



Prova de Carga Estática até 6000 kN executada sob uma Ponte em construção: o caso da OAE sobre o Rio Araguaia

André Querelli

Eng. M.Sc., Diretor, **Solotechnique**, Jundiaí, São Paulo, andre.querelli@solotechnique.com.br

Tiago de Jesus Souza

Eng. D.Sc., Diretor, **Solotechnique**, Jundiaí, São Paulo, tiago.souza@solotechnique.com.br

Rodrigo Aparecido Santos

Eng., **Solotechnique**, Jundiaí, São Paulo, rodrigo.santos@solotechnique.com.br

Mariane Cardoso da S. Aguiar

Eng^a. M.Sc., **Sete Engenharia**, Goiânia, Goiás, maricardoso.eng@gmail.com

RESUMO: Provas de carga estáticas são ferramentas de controle de desempenho amplamente utilizadas na engenharia de fundações para a avaliação da capacidade de carga e comportamento força versus deformação de estacas. O presente artigo descreve a realização de uma Prova de Carga estática desafiadora nas fundações da nova ponte sobre o rio Araguaia, em construção em São Miguel do Araguaia-GO. A ponte possui mais de 1,1 km de extensão total e seus blocos, pilares e tabuleiro já estavam executados na região central da OAE, no meio da calha do rio, onde ficará um dos mastros estaiados com 104m de vão livre. Para avaliar a capacidade de carga e a segurança dos apoios centrais, foi executada prova de carga estática onde o desafio maior residiu na necessidade de executá-la por debaixo da estrutura da ponte parcialmente construída, utilizando-a como sistema de reação. O bloco de coroamento e reação foi composto por 15 estacas tubulares de aço na e a prova de carga na estaca central foi executada até 6000 kN com sucesso, superando as expectativas. A modalidade executiva representou um desafio significativo e um trabalho de alto nível de engenharia. São apresentados os condicionantes da obra e estado na data de realização das provas de carga, montagem e desafios executivos e os resultados obtido.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de Carga Estática, Fundações, Ponte sobre o Rio Araguaia, Obra de Arte, Estacas Tubulares de Aço.

ABSTRACT: Static Load Tests are foundation control tools used to assess the load capacity versus displacement behavior of piles. This article a challenging Static Load Test on the foundations of the new bridge under construction over the Araguaia River, in São Miguel do Araguaia-GO. The bridge has a total length of more than 1.1 km and during the load test, almost all of its structure was already executed in the central region of the river channel - place where one of the masts with 104m free span is located. To assess the load capacity and safety of the piles, a static load test was carried out, where the biggest challenge was the need to run it underneath the structure of the bridge, using it as a reaction system. There were 15 tubular steel piles in the reaction/foundation block, and the load test was successfully performed to 6000 kN. That test represented a significant challenge and required a high level engineering work. The paper presents all the work constraints, along with assembly and executive challenges to the achieved results.

KEYWORDS: Static Load Test, Foundations, Bridge over the Araguaia River, Steel Tube Piles

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

Uma das opções de teste de desempenho de fundações profundas se faz através de Provas de Carga Estáticas (PCE), ensaio descrito e normatizado pela NBR 16903:2020 (ABNT, 2020). O ensaio consiste na aplicação de incrementais níveis de carga (controlada) sobre uma estaca testada e monitoramento de deslocamentos da estaca (estabilizados no tempo), em função da carga aplicada. A carga é gradualmente aumentada em estágios, permitindo verificar o comportamento Carga x Recalque da fundação para posteriores interpretações de seu desempenho.

Dentre as razões para se usar esse tipo de ensaio, se tem a necessidade de validar os cálculos e dimensionamentos de projeto, além de confirmar as margens de segurança em relação às cargas atuantes previstas.

