

# Método de Perfilagem Térmica para Avaliação da Integridade de Fundações Moldadas In Loco

Gray Mullins, Ph.D., P.E.

University of South Florida, Tampa, Florida, EUA, gmullins@usf.edu

Garland Likins, PE, President

Pile Dynamics, Inc., Cleveland, Ohio, EUA, glikins@pile.com

Gina Beim, PE, Engenheira Consultora Sênior

Pile Dynamics, Inc., Cleveland, Ohio, EUA, gina@pile.com

**RESUMO:** Os métodos de construção das estacas moldadas in loco, tais como tubulões ou estacas escavadas e perfuradas, tornam desafiador o perfeito monitoramento de sua execução. As dificuldades de monitoramento e de inspeção da integridade dessas estacas após a construção aumentam as chances de defeitos acidentais. Existem vários métodos de avaliação da integridade do concreto desses elementos de fundação, mas nenhum deles pode examinar a totalidade da seção transversal ou do fuste. Alguns métodos se prestam à avaliação da porção central do fuste, enquanto outros são particularmente adequados à detecção de problemas próximos aos tubos de acesso utilizados no ensaio. Um novo ensaio de integridade, concebido por pesquisadores da Universidade de South Florida e denominado como “Perfilagem Térmica”, fornece muitas informações acerca das condições dessas estacas. O ensaio se baseia em medições de temperatura realizadas durante a cura do concreto. Dada a configuração da estaca, existe uma distribuição de temperaturas indicativa de um fuste em boas condições. As regiões relativamente frias (em relação à temperatura esperada) indicam estrangulamentos do fuste, cobrimento insuficiente, vazios e outros problemas semelhantes; já as regiões relativamente quentes indicam protuberâncias. Duas modalidades de ensaios, ambas utilizando sensores térmicos, são descritas. Na primeira, os sensores são parte de uma sonda térmica que é inserida na estaca, em tubos pré-instalados. Na segunda, os sensores são partes de uma fiação térmica acoplada à armadura. A Perfilagem Térmica avalia o formato do fuste, o alinhamento da armadura e o cobrimento de concreto ao longo de todo o comprimento, varrendo toda a seção transversal. Casos de obras nos Estados de Washington e da Florida, ambos executados pelo método de sonda térmica, ilustram o sucesso do ensaio. As limitações do ensaio são expostas, e este trabalho é concluído com uma breve discussão sobre a modelagem matemática que torna seus resultados ainda mais conclusivos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaio de integridade; Estacas moldadas in loco; Perfilagem Térmica.

## 1 INTRODUÇÃO

As estacas moldadas in loco tendem a ser especificadas quando as capacidades axiais e laterais de carga são significativas, concedendo extrema importância a cada um dos elementos de fundação. Ao mesmo tempo, os métodos de execução deste tipo de estaca não se prestam a um monitoramento perfeito do processo construtivo, resultando em uma certa probabilidade de defeitos acidentais. Em razão

disso, a avaliação da integridade das estacas moldadas in loco é de extrema importância.

O nível mais básico de avaliação da integridade consiste na simples inspeção dos relatórios de concretagem. Nos Estados Unidos, uma avaliação mais detalhada é frequentemente especificada, seja para uma percentagem das estacas, seja para aquelas com suspeita de anomalia. Existem vários métodos pelos quais essa avaliação é conduzida. Porém, infelizmente nenhum deles é, por si só,

suficiente (Hertlein, 2001). A realização conjunta de múltiplos ensaios em uma só estaca seria uma solução, mas na prática não é um procedimento viável do ponto de vista econômico.

Essas considerações levaram à exploração de uma nova tecnologia de ensaio que pudesse fornecer um quadro mais completo da integridade das estacas moldadas in loco, a Perfilagem Térmica de Integridade, ou TIP, do inglês *Thermal Integrity Profiling*. Essa tecnologia usa o calor emitido durante o processo de cura do concreto para avaliar a existência de anomalias.

Até o desenvolvimento desse novo conceito, o calor de hidratação do concreto era visto somente como um efeito colateral indesejável, podendo, a curto prazo, ocasionar fissuras no concreto em razão de tensões induzidas pelo diferencial de temperatura e, a longo prazo, a degradação do concreto em razão da formação de estrigita (Whitfield, 2006).

