

# A Experiência Brasileira na utilização do Ensaio de Integridade através da Perfilagem Térmica

Felipe Vianna Amaral de Souza Cruz

Concremat Engenharia e Tecnologia S/A, Rio de Janeiro, Brasil, [felipe.cruz@concremat.com.br](mailto:felipe.cruz@concremat.com.br)

Alexandre Cerqueira de Jesus

Concremat Engenharia e Tecnologia S/A, RJ, Brasil, [alexandre.cerqueira@concremat.com.br](mailto:alexandre.cerqueira@concremat.com.br)

Gustavo Alves Tristão

Concremat Engenharia e Tecnologia S/A, São Paulo, Brasil, [gustavo.tristao@concremat.com.br](mailto:gustavo.tristao@concremat.com.br)

Gina Beim

Pile Dynamics, Inc, Cleveland, Estados Unidos, [gbeim@pile.com](mailto:gbeim@pile.com)

**RESUMO:** Este trabalho descreve a primeira realização no Brasil dos ensaios de integridade pelo método da perfilagem térmica. Realizado em um dos empreendimentos para os Jogos Olímpicos de 2016, no Rio de Janeiro. O ensaio apresentou resultados bastante representativos para a análise da integridade da estaca, deslocamento da armadura e alargamento da seção transversal, entre outras conclusões. As fundações da obra em questão consistiam de estacas moldadas “in loco”, possuía 1,10 m de diâmetro e 39,0 metros de comprimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estaca, Ensaio de Integridade, Ensaio de Perfilagem Térmica, TIP, Controle de Desempenho em Fundações.

## 1 INTRODUÇÃO

As estacas moldadas in loco são frequentemente projetadas para resistir a grandes cargas de projeto. No entanto, os métodos de execução deste tipo de estaca não se prestam a um monitoramento adequado de sua integridade durante o processo construtivo, resultando em uma maior probabilidade da ocorrência de patologias que afetarão a capacidade de suporte e durabilidade das estacas.

Em razão disso, a avaliação da integridade das estacas escavadas de grande diâmetro é uma relevante importância. Existem vários métodos pelos quais essa avaliação é conduzida, porém nenhum é por si só suficiente para avaliar a totalidade do elemento de fundação. 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 (Mullins et al, 2012b). Essas considerações levaram à exploração de um ensaio que pudesse fornecer um quadro mais

completo da qualidade da fundação: a perfilagem térmica.

O método de Perfilagem Térmica, ou TIP, do inglês *Thermal Integrity Profiling*, permite avaliar o formato destas estacas, e a existência de anomalias nas mesmas, com base em medidas de temperatura tomadas durante o processo de cura do concreto.

No Brasil, esse ensaio ainda está nos estágios iniciais de divulgação, mas possui potencial para ganhar mercado e se tornar uma solução melhor, com um melhor custo/benefício para verificação de integridade em fundações profundas, do que os ensaios Cross Hole e Gama-Gama, que descrevemos na seção seguinte.

## 2 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 (Mullins et al, 2012a).

## 2.1 Ensaio de Integridade de Baixa Deformação (PIT)

Os ensaios de integridade de baixa deformação (PIT) são capazes de avaliar a seção transversal em sua totalidade, mas o comprimento do fuste, diâmetro da estaca ensaiada e características do subsolo podem prejudicar sua interpretação. Como o ensaio é baseado em estímulos de baixa deformação, o sinal perde intensidade ao longo do fuste possuindo limites de comprimento, dependendo do tipo do solo, acima dos quais o seu resultado nem sempre é satisfatório. Além disso, no caso de defeitos múltiplos, o ensaio PIT frequentemente detecta somente a primeira descontinuidade da estaca, ou seja, aquela situada mais próxima da superfície. Apesar de suas limitações e a necessidade de uma análise bastante criteriosa, o ensaio de integridade de baixa deformação PIT ainda é um dos que apresenta as melhores condições de custos/benefícios para esse tipo de avaliação.

## 2.2 Ensaio de Integridade *Cross Hole* (CSL)

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). Velocidades de onda inferiores ao valor esperado, assim como pulsos que chegam ao receptor mais fracos do que o 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 e intensidade do sinal recebido pelo ensaio CSL. No entanto, esse ensaio permite avaliar a qualidade do concreto somente na região entre os tubos, ou seja, na região interior à armadura. A contribuição do concreto desta 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 é de extrema importância tanto do ponto de vista geotécnico como estrutural. Apesar de suas limitações, nos Estados Unidos este é o ensaio mais utilizado na avaliação das estacas de grande diâmetro moldadas *in loco*, porém no Brasil, o ensaio CSL nunca chegou a ganhar muita popularidade.