Neste cenário, o presente artigo apresenta em detalhes uma Prova de Carga Estática (PCE) no caso da Ponte sobre o Rio Araguaia, no município de São Miguel do Araguaia-GO, abordando aspectos relacionados à montagem dos equipamentos, execução da PCE propriamente dita e seus resultados frente ao desafio de executá-la sob a Obra de Arte já em estágio avançado de execução.

2 A Ponte sobre o Rio Araguaia: Obra, Subsolo e Fundações

A ponte estaiada em construção entre os municípios de Cocalinho (MT) e São Miguel do Araguaia (GO) representa uma solução para aprimorar a logística da região e ser mais uma alternativa de escoamento do fluxo humano, de veículos, bens e mercadorias, favorecendo o transporte, em especial, de produtos agropecuários da região, favorecendo-a economicamente. A ponte tem impacto direto em todo o estado de Goiás, bem como refletirá significativamente no desenvolvimento do nordeste Mato-Grossense. A Figura 1 traz a localização da ponte:



Figura 1. Localização da Ponte sobre o Rio Araguaia

A Estrutura da Ponte possui um total de 1031 metros de extensão e mais de 31 metros de altura de gabarito de navegação. Ela possuirá um total de Quatro mastros Estaiados, com vãos livres máximos de mais de 100 metros. A Figura 2 mostra um recorte da elevação constante no projeto de fundações dos mastros centrais (Apoios 16 e 17).

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



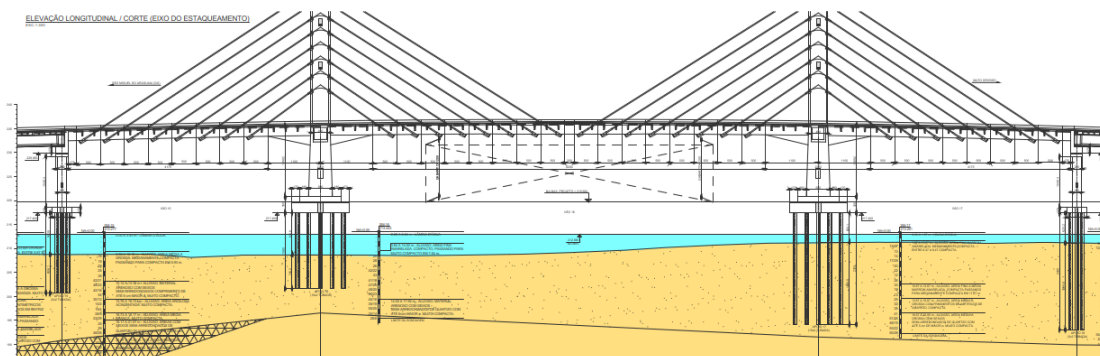


Figura 2. Elevação do projeto de fundações – Apoios 16 e 17

O subsolo do local onde a ponte está em construção é predominantemente arenoso, sendo composto por uma camada inicial de aluvião-areno-argiloso de baixa compactidade, seguida por uma camada também aluvionar, mas areno-siltosa e finalizando – em sua maior espessura – com areia majoritariamente fina (porém com lentes de areia grossa compacta a muito compacta). Ainda existem seixos semi-arredondados de quartzo nessa terceira camada.

As Fundações da obra foram inicialmente projetadas em estacas de aço cravadas (ver Figura 3), de seção tubular com 80cm de diâmetro (e 10,3mm de espessura) nos trechos da calha do rio (lâmina d'água). As estacas foram projetadas para carga de trabalho de até 3000 kN (6000 kN na ruptura). Elas foram cravadas e posteriormente tiveram parte de seu interior limpo, armado e preenchido com concreto estrutural. Esse tipo de solução de fundação tem boa capacidade para resistir a momentos fletores e o preenchimento parcial em concreto gera também uma melhoria no quesito durabilidade das estacas sob ação da degradação pela lâmina do curso d'água.



