



AVALIAÇÃO DO ATRITO LATERAL DE ESTACAS COMPRIMIDAS POR MEIO DO EMPREGO DE DADOS DE ESTACAS DE REAÇÃO UTILIZADAS EM PROVAS DE CARGA

João Ignácio Godoy Souza*, Paulo José Rocha de Albuquerque

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Departamento de Infraestrutura e Ambiente

Financiamento: CNPq

Palavras-chave: Prova de carga, Instrumentação, Transferência de carga.

Introdução

Nos últimos anos a engenharia geotécnica experimentou um grande avanço nos processos de projeto e técnicas na execução de fundações profundas, principalmente quando se trata do aumento das cargas solicitantes.

De modo a obter mais subsídios para o dimensionamento das fundações, vem sendo adotada a prova de carga instrumentada, em que se destaca a utilização dos extensômetros elétricos de resistência, chamados de strain-gages.

Com a instrumentação é possível determinar a transferência de carga ao longo da profundidade da estaca, bem como separar as parcelas de atrito lateral e da carga de ponta. Entretanto, esta técnica é fornecida por poucas empresas e pode ser inviável para alguns tipos de estacas.

Diante disso, este trabalho se baseou na metodologia abordada por Oliveira et. al (2018), aplicando-a em provas de carga estática instrumentadas, possibilitando uma análise comparativa.

Objetivos

Estudar as relações da resistência lateral e carga de ponta de estacas moldadas *in loco* por meio do uso de metodologia expedita de cálculo que tem por base resultados de dados de estacas tracionadas, utilizadas como reação de provas de carga à compressão.

Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento da metodologia, elaborada em planilha eletrônica, foram utilizadas duas provas de carga instrumentadas. Além disso, foi necessário compreensão do mecanismo de capacidade de carga de estacas, execução de provas de carga estática e da instrumentação em profundidade, assim como o processamento dos dados das curvas carga vs deslocamento de compressão e tração advindos dos ensaios.

Estacas

As estacas são fundações profundas, podendo ser pré-fabricadas ou moldadas *in loco*. São empregadas quando o solo apresenta alta resistência somente nas camadas mais profundas do terreno, podendo chegar a profundidades de 5 a 50 m. A Tabela 1 apresenta as dimensões das estacas, do tipo escavada, que foram realizadas provas de carga estática.

A capacidade de carga (Q_U) de uma estaca é dada pela soma das parcelas de atrito lateral ao longo do fuste (Q_L) e a carga de ponta (Q_P):

$$Q_U = Q_L + Q_P \quad (1)$$

A Figura 1 ilustra a mobilização do atrito lateral e carga de ponta durante a aplicação de uma carga axial (Q) aplicada no topo de uma estaca.