## 2.3 Ensaio de Integridade Gama-Gama (GGL)

O ensaio Gama-Gama, de aplicação rara no Brasil, também requer tubos de acesso, e 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 do tubo (Caltrans, 2005 e 2010). No Estado da Califórnia, onde este ensaio é bastante utilizado, 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). Este ensaio permite avaliar parte da região exterior à armadura, mas não a sua totalidade.

# 3 ENSAIO DE PERFILAGEM TÉRMICA (TIP)

## 3.1 Considerações Teóricas

A compreensão do processo de geração de calor durante a cura do concreto permite prever a distribuição teórica das temperaturas no interior das estacas moldadas *in loco* com base em 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 (Mullins e Ashmawy, 2005; Mullins e Kranc, 2007).

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. Já o processo de difusão do calor no

meio ambiente; é função primordialmente da densidade do solo.

É possível estimar a distribuição da temperatura teórica no interior de uma estaca de concreto moldada in loco a partir das considerações acima e do tipo de solo (conteúdo mineralógico e densidade) revelado pelas sondagens (Pauly, 2010). A variação da temperatura teórica em função do tempo, por sua vez, pode ser estimada com base nas teorias termodinâmicas de produção e de dissipação de calor.

De modo geral, a insuficiência de concreto numa certa região (por exemplo, bolhas, estrangulamento do fuste) faz com que aquela região apresente-se relativamente fria; a ocorrência de concreto em excesso (protuberância) resulta em temperaturas relativamente altas. As anomalias do concreto, tanto no interior como no exterior da armadura, afetam a temperatura não só na região do defeito, mas em toda a seção transversal, embora o efeito se torne progressivamente menor ao se medir a temperatura em pontos mais afastados do defeito (Mullins et al, 2012b). Em condições perfeitas, a distribuição da temperatura interna ao longo da seção transversal de um fuste de formato cilíndrico é aproximadamente normal (Figura 1).

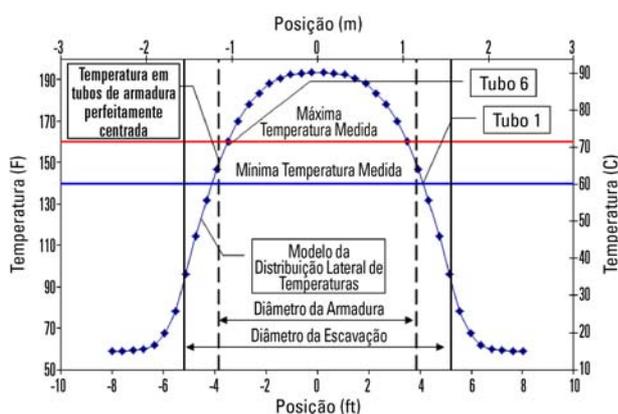


Figura 1. Distribuição teórica da temperatura ao longo da seção transversal de uma estaca com 3,3 m de diâmetro.

### 3.2 Tipos de Ensaios

A perfilagem térmica de integridade utiliza temperaturas medidas durante o processo de cura de concreto. Estas temperaturas podem ser obtidas por dois métodos distintos.

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 semelhantes ao utilizados nos ensaios CSL.



Figura 2. Sonda Térmica

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 durante o período de pico de temperatura, que pode ser estimado pelos diâmetros das estacas ensaiadas (Figura 3).

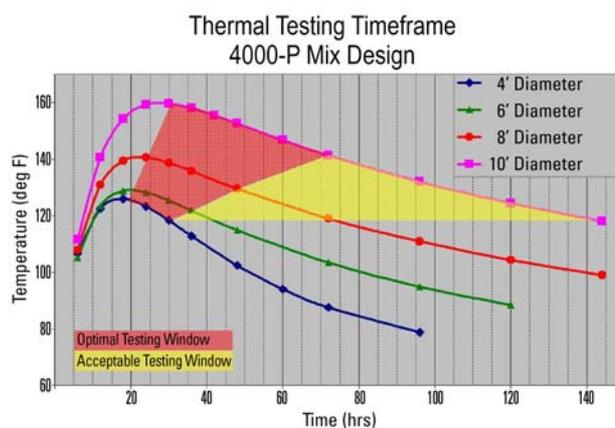


Figura 3. Tempo de coleta de dados (Mullins e Winters, 2011)

Em uma segunda modalidade do ensaio os tubos de acesso não são necessários. Uma fiação contendo sensores térmicos digitais e descartáveis (*Thermal Wire*<sup>®</sup> cables, Cotton et al, 2010) é acoplada à armadura (Figura 4). 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. Com esse tipo de instrumentação é muito importante que as

informações sobre a armadura e sobre a clipagem das mesmas sejam precisas, pois as fiações são fabricadas especificamente para o ensaio.



