



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

ENSAIO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO COM CÉLULA BI-DIRECIONAL - CASOS DE OBRA

- **Celso Nogueira Corrêa**

Engenheiro Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, celso@zfsolos.com.br



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

ABNT NBR 6122:2022 - SEGURANÇA NAS FUNDAÇÕES

6.2.1.2 Segurança de fundações profundas

6.2.1.2.2 Resistência determinada por provas de carga estáticas executadas na fase de elaboração ou adequação do projeto

- ✓ Para que se obtenha a carga admissível ou a força resistente de cálculo de estacas, a partir de provas de carga, é necessário que:
 - a) a(s) prova(s) de carga seja(m) estática(s);
 - b) a(s) prova(s) de carga seja(m) especificada(s) na fase de projeto e executadas no início da obra, de modo que o projeto possa ser adequado para as demais estacas;
 - c) a(s) prova(s) de carga seja(m) levada(s) até uma carga no mínimo duas vezes a carga admissível prevista em projeto.



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

ABNT NBR 6122:2022 - DESEMPENHO DAS FUNDAÇÕES

9. Desempenho das Fundações

9.2.2 Fundação em estacas

9.2.2.1 Quantidade de provas de carga

- ✓ É obrigatória a execução de provas de carga estáticas de desempenho, no decorrer do estaqueamento, em obras que tiverem um número de estacas superior ao valor especificado na coluna (B) da Tabela 6;
- ✓ Quando o limite de exigência de provas de carga de desempenho for atingido, deve-se realizar provas em 1% do total de estacas da obra, considerando todas as edificações (mesmo com tipos diferentes de estaca), incluindo periferia e anexos, exceto estacas usadas apenas em contenções ou muros de fechamento. O cálculo de 1% deve ser feito com uma casa decimal e arredondado para o inteiro mais próximo, sempre arredondando o dígito 5 para cima. As provas de carga já realizadas conforme o item 6.2.1.2.2 podem ser incluídas nesse total;



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

ABNT NBR 6122:2022 - DESEMPENHO DAS FUNDAÇÕES

9.2.2 Fundação em estacas

9.2.2.1 Quantidade de provas de carga

- ✓ Após atingir o limite de exigência de provas de carga (Tabela 6), deve ser feita pelo menos uma prova de carga estática ensaio de carregamento dinâmico em estacas da edificação principal;
- ✓ Independentemente da quantidade de estacas, é obrigatória a prova de carga se forem utilizadas tensões de trabalho acima dos valores da coluna (A) da Tabela 6.

| Tipo de estaca | A | B |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Tensão de trabalho abaixo da qual não serão obrigatórias provas de carga, desde que o número de estacas da obra seja inferior à coluna (B), em MPa ^{b c d} | Número total de estacas da obra a partir do qual serão obrigatórias provas de carga ^{b c d} |
| Pré-moldada ^a | 7,0 | 100 |
| Madeira | – | 100 |
| Aço | $0,5 f_{yk}$ | 100 |
| Hélice, hélice de deslocamento, hélice com trado segmentado (monitoradas) | 5,0 | 100 |
| Estacas escavadas com ou sem fluido $\varnothing \geq 70$ cm | 5,0 | 75 |
| Raiz ^e | $\leq \varnothing 310$ mm = 15,0 | 75 |
| | $\geq \varnothing 400$ mm = 13,0 | |
| Microestaca ^e | 15,0 | 75 |
| Trado vazado segmentado | 5,0 | 50 |
| Franki | 7,0 | 100 |
| Escavadas sem fluido $\varnothing < 70$ cm | 4,0 | 100 |
| Strauss | 4,0 | 100 |

Tabela 6 – Quantidade de provas de carga.



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

ABNT NBR 6122:2022 - DESEMPENHO DAS FUNDAÇÕES

9.2.2.3 Quantidade de ensaios dinâmicos

- ✓ Para comprovação de desempenho, as provas de carga estáticas à compressão podem ser substituídas por ensaios de carregamento dinâmico, conforme ABNT NBR 13208, na proporção de cinco ensaios de carregamento dinâmico para cada prova de carga estática, conforme ABNT NBR 12131;



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

ABNT NBR 6122:2022 - DESEMPENHO DAS FUNDAÇÕES

9.2.2.4 Casos particulares

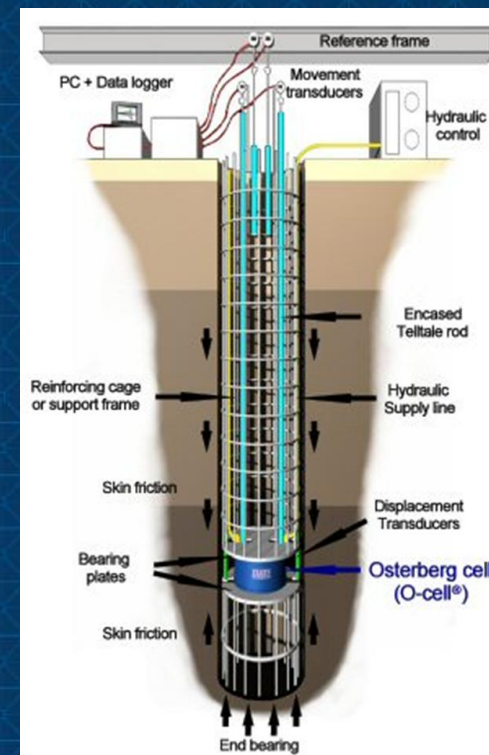
- ✓ A critério do projetista, são aceitos outros ensaios de carga, por exemplo, **teste bidirecional**, devendo-se levar em conta as particularidades de sua interpretação para o estabelecimento da quantidade e avaliação de desempenho;

SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

ENSAIO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO COM CÉLULA BI-DIRECIONAL

DESCRIÇÃO DO ENSAIO

- ✓ O ensaio com células expansivas hidrodinâmicas é realizado com as células instaladas no interior da estaca durante sua execução. A expansão das células, gera deslocamentos medidos no fuste e na ponta, fazendo com que um trecho reaja contra o outro, ambos solicitados à compressão. A profundidade de instalação é definida buscando o equilíbrio entre as resistências do fuste (atrito lateral e peso próprio acima das células) e da ponta (atrito lateral abaixo e resistência de ponta);
- ✓ Sugestão: trecho superior e trecho inferior no lugar de fuste e ponta.



Esquema de ensaio.

SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

ENSAIO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO COM CÉLULA BI-DIRECIONAL

DESCRIÇÃO DO ENSAIO

- ✓ Os deslocamentos da ponta são medidos através dos teltales instalados na face inferior das células expansivas, enquanto os deslocamentos do fuste são medidos através de deflectômetros no topo da estaca e dos teltales instalados na face superior das células.



Posicionamentos das células (estacão).



Posicionamentos das células (barrete).



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASOS DE OBRA

ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

- ✓ A rigor, como as células expansivas não ficam exatamente na ponta da estaca, ainda há contribuição da parcela de carga de atrito lateral no trecho abaixo da célula;
- ✓ Para descontar a parcela de carga de atrito lateral do resultado do ensaio aplicou-se o método da Rigidez de Décourt (1996) no trecho abaixo da célula. O método utiliza a rigidez que é a razão entre a carga aplicada e seu deslocamento. Com isso, segundo o autor, é possível identificar facilmente dois domínios: domínio de atrito lateral e domínio de ponta;



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASOS DE OBRA

CRITÉRIO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

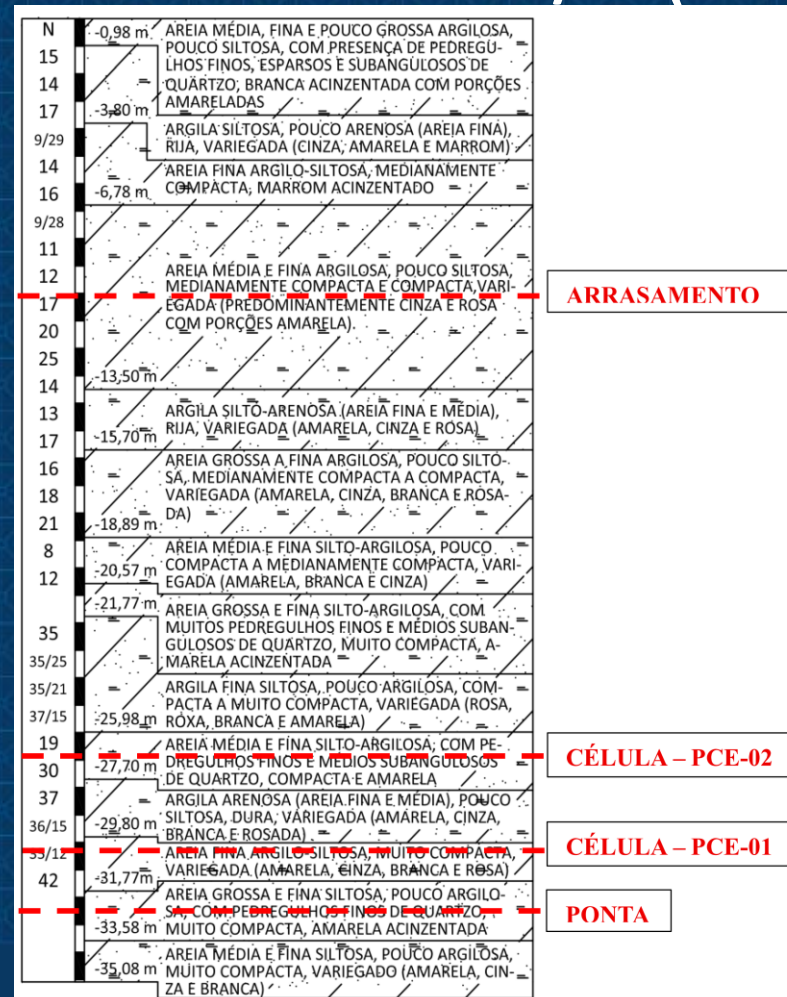
- ✓ O gráfico de Rigidez deve ser plotado com os valores de rigidez em ordenadas e os valores de carga em abscissas.
- ✓ Para definir os pontos dos domínios adotou-se a correlação que abrange o maior número de pontos e o maior valor de R^2 .

SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA I – ZONA OESTE DE SÃO PAULO/SP (ESTACÃO)

DESCRIÇÃO DO SUBSOLO

- ✓ Subsolo constituído por areias medianamente compactas e argilas rijas a duras, com nível d'água no topo da sondagem. Até 20 m predomínio de areia argilosa ($N_{SPT} = 16$) com intercalações de argila siltosa; de 20 m a 28 m ocorre areia silto-argilosa ($N_{SPT} = 40$), passando, a partir dessa profundidade, a material de granulometria similar e $NSPT > 50$.

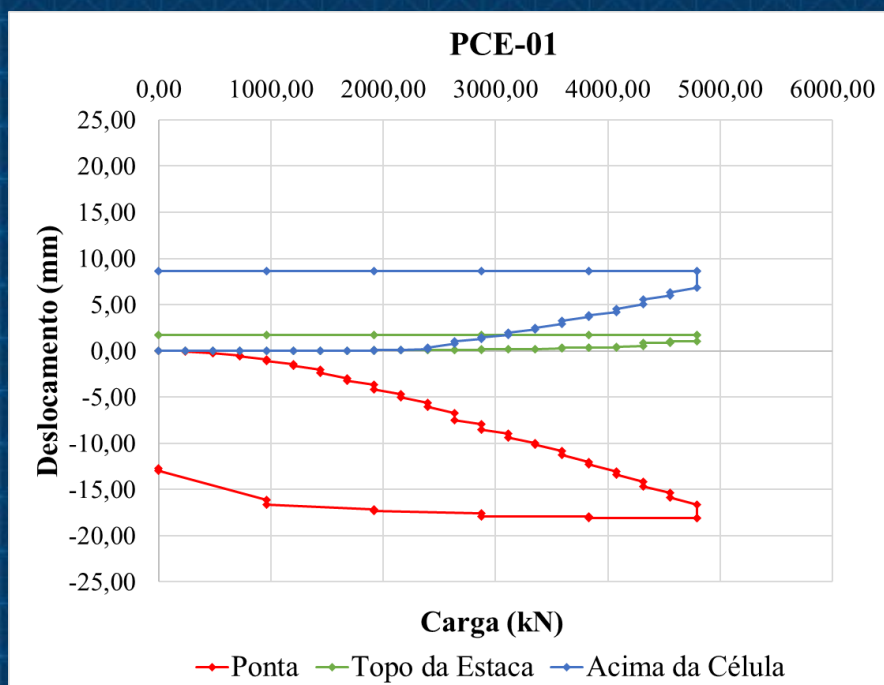


Sondagem de referência.

SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA I – ZONA OESTE DE SÃO PAULO/SP (ESTACÃO)

RESULTADOS DO ENSAIO



Carga x deslocamento.

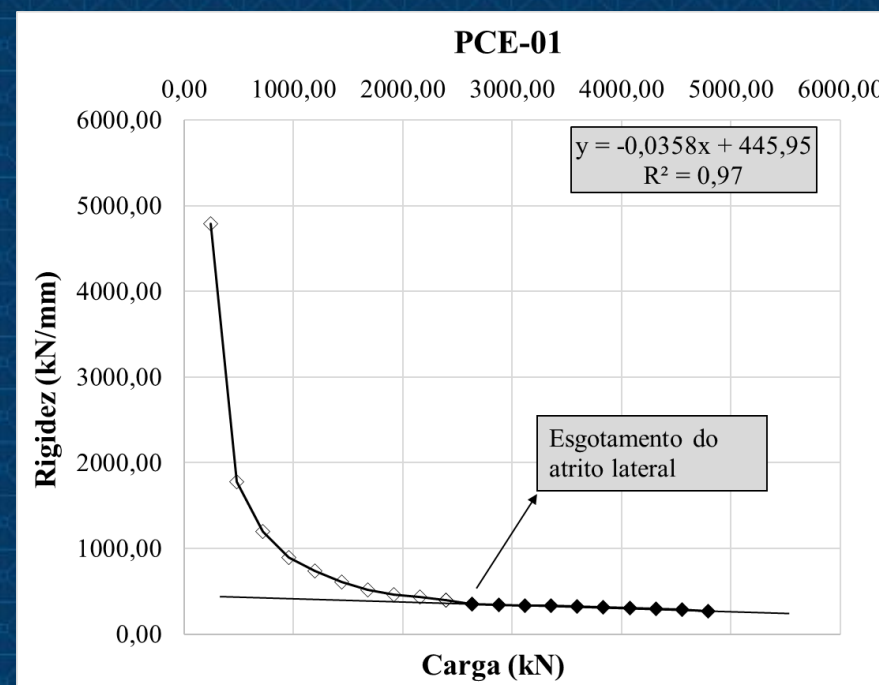
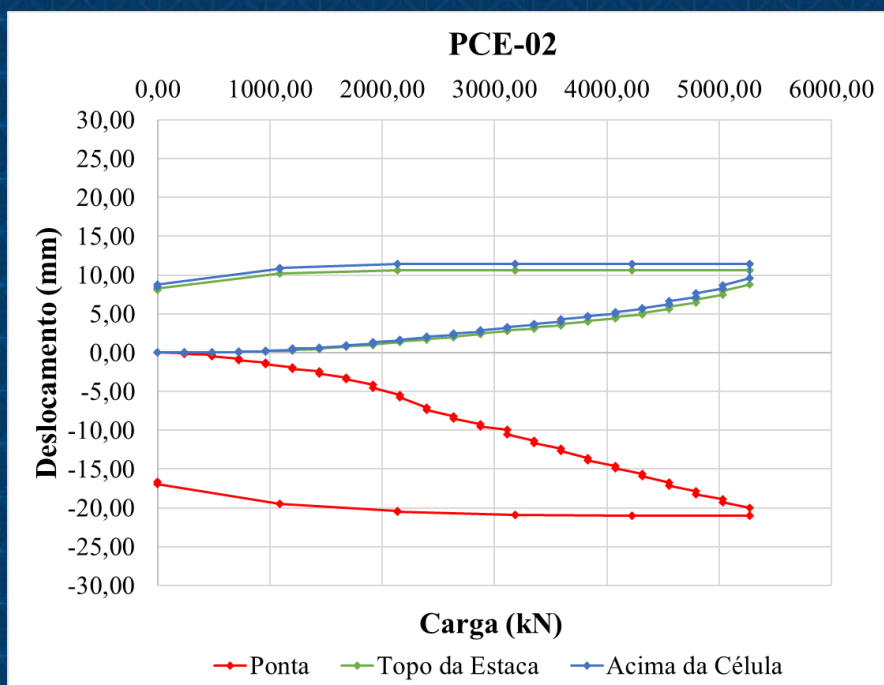