Figura 3. Estacas tubulares de aço cravadas nos apoios centras (região da calha do rio Araguaia)

O comprimento cravado das estacas foi em torno de 20 a 28m (trecho em solo, sem contar o trecho na lâmina d'água) com valor médio em torno de 25m de comprimento.

No trecho das margens do rio, as fundações foram originalmente previstas em estacas de aço de seção I, porém posteriormente foram alteradas para estacas escavadas de grande diâmetro com fluido estabilizante – decisão de engenharia que posteriormente será objeto de outra publicação científica sobre o caso.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





3 Sobre a necessidade da Prova de Carga Estática no Apoio Central

O item 9.2.2.1 da atual norma de fundações, NBR 6122 (ABNT, 2022) indica para o caso de Obras de Arte Especiais (OAEs) a obrigatoriedade de realização de provas de carga caso a mesma exceda três linhas de apoio (quatro vãos) ou tenha ao menos um de seus vãos superior a 30m. No caso da ponte do Araguaia, há 32 apoios (33 vãos) e maior vão com comprimento livre igual a 104 metros, de modo que por esse critério já se enquadra a necessidade dos ensaios.

De igual modo, como a obra possui um total de 424 estacas, o número mínimo de PCEs em obrigatoriedade de execução conforme a norma supramencionada seria de quatro testes (ainda sob a possibilidade de substituição de até três desses por ensaios de carregamento dinâmico).

No entanto, em projeto foi indicado um critério de ensaios ainda mais rigoroso, devendo ser respeitada execução de:

- duas Provas de Carga Estáticas nos Apoios 09 e 24 (apoios em terra, às margens do rio);
- duas Provas de Carga Estáticas nos Apoios 16 e 17 (mastros centrais, no meio do rio); e
- ao menos quinze Ensaios de Carregamento Dinâmico, contendo testes nos Apoios: 04, 05, 07, 08, 09, 10, 16, 18, 23, 25, 27, 29 e 30.

Foram, portanto, necessárias PCEs nas fundações dos mastros (AP16 e AP17). Este artigo apresentará especificamente a PCE realizada no Apoio 16. Todo o processo de montagem da PCE no Apoio 17 é análogo, porém há uma diferença na imposição dos estágios de carregamento – assunto que será posteriormente explorado em outro artigo.

4 Desafios de Projeto da PCE

Para se realizar PCEs à compressão, usualmente se executam ao menos 4 estacas para funcionar à tração, ancoradas em um sistema de vigas metálicas – isso é chamado “sistema de reação”. No entanto, uma vez que se deseja ensaiar a estaca prova para até 2 vezes sua resistência admissível, cada uma das 4 reações contaria com uma carga máxima à tração igual a 0,5x a resistência admissível da estaca prova.

No presente caso, testando-se a estaca prova a 6000 kN, cada uma das 4 estacas de reação ficaria sujeita a 1500 kN de carregamento à tração. Esse esforço não seria problema estrutural às estacas, uma vez que se tratam de tubos de aço, porém trata-se de uma questão geotécnica – da necessidade de ao menos 1500 kN de resistência admissível à tração no contato estaca-solo.

Realizamos algumas verificações de capacidade de carga geotécnica das estacas à tração, seja adaptando métodos semi-empíricos como os de Aoki e Velloso (1975) e suas adaptações, como Laprovitera (1988), Benegas (1993) e Monteiro (1977), como também calculando pelas metodologias típicas e próprias para o cálculo de estacas à tração, como o método da Universidade de Grenoble (Martin, 1973) e de Meyerhof e Adams (1968) - métodos amplamente consagrados no meio técnico. As verificações conduziram para a necessidade de, ao menos 7 estacas de reação para suportar o esforço de tração no conjunto estaca-solo.