Figura 4. Fiação térmica acoplada à armadura

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Avaliação do Alinhamento da Armadura

A variação da temperatura medida em cada um dos pontos de medição (tubo de acesso ou elemento da fiação térmica, ambos localizados na armadura) é afetada tanto pela excentricidade da armadura como pelo recobrimento de concreto. Com base na distribuição teórica ilustrada na Figura 1, para uma armadura perfeitamente centralizada, a temperatura em todos os pontos de medida deveria ser idêntica. Uma armadura ligeiramente excêntrica, mais próxima a uma das paredes da escavação, exibirá temperaturas mais baixas nos pontos de medição 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. 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 as várias medidas e a média dentre as mesmas.

### 4.2 Avaliação 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 lançado por cada caminhão betoneira permite o cálculo do diâmetro efetivo médio, e constitui o nível mais básico de inspeção. O diâmetro efetivo leva a uma estimativa básica do perfil do fuste e é comparado com o de projeto. 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. O ensaio TIP permite uma avaliação mais sofisticada do que esta simples observação em campo.

Em uma estaca perfeitamente cilíndrica, a curva de temperaturas (médias dentre todos os pontos numa mesma cota) medidas versus profundidade é perfeitamente vertical, com exceção das regiões junto ao topo e pé da estaca, onde há transferência de calor com o ar ou o solo (o método TIP permite levar em conta este fenômeno). Nos casos reais, as curvas de temperatura média medida pelo método de perfilagem térmica ao longo da profundidade nunca é perfeitamente vertical, e por isto pode ser usada para representar o formato do fuste. Ao ser plotada conjuntamente com o diâmetro médio teórico obtido das observações em

campo, a curva de temperatura permite estabelecer uma relação entre temperatura média medida e diâmetro efetivo em cada cota. Desta forma estabelece-se com bastante confiança o formato do fuste.

## 5 EXPERIÊNCIA BRASILEIRA – ESTUDO DE CASO

A construção da Vila dos Atletas, com capacidade para receber 18 mil esportistas e treinadores que participarão dos Jogos Olímpicos do Rio, em 2016, foi a primeira obra no Brasil a utilizar essa inovação tecnológica para a verificação da integridade de estacas moldadas “in loco”. A estaca ensaiada era do tipo escavada, possuía 1,10 m de diâmetro e 39,0 metros de comprimento, características perfeitas para optarmos pelo Ensaio TIP.

A instrumentação foi incorporada junto à armação da estaca por meio de quatro fios térmicos (Fig. 5). A estaca foi totalmente armada ao longo do seu comprimento, sendo a armadura dividida em três gaiolas (11 m + 11 m + 18 m). A instrumentação foi fixada na primeira gaiola ainda no solo (Fig. 6) e foi estimado um comprimento restante de espera da fiação térmica para instrumentar a segunda gaiola de 11 metros, assim que a mesma fosse clipada à primeira armadura (Fig. 7).



Figura 5 – Fiação Térmica posicionada na armadura



Figura 6 – Fixação da instrumentação na armadura

Durante a colocação da segunda parte da armadura, os fios térmicos foram inseridos com a gaiola na vertical, conforme sua introdução na estaca. A terceira armadura foi instrumentada no terreno e conectada aos fios térmicos restantes no momento da clipagem.



Figura 7 – Clipagem das armaduras instrumentadas

Após a instrumentação ter sido finalizada, os coletores térmicos (TAP, do inglês *Thermal Acquisition Port*) foram testados e a concretagem liberada para ser iniciada (Fig.8). Na concretagem foram utilizados cinco caminhões betoneira com 8,0 m<sup>3</sup> de concreto, cada.



Figura 8 – Fixação dos coletores (TAP) para registro

No dia seguinte após 23 horas do início da concretagem, foram retirados os coletores de temperatura e iniciou-se a análise do ensaio no escritório.