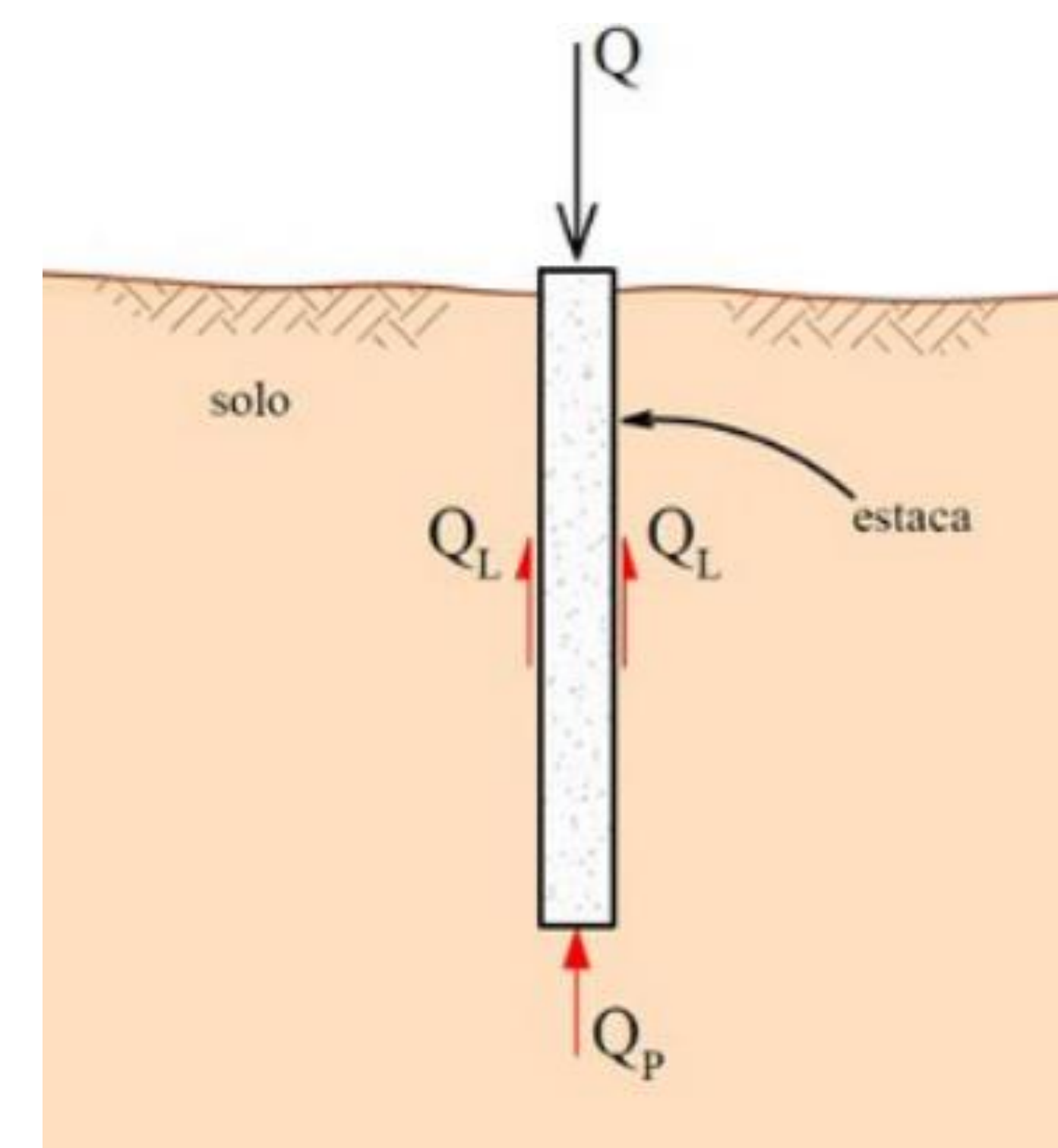


Figura 1 – Mobilização do atrito lateral e carga de ponta. (Fonte: ALBUQUERQUE, 2019)

Tabela 1 – Dados das estacas ensaiadas

PCE	Ø (m)	L (m)	$Q_{trabalho}$ (kN)
1	0,40	16,00	500
2	0,60	17,00	1050

Prova de Carga Estática

As provas de carga estática (PCE) utilizaram carregamento do tipo lento com compressão vertical, seguindo as prescrições da ABNT NBR 12131:2006. De acordo com a norma, o carregamento lento se baseia em estágios iguais e sucessivos, em que o incremento de carga não deve ser superior a 20% da carga de trabalho da estaca ensaiada e mantida até a estabilização dos deslocamentos, com tempo mínimo de 30 min. Ao atingir a carga máxima do ensaio, deve ser realizado monitoramento de até 12h, mantendo-se a carga, seguido do descarregamento em no mínimo quatro estágios com período mínimo de 15 min.

A Figura 2 mostra um registro fotográfico da PCE01 e a Figura 3 apresenta o corte do esquema de montagem da PCE02, que contou com 6 estacas de reação.



Figura 2 – Configuração da PCE01. (Fonte: Geoprova Engenharia Ensaios e Monitoramento)

