

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE FUNDAÇÕES MOLDADAS IN LOCO PELO MÉTODO DE PERFILAGEM TÉRMICA

Gray Mullins, Ph.D., P.E., Professor e Consultor
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, University of South Florida
Foundation & Geotechnical Engineering LLC
gmullins@usf.edu

Garland Likins, PE, Presidente
Pile Dynamics, Inc.
glikins@pile.com

Gina Beim, PE, Engenheira Consultora Sênior
Pile Dynamics, Inc.
gina@pile.com

Jorge Beim, Engenheiro Sênior
Pile Dynamics, Inc.
jbeim@pile.com

RESUMO

As fundações moldadas in loco, tais como estacas escavadas e tubulões, constituem um desafio para todos os profissionais envolvidos na obra. Os processos de concretagem destes elementos de fundação tornam difícil a certificação de que a estaca tenha sido instalada com as dimensões de projeto, bem como de que o concreto esteja perfeitamente intacto. Um novo ensaio de integridade foi desenvolvido com vistas a prover maiores informações acerca das condições destas estacas. O ensaio se baseia em medidas da temperatura de cura do concreto, realizadas ao longo do interior estaca através de sensores térmicos. Este trabalho oferece uma visão geral do Método de Perfilagem Térmica para avaliação de integridade, detalha o procedimento do ensaio e discute a análise das medidas de temperatura obtidas. Um caso de obra é apresentado.

ABSTRACT

Cast in place foundations, such as drilled shafts, present a challenge to all construction professionals involved. The characteristics of the concreting process of these foundation elements make it difficult to ascertain that the shaft is installed with the dimensions of design, and that the concrete is perfectly intact. A new integrity test was developed to provide more information about the conditions of these foundation elements. This test is based on temperatures measured during the concrete curing process by thermal sensors placed inside the shaft. This paper offers an overview of the Thermal Profiling Method of integrity testing, details the test procedures and discusses the analysis of the measured temperatures. A case study is presented.

INTRODUÇÃO

As estacas moldadas in loco se prestam a suportar capacidades de carga axiais e laterais de grandes proporções, e conseqüentemente são frequentemente especificadas em estruturas tais como pontes sobre cursos de água navegáveis, onde existe a possibilidade de cargas extremas resultantes de uma eventual colisão com uma embarcação. Apesar dos cuidados normalmente tomados na execução deste tipo de fundação, tanto na escavação como concretagem, há sempre a possibilidade do monitoramento não detectar a ocorrência de certos defeitos acidentais.

Existem vários métodos de avaliação “a posteriori” da integridade do concreto de estacas moldadas in loco e, apesar de constituírem o “estado da arte”, nenhum destes é, por si só, capaz de fornecer um quadro completo da situação do elemento de fundação (Hertlein, 2011). Enquanto alguns dos métodos se prestam à avaliação da porção central do fuste, outros são particularmente adequados à detecção de problemas próximos aos tubos de acesso utilizados no ensaio. A situação ideal seria a realização conjunta de múltiplos

ensaios numa só estaca; isto provavelmente identificaria a maior parte dos eventuais problemas, mas certamente não é um procedimento viável na prática.

As considerações acima expostas motivaram a exploração de novas tecnologias que pudessem fornecer um quadro mais completo da integridade de estacas moldadas in loco. Uma destas tecnologias tira proveito do calor emitido durante o processo de cura do concreto, utilizando medições de temperatura no interior do fuste da estaca para avaliar a existência de anormalidades. Referimo-nos a este tipo de ensaio de integridade como Perfilagem Térmica de Integridade, ou TIP, do inglês Thermal Integrity Profiling.

Até o desenvolvimento deste novo conceito, o calor de hidratação do concreto era visto somente como um efeito colateral indesejável, reconhecido por suas consequências potencialmente prejudiciais. Um dos mais famosos casos de obra é o da barragem Hoover Dam, construída nos Estados Unidos da América entre os anos de 1932 e 1935. Quatro milhões de metros cúbicos de concreto foram utilizados na estrutura. Na época, sabia-se que seria necessário construir a barragem em várias etapas, e que sistemas internos de refrigeração seriam necessários para controlar as elevadas temperaturas de cura. A preocupação principal centrava-se nas fissuras que poderiam resultar dos diferenciais de temperatura e dos esforços de tração resultantes. Estimava-se que, sem as precauções de controle de temperatura, a dissipação do calor poderia levar mais de 100 anos, e seriamente comprometer a integridade estrutural e impermeabilidade da barragem (US Dept of Interior, 2004).