Os resultados mostraram uma estaca uniforme ao longo do comprimento e íntegra com alguns pontos de alargamento. O diâmetro médio da estaca em todas as profundidades foi superior ao diâmetro nominal de 1,10 m, especificado no projeto (Fig. 9).

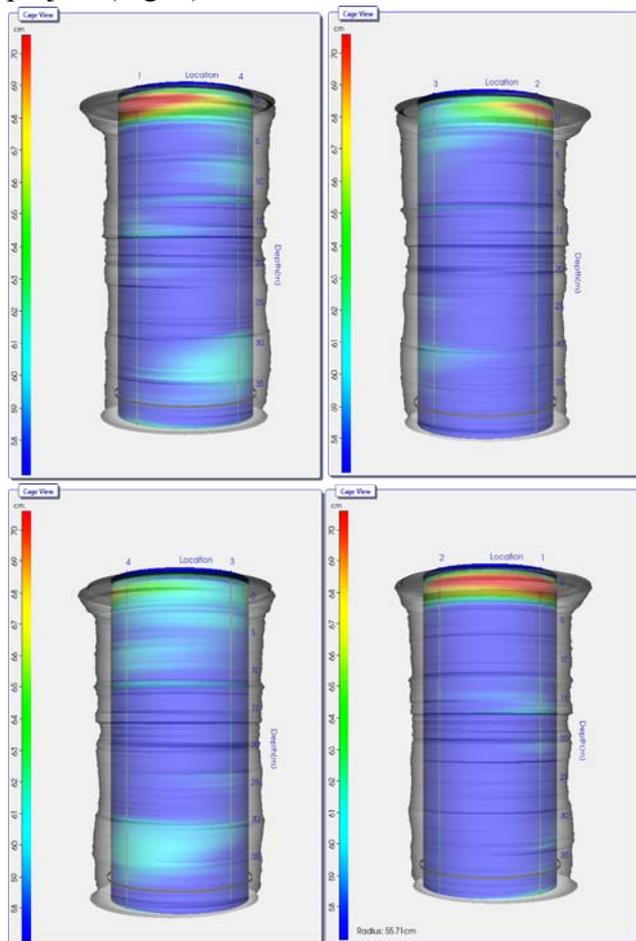


Figura 9: Imagem 3D representando o alargamento ocorrido ao longo do fuste da estaca

Salienta-se que os primeiros 3 metros da imagem são referentes a sensores térmicos que se encontram para fora do terreno. Considerando o diâmetro da gaiola de 95 cm, os dados indicaram uma cobertura de concreto de 6 a 14 cm ao longo do comprimento da estaca.

A Figura 10 mostra as temperaturas medidas ao longo do fuste da estaca. Cada um dos traços 1 a 4 corresponde a uma fiação térmica, estando ainda representada a curva média (indicada por Avg. na Figura 10).

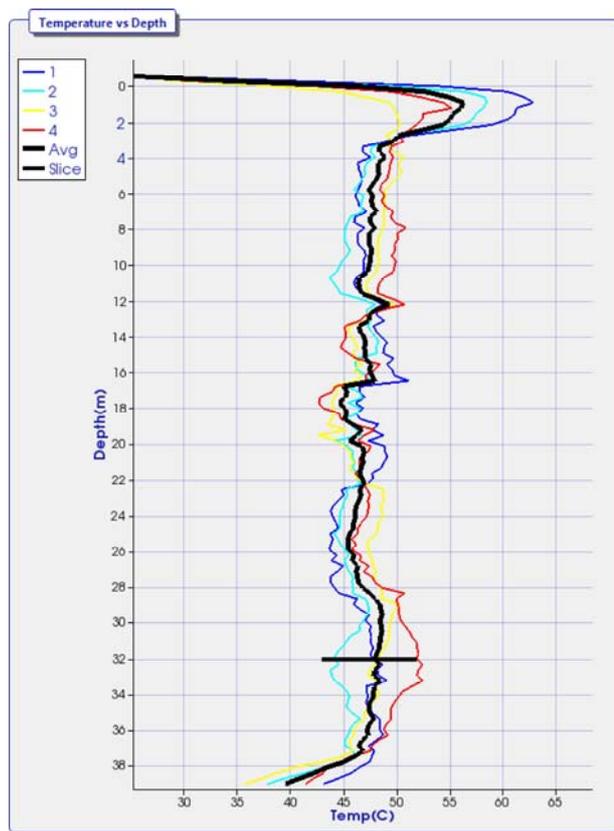


Figura 10: Representação gráfica de medidas de temperatura versus profundidade.