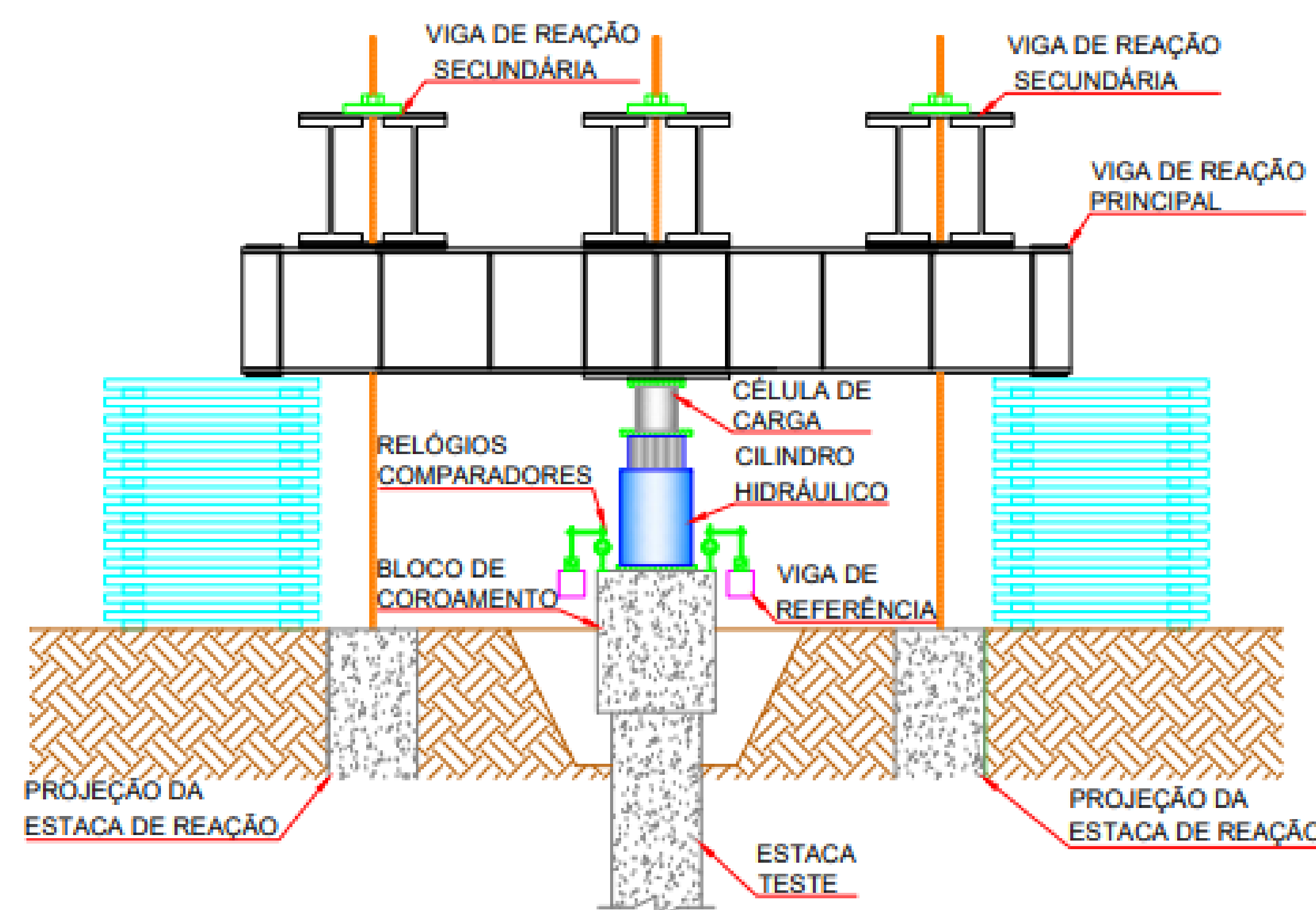


Figura 3 – Corte do esquema de montagem PCE02. (Fonte: Geoprova Engenharia Ensaios e Monitoramento)

Instrumentação em Profundidade

Atualmente, a forma mais simples e confiável para determinação do atrito lateral e carga de ponta em estacas que estão submetidas à compressão é a instrumentação do seu fuste por extensômetros elétricos de resistência, chamados de strain-gages.

Segundo Albuquerque (1996), o extensômetro é um elemento sensível que relaciona pequenas variações de dimensão com a variação de sua resistência elétrica. Isso é possível pois seu circuito é constituído por uma ponte de Wheatstone (Figura 4), que deve ser montada em ponte completa, ou seja, os quatro strain-gages ativos, eliminando os efeitos de temperatura e flexão do extensômetro.

