

## 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  
Graduando, Unicamp, Campinas, Brasil, joaoincaciogs@gmail.com

Alexandre Duarte Gusmão  
Professor doutor, UPE, Recife, Brasil, alexandreduarteagusmao@gmail.com

Paulo José Rocha de Albuquerque  
Professor doutor, Unicamp, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

Guilherme Soler Varela da Silva  
Diretor, Geoprova Engenharia, Ensaios e Monitoramento, Campinas, Brasil, guilherme@geoprova.com.br

**RESUMO:** Atualmente, a comunidade geotécnica vem utilizando provas de carga instrumentadas para determinar de forma confiável a transferência de carga ao longo do fuste, bem como no desenvolvimento de metodologias que possibilitem separar o atrito lateral e carga de ponta de uma prova de carga sem o uso da instrumentação. Nesse sentido, o presente trabalho complementa os estudos de Oliveira et al. (2018), através da análise de provas de carga estática instrumentadas. Em suma, esta análise emprega valores de deslocamento das estacas de reação e cargas de ruptura extrapoladas pelo método de Chin (1970), correlacionadas por um fator  $\lambda$ . Dessa forma, para a verificação dos resultados foram utilizados valores obtidos de duas provas de carga estática instrumentadas e comparados com os valores estimados pela metodologia. Os resultados evidenciaram que a PCE01, que atingiu a ruptura geotécnica, obteve valores semelhantes à instrumentação, enquanto a PCE02 resultou em valores discrepantes de carga de ponta. A partir disso, foi possível inferir que as análises apresentaram boas estimativas quando há ruptura geotécnica da estaca teste. Para estudos futuros, recomenda-se realizar análises de ensaios instrumentados que tiveram ruptura geotécnica da estaca teste, além de apresentarem dados de deslocamento das estacas de reação por meio de deflectômetros.

**PALAVRAS-CHAVE:** Prova de carga, Instrumentação, Transferência de carga, Estacas.

**ABSTRACT:** Nowadays, the geotechnical community has been using instrumented load tests to reliably determine the transfer load along the pile shaft, as well as in the development of methodologies in which they allow to separate side friction and tip resistance of a load test without the use of instrumentation. In this respect, the present paper complements the studies by Oliveira et al. (2018), through the analyses of instrumented static load tests. In short, this analysis uses values of reaction piles displacement and extrapolated failure load by the method proposed by Chin (1970), correlated by a factor  $\lambda$ . Thus, for the verification of the results, values obtained from two instrumented static load tests were used and compared with the values estimated by the method. The results highlighted that PCE01, which reached geotechnical failure, obtained values like instrumentation, while PCE02 resulted in discrepant values of tip resistance. From here onwards, it was possible to infer that the analyses presented good estimates when there is geotechnical failure of the test piles. For future studies, it is recommended to perform analyses of instrumented static load test that had geotechnical failure of test piles, as well as having reaction piles data, such as monitoring the displacement by means of deflectometers.

**KEYWORDS:** Load test, Instrumentation, Transfer load, Piles.

## 1 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 a parcela do atrito lateral e da carga de ponta. Entretanto, esta técnica é fornecida por poucas empresas e pode ser inviável para alguns tipos de estacas.

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, que deve ser montada em ponte completa, ou seja, os quatro strain-gages ativos, eliminando efeitos causados por sua flexão e variação de temperatura.

A força ( $P$ ) que atua em cada seção instrumentada é determinada pela deformação específica ( $\varepsilon$ ) medida pelos strain-gages. Utilizando 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.

$$P = E \cdot A \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Atualmente, a comunidade geotécnica vem desenvolvendo metodologias para estimar o atrito lateral e a carga de ponta a partir da curva carga vs deslocamento de uma prova de carga estática convencional, ou seja, sem que a estaca tenha sido instrumentada.

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.