Gráfico de Rigidez.

SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA I – ZONA OESTE DE SÃO PAULO/SP (ESTACÃO)

RESULTADOS DO ENSAIO



Carga x deslocamento.

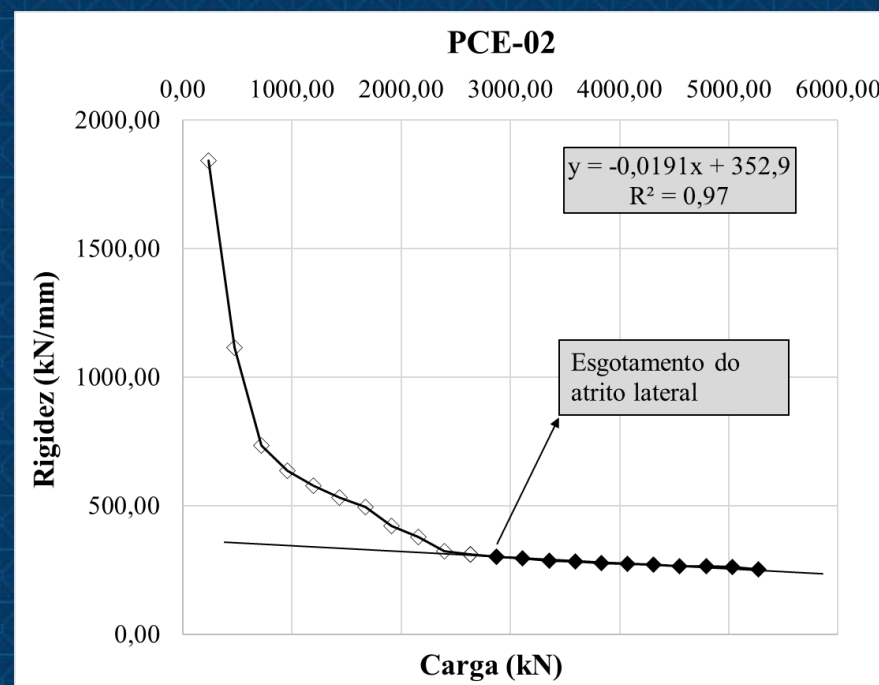


Gráfico de Rigidez.



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA I – ZONA OESTE DE SÃO PAULO/SP (ESTACÃO)

| Ensaio | Carga máxima de ensaio (kN) | Atrito Lateral inferior (kN) | Atrito lateral (kN) | Carga de Ponta (kN) | Ponta (%) |
|--------|-----------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|-----------|
| PCE-01 | 9.583,2 | 2.395,80 | 7.187,4 | 2.395,80 | ~25 |
| PCE-02 | 10.541,52 | 2.635,38 | 7.906,09 | 2.635,43 | ~25 |