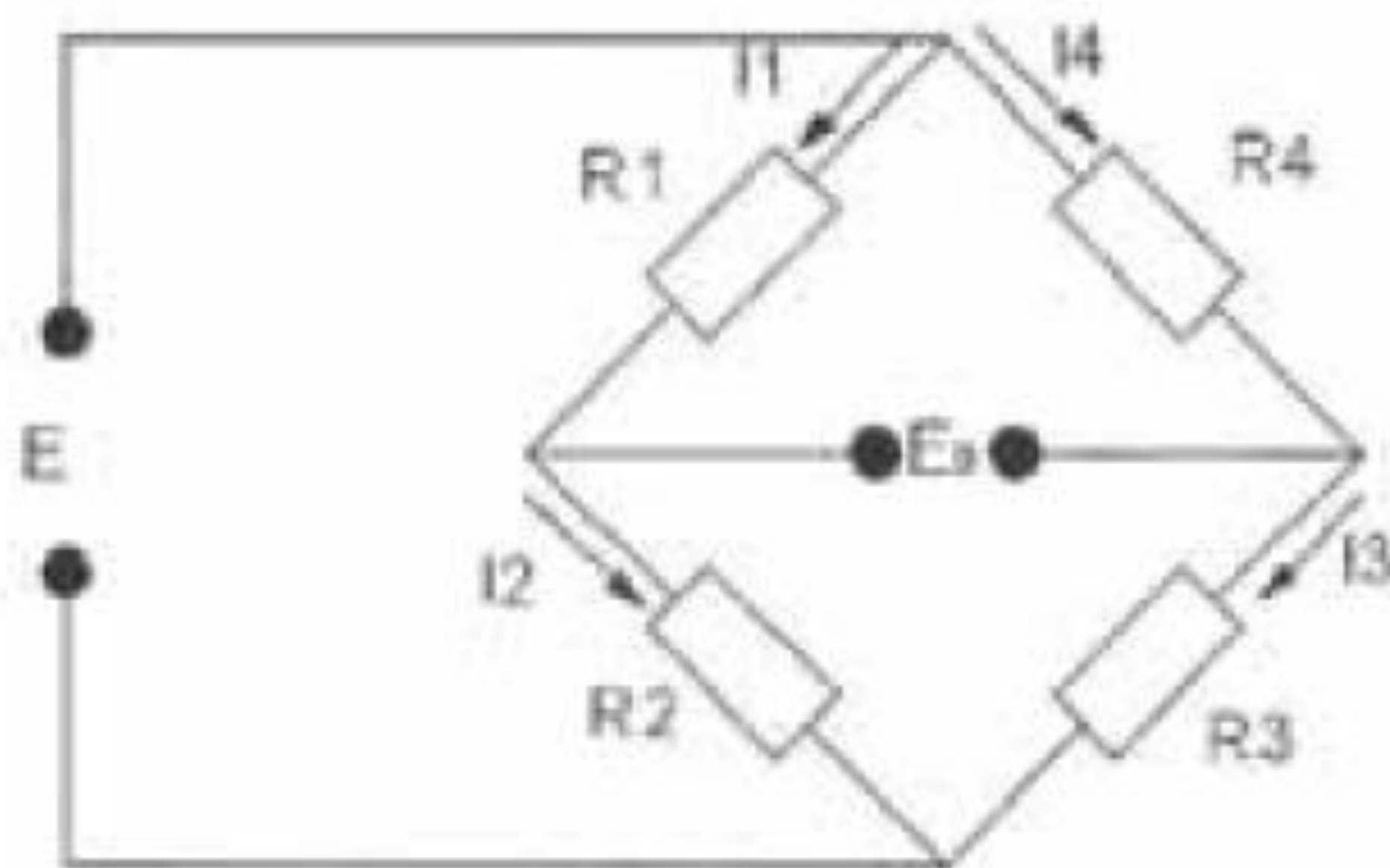


Figura 4 – Ponte de Wheatstone. (Fonte: ALBUQUERQUE, 2017)

A força (P) que atua em cada seção instrumentada é determinada pela deformação específica (ϵ) medida pelos strain-gages. Utilizando-se a Lei de Hooke, e conhecendo a área transversal (A) e o módulo de Young (E) da estaca é possível determinar a força na seção:

$$P = E \cdot A \cdot \epsilon \quad (2)$$

Análises

A análise consistiu em estimar as parcelas de atrito lateral e carga de ponta a partir da curva carga vs deslocamento das estacas de reação de uma prova de carga convencional sem o uso da instrumentação. A Figura 5 apresenta as curvas carga vs deslocamento de compressão da PCE01 e PCE02. É possível notar nítida ruptura geotécnica da PCE01. A carga de tração é a carga de compressão aplicada na estaca teste dividida pelo número de estacas de reação, subtraindo-se seu peso próprio.