As estacas moldadas in loco são rotineiramente instaladas desconsiderando-se os efeitos adversos do calor gerado durante a cura do concreto, porém existem duas maneiras em que estes efeitos podem se apresentar: (1) a curto prazo, tensões induzidas pelo diferencial de temperatura podem fissurar o concreto e (2) a longo prazo, a degradação causada pela formação posterior de estringita (Whitfield, 2006).

A compreensão dos parâmetros que afetam a elevação da temperatura durante a cura do concreto apresenta um duplo benefício para a indústria da construção: (1) a habilidade de prever o comportamento das massas de concreto em quaisquer tipos de estrutura e (2) a utilização do calor gerado, e da sua difusão através do ambiente para prever a distribuição normal das temperaturas no interior das estacas moldadas in loco. O presente trabalho, que traduz, atualiza e sintetiza o originalmente publicado em inglês no DFI Journal (Mullins, 2010), concentra-se no segundo dos benefícios listados, embora os cálculos e métodos de medições de campo apliquem-se a ambos.

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

O conceito de perfilagem térmica engloba vários princípios físicos, químicos e moleculares relativos à geração de calor no concreto, a sua difusão no solo e ao perfil de temperatura característico de uma estaca ideal (Mullins et al., 2004, 2005, 2007 e 2009; Kranc e Mullins, 2007). Durante as fases iniciais do processo de cura do concreto a geração de calor tende a determinar a temperatura resultante, enquanto que nas etapas subsequentes o processo de dissipação de calor torna-se mais importante.

A quantidade de calor produzida, bem como a taxa de produção do calor, são diretamente relacionadas à composição do concreto e à constituição química do cimento e seus aditivos (escória e cinzas volantes). Mullins (2010) discute como cada um destes materiais produz calor durante a sua hidratação, e como as suas percentagens, que normalmente podem ser obtidas do fornecedor de concreto, influenciam a produção de calor resultante. Os estudos de Schindler e Folliard (2005) explicam os efeitos da composição química do concreto na produção de energia, bem como a taxa de produção de energia. No caso dos concretos tipicamente utilizados em estacas moldadas in loco nos Estados Unidos, com uma percentagem de escória em torno de 15%, toda a energia térmica é gerada em 18 a 24 horas. Concretos com alta percentagem de escória podem levar mais de 50 horas para completar o processo, enquanto que concretos sem aditivos completam o processo de emissão de calor em 15 horas.

O processo de difusão do calor no meio ambiente é de importância tão significativa quanto o processo de produção de calor. O fluxo de calor nos solos envolve mecanismos concomitantes de condutividade, convecção e irradiação, sendo a condutividade o processo predominante. A condutividade térmica nos solos é um fenômeno semelhante à condutividade elétrica, e é função da densidade do solo. Já a capacidade térmica do solo – seu calor específico – é função das percentagens de partículas de solo, água e ar. Quanto mais denso o material melhor ele conduz calor, porém maior a energia necessária para aquecê-lo.

A determinação da temperatura normal no interior de uma estaca moldada in loco pode ser feita com base nas considerações teóricas acima, nos perfis de sondagem, tipo de solo, conteúdo mineralógico, densidade e sondagens (Pauly, 2010). A compreensão dos mecanismos de produção e dissipação de calor pode ser usada para estimar a evolução da temperatura teórica do elemento de fundação em função do tempo.

Esta informação é útil para determinar o período ideal para a obtenção de medições de temperatura com vistas a realização de um ensaio pelo método de perfilagem térmica.

MÉTODOS ATUAIS DE ENSAIOS DE INTEGRIDADE

Entre os métodos de ensaios de integridade de estacas de concreto moldadas in loco, podem-se citar o Ensaio de Integridade de Baixa Deformação (também conhecidos como ensaios PIT), os Ensaios “Cross-Hole” (CSL) e o ensaio gama-gama (GGL). Cada um destes métodos possui pontos fortes, assim como limitações. Os ensaios PIT podem examinar a seção transversal completa, porém a esbeltez do fuste pode dificultar a sua interpretação, e no caso de defeitos múltiplos, este ensaio frequentemente detecta somente aquele situado mais próximo do topo da estaca. Os ensaios CSL e GGL não são limitados pela esbeltez do fuste e podem detectar múltiplos defeitos, mas ambos apresentam limitações quanto à parte da área da seção transversal que podem examinar. Nos Estados Unidos da América, a maior parte dos Departamentos de Estradas de Rodagem segue as recomendações do “Federal Highway Administration” (FHWA) para instalação de tubos de acesso na armadura dos tubulões de concreto (O’Neill and Reese, 1999). Estas recomendações, que incluem o número de tubos, seu material e diâmetro, foram concebidas para permitir o ensaio CSL mas aplicam-se também ao ensaio GGL.