Por essa razão, idealizou-se a utilização do bloco de coroamento do apoio em questão e uso de todas as estacas do mesmo (exceto a estaca-prova) como sistema de reação. Como esse apoio conta com blocos de 15 estacas, haveria um total de 14 estacas de reação, somado ao peso próprio do bloco de coroamento (por volta de 4000 kN) – o que atende aos esforços necessários à PCE com considerável margem de segurança, sem risco algum de levantamento das estacas.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



O bloco deveria ser concretado normalmente e, em seguida, a estaca prova seria parcialmente cortada, realizar-se-ia a PCE e se reconstituiria a estaca (assuntos tratados mais adiante). Destacamos que foi necessária verificação e alteração das armaduras do bloco frente aos esforços atuantes durante a PCE e melhoria de seu comportamento à punção no trecho da estaca central.

A Figura 4 mostra um recorte do bloco de coroamento do apoio, com destaque à estaca-prova E8 que foi sujeitada à PCE (inclusive presença de uma sondagem mista no local). As demais estacas funcionaram como reação.

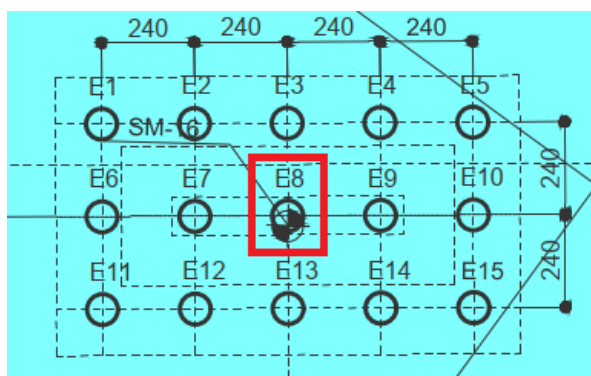


Figura 4. Fundações do Apoio 16 (lado de jusante do rio) com destaque à estaca ensaiada E8

5 Desafios de Execução e Montagem da PCE

Definido o conceito de projeto, a equipe de execução de obra ficou de agendar uma data para a realização do ensaio. No entanto, por questões de logística de obra e cronograma, a construção seguiu em ritmo acelerado de execução de blocos, pilares, tabuleiro da ponte e início dos estais sem antes se executar a PCE, como pode ser visto na Figura 5.



Figura 5. Estágio de construção da OAE, já avançado com pilares, tabuleiros e mastros construídos

Isso trouxe o benefício da carga permanente sobre as estaca teste e reações, porém uma complexidade adicional por agora haver uma grande estrutura em avanço sobre o bloco. Qualquer comportamento distorcional da PCE (ex. um lado do bloco subir mais que o outro) teria efeitos de segunda ordem significativos, podendo comprometer a OAE e até ocasionar um acidente grave. As Figuras 5 e 6 mostram o estágio da obra e local da PCE, sob a estrutura existente:



Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

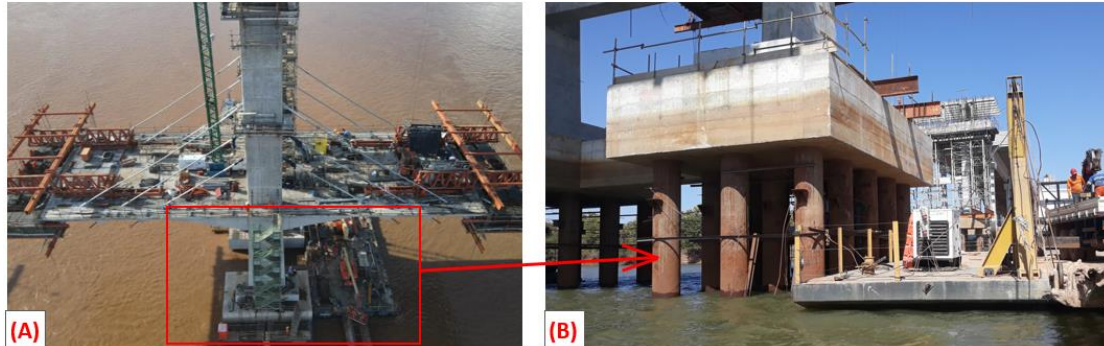


Figura 6. (A) estrutura em avanço do Apoio 16 e (B) destaque ao bloco a ensaiar, sob a OAE

Para um cuidado maior em relação a isso, indicamos a obrigatoriedade, durante todo o tempo da PCE, de leituras topográficas de deslocamento em pinos instalados nos quatro vértices do bloco. Durante toda a execução da prova de carga esses deslocamentos permaneceram zerados.