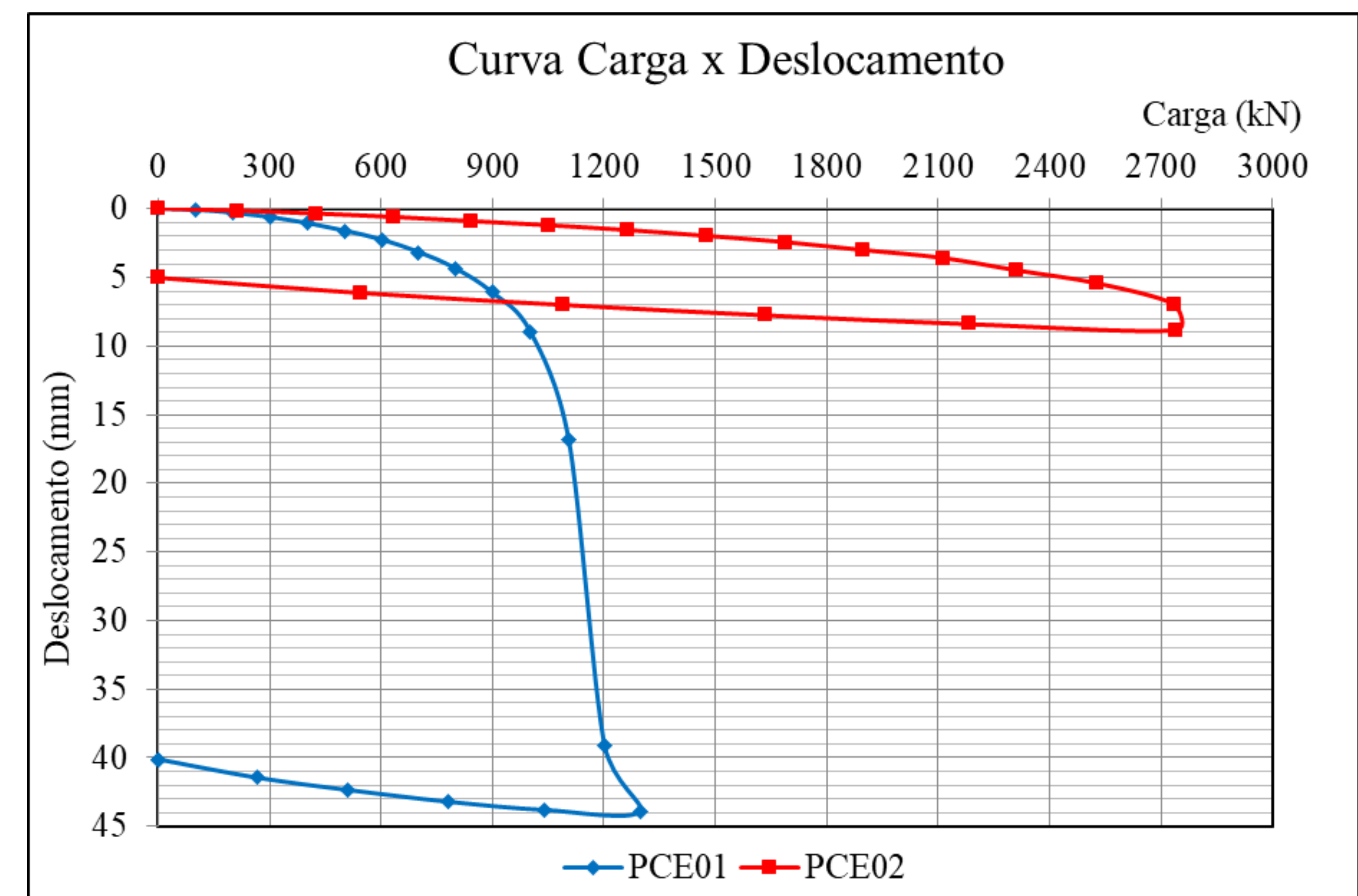


Figura 5 – Gráfico curvas carga vs deslocamento da PCE01 e PCE02

Extrapolação por Chin (1970)

Utilizando-se o método de extrapolação de carga de Chin (1970), dado pelas seguintes equações:

$$Q = \frac{r}{a+b \cdot r} \quad (3)$$

$$Q_{rup} = 1/b \quad (4)$$

$$E_i = 1/a \quad (5)$$

Em que Q : Carga aplicada; r : deslocamento; b : coeficiente angular da reta obtida pelo gráfico r vs r/Q ; a : interseção da ordenada; Q_{rup} : carga de ruptura e E_i : módulo de deformação inicial. Dessa forma, é possível determinar as curvas extrapoladas de compressão ($V_{extr.}$) e tração ($T_{extr.}$), substituindo-as em Q .

Fator λ

É definido um fator λ como sendo a relação entre $T_{extr.}$ e $V_{extr.}$:

$$\lambda = T_{extr.} / V_{extr.} \quad (6)$$

Paschoalin Filho (2008) apresenta em seu trabalho os valores sugeridos na literatura desta relação, variando de 0,53 e 1,00, sendo 0,85 para estacas escavadas.