O Ensaio Cross Hole baseia-se no tempo de trajeto de pulsos sônicos entre um tubo de acesso e outro (i.e. na velocidade da onda no concreto) e limita-se a avaliar a qualidade do concreto na região entre os tubos, ou seja, na região interior à armadura. O Ensaio Gama-Gama, por sua vez, utiliza medições de raios gama em contagem por segundo para avaliar a densidade do concreto na região circunvizinha ao tubo de acesso, restringindo-se a um raio de 76 a 114 mm do centro do mesmo (Caltrans, 2005 e 2010). Ambos os ensaios deixam de examinar uma percentagem considerável da seção transversal do elemento de fundação. A Figura 1 mostra a relação entre o diâmetro da estaca e a percentagem ensaiada, com base num recobrimento da armadura de 150 mm de concreto (FDOT, 2010). As duas imagens mostram a porção de uma estaca de 0,9m de diâmetro que é efetivamente ensaiada. Note que, quanto maior o recobrimento, menor a percentagem da seção transversal que pode ser avaliada pelo ensaio CSL.

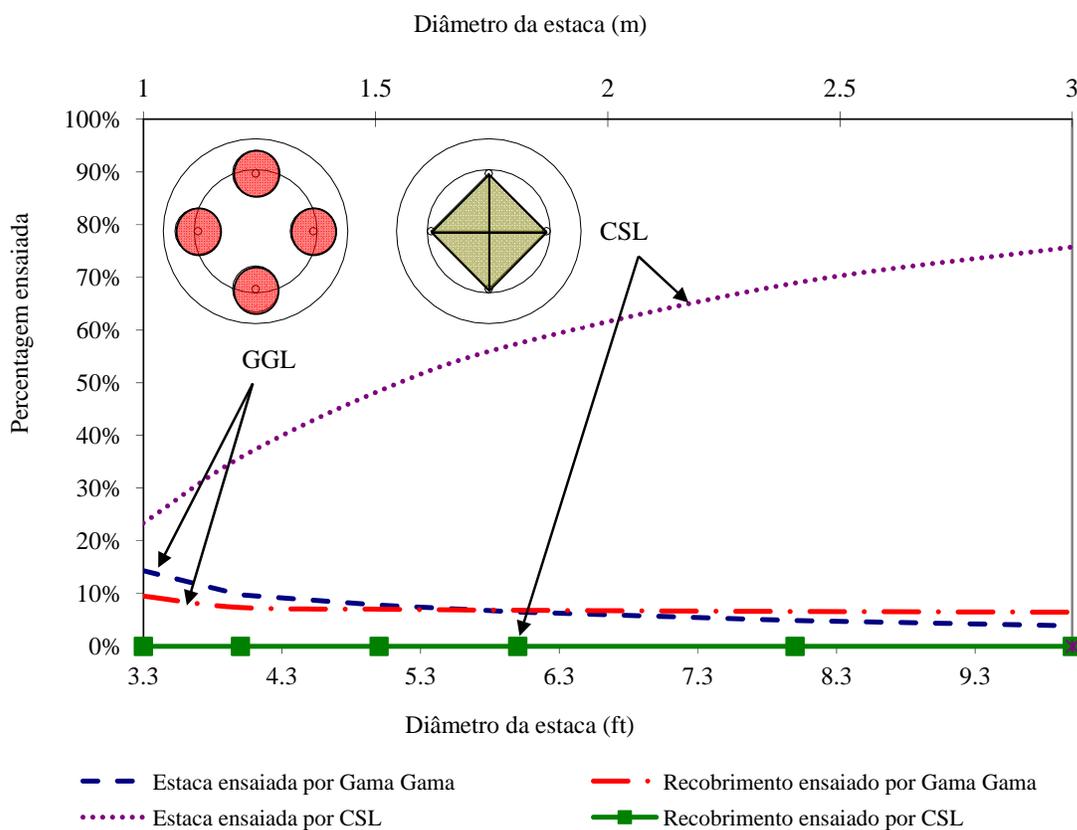


Figura 1 - Percentual da área da seção transversal de uma estaca escavada efetivamente avaliada pelos métodos GGL e CSL, assumindo um recobrimento da armadura de 150 mm