O processo de preparo da estaca começou pelo corte e abertura da camisa metálica (tubo). Em seguida, o concreto dessa região foi quebrado e removido junto com a estribagem. As barras longitudinais da armadura foram preservadas íntegras e mantidas expostas. Procedeu-se, então, com um pequeno corte no ponto intermediário da armadura longitudinal, abrindo-a em formato de “flor”, para que os macacos hidráulicos e pudessem ser inseridos, como mostrado na Figura 7.



Figura 7. (A) após corte da camisa e remoção do concreto, (B) leve abertura na armadura para possibilitar inserção dos equipamentos e (C) inserção das placas, macacos e célula de carga

Para garantir o contato e transferência de carga completos para a estaca, foram preparadas placas metálicas em forma de “engrenagem” para encaixe adequado no topo e na base do macaco hidráulico e plena transferência de carga sobre a maior área possível da seção da estaca sem interferência com barras longitudinais da armação.

Foram utilizados três macacos hidráulicos de até 2500 kN cada, totalizando força possível de até 7500 kN, com célula de carga de aferição até 6000 kN. Também foram acrescentadas vigas de referência fixas, com comprimento de 4,20 metros, para permitir fixação dos extensômetros digitais, com curso de 50mm e sensibilidade de até 0,01mm, bem como 4 relógios comparadores utilizados para a média da medição dos deslocamentos.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



6 Características da Estaca-Prova e Definições de Carregamento do Ensaio

A estaca ensaiada, a E8 do AP16 era cravada, de aço e seção tubular com 80cm de diâmetro (e 10,3mm de espessura de parede). O comprimento total da estaca é de 33,45cm, sendo 8,35cm na lâmina d'água e 25,10m efetivamente embutido em solo. Um trecho total dos 14,0m no topo da estaca foram concretados com gaiola de reforço de armação, conforme projetado.

A PCE teve carregamento adotado do tipo misto, conforme a NBR 16903 (ABNT, 2020). O ensaio foi previsto para até 6000 kN, dividido em 20 estágios de incremento de carga, sendo os 10 primeiros estágios mantidos até a estabilização de deslocamentos (até 3000 kN) e posteriormente, em carregamento rápido, 10 estágios até atingir a carga de 6000 kN. Na carga máxima, manteve-se o carregamento por um total de 2 horas. Após esse processo se realizou o descarregamento, em quatro estágios mantidos por 20min cada.

7 Execução do Ensaio e Resultado

O ensaio foi iniciado às 9:45 da manhã com o carregamento lento de 300 kN, estabilizando com 0,91mm de deslocamento e foi conduzido conforme roteiro elencado até atingimento dos 6000 kN, com deslocamento final médio de 38,01mm após duas horas de estabilização (às 21:00). Após descarregamento, o recalque residual medido foi de 24,92mm. A Figura 8 mostra o ensaio durante execução e estabilizado na carga máxima de 6000 kN:



Figura 8. (A) Etapas de carregamento da PCE e (B) estabilização na carga máxima de 6000 kN.