Simulação da Resistência Lateral

Substituindo-se $V_{extr.}$ pela resistência lateral simulada (RL_{sim}) na expressão (6):

$$RL_{sim} = T_{extr.} / \lambda \quad (7)$$

Com os valores da curva extrapolada de tração e variando-se o valor do fator λ , pode-se ajustar os primeiros pontos da curva de resistência lateral simulada com os pontos iniciais da curva carga vs deslocamento de compressão, apresentadas na Figura 5. Após este processo, têm-se os valores de resistência lateral no fuste da estaca.

Finalização

Portanto, os valores extrapolados de compressão ($V_{extr.}$) são referentes à carga mobilizada total, os valores de RL_{sim} correspondem à estimativa do atrito lateral, assim, pela equação (1), a carga de ponta é a diferença entre $V_{extr.}$ e RL_{sim} , temos que:

$$Q_U = V_{extr.}$$

$$Q_L = RL_{sim}$$

$$Q_P = V_{extr.} - RL_{sim}$$



Resultados

Para o fator λ , ajustando-se os primeiros pontos da curva RL_{sim} com os da curva carga vs deslocamento, foram determinados os seguintes valores para a PCE01, $\lambda = 1,00$ e para a PCE02, $\lambda = 0,80$, estando ambos dentro do intervalo dos valores expostos por Paschoalin Filho (2008)

A Tabela 2 e Tabela 3 apresentam os valores obtidos nas instrumentações, respectivamente, da PCE01 e PCE02, nos estágios iniciais, intermediários e finais de carregamento.

Tabela 2 – Dados obtidos na instrumentação e estimados pelo método PCE01

Estágio	Análise PCE01					
	Carga de Ponta		Atrito Lateral		Carga Total	
	Instr. (kN)	Método (kN)	Instr. (kN)	Método (kN)	Instr. (kN)	Método (kN)
1	1	0	102	53	103	48
2	5	0	194	224	199	210
6	28	19	568	776	596	795
7	36	37	659	880	695	917
8	44	50	739	943	783	992
12	92	108	1104	1164	1196	1272
13	98	110	1118	1168	1217	1278

Tabela 3 – Dados obtidos na instrumentação e estimados pelo método PCE02

Estágio	Análise PCE02					
	Carga de Ponta		Atrito Lateral		Carga Total	
	Instr. (kN)	Método (kN)	Instr. (kN)	Método (kN)	Instr. (kN)	Método (kN)
1	20	0	179	141	200	116
2	42	0	374	432	416	379
6	146	0	1109	928	1256	919
7	174	0	1279	928	1454	919
8	204	146	1482	1343	1686	1489
12	300	536	2214	1837	2514	2373
13	328	626	2433	1915	2761	2541

A Figura 6 e Figura 7 mostram, as relações entre os valores estimados pela metodologia e os medidos na instrumentação durante os estágios de carregamento, respectivamente, da PCE01 e PCE02. Foi considerada uma tolerância de $\pm 20\%$ para análise. Nota-se que na PCE01 os valores estimados pelo método são próximos dos resultados da instrumentação apenas nos estágios finais de carregamento, devido à proximidade da carga última.

Na PCE02 os valores estimados da carga de ponta apresentaram aproximações destoantes no início e final do carregamento. Isso ocorreu pois a PCE02 não atingiu a ruptura geotécnica, assim, a extrapolação por Chin (1970) não foi representativa.

