadas contra a penetração acumulada.

A prática brasileira usa as chamadas curvas RMX-DMX (capacidade de carga pelo método CASE versus deslocamento elástico máximo da estaca), obtida a partir dos sinais referentes a golpes com energias crescentes, para determinar o nível de mobilização da carga última da estaca alcançado durante o ensaio.

Os ensaios dinâmicos podem também tomar a forma de Provas de Carga Rápidas. Neste caso, um pilão extremamente pesado (de até 800kN) produz um impacto no topo de uma estaca protegida por um coxim com propriedades de compressão bastante altas, produzindo desta forma um pulso de força de maior duração do que os pulsos normalmente resultantes de um ensaio dinâmico convencional.

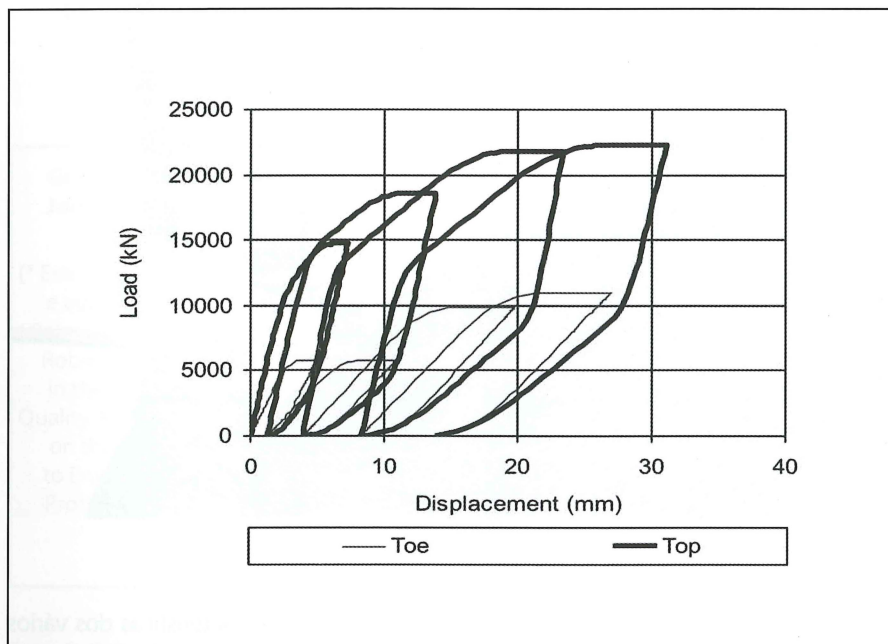


Figura 3 - Curvas de carga cíclica, calculadas por CAPWAP em um tubulão de 1.8 m de diâmetro (Rausche et al., 2007)



Figura 4 - PIT Pile Integrity Tester

ENSAIO DE INTEGRIDADE SÔNICO

O ensaio de integridade sônico, ou ensaio dinâmico de baixa deformação, é conhecido no Brasil e em outras partes do mundo como ensaio PIT (*pile integrity test*); PIT é também o nome de um dos equipamentos para realização deste ensaio – o *Pile Integrity Tester*. O método, normalizado pela ASTM 5882-07, requer que um martelo de mão produza um impacto de baixa deformação na estaca a ser ensaiada. A instrumentação necessária para o ensaio consiste do equipamento PIT, de um ou dois acelerômetros, e, opcionalmente, de um martelo de mão instrumentado. O sistema mais moderno para condução deste ensaio consiste de um PIT pequeno, leve, e de alta resolução, e inclui acelerômetros que transmitem os dados

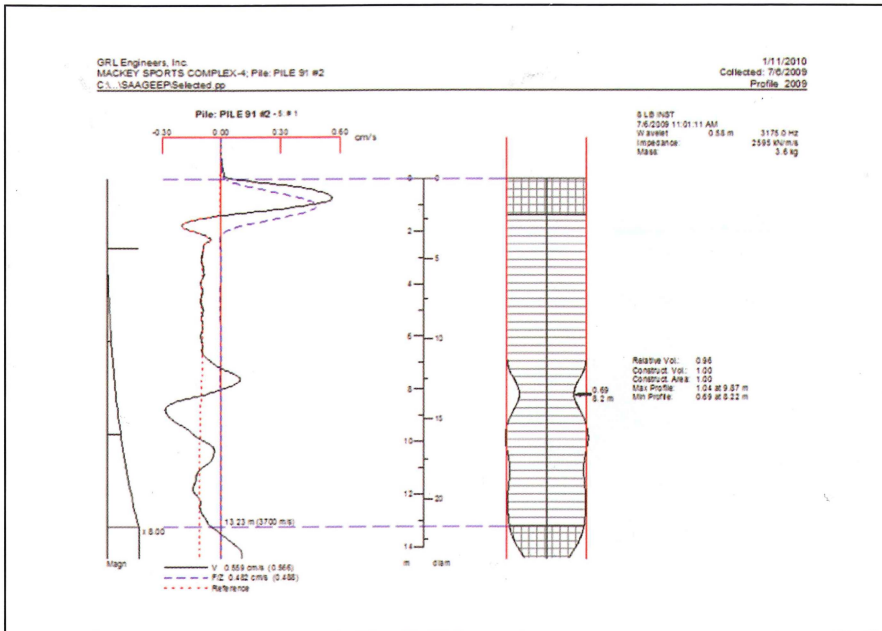


Figura 5 - Perfil de uma estaca de 610 mm de diâmetro, calculada a partir de dados coletados com o instrumento PIT