O concreto da porção da estaca mais próxima à superfície é importante tanto do ponto de vista geotécnico como estrutural. A contribuição do concreto da parte central à resistência aos esforços de momentos fletores é insignificante, quando comparada à contribuição do concreto da parte externa. O concreto que forma o vínculo entre a armadura e o solo é de extrema importância e, no entanto, é avaliada somente em parte por GGL e geralmente não acessada pelo método CSL (a exceção consiste na realização concomitante de ensaios “single hole”, em que transmissor e receptor são inseridos em cada um dos tubos de acesso – porém este não é um procedimento de rotina).

PERFILAGEM TÉRMICA DE INTEGRIDADE

A perfilagem térmica de integridade utiliza temperaturas medidas durante o processo de cura de concreto para avaliar a qualidade de fundações moldadas in loco, como por exemplo estacas escavadas, tubulões e até mesmo estacas hélice contínua. As medições podem ser realizadas inserindo-se uma sonda (Figura 2a) contendo quatro sensores térmicos (termopares infravermelhos direcionados horizontalmente e orientados a 0, 90, 180 e 270 graus) em tubos de acesso (como os instalados para os ensaios CSL, porém secos). Este processo permite medir as temperaturas na parede do tubo de acesso em 4 direções, e ao longo de todo o comprimento do fuste. Um outro processo de medida substitui os tubos de acesso pela instalação, na própria armadura, de uma fiação térmica contendo uma série de sensores térmicos descartáveis (Figura 2b).



Figura 2a – Sonda contendo quatro termopares infravermelhos



Figura 2b – Fiação térmica

De modo geral, a ausência de concreto intacto (por exemplo, bolhas, estrangulamento do fuste) é indicada por regiões relativamente frias; a ocorrência de concreto em excesso (protuberâncias) aparece como temperaturas relativamente altas. As anomalias do concreto, tanto no interior como no exterior da armadura, perturbam o perfil normal de temperatura não só no ponto de medição mais próximo ao defeito, mas em todo o fuste, embora o efeito torne-se progressivamente menor ao medir-se a temperatura em pontos mais afastados. A Figura 3 ilustra a execução do ensaio, com a posição da sonda sendo registrada por um decodificador de profundidade.



Figura 3 – Execução de um ensaio de perfilagem térmica de integridade

A distribuição da temperatura interna ao longo da seção transversal de um fuste de formato cilíndrico é aproximadamente normal (curva de sino, Fig. 4). A magnitude do pico de temperatura depende da composição do concreto, diâmetro da estaca, propriedades térmicas do solo e tempo de hidratação. Contudo, a cada instante de tempo durante o período de hidratação corresponde um perfil térmico distinto para as condições vigentes. Embora a magnitude da temperatura varie com o tempo, o formato da curva é constante.

