

# Reflexões Sobre O Uso Do Manômetro Na Prova De Carga Estática

Daniel Kina Murakami  
Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, daniel.murakami@gmail.com

Dirney Cury Filho  
G2Base Fundações e Contencções, São Paulo, Brasil, dirney.cury@gmail.com

Fabian Corgnier  
Teknier Engenharia e Tecnologia, São Paulo, Brasil, fabian@teknier.com.br

**RESUMO:** Murakami et al. (2022) introduziram o conceito das três curvas possíveis obtidas durante a prova de carga estática (PCE) em estacas: célula de carga (LC), manômetro (MA) e teórica (TH). Essas curvas são identificadas realizando leituras simultâneas da carga aplicada com manômetro e célula de carga na mesma PCE. A curva MA geralmente apresenta carga maior devido ao atrito do macaco hidráulico, deslocando-se para a direita em relação à curva LC. Por outro lado, a TH é obtida subtraindo-se o atrito do macaco hidráulico da curva LC, deslocando-se para a esquerda em relação à curva LC. Em um estudo em Jacarepaguá, Rio de Janeiro, RJ, foram realizadas 7 PCEs utilizando manômetro e célula de carga simultaneamente. Cada PCE resultou em uma curva diferente de carga da LC versus pressão do manômetro. Em cada curva foi realizada regressão polinomial de grau 3 com  $R^2$  maior que 0,99. Simulou-se a curva de uma das PCEs (SLT3), aplicando sua pressão do manômetro nas equações polinomiais das outras 6 PCEs. Os resultados mostraram que as curvas obtidas ficaram entre as curvas MA e TH, destacando a importância da LC na leitura da carga aplicada, pois o uso exclusivo do manômetro pode gerar incertezas sobre as cargas aplicadas e ao formato real da curva carga versus recalque.

**PALAVRAS-CHAVE:** Prova de carga estática (PCE), manômetro (MA), célula de carga (LC), curva teórica (TH), regressão polinomial

**ABSTRACT:** Murakami et al. (2022) introduced the concept of three possible curves obtained during static load tests (SLT) on piles: load cell (LC), manometer (MA), and theoretical (TH) curves. These curves are identified by taking simultaneous readings of the applied load with a manometer and a load cell in the same SLT. The MA curve usually presents a higher load due to the friction in the hydraulic jack, shifting to the right in relation to the LC curve. On the other hand, the TH curve is obtained by subtracting the hydraulic jack friction from the LC curve, shifting it to the left of the LC curve. In a study conducted in Jacarepaguá, Rio de Janeiro, Brazil, 7 SLTs were performed using a manometer and a load cell simultaneously. Each SLT resulted in a different load curve of LC versus manometer pressure. A 3rd-degree polynomial regression was performed on each curve with an  $R^2$  greater than 0.99. The curve of one of the SLTs (SLT3) was simulated by applying its manometer pressure to the polynomial equations of the other 6 SLTs. The results showed that the curves obtained were between the MA and TH curves, highlighting the importance of the LC in reading the applied load, as the exclusive use of the manometer can generate uncertainties about the applied loads and the actual shape of the load-settlement curve.

**KEYWORDS:** Static Load Test (SLT), manometer (MA), load cell (LC), theoretical curve (TH), polynomial regression

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Fellenius (1984), pode haver até 20% de erro entre a leitura da carga medida pela célula de carga e a carga medida pelo manômetro. Isso ocorre devido ao atrito interno no cilindro do macaco

hidráulico, causado principalmente por inevitável aplicação de carga excêntrica e inclinada. Velloso e Lopes (2010) sugerem o uso de uma célula de carga para eliminar dúvidas de calibração do macaco, pois um pequeno desalinhamento na montagem pode aumentar significativamente o atrito no macaco hidráulico.

Murakami et al. (2020) propuseram o conceito das três possíveis curvas obtidas na prova de carga estática (PCE) em estacas: célula de carga (LC), manômetro (MA) e teórica (TH). Para identificar essas três curvas é necessário realizar na mesma PCE leituras simultâneas da carga aplicada com manômetro e célula de carga. De forma geral, a curva do manômetro deverá apresentar maior carga em função do atrito do macaco hidráulico, ou seja, a curva carga vs. recalque deverá ficar deslocada para direita em relação à curva LC. A curva teórica é obtida subtraindo-se o atrito do macaco hidráulico da curva da célula de carga, ou seja, deverá ficar deslocada para esquerda em relação à curva LC. Nota-se que o conhecimento da magnitude do atrito do macaco em cada estágio somente é conhecido quando se fazem leituras simultâneas com célula de carga e manômetro. O atrito do macaco hidráulico obtido em laboratório não necessariamente é igual à uma PCE real, conforme será mostrado adiante.