## 2 Prova de Carga

As provas de carga estática (PCE) utilizaram carregamento do tipo lento com compressão vertical, seguindo as prescrições da ABNT NBR 12131/2006. Consistiram em provas de carga de projeto, sendo instrumentadas em três níveis ao longo do fuste.

A montagem dos ensaios se consistiu em bomba hidráulica, cilindro hidráulico e célula de carga para o sistema de aplicação de carga, todos calibrados e certificados. Para o sistema de reação foram empregadas vigas de reação e armação adicional integral de monobarra de tirante nas estacas de reação. As leituras de deslocamento da estaca teste foram realizadas por meio de deflectômetros e vigas de referência. Para o monitoramento das estacas de reação foi utilizado nível óptico.

A Figura 1 mostra um registro fotográfico da PCE01 e a Figura 2 apresenta o corte do esquema de montagem da PCE02, que contou com 6 estacas de reação.

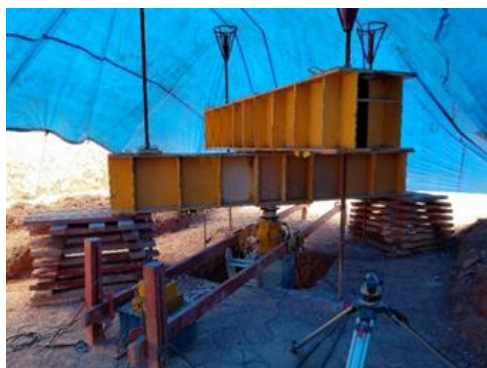


Figura 1. Configuração da PCE01.

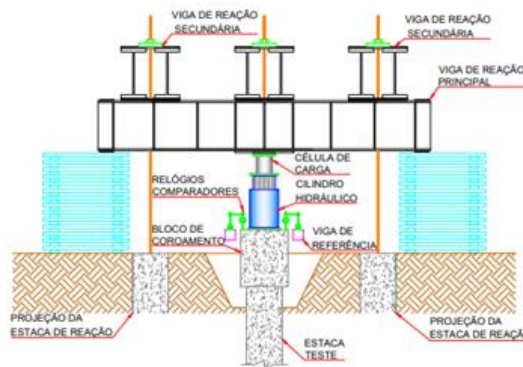


Figura 2. Corte do esquema de montagem da PCE02.

Referência: Geoprova Engenharia, Ensaios e Monitoramento.

## 2.1 Estacas Ensaaiadas

Na metodologia proposta por Oliveira et al. (2018) é utilizada a extrapolação da carga de ruptura por Van der Veen (1953), neste trabalho optou-se pelo método de Chin (1970). Nesse sentido, foram escolhidas uma estaca que sofreu ruptura geotécnica e outra que manteve integridade entre o sistema estaca – solo, possibilitando identificar a influência da extrapolação da carga de ruptura nos valores estimados pela metodologia. As estacas em que foram realizadas as provas de carga são do tipo escavada, suas principais características são apresentadas na Tabela 1.

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

As estacas foram instrumentadas em três níveis, a Tabela 2 mostra a profundidade dos sensores para cada estaca ensaiada. Em cada nível foram instalados dois sensores de força que consistiam em barras de aço CA-50, instrumentadas com strain-gages com resistência de 350  $\Omega$  em ponte completa. Todos foram protegidos de modo a ter isolamento elétrico, impermeabilização e proteção mecânica.

Tabela 2. Posicionamento dos sensores em relação à cota do topo da estaca.

PCE	1	2
Referência (m)	0,50	0,50
Fuste (m)	8,00	8,00
Ponta (m)	15,50	16,50

## 3 Metodologia

A análise consiste 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 seguir é descrita a adaptação da metodologia de Oliveira et al. (2018) pelo método de Chin (1970).