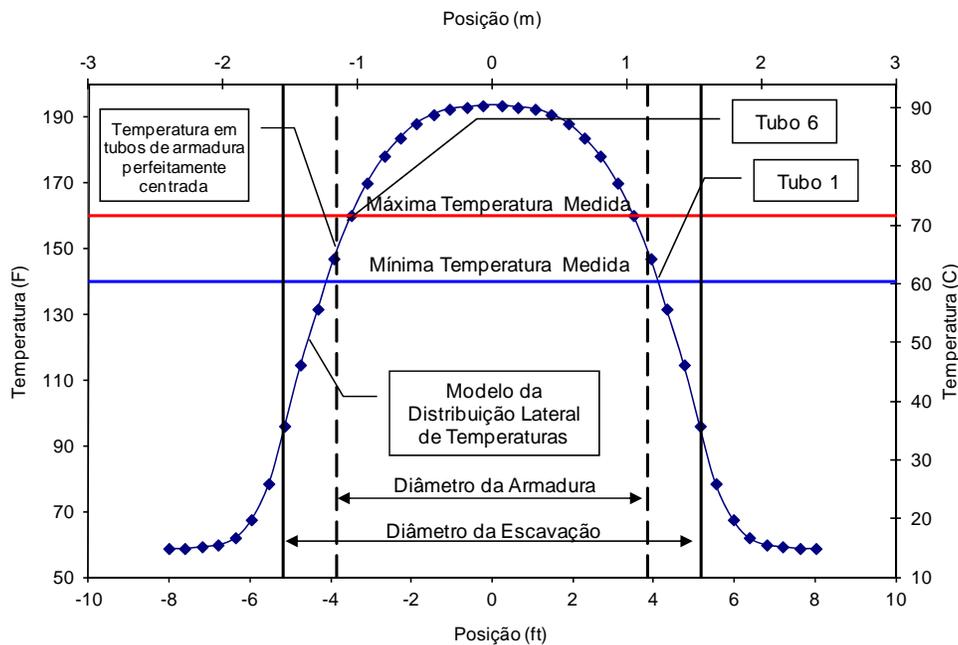


Figura 4 – Distribuição teórica de temperatura comparada com medições de campo ao longo de uma seção transversal de uma estaca de 3,3 m de diâmetro.

ALINHAMENTO DA ARMADURA

A variação da temperatura medida em cada um dos tubos de acesso (ou em cada ponto da armadura, quando a fiação térmica é utilizada) ao longo tempo é afetada tanto pela excentricidade da armadura como pelo recobrimento de concreto (diâmetro efetivo). Com base na distribuição teórica ilustrada na Figura 4, para uma armadura perfeitamente centralizada a temperatura em todos os pontos de medida (pontos estes sempre localizados na armadura) deveria ser idêntica. Uma armadura ligeiramente excêntrica, mais próxima a uma das paredes da escavação, exibirá temperaturas mais baixas nos tubos (ou fiações térmicas) próximos à interface com o solo, e temperaturas mais altas nos tubos ou fiações mais próximas ao centro da estaca. Há várias razões pelas quais as armaduras se desviam do alinhamento central, incluindo escavação excessiva,

falta ou quebra de espaçadores e o desalinhamento da gaiola de armadura. Por este motivo uma estaca moldada in loco, mesmo que perfeitamente cilíndrica, pode exibir temperaturas diferenciadas nos pontos de medição de uma mesma seção transversal. A comparação entre a temperatura mais alta e a mais baixa – diametricamente oposta – com a temperatura média a uma dada profundidade, torna possível diferenciar a falta de alinhamento da gaiola de uma variação de seção transversal. Além disto, é possível determinar-se a magnitude da falta de alinhamento, bem como o recobrimento de concreto, utilizando-se a parte linear da curva de temperatura (Fig. 4) teórica e as temperaturas medidas em campo.

Caso de obra: Valley Nalley, Tacoma, Washington

A perfilagem térmica foi executada em vários dos elementos de fundação do projeto Vale Nalley da rodovia I-5 / SR16 em Tacoma, Washington. Os dados da Figura 5 foram obtidos numa estaca escavada de 3,3 m de diâmetro, contendo 10 tubos de acesso. É possível visualizar-se as características geométricas da estaca através de uma simples observação dos dados. A porção superior do gráfico (acima de 4,5 m) corresponde à parte dos tubos acima da estaca, e é irrelevante. A 9,8 m, observa-se uma elevação de temperatura em todos os tubos de acesso. Esta profundidade corresponde ao nível do lençol freático, deduzindo-se então a ocorrência de um certo desprendimento de solo anteriormente à introdução da lama bentonítica que resultou num alargamento do fuste. O topo e a ponta da estaca apresentam efeitos normais de dissipação de temperatura, tanto radialmente como longitudinalmente. Entre estes dois pontos extremos a dissipação de temperatura é somente radial. É possível ter-se uma idéia do alinhamento da gaiola da armadura ao longo do fuste através da comparação entre as temperaturas medidas em tubos de acesso diametricamente opostos, e entre estas temperaturas e a média (66 graus centígrados). A quantificação da excentricidade da armadura pode ser estimada, como demonstrado na Figura 4.

É possível também representar-se graficamente as temperaturas medidas em cada um dos tubos de acesso desta mesma estaca a uma determinada profundidade. Isto é demonstrado na Figura 6, utilizando-se uma escala radial, com os pontos mais quentes do que a média de 66°C plotados mais próximos ao centro e os pontos mais frios plotados mais próximos à parte exterior, mantendo-se a posição angular de cada tubo inalterada. Esta representação facilita a visualização da excentricidade da gaiola da armadura: observa-se que, a esta profundidade, a armadura apresenta um desvio em direção aos quadrantes superiores.