Os quatro registros comportaram-se aproximadamente de maneira semelhante, não apresentando um desvio significativo de um alinhamento vertical. Este resultado mostra uma estaca em boas condições, sem nenhum dano ou anomalia. No entanto, a armadura não se encontra perfeitamente alinhada em todo seu comprimento, principalmente nos comprimentos de 3 a 12 m e de 22 a 39 m. As temperaturas não idênticas em cada um dos quatro pontos de medição indicam que a armadura apresenta-se algum desalinhamento.

A Figura 11 mostra o alargamento da estaca provavelmente devido à oscilação da perfuratriz ou escavação excessiva nos primeiros 3 metros; a Figura 12 mostra a gaiola totalmente centralizada na seção da estaca.

O deslocamento mais significativo da armadura ocorreu na profundidade de 32,61 m, onde o fio térmico 4 apresentou uma temperatura mais elevada porque encontra-se mais próximo ao centro da estaca e o fio 2 (diametralmente oposto) encontra-se mais próximo a interface solo-estaca devido à sua baixa temperatura (Fig. 13).

## 6 CONCLUSÕES

A execução de ensaios de integridade por vários métodos em uma mesma estaca, quando viável, geralmente resulta em uma boa avaliação da qualidade da fundação. Quando realizados individualmente, no entanto, cada um dos ensaios ora em uso corrente pode vir a deixar alguma incerteza. O ensaio pelo método CSL não examina a região exterior à gaiola da armadura; o Gama-Gama cobre aproximadamente 10% dessa importante região, onde geralmente ocorrem as anomalias, e o método PIT, embora realize uma análise total da seção transversal do fuste, apresenta restrições quanto à profundidade. O método de perfilagem térmica (TIP) permite examinar 100% da área da seção transversal ao longo de todo o comprimento, além de avaliar a geometria do fuste, o posicionamento da gaiola da armadura e o recobrimento de concreto. Uma importante vantagem do ensaio TIP 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 é relativamente simples. As cotas do fundo e do topo da estaca, o alinhamento da armadura e as variações significativas da seção transversal são estimadas a partir da observação das temperaturas medidas. A comparação quantitativa dos relatórios de construção e de concretagem com as temperaturas medidas por meio de perfilagem térmica permite estimar a geometria do fuste e a posição da armadura com maior precisão.

O primeiro ensaio de perfilagem térmica (TIP) realizado no Brasil demonstra todos os benefícios que este pode trazer às grandes obras que estão ocorrendo no país, em estacas de grandes diâmetros e comprimentos, nas quais o PIT possui suas restrições e os outros métodos não identificam as ocorrências na região externa à armadura.

Ressalta-se ainda que o ensaio de perfilagem térmica (TIP) pode ser utilizado para verificar a integridade e forma de outras estruturas de concreto, como por exemplo, lajes, paredes diafragma, micro estacas e colunas de *jet*