O método que descrevemos anteriormente muda essa atitude negativa e tira proveito do fato de que a compreensão do processo de geração de calor e de sua difusão através do meio ambiente permite prever a distribuição teórica das temperaturas no interior das estacas moldadas in loco.

## 2 MÉTODOS ATUAIS DE ENSAIOS DE INTEGRIDADE

Entre os métodos de ensaios de integridade de estacas de concreto moldadas in loco pode-se citar o Ensaio de Integridade de Baixa Deformação (também conhecido como Ensaio PIT), o Ensaio “Cross Hole” (CSL) e o Ensaio Gama-Gama (GGL). Cada um desses métodos possui pontos fortes, mas também limitações.

Os ensaios PIT são capazes de avaliar a seção transversal em sua totalidade, mas a profundidade do fuste pode prejudicar sua interpretação. Além disso, no caso de defeitos múltiplos, o ensaio PIT frequentemente detecta somente aquele situado mais perto da superfície.

O ensaio Cross Hole requer que tubos de acesso sejam instalados na estaca, geralmente amarrados à armadura, e se baseia no tempo de trajeto de pulsos sônicos entre um tubo de

acesso e outro (*i. e.*, na velocidade da onda no concreto). Esse ensaio se limita a avaliar a qualidade do concreto na região entre os tubos, ou seja, na região interior à armadura. Velocidades de onda inferiores ao valor esperado indicam a suspeita de um concreto de resistência insuficiente, ou de vazios. Vários Departamentos de Estradas de Rodagem americanos aceitam ou rejeitam estacas moldadas in loco com base na velocidade de onda verificada pelo ensaio CSL.

O ensaio Gama-Gama, que também requer tubos de acesso, utiliza medições de raios gama 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 dele (Caltrans, 2005 e 2010). As estacas moldadas in loco são aceitas ou rejeitadas com base na distribuição estatística das medições obtidas em cada uma (quanto maior o desvio padrão, maior a chance de rejeição).

Ao contrário do ensaio PIT, os ensaios CSL e GGL não são limitados pela profundidade do fuste e podem detectar múltiplos defeitos, mas ambos apresentam limitações quanto à parte da área da seção transversal que podem examinar. Quanto maior o recobrimento, menor a percentagem da seção transversal que pode ser avaliada pelo ensaio CSL.

O concreto da porção exterior da estaca é importante tanto do ponto de vista geotécnico como estrutural. A contribuição do concreto da parte central à resistência aos esforços dos 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, por sua vez, é de extrema importância; no entanto, é avaliado apenas parcialmente pelo ensaio GGL e em geral não é acessado pelo ensaio 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, mas esse não é um procedimento de rotina).

## 3 PERFILAGEM TÉRMICA DE INTEGRIDADE

### 3.1 Considerações Teóricas

O conceito de perfilagem térmica engloba vários princípios físicos, químicos e moleculares relativos à geração de calor e sua difusão no solo e ao perfil de temperatura característico de uma estaca corretamente instalada in loco (Mullins et al., 2004 e 2009; Mullins e Ashmawy, 2005; Mullins e Kranc, 2007). Durante as fases iniciais do processo de cura do concreto, a geração de calor tende a determinar a temperatura resultante, enquanto nas etapas subsequentes o processo de dissipação de calor se torna 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 de seus aditivos (escória e cinzas volantes). Mullins (2010) discute como cada um desses materiais produz calor durante sua hidratação, e como suas percentagens, as quais 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. 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 até 24 horas. Concretos com alta percentagem de escória podem levar mais de 50 horas para completar o processo, e 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, de convecção e de irradiação, sendo a condutividade o processo predominante. A condutividade térmica nos solos é um fenômeno semelhante à condutividade elétrica, sendo 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 for o material, melhor ele conduzirá calor, porém maior será a energia necessária para aquecê-lo.

A determinação da temperatura normal no interior de uma estaca de concreto moldada in loco pode ser feita com base nas considerações teóricas acima, bem como nos perfis de sondagem, tipo de solo, conteúdo mineralógico, densidade e sondagens (Pauly, 2010). Os mecanismos de produção e de dissipação de calor podem ser usados para estimar a evolução da temperatura teórica do elemento de fundação em função do tempo. Essa informação é útil para determinar o período ideal para a obtenção de medições de temperatura com vistas à realização de um ensaio pelo método de perfilagem térmica.