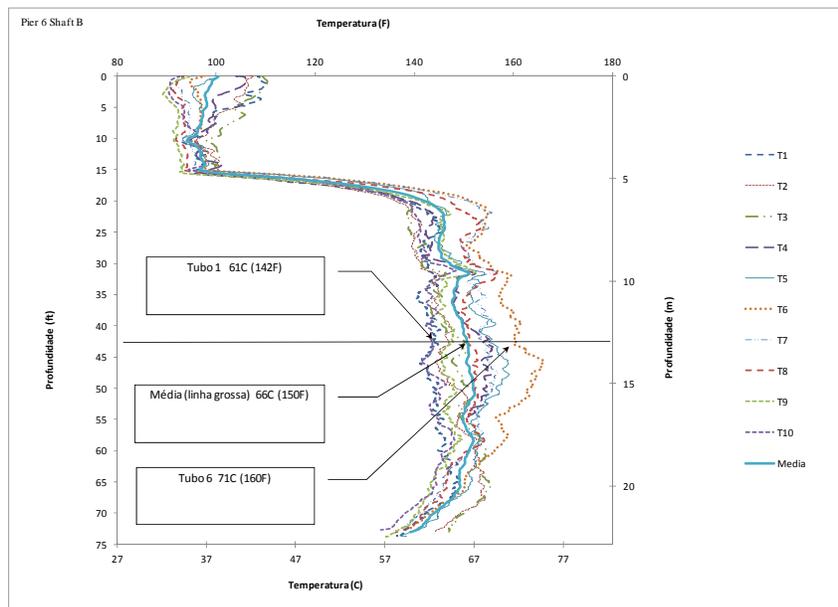


Figura 5 - Dados de uma estaca de 3,3 m de diâmetro, evidenciando o efeito do alinhamento da armadura na temperatura medida

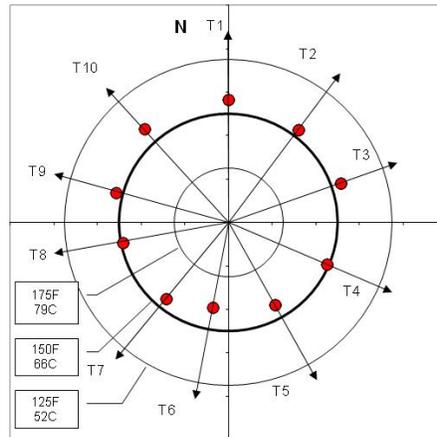


Figura 6- Temperaturas plotadas numa escala radial a partir do centro, a uma profundidade de 12,2 m.

FORMATO DO FUSTE

Os relatórios de controle da concretagem são um mecanismo chave para a identificação de condições atípicas. A comparação da variação do nível do concreto no poço de escavação com o volume de concreto descarregado por cada caminhão betoneira fornece um nível básico de inspeção. O cálculo do diâmetro efetivo é comparado com o diâmetro de projeto, resultando numa estimativa básica do perfil do fuste. Nos Estados Unidos, esta informação é frequentemente utilizada na decisão de realizarem-se ensaios de integridade. Para estacas pequenas nas quais apenas um ou dois caminhões betoneiras são utilizados, no entanto, não é possível obter-se uma boa visualização do formato do fuste.

Como a distribuição de temperatura na região próxima à armadura é praticamente linear, a temperatura média medida pelo método de perfilagem térmica em um dado tubo de acesso ou elemento de fiação térmica plotada ao longo da profundidade, pode ser usada para representar o formato do fuste. Esta visualização do formato do fuste pode desta forma ser obtida independente do número de caminhões betoneiras.

A Figura 7, obtida numa estaca de 2,1 m de diâmetro com 7 tubos de acesso, compara a temperatura média medida pelo método de perfilagem térmica com o diâmetro estimado através dos relatórios de concretagem (diâmetro efetivo na figura). Desta forma fica estabelecida a relação entre temperatura medida e diâmetro estimado para esta estaca em particular. O próximo passo consiste em plotar o perfil de temperatura de cada um dos tubos de uma forma radial, equivalente à Figura 6 porém ao longo de todo o fuste, obtendo-se desta forma um modelo tridimensional como o da Figura 8.