Além disso, Murakami et al. (2020) citam que o erro entre a curva LC e MA pode variar entre diferentes obras para um mesmo sistema de macaco, bomba hidráulica e manômetro, apresentando um indício de que uma possível calibração em laboratório seria impossível. Tais erros dependem de uma série de fatores, como por exemplo, aplicação de cargas excêntricas e inclinadas, inclinação das vigas de reação e do bloco de coroamento, precisão do manômetro e possível influência de tensões residuais na ponta da estaca.

Murakami et al. (2022) destacam que a extrapolação da carga de ruptura das três possíveis curvas da PCE (LC, MA e TH) devem conduzir à resultados diferentes, apresentando diferenças da ordem de +/- 20% para os casos de obra estudados. Os autores observaram um melhor  $R^2$  na extrapolação da curva LC em função de apresentar uma melhor precisão da leitura das cargas aplicadas.

Convém destacar que a norma NBR 16903:2020 permite a utilização de um conjunto de macaco, bomba hidráulica e manômetro ou célula de carga devidamente calibrados, enquanto que a norma ASTM D1143 obriga o uso da célula de carga para provas de carga acima de 900 kN. A calibração apenas do manômetro não estaria dentro das especificações da NBR 16903:2020.

A curva TH representa uma PCE calibrada apenas no manômetro, desconsiderando a calibração do conjunto completo (macaco, bomba hidráulica e manômetro), o que contraria as normas brasileiras. Essa calibração ignora o atrito interno do macaco hidráulico, levando a uma carga aplicada menor do que a indicada. A magnitude do atrito só é conhecida com leituras simultâneas de manômetro e célula de carga, tornando impossível determinar a carga real aplicada em uma PCE calibrada apenas no manômetro.

## 2 OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo mostrar que a utilização do manômetro como referência para leitura da carga aplicada pode conduzir à resultados diferentes do esperado em relação à uma curva calibrada em laboratório, uma vez que o conjunto macaco, bomba hidráulica e manômetro no laboratório se comporta de forma diferente em relação à uma PCE real. De fato, na PCE ocorre variação da altura curso do cilindro do macaco hidráulico, além de apresentar possível inclinação do bloco de coroamento, excentricidade e inclinações das vigas de reação, enquanto que no laboratório o curso do cilindro é constante e centralizado durante toda a calibração.

## 3 METODOLOGIA

Em uma obra localizada em Jacarepaguá, Rio de Janeiro, RJ, foram realizadas 7 PCEs utilizando-se simultaneamente o mesmo conjunto macaco, bomba hidráulica e manômetro, em série com uma célula de carga posicionada acima do macaco hidráulico. Em cada PCE se verificou curvas diferentes relacionando a carga da LC vs. pressão do manômetro. Em cada curva foi realizada regressão polinomial de grau 3 com  $R^2$  maior que 0,99.

Adotando-se como referência uma das PCEs (SLT3), simulou-se a curva da SLT3, aplicando sua pressão do manômetro nas equações polinomiais das outras 6 PCEs. Destaca-se que tais curvas polinomiais

de cada PCE foram obtidas em campo através da leitura simultânea da célula de carga e manômetro. Não foram obtidas em laboratório.

#### 4 RESULTADOS

A figura 1 mostram os resultados da prova de carga SLT3 com a indicação das três curvas propostas por Murakami et al. (2020): célula de carga (LC), manômetro (MA) e teórica (TH).

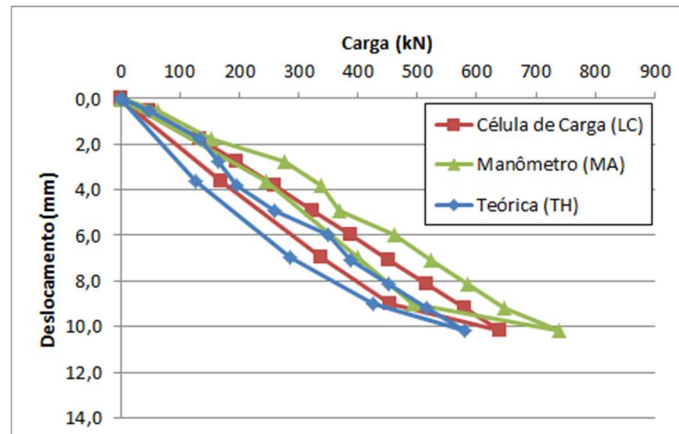


Figura 1. Curvas LC, MA e TH da prova de carga SLT 3 (Murakami et al., 2020)