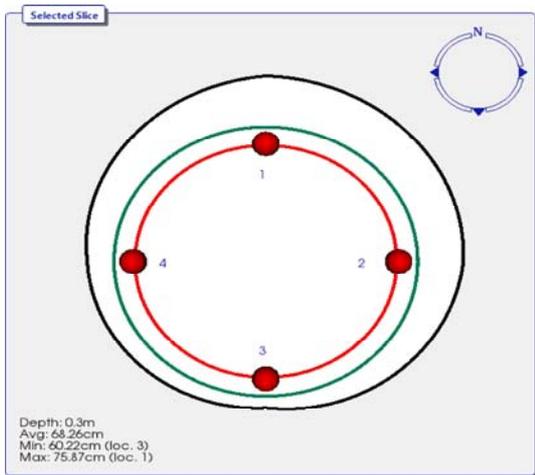


Figura 11 – Posição da gaiola no comprimento 3 m

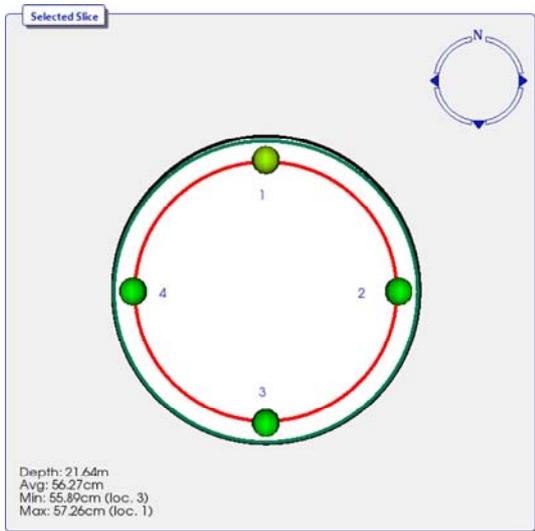


Figura 12 – Posição da gaiola no comprimento 21,6 m

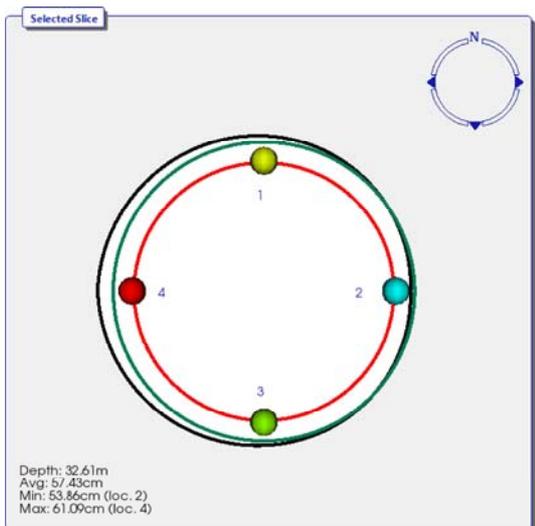


Figura 13 – Deslocamento da gaiola no comprimento 32,61 m

OBS: Linha vermelha/ interior - Ilustração da gaiola;  
Linha verde / intermediária - Ilustração da estaca projetada;  
Linha preta / exterior - Ilustração da estaca executada

*grouting*, desde que sua geometria seja adaptada para esse tipo de análise. Ao considerar-se a introdução desta tecnologia ao mercado brasileiro, deve-se evidentemente levar em conta o preço de execução de cada um dos ensaios existentes. Recomendamos também uma detalhada comparação entre os dois métodos de ensaios de perfuração térmica ora oferecidos no mercado. As vantagens e desvantagens da fiação térmica versus o método sonda, em especial levando-se em conta as condições econômicas atuais do mercado brasileiro, não foram discutidas em detalhe neste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Consórcio Ilha Pura, por ter nos oferecido a oportunidade de realizarmos essa inovação para ensaios de integridade aqui no Brasil.

Agradecemos também à Área de Negócios de Inspeções e Laboratórios (ANIL) das empresas Concremat, por ter investido nesse projeto, bem como à empresa Pile Dynamics, Inc. por ter nos oferecido todo apoio e suporte técnico para aprendizado e desenvolvimento das análises.

## 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)
- Cotton, D., Ference, M., Piscalko, G., and Rausche, F. (2010). *Pile Sensing Device and Method of Making and Using the Sam*, US Patent 8,382,369.
- Mullins, G.(2010). Thermal Integrity Profiling of Drilled Shafts. *DFI Journal*, Vol. 4 No. 2
- Mullins, G. e Ashmawy, A., (2005). *Factors affecting anomaly formation in drilled shafts*. Final Report, FDOT Project BC353-19.
- Mullins, G., Beim, G, Likins, G. E., Beim, J.W.(2012a). Avaliação da Integridade de Fundações Moldadas in Loco Pelo Método de Perfuração Térmica, *Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia*: São Paulo, Brasil.
- Mullins, G. e Kranc, S. C.(2004) . *Method for testing the integrity of concrete shafts*,US Patent 6,783,273.
- Mullins, G., Likins, G. E., Beim, G, (2012b). Método de Perfuração Térmica para Avaliação da Integridade de Fundações Moldadas In Loco. *Cobramseg 2012*; XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica: Pernambuco, Brasil.
- Piscalko, G.(2012). New Non-Destructive Testing Method for Drilled Shafts and ACIP Piles, *Proceedings, 37th Annual Conference on Deep Foundations*, Deep Foundations Institute, Houston, Texas.
- 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, Tampa, Florida.
- Mullins, G., Winters, D., June 2011. Infrared Thermal Integrity Testing, Quality Assurance Test Method To Detect Drilled Shaft Defects. WSDOT Project WA-RD 770.1.