### 3.1 Extrapolação da curva carga vs deslocamento da estaca teste por Chin (1970)

Neste trabalho é empregado a extrapolação por Chin (1970), em que a região próxima da ruptura é hiperbólica, possibilitando o ajuste das curvas de tração e compressão.

$$Q = \frac{r}{a+b.r} \quad (2)$$

$$Q_{rup} = \frac{1}{b} \quad (3)$$

$$E_i = \frac{1}{a} \quad (4)$$

Em que  $Q$ : Carga aplicada;  $r$ : deslocamento;  $b$ : coeficiente angular da reta obtida pelo gráfico  $r$  vs  $r/Q$ ;  $a$ : intersecção da ordenada;  $Q_{rup}$ : carga de ruptura,  $E_i$ : módulo de deformação inicial.

Nesse sentido, é plotado o gráfico  $r$  vs  $r/Q$  com os dados da estaca de compressão da prova de carga, obtendo os coeficientes  $a$  e  $b$ . Pelas equações (3) e (4) é determinado  $Q_{rup}$  e  $E_i$  da estaca teste, a partir deles são considerados valores arbitrados de  $a$  e  $b$ , de forma a obter melhores ajustes no início da curva de extrapolação em relação a curva carga vs deslocamento.

Assim, os valores da curva extrapolada de compressão ( $V_{extr.}$ ) com os coeficientes arbitrados é dado por:

$$V_{extr.} = \frac{r}{a+b.r} \quad (5)$$

### 3.2 Extrapolação da curva carga vs deslocamento da estaca de reação por Chin (1970)

De forma análoga, é realizada a extrapolação da curva dos dados de tração, sendo a carga de tração ( $T_i$ ) igual a carga de compressão dividida pelo número de reações. Porém, é adotada uma carga de tração efetiva ( $T$ ) considerando o peso da estaca ( $W$ ).

$$T = T_i - W \quad (6)$$

$$W = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \gamma \cdot L \quad (7)$$

Em que  $D$ : diâmetro da estaca;  $\gamma$ : peso específico do concreto (adotado 24 kN/m<sup>3</sup>);  $L$ : comprimento da estaca.

Assim, os valores da curva extrapolada de tração ( $T_{extr.}$ ) com os coeficientes arbitrados é dado por:

$$T_{extr.} = \frac{r}{a+b.r} \quad (8)$$

### 3.3 Determinação do fator $\lambda$

De acordo com Oliveira et al. (2018) é definido um fator  $\lambda$  como sendo a relação entre a resistência lateral na tração e na compressão, ambos referentes às curvas extrapoladas. Dessa maneira, é plotada a variação do fator  $\lambda$  em um gráfico  $r$  vs  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{T_{extr.}}{V_{extr.}} \quad (9)$$

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

### 3.4 Simulação da resistência lateral corrigida por $\lambda$

Com os valores da curva de tração extrapolada, é possível obter os valores da resistência lateral simulada ( $RL_{sim}$ ), juntamente com a correção do fator  $\lambda$ , de acordo com a equação (9), substituindo  $V_{extr.}$  por  $RL_{sim}$ .

De acordo com Oliveira et al. (2018) muitos modelos sugerem que para deslocamentos da ordem de 1 a 2% do diâmetro da estaca, apenas há mobilização da resistência lateral, logo, foi adotado o  $\lambda$  que ajusta os primeiros pontos da curva da  $RL_{sim}$  com os pontos da curva carga vs deslocamento de compressão.

### 3.5 Parcela de atrito lateral, carga de ponta e carga total.

A estimativa do atrito lateral no fuste da estaca corresponde à  $RL_{sim}$ , a carga mobilizada total corresponde aos valores extrapolados de compressão. Dessa maneira, a diferença entre os valores extrapolados de compressão e os valores da  $RL_{sim}$  resultam na carga de ponta.