A curva Carga versus Recalque obtida está apresentada na Figura 9, com o trecho em azul mostrando os estágios lentos do ensaio e em verde, os rápidos, estabilização e descarregamento.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



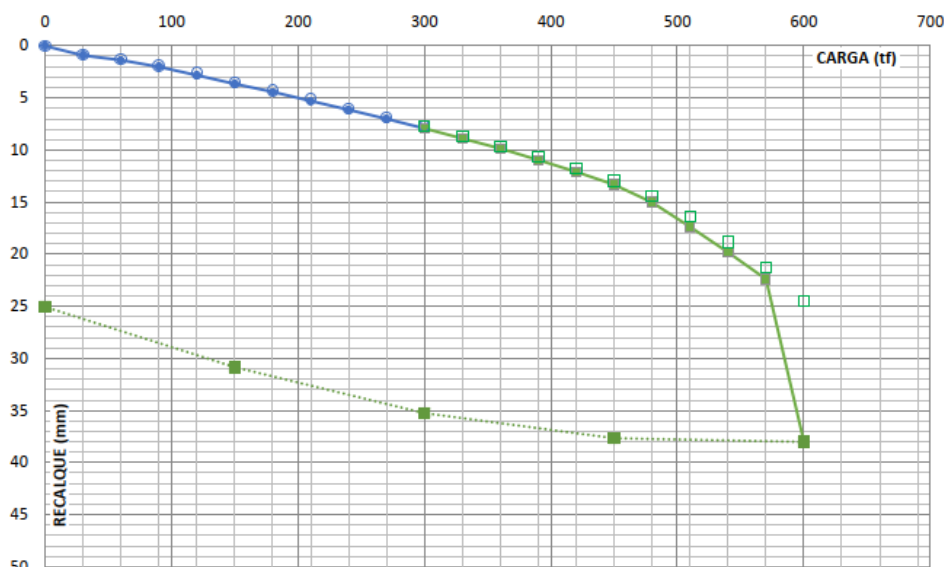


Figura 9. Curva Carga versus Recalque até 6000 kN do ensaio na E8 do Apoio 16

8 Recomposição da Estaca-Prova

Após a conclusão da Prova de Carga Estática, a estaca teste no centro do bloco de coroamento precisou passar por um processo de reconstrução e re-solidarização ao bloco devido ao processo do ensaio, que necessitou remover a camisa metálica (tubo), quebrar o concreto local e cortar e abrir as armaduras.

O primeiro procedimento adotado para a reconstrução foi a reconstituição da armadura. Para isso, retornaram-se as barras longitudinais à posição original e foram lançadas barras de traspasse. Cada barra recebeu o reforço do traspasse e cordões de solda, de modo que toda a armadura no entorno teve sua função estrutural restituída. Na Figura 10 é possível visualizar as barras retornadas à suas posições originais e o traspasse soldado. A estribagem também foi reconstruída e espaçadores colocados para garantir o cobrimento em relação à camisa de aço.