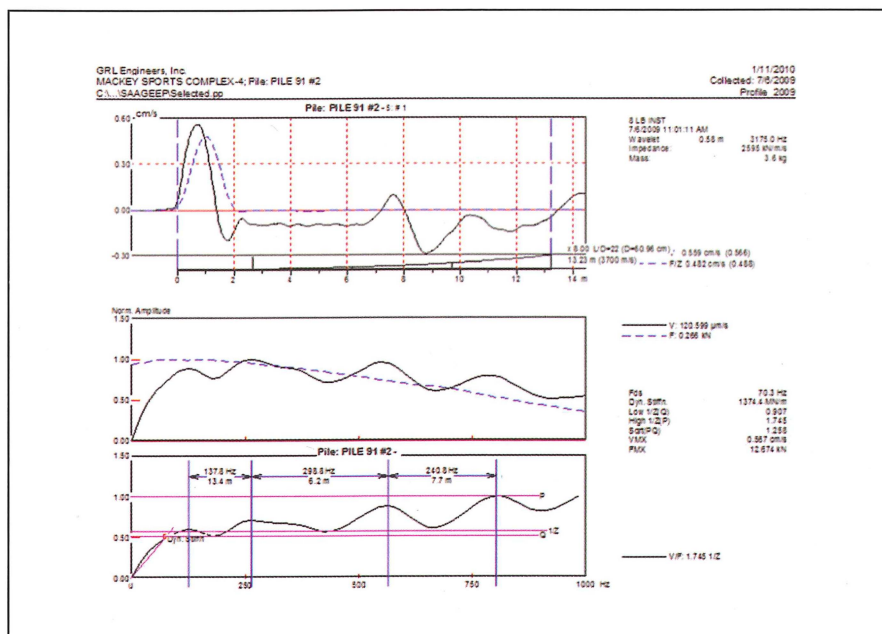


Figura 6 - Análise no domínio da frequência do exemplo da Figura 5

medidos via rádio ao invés de cabos conectados ao equipamento (Figura 4).

A análise dos dados obtidos no ensaio é normalmente feita no domínio do tempo. A análise dos dados no domínio da frequência é mais complexa, mas pode ajudar na interpretação dos dados. O uso de um martelo instrumentado, além de permitir a análise no domínio da frequência usando o método da resposta transiente, também é útil na análise da parte superior da estaca.

A Figura 5 ilustra um perfil calculado a partir dos dados obtidos durante um ensaio PIT numa estaca de 1,8 m de diâmetro. Neste exemplo, os dados indicam uma redução do diâmetro efetivo, e/ou da resistência e/ou da densidade do concreto entre 7 m e 9 m de profundidade. Análises posteriores, usando o método da resposta transiente, incluem o cálculo da mobilidade característica e da rigidez dinâmica da estaca, a partir da curva de "mobilidade" (velocidade dividida pela força). O período entre os

picos da curva de mobilidade pode ajudar a avaliar a profundidade do defeito, no entanto, geralmente é mais simples determinar-se esta profundidade no domínio do tempo.

A simulação do ensaio de integridade sônico com o software PIT-S é não só instrutiva como também útil para o preparo e para a interpretação dos ensaios PIT. O programa permite simular vários pontos de impacto do martelo e vários pontos de medição, assim como o perfil da estaca e da resistência do terreno.

O uso de dois acelerômetros permite a identificação das reflexões causadas pelas ondas ascendentes, em oposição às causadas pelas ondas descendentes. Isso é útil em ensaios de estacas sob estruturas já existentes.

ENSAIO CSL (CROSS HOLE SONIC LOGGING)

Assim como os ensaios PDA e PIT descritos acima, os ensaios CSL (do inglês *Cross-Hole Sonic Logging*) também se baseiam no conceito de propagação da onda. Rausche 2005 descreve o ensaio, normalizado pela ASTM 6760-08, que consiste em medir-se o tempo de trajeto de pulsos ultrassônicos entre tubos instalados na estaca. O ensaio CSL é conduzido alguns dias após a cura do concreto ter se completado, e fornece um quadro bastante detalhado da qualidade do mesmo. A sensibilidade das sondas utilizadas neste teste foi recentemente bastante aprimorada, tornando possível detectar pulsos emitidos a até 3 m de distância, facilitando os ensaios em tubulões de grande diâmetro. A execução do ensaio foi também modernizada nos últimos tempos, com a introdução de sondas motorizadas, ilustradas juntamente com o equipamento CHAMP na Figura 7. Este equipamento executa não só os ensaios CSL, mas também os ensaios SSL, do inglês *single hole sonic logging*, utilizado em estacas de pequeno diâmetro com apenas um tubo instalado.