CONCLUSÕES - CASO DE OBRA I

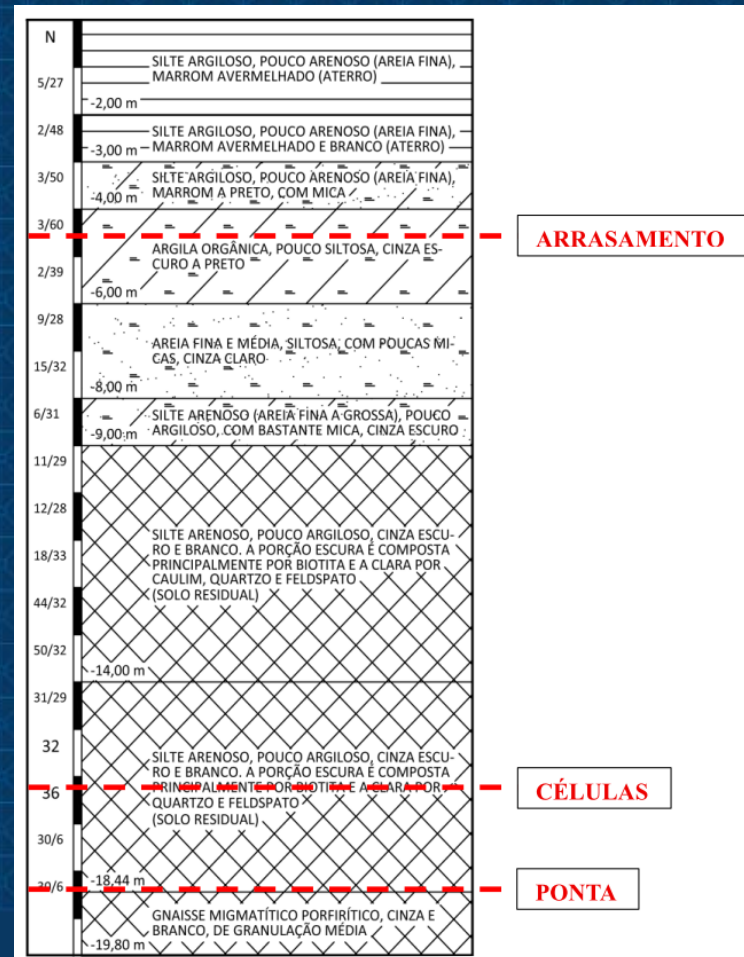
- ✓ Apesar de 3 m a mais de fuste no trecho inferior, a estaca do PCE-02 não apresentou ganho significativo de atrito lateral.
- ✓ Nos dois ensaios, a resistência de ponta é ~25% da carga total aplicada e o atrito lateral ~75%, confirmando as previsões dos métodos semi-empíricos.
- ✓ Nesse caso as expectativas foram atendidas e não houve necessidade de intervenção na execução das estacas.

SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA II – ZONA SUL DE SÃO PAULO/SP (BARRETE)

DESCRIÇÃO DO SUBSOLO

- ✓ Subsolo composto por aterros e sedimentos aluvionais, com siltes e areias pouco compactas nas camadas superficiais e argila orgânica mole a 4 m. Nível d'água a 5,6 m. Até 9 m, predominam siltes e areias siltosas de N_{SPT} 1 a 6 golpes; de 9 m a 18 m, solo residual silto-arenoso com N_{SPT} até 60 golpes; abaixo de 18 m, rocha extremamente alterada A4, pouco coerente.



Sondagem de referência.



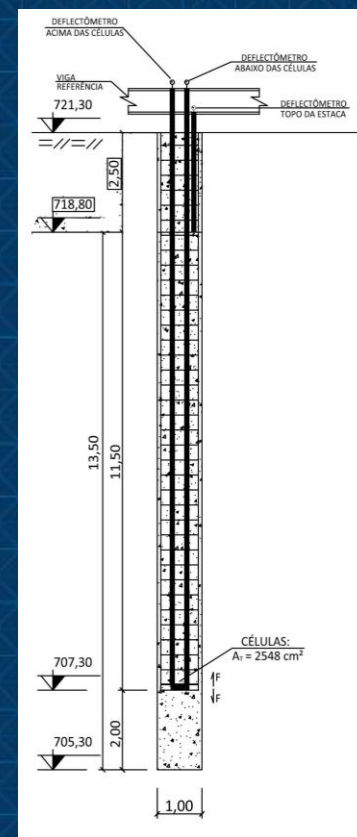
SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA II – ZONA SUL DE SÃO PAULO/SP (BARRETE)

CARACTERÍSTICAS GERAIS E RESULTADOS DO ENSAIO

- ✓ Estaca barrete com fluído estabilizante.

| Ensaio | Secção (cm) | Carga de ensaio (kN) | Carga máxima de ensaio (kN) | Estágios | Deslocameto Máximo (mm) | | | Deslocameto Residual (mm) | | |
|--------|-------------|----------------------|-----------------------------|----------|-------------------------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|
| | | | | | Topo da Estaca | Fuste | Ponta | Topo da Estaca | Fuste | Ponta |
| PCE-01 | 100x250 | 26.000 | 26.906,88 | 22 | 3,99 | 4,04 | 14,66 | 3 | 3,01 | 10,57 |

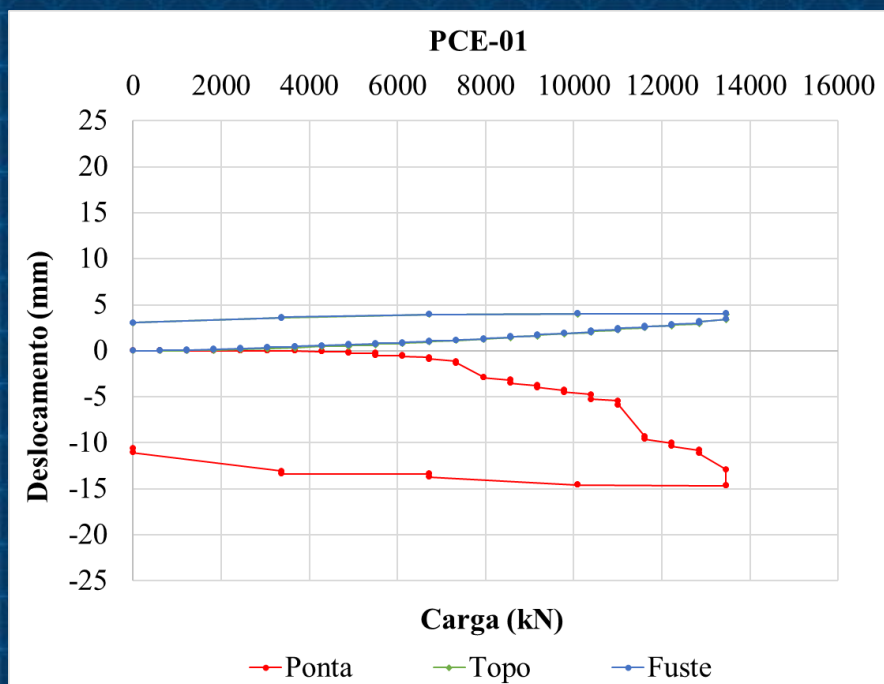


PCE-01.

SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA II – ZONA SUL DE SÃO PAULO/SP (BARRETE)

RESULTADOS DO ENSAIO



Carga x deslocamento.

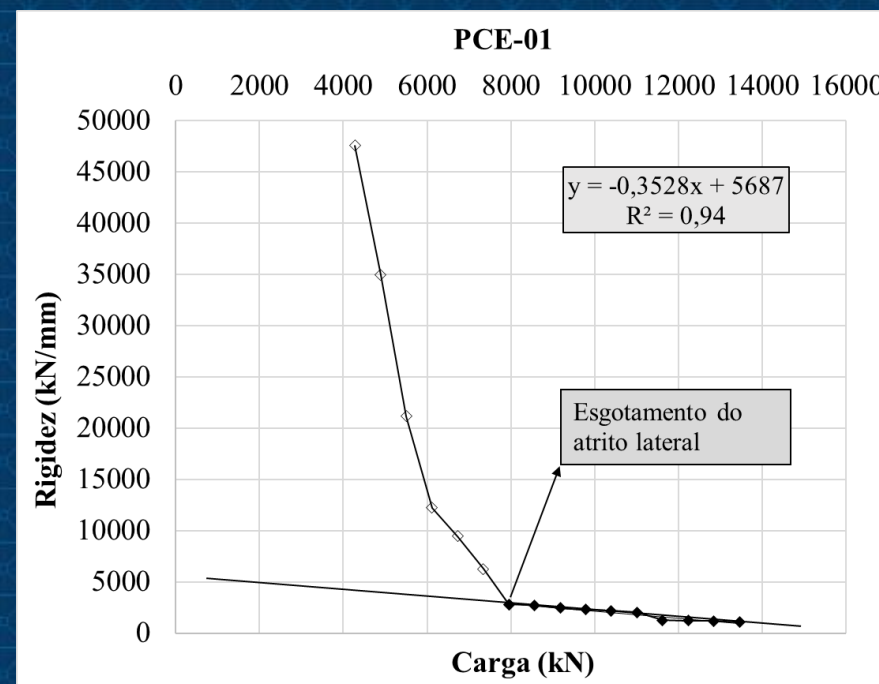


Gráfico de Rigidez.



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA II – ZONA SUL DE SÃO PAULO/SP (BARRETE)

| Ensaio | Carga máxima de ensaio (kN) | Atrito Lateral inferior (kN) | Atrito lateral (kN) | Carga de Ponta (kN) | Ponta (%) |
|--------|-----------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|-----------|
| PCE-01 | 26.906,88 | 7.949,76 | 21.403,2 | 5.503,68 | ~21 |

CONCLUSÕES - CASO DE OBRA II

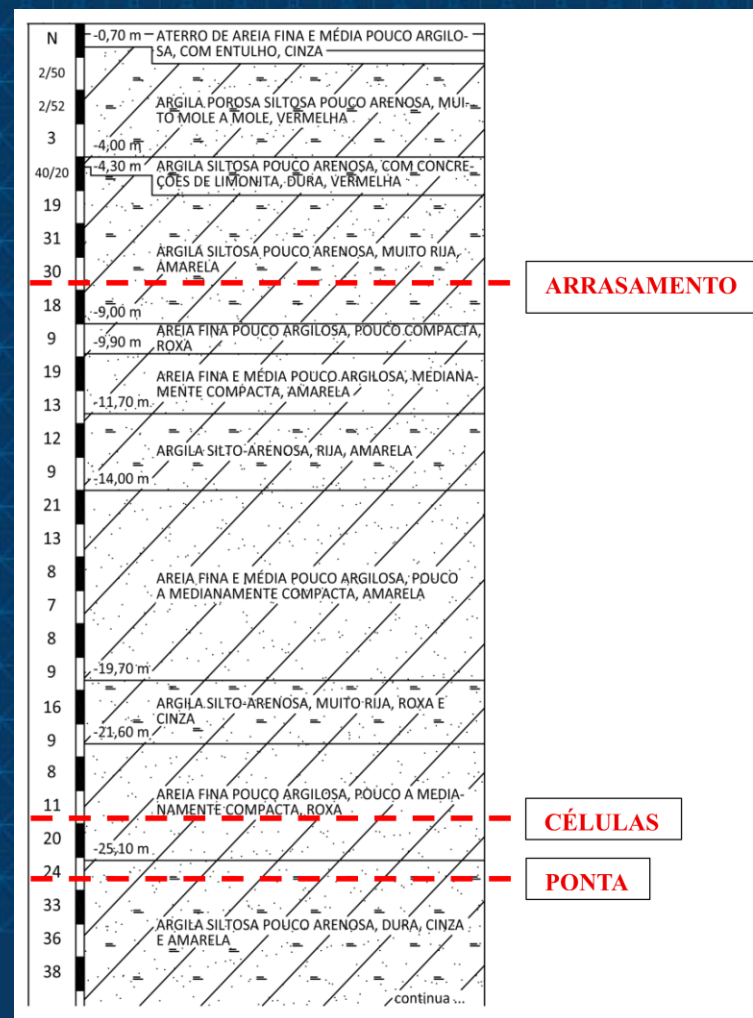
- ✓ A carga de atrito lateral no trecho inferior é bastante significativa, cerca de 40% do atrito lateral total da estaca.
- ✓ É uma estaca para 13000 kN de carga de trabalho, e portanto a carga será transmitida totalmente por atrito lateral.
- ✓ Nesse caso a ponta representa 21% da carga total aplicada no ensaio.
- ✓ Não houve necessidade de intervenção na execução das estacas dessa obra.

SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA III – ZONA SUL DE SÃO PAULO/SP (ESTACÃO)

DESCRIÇÃO DO SUBSOLO

- ✓ Subsolo constituído por argilas orgânicas moles a muito moles, de coloração preta ou cinza-escura, e camadas arenosas fofas a compactas, por vezes com matéria orgânica ou cascalho, de coloração amarela a cinza-escura. Nível d'água a 8,1 m. Até 10 m, predominam areias silto-argilosas (N_{SPT} 3–20); abaixo, areias argilosas intercaladas com argila silto-arenosa com N_{SPT} superiores a 30 golpes.



Sondagem de referência.



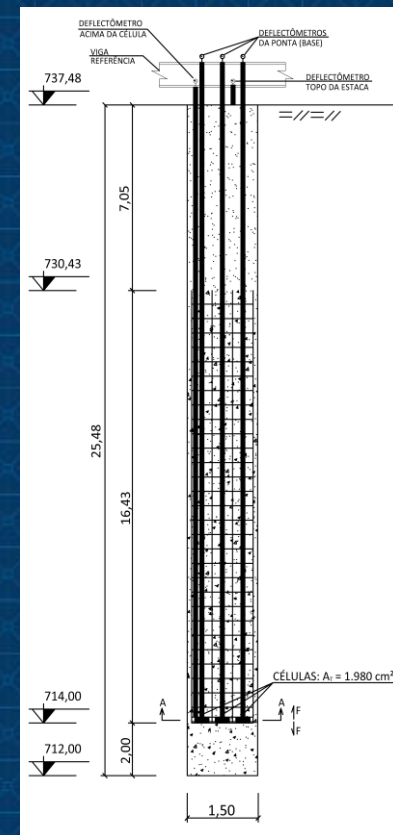
SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA III – ZONA OESTE DE SÃO PAULO/SP (ESTACÃO)

CARACTERÍSTICAS GERAIS E RESULTADOS DO ENSAIO

- ✓ Estaca escavada de grande diâmetro com fluído estabilizante.

| Ensaio | Ø (cm) | Carga de ensaio (kN) | Carga máxima de ensaio (kN) | Estágios | Deslocameto Máximo (mm) | | | Deslocameto Residual (mm) | | |
|--------|-----------|-------------------------|-----------------------------------|----------|-------------------------|-------|--------|---------------------------|-------|--------|
| | | | | | Topo da Estaca | Fuste | Ponta | Topo da Estaca | Fuste | Ponta |
| PCE-01 | 150 | 17.660 | 17.661,6 | 20 | 0,3 | 1,11 | 153,09 | 0,3 | 1,11 | 148,73 |

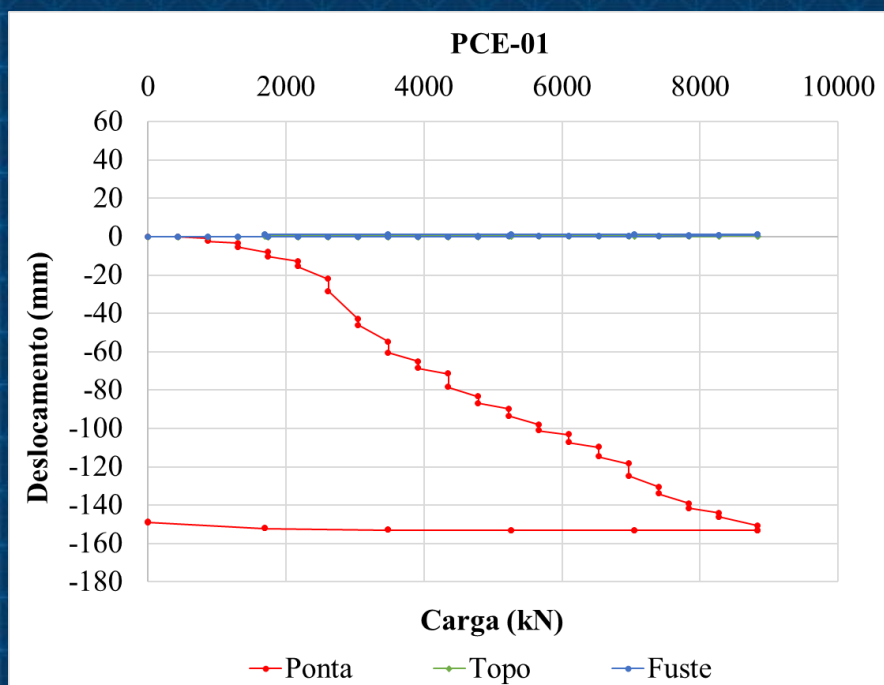


PCE-01.

SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA III – ZONA OESTE DE SÃO PAULO/SP (ESTACÃO)

RESULTADOS DO ENSAIO



Carga x deslocamento.

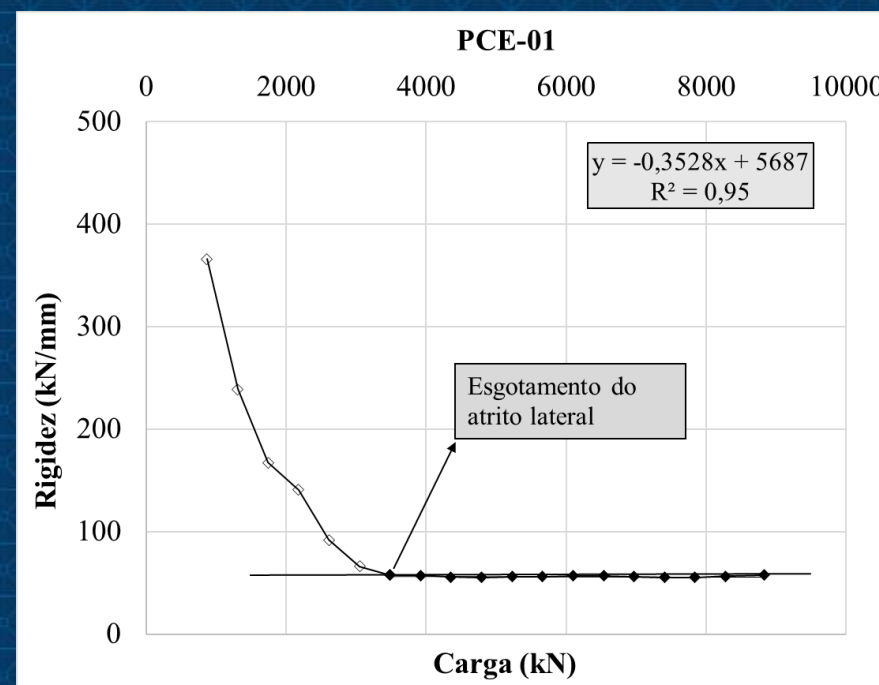


Gráfico de Rigidez.



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

CASO DE OBRA III – ZONA OESTE DE SÃO PAULO/SP (ESTACÃO)

| Ensaio | Carga máxima de ensaio (kN) | Atrito Lateral inferior (kN) | Atrito lateral (kN) | Carga de Ponta (kN) | Ponta (%) |
|--------|-----------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|-----------|
| PCE-01 | 17.661,6 | 3.484,8 | 12.315,6 | 5.346 | ~31 |

CONCLUSÕES - CASO DE OBRA III

- ✓ Com grande deslocamento de ponta, a preocupação nessa obra foi a limpeza da ponta das estacas.
- ✓ A verificação da carga por atrito lateral total, com a ajuda do método de rigidez indicou que apenas com o atrito lateral, o FS seria de ~1,5. Abaixo do previsto mas ainda aceitável para as estacas executadas na obra até o momento de execução do ensaio.
- ✓ A partir daí, foram tomadas diversas providencias executivas para melhorar a limpeza de ponta das estacas, tais como tempo de limpeza com bomba e redução do tempo de espera do concreto.
- ✓ Mesmo com grande deslocamento a carga de ponta na estaca atingiu ~30% do total da carga aplicada.



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ Décourt, L. A. (1996). A Ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. In: III Seminário de Engenharia de Fundações Epeciais e Geotecnica, SEFE III. São Paulo. Anais... ABEF e ABMS, v.1, p. 215-224.
- ✓ Mucheti, A. S.; Falconi, F. F.; Santos, M. S.; Maset, V. L.; Junior, W. F. (2023). Análise de Ensaio Bidirecionais em Estacas Escavadas na Região Metropolitana de São Paulo. In: X Seminário de Engenharia de Fundações Epeciais e Geotecnica, SEFE X. São Paulo. Anais... ABEF.
- ✓ Sousa, W. S.; Barros, B. A.; Falconi, F. F.; Resende, A. (2023). Carga de Ponta em Estacas Escavadas - Análise de Ensaio Bidirecionais com Estacas Apoiadas em Solo. In: X Seminário de Engenharia de Fundações Epeciais e Geotecnica, SEFE X. São Paulo. Anais... ABEF.
- ✓ Célula Expansiva Hidrodinâmica – Uma Nova Maneira de Executar Provas de Carga – Pedro Elisio C.A.F. da Silva - 1983.
- ✓ F.Massad – Equivalent Down Load Curves From Bidirectional Tests
- ✓ Dada, T.L.; Resende, A.S.; Massad, F, (2019). Análise de Ensaio Bidirecionais com Medida de Encurtamento Elástico em Estacas Hélice Contínua.



SIMPÓSIO PROVA DE CARGA E ENSAIOS DINÂMICOS

MUITO OBRIGADO !