## 4 Resultados e Discussões

Durante as análises comparativas entre o método e a instrumentação foi constatado que na PCE01 a capacidade de carga da estaca é formada por 92 % de parcela de resistência lateral, conforme mostrado pelos

dados da instrumentação na Tabela 3. A capacidade de carga da estaca teste é da ordem de 1300 kN e a parcela lateral de 1200 kN e a ponta de 100 kN. A carga máxima das estacas de tração foi 325 kN (1300/4), menor que a resistência lateral na compressão (1200 kN). Portanto, isso só confirma que a carga de ruptura não foi atingida no ensaio de tração. Dessa forma, a extrapolação da carga de ruptura à tração e a simulação da resistência lateral ficam prejudicadas.

Para a correção, foram utilizadas as equações (3) e (9) e adotando  $Q_{rup}$  igual 1200 kN multiplicado pelo fator  $\lambda$ , determinando, assim, novo valor para o coeficiente arbitrado b da extrapolação por Chin (1970). O mesmo processo foi adotado para a PCE02.

#### 4.1 Curva carga vs deslocamento

A Figura 3 apresenta as curvas carga vs deslocamento obtidos nos ensaios de prova de carga estática. É possível notar a nítida ruptura geotécnica convencionada da PCE01, enquanto a PCE02 teve comportamento elasto-plástico.

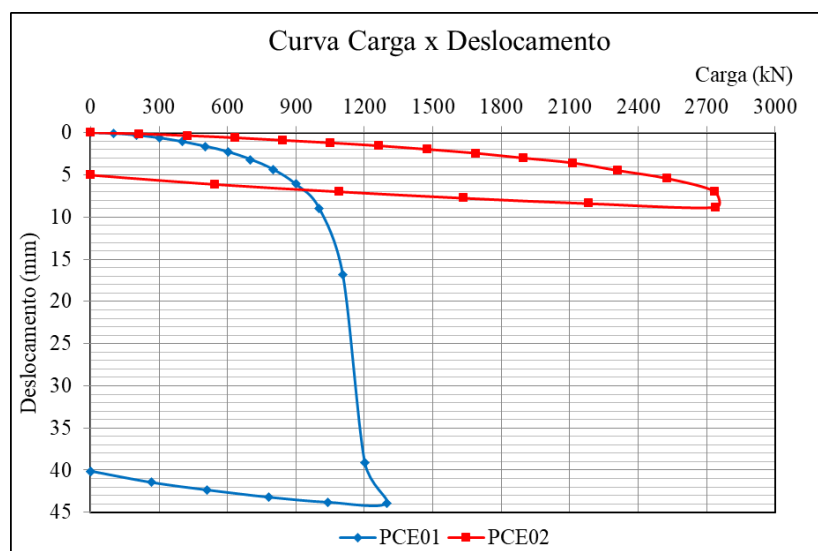


Figura 3. Gráfico curvas carga vs deslocamento da PCE01 e PCE02.

#### 4.2 Fator $\lambda$

A Figura 4 mostra a variação de  $\lambda$ , com os valores de tração e compressão extrapolados, ao longo do deslocamento da PCE01 e PCE02. Percebe-se que os valores médios de  $\lambda$  são de 0,55 e 0,95 e que se mantém constantes para deslocamentos entre 1,5 e 2,5% do diâmetro da estaca.