### 3.2 Execução do Ensaio

A perfilagem térmica de integridade utiliza temperaturas medidas durante o processo de cura de concreto para avaliar a qualidade de fundações moldadas in loco. 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) resulta em temperaturas relativamente altas. As anomalias do concreto, tanto no interior como no exterior da armadura, perturbam o perfil normal de temperatura não apenas no ponto de medição mais próximo ao defeito, mas em toda a seção transversal, embora o efeito se torne progressivamente menor ao se medir a temperatura em pontos mais afastados. A distribuição da temperatura interna ao longo da seção transversal de um fuste de formato cilíndrico é aproximadamente normal (Figura 1).

A magnitude do pico de temperatura depende da composição do concreto, do diâmetro da estaca, das propriedades térmicas do solo e do tempo de hidratação. No entanto, cada instante de tempo durante o período de hidratação corresponde a um perfil térmico distinto para as condições vigentes. Embora a magnitude da temperatura varie com o tempo, as características do perfil (o formato da curva) são constantes.

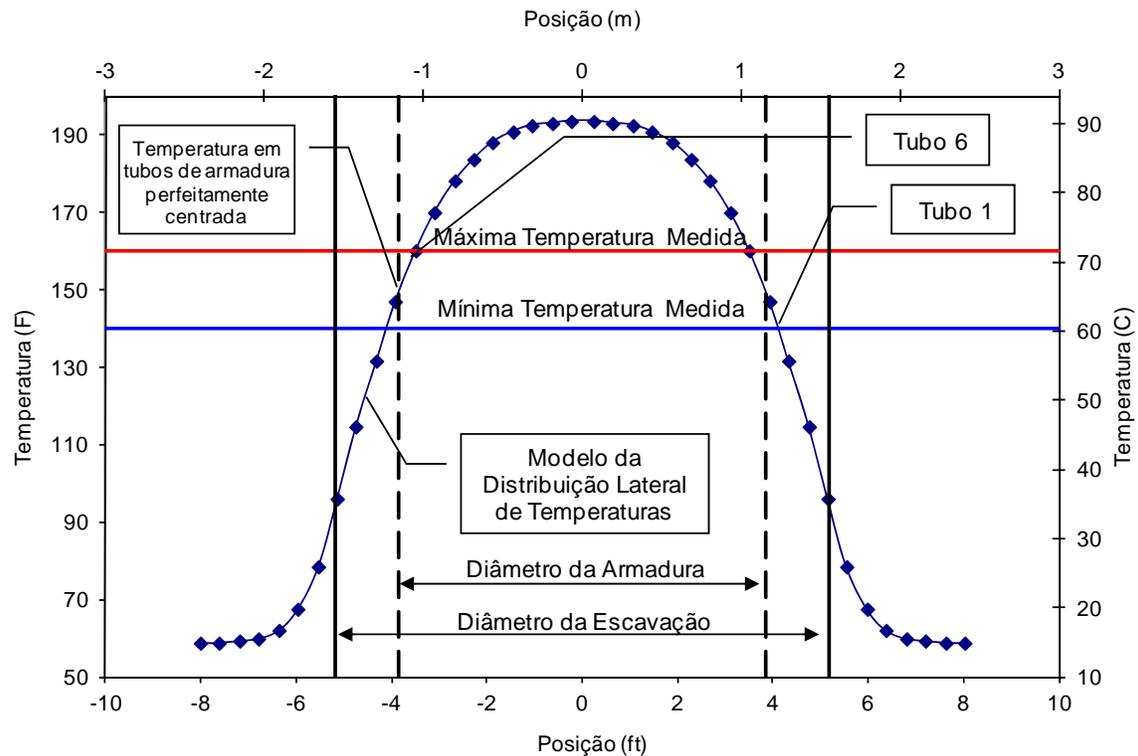


Figura 1 - Distribuição teórica da temperatura ao longo da seção transversal de uma estaca com 3,3 m de diâmetro