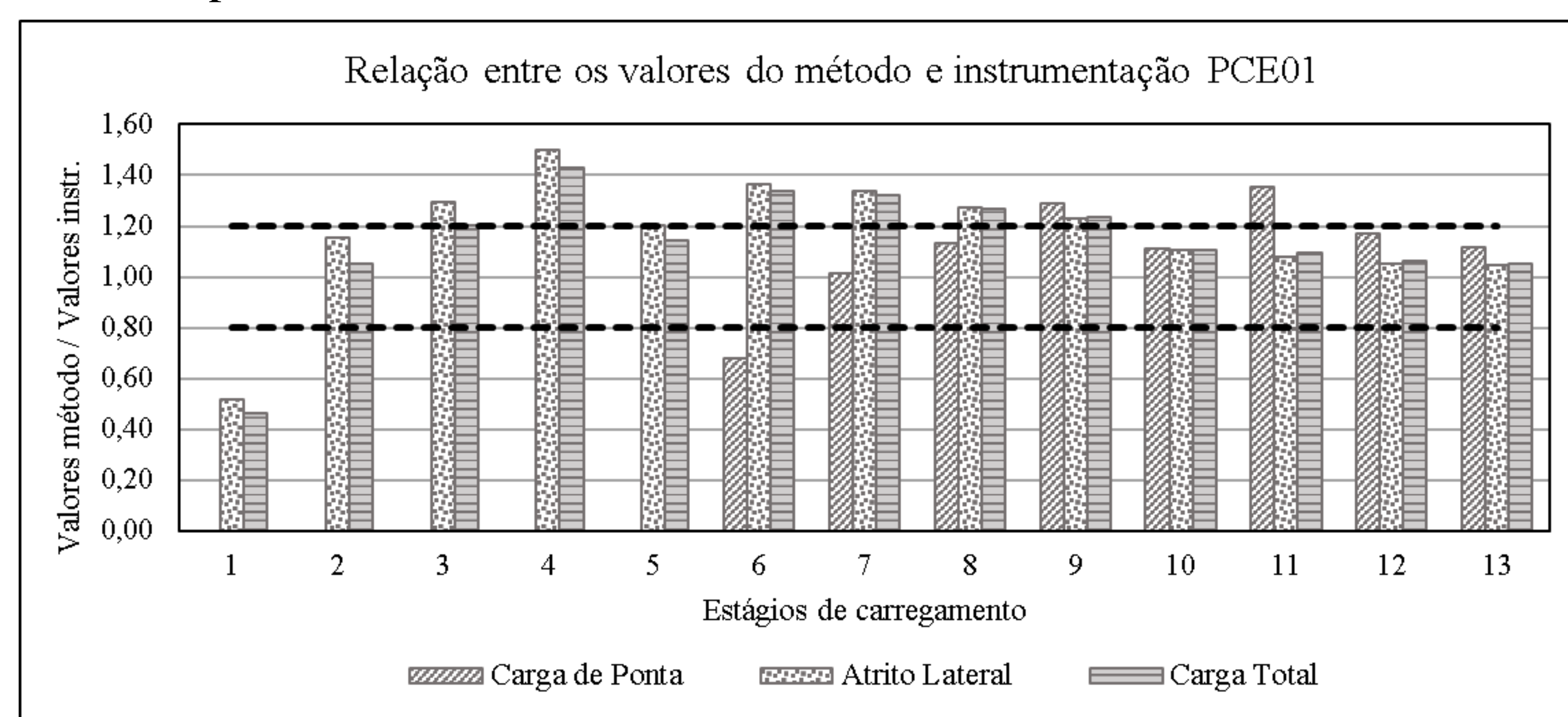


Figura 6 – Relação dos valores estimados pelo método e medidos pela instrumentação da PCE01