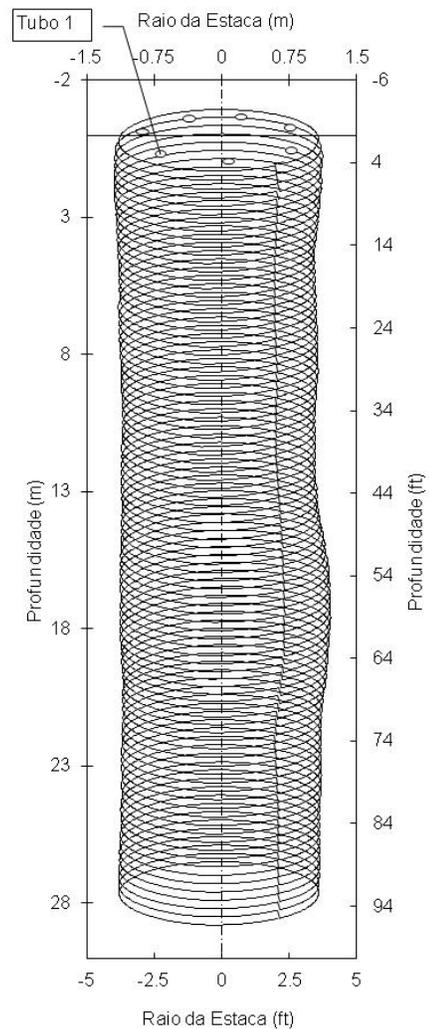
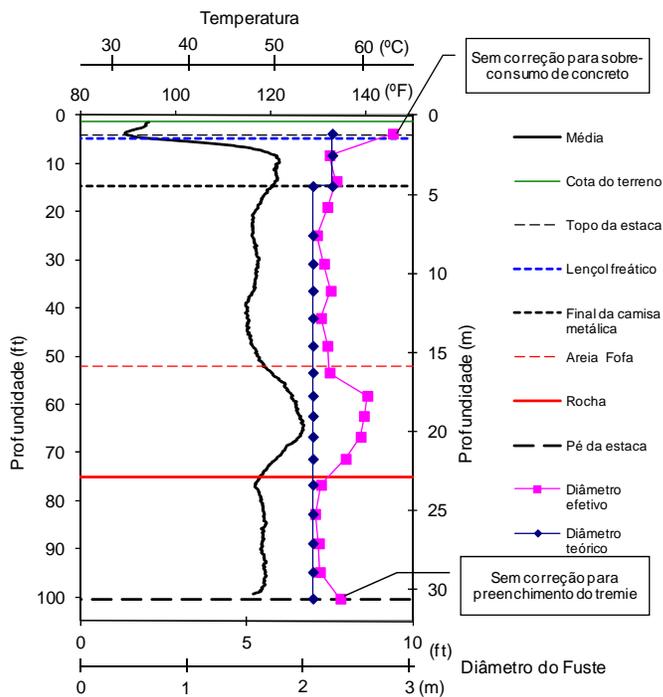


Figura7 (esquerda) – Temperatura média e diâmetro calculado a partir de relatórios de concretagem e Figura 8 (direita) - Representação tridimensional a partir de temperaturas medidas em 7 tubos de acesso

CONCLUSÕES

Ao longo dos últimos 30 anos o controle de qualidade das estacas moldadas in loco vem evoluindo da simples monitoração dos volumes de concreto ao controle das propriedades da lama bentonítica utilizada e aos ensaios não destrutivos após a construção. A execução de ensaios por vários métodos, quando viável, pode fornecer maiores informações e uma melhor avaliação da qualidade da fundação. Nenhum método por si só, no entanto, é suficiente. O método de perfilagem térmica fornece uma perspectiva geral da situação do fuste com base na presença ou ausência de concreto. O formato, posicionamento da gaiola da armadura, e recobrimento são avaliados por este método. Tanto a presença de concreto em excesso como a sua ausência afetam a temperatura. Durante a fase de pesquisa do método de perfilagem térmica a maior parte das estacas testadas apresentou características de concretagem em excesso, e não de estrangulamentos ou vazios. O método, no entanto, detecta a falta de concreto tão bem como o seu excesso.

Alguns aspectos da análise dos dados obtidos através do Método de Perfilagem Térmica foram mencionados apenas superficialmente neste trabalho. Estas análises se iniciam com uma revisão qualitativa das temperaturas medidas, o que identifica as cotas do fundo e do topo do poço de escavação, o alinhamento da armadura e variações significativas de seção transversal. A um nível mais profundo de análise, os relatórios de construção e concretagem tornam possível estabelecer uma relação entre temperaturas medidas

e diâmetros, estimando-se desta forma o formato do fuste e a posição da armadura. A interpretação da maior parte dos resultados obtidos com a perfilagem térmica não requer o desenvolvimento de um modelo matemático, e sim a compreensão das características e dos perfis normais de temperatura. No entanto, caso se deseje efetuar uma análise mais sofisticada dos dados de perfilagem térmica, podem-se comparar as medidas de campo com as temperaturas estimadas por meio de uma modelagem matemática do processo de produção da energia de hidratação em elementos de concreto. A comparação do modelo matemático com as medidas de campo pode ser usada para determinar com maior precisão a extensão e magnitude das regiões anômalas. Estas comparações também verificam se o processo de hidratação está se desenvolvendo apropriadamente.