Em uma das modalidades do ensaio de perfilagem térmica, uma sonda (Figura 2) contendo quatro sensores térmicos (termopares infravermelhos direcionados horizontalmente e orientados a 0, 90, 180 e 270 graus) é inserida em tubos de acesso (como os instalados para os ensaios CSL, mas secos). Esse processo permite medir as temperaturas na parede do tubo de acesso em quatro direções, e ao longo de todo o comprimento do fuste. O processo é repetido para cada um dos tubos de acesso. Os dados são coletados em tempo real e baixados a um computador para análise. Em uma segunda modalidade do ensaio os tubos de acesso não são necessários. Uma fiação térmica, contendo sensores térmicos descartáveis, é acoplada à armadura (Figura 3). Nesta segunda modalidade do ensaio a aquisição de dados é feita automaticamente durante o período de cura, iniciando-se logo após a concretagem. Os dados coletados podem ser baixados para um computador a qualquer momento que seja conveniente.



Figura 2 - Sonda térmica



Figura 3 - Fiação térmica

## 4 RESULTADOS DA PERFILAGEM TÉRMICA

### 4.1 Avaliação do 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) é afetada tanto pela excentricidade da armadura como pelo recobrimento de concreto (diâmetro efetivo). Com base na distribuição teórica ilustrada na Figura 1, 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 desalinhamento da gaiola de armadura. Por esse motivo, uma estaca moldada in loco, mesmo que perfeitamente cilíndrica, pode exibir temperaturas não uniformes nos pontos de medição. A comparação entre a temperatura mais alta e a mais baixa – diametralmente opostas – com a temperatura média a uma dada profundidade torna possível diferenciar a falta de alinhamento da gaiola de uma variação de seção transversal. Além disso, é possível se determinar a magnitude da falta de alinhamento, bem como o cobrimento de concreto, utilizando-se a parte linear da curva de temperatura teórica e as temperaturas medidas em campo.

### 4.2 Avaliação do Formato do Fuste

Os relatórios de controle da concretagem são mecanismos-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 constitui o nível mais básico de inspeção. O cálculo do diâmetro efetivo é comparado com o diâmetro de projeto,

resultando em uma estimativa básica do perfil do fuste. Nos Estados Unidos, essa informação é frequentemente utilizada na decisão de se realizarem ensaios de integridade. No entanto, para estacas pequenas, nas quais apenas um ou dois caminhões betoneiras são utilizados, não é possível se obter 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 em um elemento de fiação térmica plotada ao longo da profundidade pode ser usada para representar o formato do fuste. Essa visualização do formato do fuste pode, assim, ser obtida independente do número de caminhões betoneiras.

## 5 CASOS DE OBRA

### 5.1 Nalley Valley, Tacoma, Washington, EUA

Várias das estacas do projeto Nalley Valley da Rodovia I-5 / SR16 em Tacoma, Washington, foram ensaiadas por perfilagem térmica, método sonda. As temperaturas obtidas em uma estaca de 3,3 m de diâmetro, contendo 10 tubos de acesso, aparecem na Figura 4.

A porção superior do gráfico (acima de 4,5 m) corresponde à parte dos tubos acima da estaca, sendo irrelevante. A 9,8 m se observa uma elevação de temperatura em todos os tubos de acesso. Essa profundidade corresponde ao nível do lençol freático, deduzindo-se, então, que um certo desprendimento do solo anteriormente à introdução da lama bentonítica tenha resultado em um alargamento do fuste. O topo e a ponta da estaca apresentam efeitos normais de dissipação de temperatura, tanto radialmente como longitudinalmente. Entre esses dois pontos extremos a dissipação de temperatura é somente radial.

O alinhamento da gaiola da armadura ao longo do fuste pode ser avaliado comparando-se as temperaturas medidas em tubos de acesso diametralmente opostos e observando-se a diferença entre elas e a média (linha grossa, 66°C).