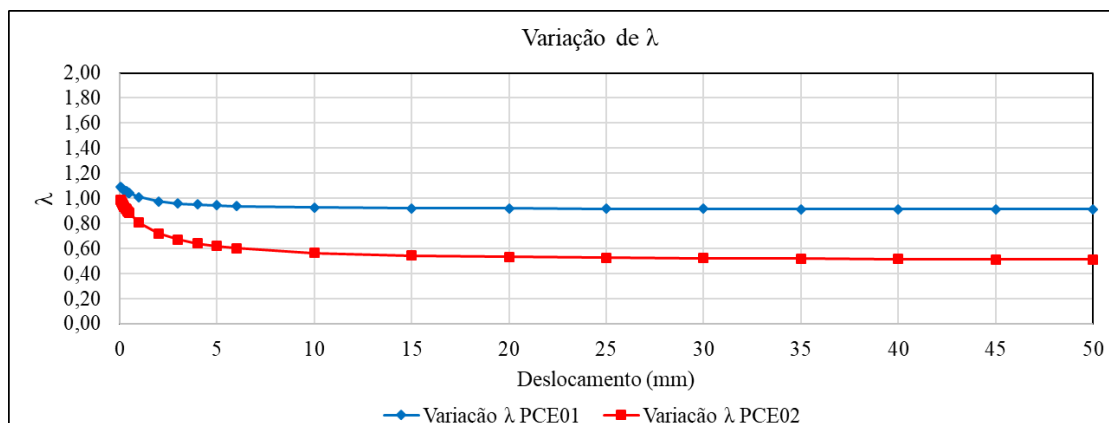


Figura 4. Gráfico variação de  $\lambda$  da PCE01 e PCE02.

### 4.3 Simulação da resistência lateral corrigida por $\lambda$

Os valores de  $\lambda$  foram determinados com o auxílio dos gráficos da Figura 5 e Figura 6, em que o melhor valor é aquele que ajusta os primeiros pontos da curva da  $RL_{sim}$  com os pontos da curva carga vs deslocamento de compressão. Para tal, foram plotadas as curvas carga vs deslocamento de cada ensaio e as curvas de compressão extrapoladas por Chin (1970). Os valores são para a PCE01  $\lambda = 1,00$  e para PCE02  $\lambda = 0,80$ , estando dentro do intervalo de valores expostos por Paschoalin Filho (2008).

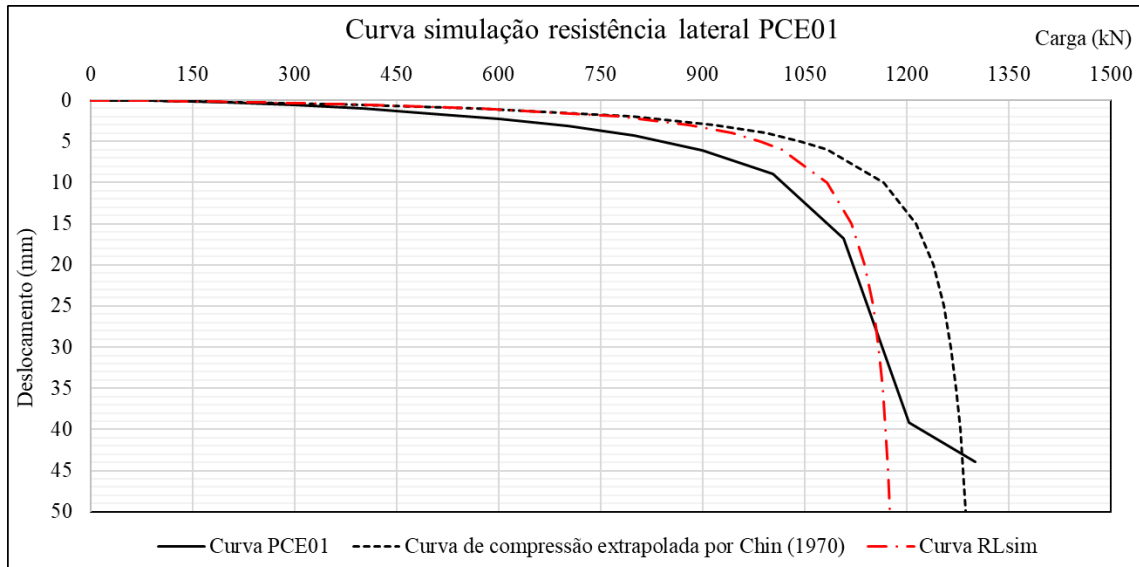


Figura 5. Gráfico da curva de  $RL_{sim}$  da PCE01.