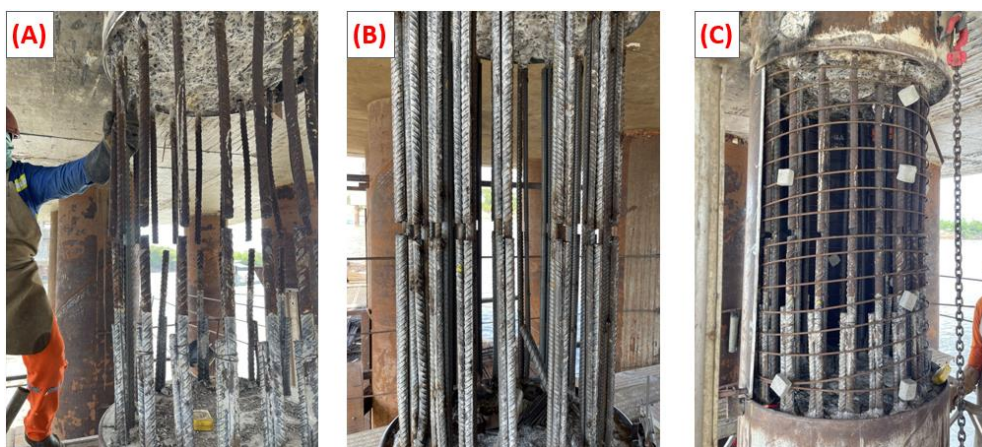


Figura 10. (A) Barras longitudinais retornadas à suas posições originais; (B) à barras de traspasse já soldadas, reconstituindo a armação e (C) estribagem refeita, com espaçadores de cobrimento.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Resolvida a armadura, foi necessário então recompor a camisa metálica. Não havia outra maneira a não ser por um novo segmento de camisa que fora montado em duas metades igualmente encaixadas e soldadas, conforme pode ser conferido na Figura 11A abaixo. Assim, cada uma de suas partes foi recolocada no local correto e soldada, de acordo com o que é apresentado nas Figuras 11B e 11C:



Figura 11. (A) Duas metades da camisa de aço a utilizar na recomposição, com (B) a primeira metade da camisa já soldada à estaca e (C) solda da segunda metade para fechamento do tubo de aço.

Após reconstrução da armadura e camisa, restava ainda re-concretar o segmento de estaca para reconstituí-la por completo. Assim, foram realizadas duas dois orifícios na parte superior do trecho de camisa soldado. Esses pontos objetivaram a injeção do concreto por meio de uma mangueira em um deles, enquanto que no outro há expurgo de material, até que o interior da camisa estivesse integralmente preenchido e livre de contaminação de concreto por materiais soltos ou estranhos. A Figura 12 mostra esse processo para a recomposição final da estaca teste.



Figura 12. (A) Aberturas com tubos criadas para injeção e expurgo de concreto e (B) momento da concretagem, com detalhe do expurgo saindo por um dos furos.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



9 Conclusões e Discussões Finais

A estaca que fora cravada mediante nossa consultoria de escolha de martelo, critérios de cravação e acompanhamento para as 6000 kN na ruptura apresentou comportamento condizente na Prova de Carga Estática.

Foi obtida carga resistente que atendeu ao fator de segurança igual à 2,0 em níveis de deslocamento esperados, especialmente em sua carga de trabalho (3000 kN; 7,1mm), tornando o resultado do ensaio plenamente satisfatório.

No entanto, acima disso, o presente artigo objetivou consolidar a relevância de um ensaio extremamente desafiador, em um cenário desfavorável e complicado quanto à execução, gerando uma Prova de Carga Estática inédita e de sucesso em todas as suas etapas executivas e resultado.

AGRADECIMENTOS

A **Solotechnique** agradece ao Consórcio **COMSA-Loctec-Enescil** e ao **DNIT** pela confiança depositada em **nossa Consultoria, Acompanhamento Técnico e responsabilização por todas as Fundações da Obra de Arte**. Estendemos agradecimentos à SETE Engenharia, por montou e seguiu o ensaio estritamente conforme todas as indicações de nossa Consultoria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020). *NBR 16903: Solo - Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. (1975). *An approximate method to estimate the bearing capacity of piles*. In: PAN AMERICAN CSMFE. *Proceedings*, Buenos Aires, v.1.
- BENEGAS, H. Q. (1993). *Previsões para a curva carga-recalque de estacas a partir de SPT*. Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- LAPROVITERA, H. (1988). *Reavaliação do método semi-empírico de previsão de capacidade de carga de estacas a partir de banco de dados*. Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 213p.
- MARTIN, D. (1973). *Calcul des pieux et fondations à dalle des pylônes de transport d'énergie électrique. Etude théorique et resultats d'essais en laboratoire et in-situ*. Anais do L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, v. 307-308, p. 105-130.
- MEYERHOF, G. G.; ADAMS, J. I. (1968) *The ultimate uplift capacity of foundations*. Canadian Geotechnical Journal, 10(1): p.64-70.
- MONTEIRO, P. F. (1997). *Capacidade de carga de estacas – método Aoki-Velloso*, Relatório interno da empresa Estacas Franki Ltda.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