Assim como outros métodos de ensaios de integridade, os resultados da perfilagem térmica fornecem valores medidos. O ensaio CSL provê os valores medidos para o tempo de chegada, o ensaio GGL mede a contagem de raios gama e a perfilagem térmica mede valores de temperatura. Os parâmetros físicos apropriados para cada um dos ensaios podem ser estimados a partir destes valores medidos: densidade do concreto no caso de GGL, velocidade da onda no concreto no caso de CSL, presença de materiais cimentícios em fase de cura, a partir da qual o volume de concreto intacto é estimado, no caso da perfilagem térmica. Em quaisquer destes ensaios, é possível realizar-se uma previsão teórica, a priori, da densidade, da velocidade de onda ou da temperatura. É necessário ter em mente, no entanto, que a interpretação dos ensaios em geral é feita não com base nesta previsão teórica, mas sim com base em eventuais variações localizadas em relação aos valores médios medidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Departamentos de Estradas de Rodagem dos Estados da Florida e Washington, pelo apoio ao desenvolvimento desta tecnologia e uso do método de perfilagem térmica de integridade, e aos fundadores da empresa FGE.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Caltrans, 2005. Method of ascertaining the homogeneity of concrete in cast-in-drilled hole (CIDH) piles using the gamma-gamma test method. California Department of Transportation Specifications, California Test 233

Caltrans, 2010. Gamma-gamma logging (GGL). www.dot.ca.gov/hq/esc/geotech/ft/gamma.htm

Debye, P., 1914. Vorträge über die kinetische theorie der materie und der elektrizität (trans. Discussion of Kinetic Theory of Matter and Electricity), gehalten in Göttingen auf einladung der Kommission der Wolfskehlstiftung, B.G. Teuber Publisher, Liepzig and Berlin

FDOT, 2010. Standard specifications for road and bridge construction. Florida Department of Transportation, <ftp://ftp.dot.state.fl.us/LTS/CO/Specifications>

Hertlein, B., 2001. Are our client's expectations realistic? Geo-Strata, Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, January, p.11

Kranc, S.C. and Mullins, G., 2007. Inverse method for the detection of voids in drilled shaft concrete piles from longitudinal temperature scans. Inverse Problems Design and Optimization Symposium, Miami, FL, April 16-18, 2007

Mullins, A. G. and Kranc, S. C., 2004. Method for testing the integrity of concrete shafts. US Patent 6,783,273

Mullins, G. and Ashmawy, A., 2005. Factors affecting anomaly formation in drilled shafts. Final Report, FDOT Project BC353-19, March

Mullins, G. and Kranc, S., 2007. Thermal integrity testing of drilled shafts. Final Report, FDOT Project BD544-20, May

Mullins, G., Winters, D., and Johnson, K., 2009. Attenuating mass concrete effects in drilled shafts. Final Report, FDOT Project BD544-39, September, 148 pp

Mullins, G., 2010. Thermal Integrity Profiling of Drilled Shafts. DFI Journal, Vol. 4 No. 2, December

O'Neill, M.W. and Reese, L. C., 1999. Drilled shafts: construction procedures and design methods. U.S. Department of Transportation, Publication No. FHWA-IFP-99-025, ADSC-TL 4, Volume II

Pauly, N., 2010. Thermal conductivity of soils from the analysis of boring logs. Master's Thesis, University of South Florida Department of Civil and Environmental Engineering, December

Schindler, A. and Folliard, K., 2005. Heat of hydrations models for cementitious materials. ACI Materials Journal, Vol. 102, No.1, pp. 24-33

U.S. Department of the Interior, 2004. Story of Hoover Dam; concrete. Bureau of Reclamation, <http://www.usbr.gov/lc/hoverdam/History/essays/concrete.html>

Whitfield, T., 2006. "Effect of C3S content on expansion due to ettringite formation. Master's Thesis, University of South Florida Department of Civil and Environmental Engineering, June