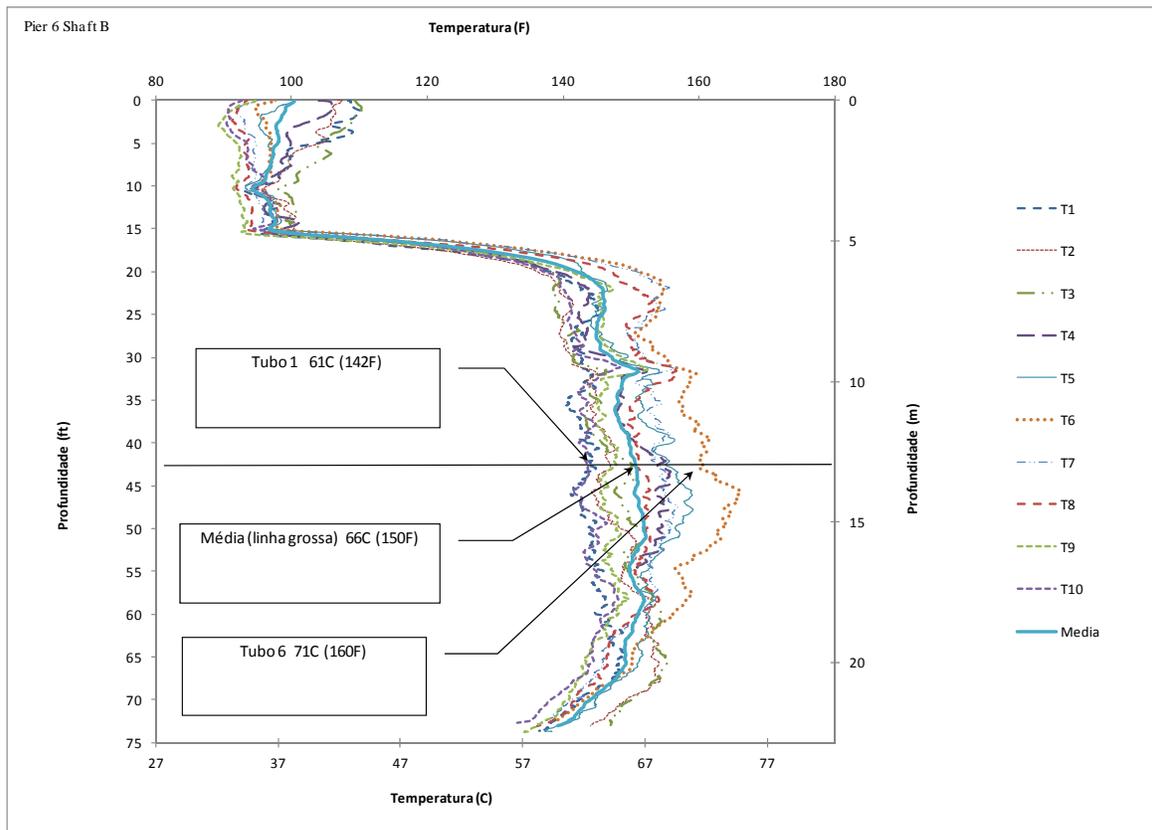


Figura 4. Dados de uma estaca de 3,3 m de diâmetro, evidenciando o efeito do alinhamento da armadura na temperatura medida

A Figura 5 mostra as temperaturas medidas a uma determinada profundidade em cada um dos tubos de acesso dessa estaca, em uma escala radial, com os pontos mais quentes do que a média de 66°C plotados mais próximos ao centro, os pontos mais frios plotados mais próximos à parte externa e a posição angular de cada tubo inalterada. Essa representação facilita a visualização da excentricidade da gaiola da armadura: observa-se que, a esta profundidade, a armadura apresenta um desvio em direção ao quadrante superior direito.

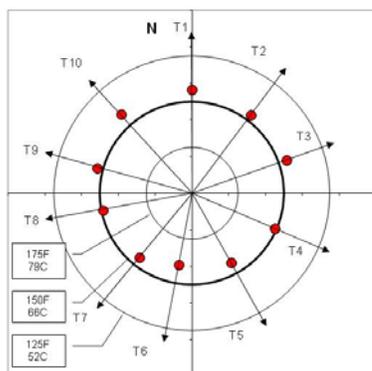


Figura 5. Temperaturas plotadas em uma escala radial a partir do centro, a uma profundidade de 12,2 m

Mais detalhes sobre esse projeto se encontram em Mullins (2010).