Se o equipamento CHAMP detecta um defeito na estaca, é recomendável tentar avaliar a gravidade do mesmo. Isto pode ser feito através de uma análise



Figura 7 - Equipamento CHAMP para realização dos ensaios CSL, e sondas motorizadas

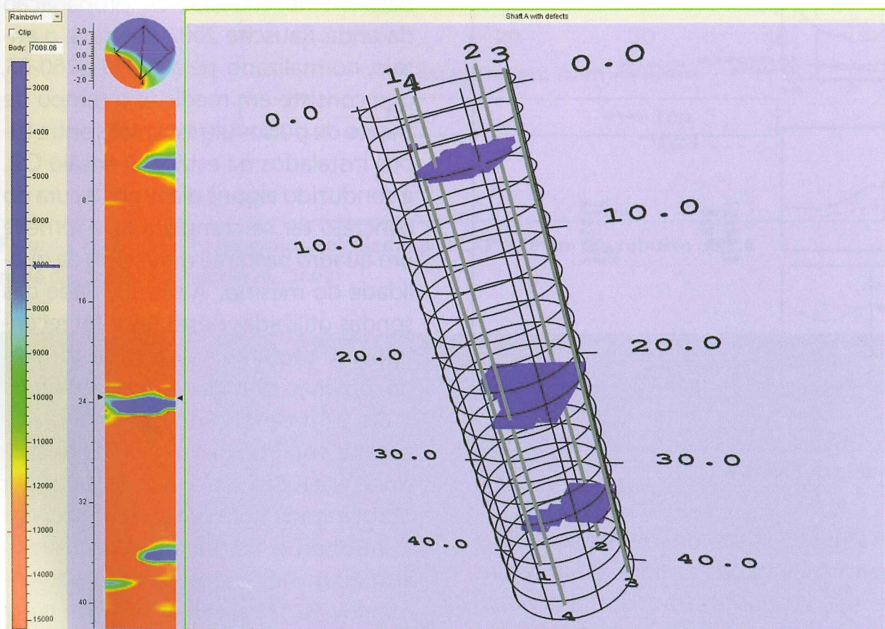


Figura 8 - Tomografia de uma estaca construída propositalmente com defeitos

tomográfica. A análise utiliza as velocidades de onda medidas para estimar a distribuição de velocidades de onda ao longo de todo o fuste, e plota o resultado em três dimensões. A Figura 8 mostra o resultado da análise tomográfica realizada numa estaca moldada *in loco*,

construída com defeitos para uso em demonstrações do ensaio, com 1,5 m de diâmetro, 12 m de profundidade, e oito tubos de inspeção. As regiões em que o concreto apresentou velocidades de onda menores do que 2100 m/s aparecem em azul-escuro.

CONCLUSÃO

Os métodos atualmente disponíveis para o controle de qualidade de fundações se baseiam em vários tipos de análises baseadas na teoria de propagação da onda. Estes métodos determinam a velocidade de onda no material da estaca, velocidade esta que é função da qualidade e resistência do material. Dentre os métodos baseados na propagação da onda, os mais poderosos envolvem não só medições de deslocamento, mas também de força, e avaliam a capacidade de carga da estaca, tensões de cravação e a rigidez do solo.

Entre os desenvolvimentos mais recentes na aplicação destes métodos ressaltam-se aprimoramentos nos aspectos eletrônicos da aquisição de dados obtidos nos ensaios, cálculos executados por programas mais rápidos e sofisticados, e a introdução de instrumentação sem fio, via rádio transmissão. Além disso, a realização de ensaios PDA via internet reduz o custo dos mesmos de forma significativa.

REFERÊNCIAS

- Likins, G. E., Piscalko, G., Roppel, S., Rausche, F., September, 2008. PDA Testing: 2008 State of the Art. Proceedings of the Eighth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles 2008: Lisbon, Portugal; 395-402.
- Likins, G., Piscalko, G., and Rausche, F., 2008a. PDATesting, 2008 State of the Art, Proc. of the 8th Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Lisbon, Portugal.
- Rausche, F., 2004. Non-Destructive Evaluation of Deep Foundations. Proceedings of the Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering: New York, NY. (CD-ROM)
- Rausche, F., Robinson, B., April, 2010. Advances in the Evaluation of Pile and Shaft Quality. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP): Keystone, CO; 325-334.
- Rausche, F., Likins, G. E., Hussein, M.H., May, 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., Likins, G., and Hussein, M., 2008. Analysis of Post-Installation Dynamic Load Test Data for Capacity Evaluation of Deep Foundations; ASCE, GSP 180: From Research to Practice in Geotechnical Engineering, J.E. Laier, D.K. Crapps and M. Hussein, editors; 312-330.