A figura 2 mostra a relação entre as leituras da célula de carga vs. pressão do manômetro para cada prova de carga. Nota-se uma grande dispersão de resultados, o que leva às seguintes observações:

- O conjunto macaco, bomba hidráulica e manômetro são calibrados em laboratório e apresentam uma curva relacionando a carga aplicada com a correspondente pressão do manômetro. Seria possível realizar tal calibração em laboratório capaz de prever a carga aplicada na estaca através de uma pressão medida pelo manômetro, considerando-se que houve uma grande dispersão de resultados na figura 2?;
- No laboratório a altura do curso do macaco hidráulico é constante e centralizado, ou seja, não há variação da altura do curso durante toda a calibração, enquanto que na PCE a altura do curso varia ao longo dos estágios, além de apresentar possível inclinação do bloco de coroamento, excentricidade e inclinações das vigas de reação. Essas diferenças que ocorrem no macaco em laboratório vs. PCE real não poderiam apresentar divergências de resultados? Ou seja, as condições do laboratório não condizem com as condições de uma PCE real, uma vez que, na PCE a altura do curso do macaco varia, além de outros fatores já mencionados;
- Durante a PCE tais fatores observados por Murakami et. al. (2020) e citados no item anterior não são simulados no laboratório, como por exemplo, aplicação de cargas excêntricas e inclinadas, inclinação das vigas de reação e do bloco de coroamento, precisão do manômetro e possível influência de tensões residuais na ponta da estaca;
- Dado que as condições do laboratório vs. PCE real são diferentes, retoma-se ao primeiro questionamento: “Seria possível realizar uma calibração em laboratório, dado que as condições do laboratório são divergentes de uma PCE real?”
- No caso da figura 2, para atingirmos uma carga de 320 kN por exemplo, qual seria a pressão do manômetro necessária em uma nova PCE, caso fosse utilizada somente o manômetro como sistema de referência da carga aplicada? Conforme observado na figura 2, qualquer valor entre 5,5 MPa e 7,5 MPa seria possível atingir 320 kN dependendo da curva polinomial de cada PCE (figuras 3 a 9);
- Essa faixa de variação entre 5,5 MPa e 7,5 MPa para se atingir a mesma carga de 320 kN é um forte indicio de que cada PCE deverá ter seu próprio valor de atrito do macaco para esta carga, assim como para todas as cargas aplicadas ao longo da condução da PCE;

- A conclusão é de que não há como saber com precisão qual seria a pressão necessária em uma nova PCE para atingirmos a carga de 320 kN, uma vez que o atrito do macaco muda em cada PCE. O mesmo raciocínio é válido para os demais pontos da PCE;
- Completando o raciocínio anterior, se o atrito do macaco fosse previsível, conforme se espera em uma calibração de laboratório, deveria haver uma menor dispersão de resultados observados na figura 2.

As figuras 3 a 9 mostram a relação entre carga medida pela célula de carga vs. leitura do manômetro. Observa-se que cada PCE possui sua curva de calibração obtida em campo dada por uma regressão polinomial de grau 3. Todas as curvas obtiveram um  $R^2$  maior que 0,99, indicando boa regressão polinomial. Para este caso de obra, regressão polinomial de grau maior que 3 não apresentou melhoria significativa em relação ao  $R^2$ . Por este motivo foi adotada a regressão polinomial de grau 3 para o presente estudo.

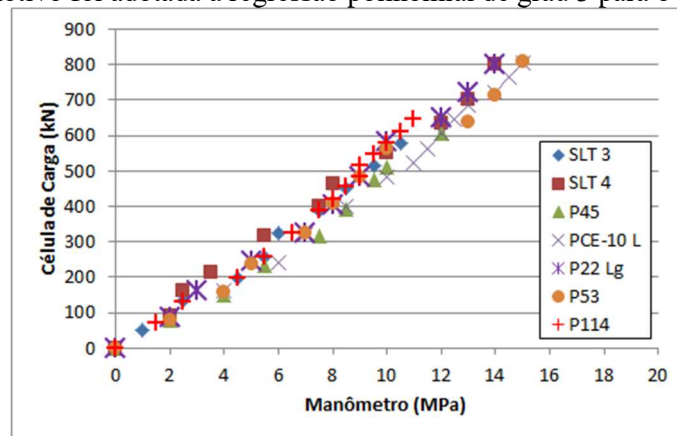


Figura 2. Relação entre Carga da Célula de Carga vs. Pressão do Manômetro para diversas PCEs