## 5.2 Projeto rodoviário I4 / Crosstown Connector em Tampa, Florida, EUA

Por ocasião do preparo deste trabalho, a Rodovia I4 / Crosstown Connector, na cidade de Tampa, Florida, era um dos maiores projetos em que os ensaios de perfilagem térmica já haviam sido utilizados. Esse projeto, de custo estimado de 613 milhões de dólares, consiste em um viaduto de aproximadamente 1,6 km, suportado em sua maior parte por estacas escavadas. O alto nível do lençol freático no local determinou a utilização de processos construtivos de certo risco. Esse fato, assim como a experiência local, resultou na especificação de um rigoroso programa de controle de qualidade.

Mais de 100 estacas desse projeto foram ensaiadas pela perfilagem térmica, método sonda. Algumas delas foram também ensaiadas com ensaios CSL e Gama-Gama. A avaliação da qualidade da estaca com base em cada um

dos três tipos de ensaios realizados em uma estaca de diâmetro 0.91 m, ancorada em rocha e instalada com uma camisa metálica provisória de 1 m, aparece na Figura 6.

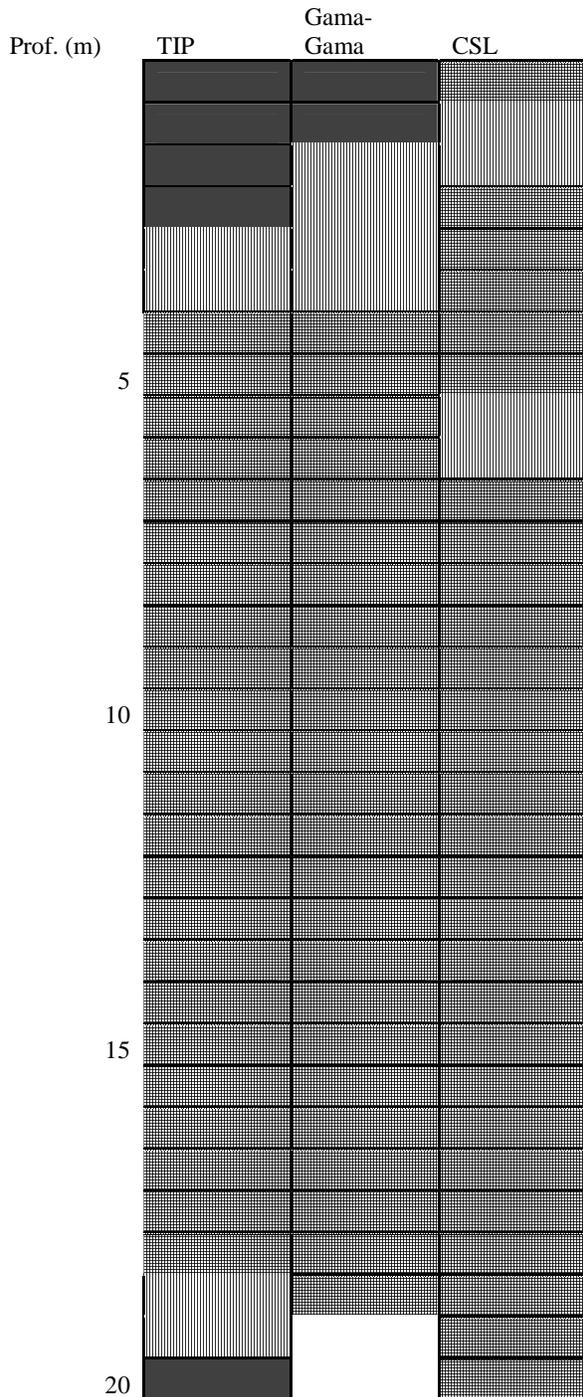


Figura 6. Comparação de ensaios de integridade em uma mesma estaca

As zonas quadriculadas, hachuradas verticalmente e sólidas representam,

respectivamente, regiões consideradas de boa qualidade, questionáveis e de má qualidade. As reduções de velocidade de onda verificadas pelo método CSL estavam dentro dos limites aceitos pelo Departamento de Estradas de Rodagem da Florida, explicando a extensa região verde. Por outro lado, os resultados Gama-Gama revelaram condições “questionáveis” ou “insatisfatórias” na parte superior. Os resultados da perfilagem térmica evidenciaram temperaturas mais frias do que as esperadas com base na modelagem matemática da estaca (curva “normal”). Temperaturas inferiores às esperadas podem indicar uma redução de seção transversal, recobrimento insuficiente ou concreto de má qualidade. Os resultados numéricos de cada um dos testes podem ser encontrados em Likins e Mullins (2011).