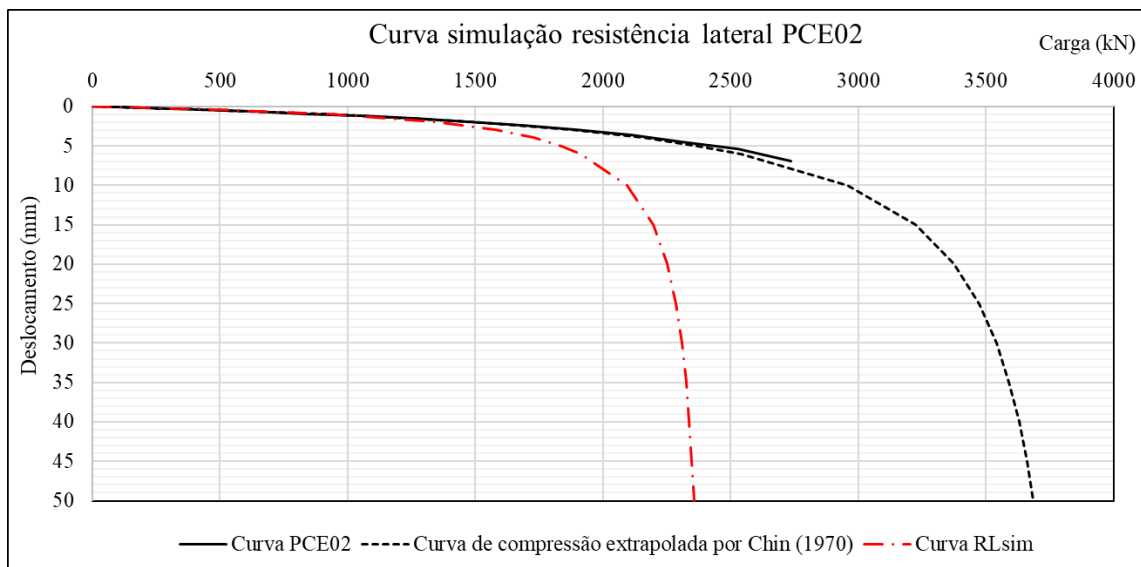


Figura 6. Gráfico da curva de  $RL_{sim}$  da PCE02.

### 4.4 Análise dos valores estimados da PCE01

A Tabela 3 apresenta os valores obtido nas instrumentações da PCE01 comparando-os com os valores estimados pelo método proposto, nos estágios iniciais, intermediários e finais de carregamento.

Tabela 3. 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

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

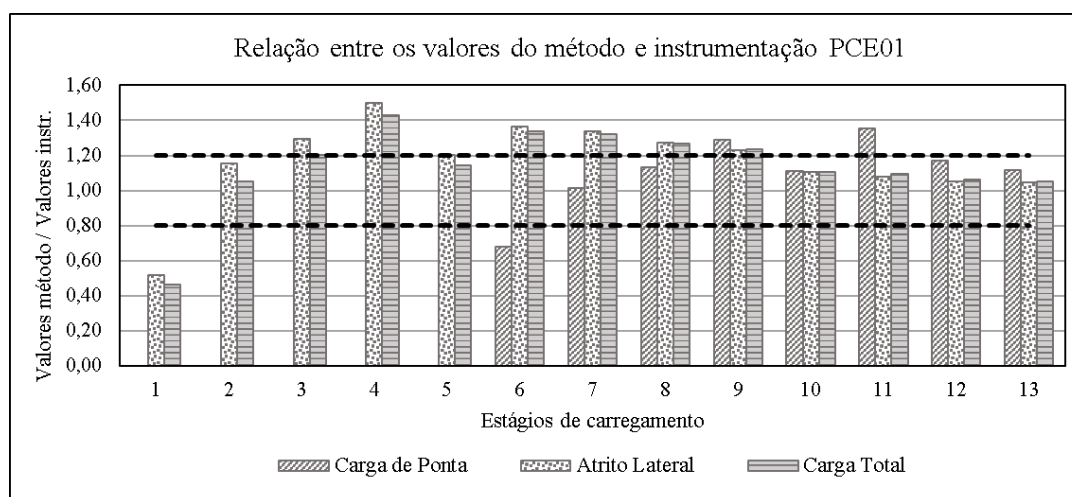


Figura 7. Relação dos valores estimados pelo método e medidos pela instrumentação da PCE01.