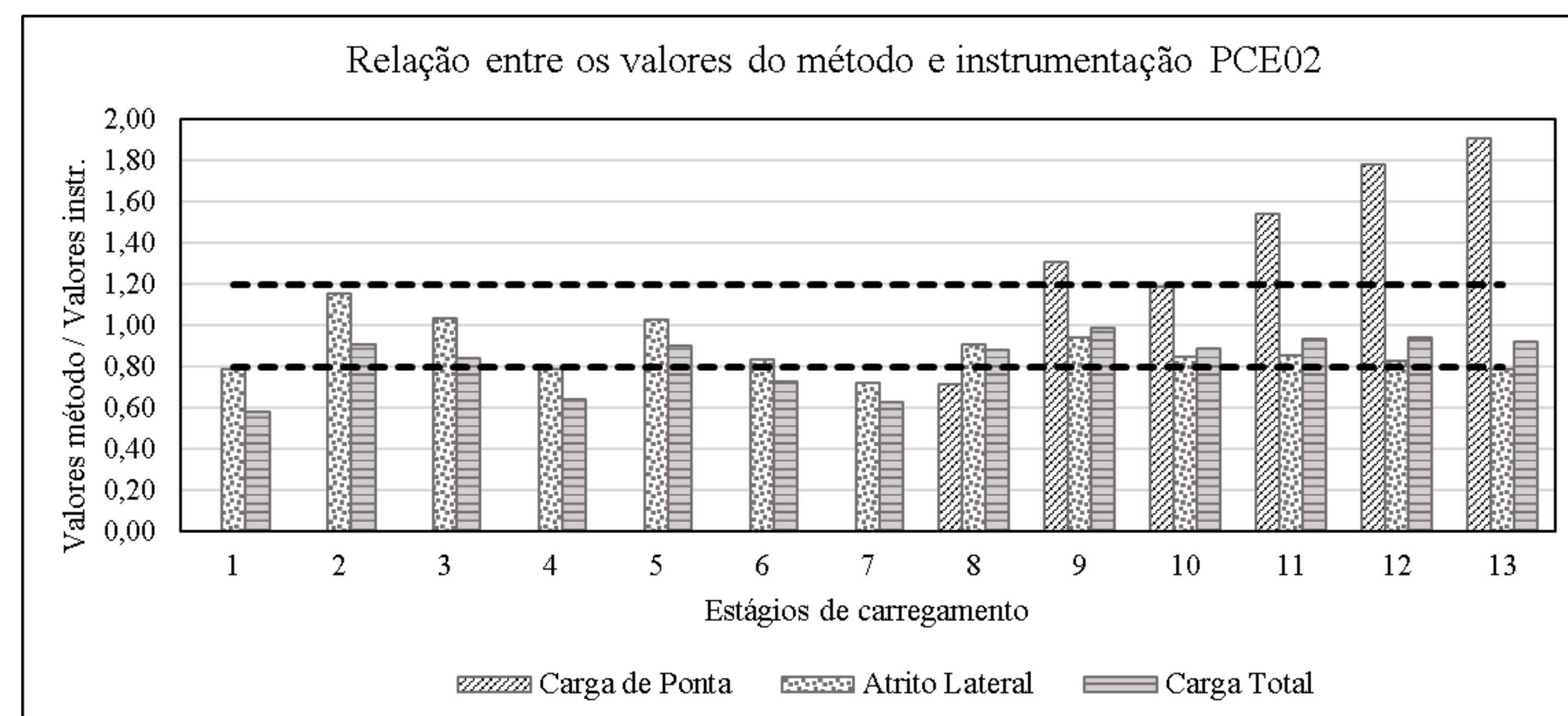


Figura 7 – Relação dos valores estimados pelo método e medidos pela instrumentação da PCE02

Discussão e Conclusão

Por meio das análises foi constatada a importância de se extrapolar com acurácia a curva de ruptura da estaca de reação.

Os resultados mais condizentes foram da PCE01, porém, apenas nos estágios finais, devido à estaca teste ter atingido a carga de ruptura geotécnica durante o ensaio. As estimativas da carga de ponta da PCE02 se mostraram discrepantes, não alcançando os resultados desejados. Dessa forma, é possível inferir que as análises apresentaram boas estimativas quando há ruptura geotécnica da estaca teste, corroborando o fator λ , relação de carga de tração e compressão, proposto por Oliveira et al. (2018).

Para estudos futuros, recomenda-se realizar análises com maior número de provas de carga estática instrumentadas em profundidade que tiveram ruptura geotécnica da estaca teste, além de utilizar outros métodos de extrapolação da carga de ruptura. Também é ideal obter dados relevantes das estacas de reação, como monitoramento do deslocamento por meio de deflectômetros.

Agradecimentos

O autor agradece ao PIBIC/CNPq pelo fomento à pesquisa, ao orientador Prof. Dr. Paulo J. R. de Albuquerque pelo apoio e prontidão para tirar dúvidas, ao Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão pelo auxílio no desenvolvimento das análises e à empresa Geoprova Engenharia Ensaios e Monitoramento Ltda. por fornecer os dados das provas de carga estática instrumentadas analisados neste trabalho.

¹ALBUQUERQUE, P.J.R. *Análise do comportamento de estaca pré-moldada de pequeno diâmetro, instrumentada, em solo residual de diabásio de Campinas*. 1996. 170p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

²ALBUQUERQUE, P.J.R. *Electrical resistance strain gages in instrumentation of deep foundations*. In: 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations. Santa Cruz de La Sierra, Bolívia, v. 1. p.1-16. 2017.

³ALBUQUERQUE, P.J.R. *Capacidade de Carga de Estacas*. 2019. 40p. Notas de aula – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2019.

⁴ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12131: Estacas – Prova de Carga Estática – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 8p.

⁵CHIN, K. F. (1970). *Estimation of the Ultimate Load of Piles from Tests nor Carried to Failure*. 2nd Southeast Conference on Soil Engineering, Singapore, pp. 91-92.

⁶OLIVEIRA, P.E.S. et al. (2018). *Metodologia para obtenção da parcela do atrito a partir do sistema de reação em provas de carga estáticas*. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2018.

⁷PASCHOALIN FILHO, J.A. (2008). *Estudo do comportamento à tração axial de diferentes tipos de estacas em solo de diabásio da região de Campinas/SP*. Campinas, SP, 2008.