Como foi tomada a decisão de não recuperar essa estaca, mas sim substituí-la, foi possível escavá-la e obter corpos de prova do concreto. Os três metros iniciais foram escavados e amostras foram obtidas a aproximadamente dois metros. Foram executados 42 testes de compressão, os quais revelaram resistências do concreto de 9,2 a 60,6 MPa, com 51% das amostras com resistência menor do que a de projeto ( $f_{ck} = 27,6$  MPa) e 81% das amostras com resistência inferior à resistência média a 28 dias ( $f_{cm28} = 51,8$  MPa).

## 6 CONCLUSÕES

Os casos de obra demonstram que o método de perfilagem térmica permite obter informações mais completas, quando comparado aos métodos CSL e Gama-Gama. A área da seção transversal é examinada na sua integridade, enquanto o método CSL não examina a região exterior à gaiola da armadura, e o Gama-Gama cobre aproximadamente 10% dessa importante região. No projeto realizado na Florida, foi possível verificar a correspondência de temperaturas anormalmente baixas com a ocorrência de concreto com resistência inferior à de projeto. Embora os testes realizados em ambos os projetos tenham sido executados pelo método sonda, pode-se afirmar que os resultados pelo método de fiação térmica seriam equivalentes.

A execução de ensaios por vários métodos, quando viável, pode fornecer mais informações e melhor avaliação da qualidade da fundação. Nenhum método, por si só, é suficiente. O método de perfilagem térmica fornece uma perspectiva geral da situação do fuste com base na presença ou na ausência de concreto. O formato, o posicionamento da gaiola da armadura e o recobrimento são avaliados por esse método. Tanto a presença de concreto em excesso como sua ausência afetam a temperatura. Uma importante característica da perfilagem térmica é a possibilidade de obtenção de resultados mais rápidos do que através de outros métodos (durante, e não após, o período de cura).

A interpretação da maior parte dos resultados obtidos com a perfilagem térmica requer apenas a compreensão do comportamento da temperatura e do seu perfil normal. Uma revisão qualitativa básica das temperaturas medidas identifica as cotas do fundo e do topo do poço de escavação, o alinhamento da armadura e as variações significativas de seção transversal. A comparação quantitativa dos relatórios de construção e de concretagem com as temperaturas medidas permite estimar o formato do fuste e a posição da armadura.

Uma análise mais sofisticada dos dados de perfilagem térmica também é possível, a qual consiste em criar um modelo matemático do processo de produção da energia de hidratação do concreto da estaca e comparar as medidas de campo com as temperaturas geradas pelo modelo. A comparação do modelo matemático com as medidas de campo pode ser usada para determinar com maior precisão a extensão e a magnitude das regiões anômalas.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- 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](http://www.dot.ca.gov/hq/esc/geotech/ft/gamma.htm)
- Hertlein, B., 2001. Are our client's expectations realistic? Geo-Strata, Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, Janeiro, p.11
- Kranc, S.C. e 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, Abril 16-18, 2007
- Likins, G. e Mullins, G., 2011. Structural integrity of drilled shaft foundations by thermal measurements. Structural Engineers, Novembro, pp. 46-48
- Mullins, A. G. e Kranc, S. C., 2004. Method for testing the integrity of concrete shafts. US Patent 6,783,273
- Mullins, G., 2010. Thermal Integrity Profiling of Drilled Shafts. DFI Journal, Vol. 4 No. 2, Dezembro
- Mullins, G. e Ashmawy, A., 2005. Factors affecting anomaly formation in drilled shafts. Final Report, FDOT Project BC353-19, Março
- Mullins, G. e Kranc, S., 2007. Thermal integrity testing of drilled shafts. Final Report, FDOT Project BD544-20, Maio
- Mullins, G., Winters, D., e Johnson, K., 2009. Attenuating mass concrete effects in drilled shafts. Final Report, FDOT Project BD544-39, September, 148 pp
- 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, Dezembro
- Schindler, A. e Folliard, K., 2005. Heat of hydrations models for cementitious materials. ACI Materials Journal, Vol. 102, No.1, pp. 24-33
- 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, Junho