#### 4.5 Análise dos valores estimados da PCE02

Da mesma forma, a Tabela 4 apresenta os valores obtido nas instrumentações da PCE02 comparando-os com os valores estimados pelo método apresentado, nos estágios iniciais, intermediários e finais de carregamento.

Tabela 4. 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 8 apresenta a relação entre os valores estimados e os medidos na instrumentação durante os estágios de carregamento. Foi considerada uma tolerância de  $\pm 20\%$  para análise. Nota-se que 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.

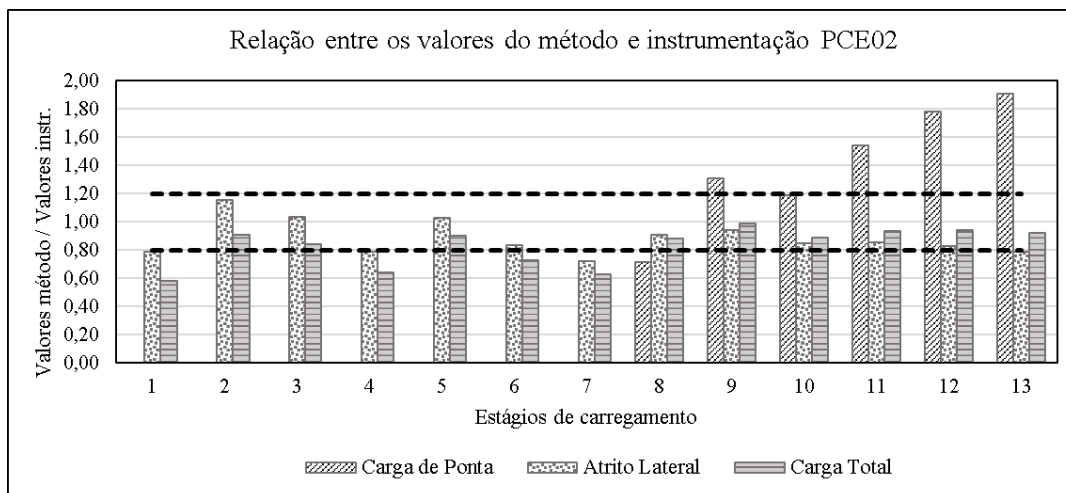


Figura 8. Relação dos valores estimados pelo método e medidos pela instrumentação da PCE02.

## 5 Conclusões

Por meio das análises foi constatada a importância de se extrapolar com acurácia a curva de ruptura da estaca de reação, visto que foi necessário ajustar a curva com valores arbitrados baseados em informações da instrumentação.

Os resultados mais condizentes foram da PCE01, porém, apenas nos estágios finais, devido à estaca teste ter atingido a carga de ruptura 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  $\lambda$ , 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.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, P. J. R. (1996) *Análise do comportamento de estaca pré-moldada de pequeno diâmetro, instrumentada, em solo residual de diabásio da Região de Campinas*. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Campinas.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131: *Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Chin, K. F. (1970). Estimation of the Ultimate Load of Piles from Tests not Carried to Failure. 2<sup>nd</sup> Southeast Conference on Soil Engineering, Singapore, pp. 91-92.
- Oliveira, 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.
- Paschoalin Filho, J.A. (2013) *Estudo do comportamento à tração axial de diferentes tipos de estacas em solo de diabásio da região de Campinas/SP* / Campinas, SP, 2008.