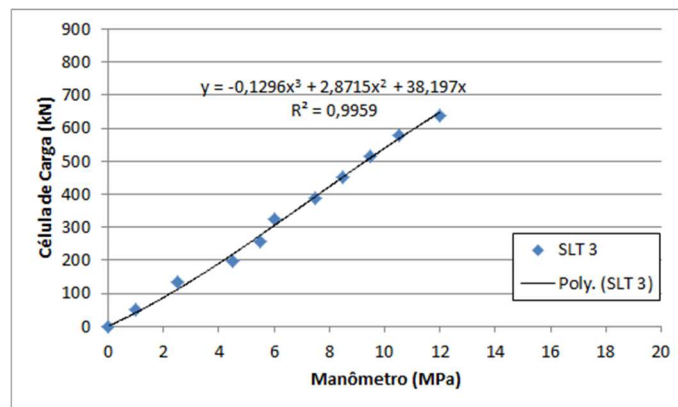


Figura 3. Regressão polinomial da prova de carga SLT 3

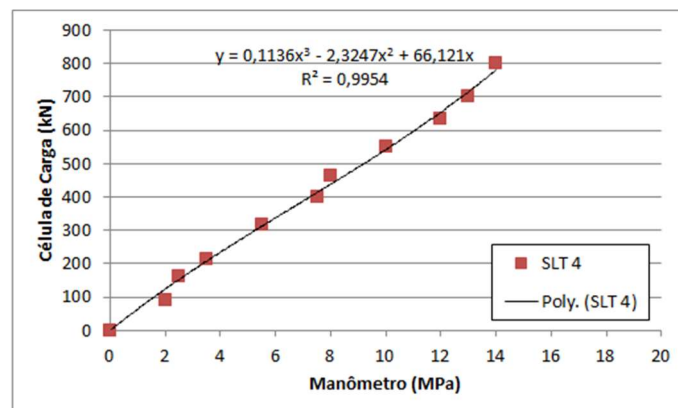


Figura 4. Regressão polinomial da prova de carga SLT 4

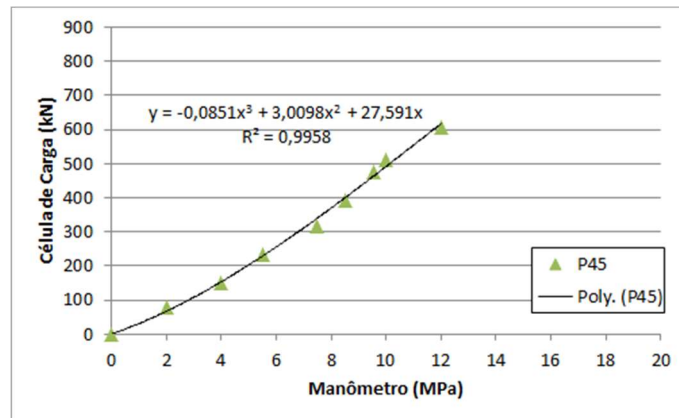


Figura 5. Regressão polinomial da prova de carga P45

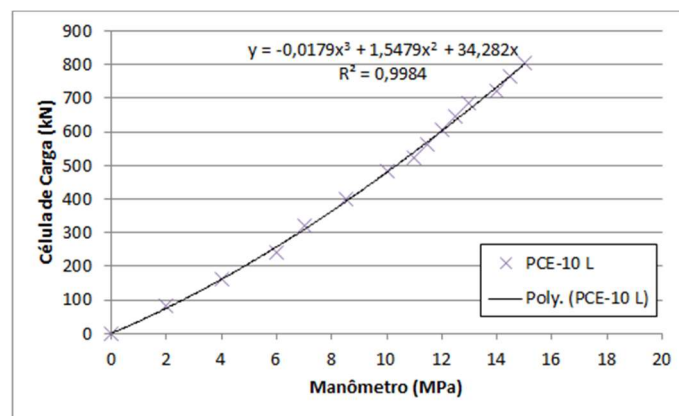


Figura 6. Regressão polinomial da prova de carga PCE-10L

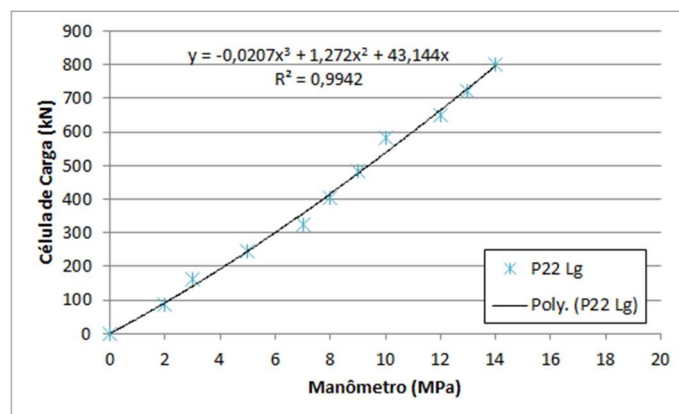


Figura 7. Regressão polinomial da prova de carga P22 Lg



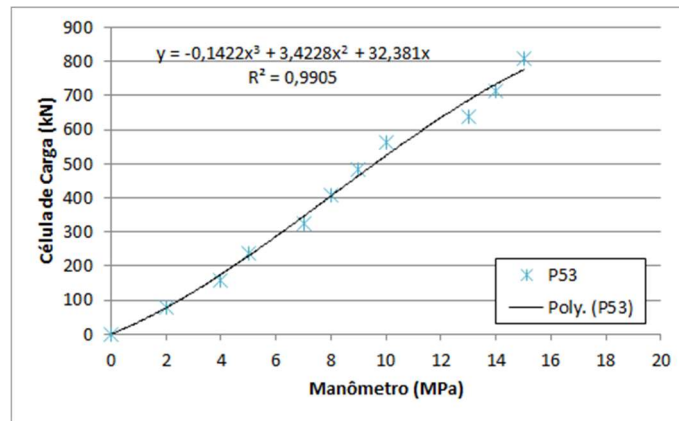


Figura 8. Regressão polinomial da prova de carga P53

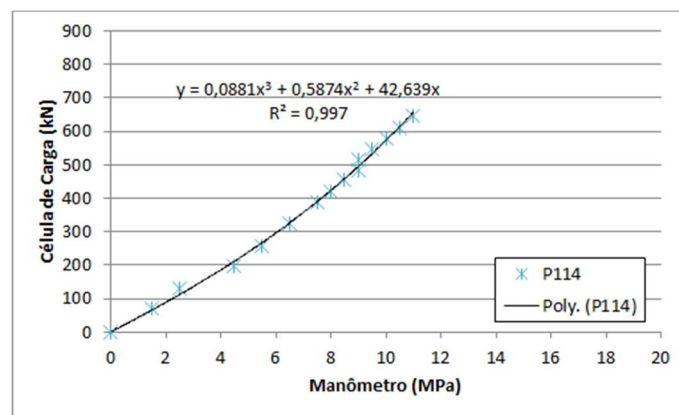


Figura 9. Regressão polinomial da prova de carga P114

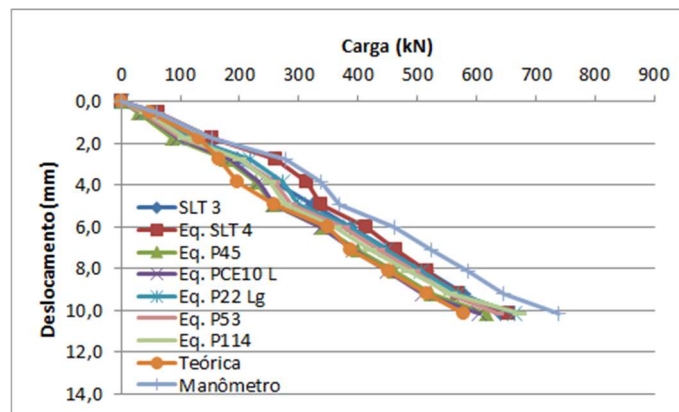


Figura 10. Comparação das curvas da SLT 3 (LC, TH e MA) com as curvas das regressões polinomiais

Com base nas pressões medidas pelo manômetro na prova de carga SLT3, verificou-se qual seria carga obtida com base nas equações polinomiais de cada PCE indicadas nas figuras 3 a 9. Os resultados estão na figura 10 e tabela 1. Em função da grande dispersão de resultados observados na figura 2, era de se esperar uma grande dispersão de resultados indicados na figura 10 e tabela 1. Já na tabela 2 estão indicadas em porcentagem a diferença observada entre as curvas polinomiais e a PCE de referência (SLT3). As diferenças observadas ficaram entre -32,9% e +37,7%. Em geral, notam-se que as maiores diferenças ocorreram nos estágios iniciais de menor carga aplicada. Uma explicação seria a precisão do manômetro de 0,5 MPa que não permite uma boa precisão de leitura para cargas menores, conforme já observado por Murakami et al. (2020, 2022). Esta baixa precisão do manômetro para leitura de cargas baixas seria um forte indício da superioridade da leitura da LC, com forte recomendação do uso da LC para todas as faixas de trabalho, independentemente da carga máxima da PCE (ASTM D1143 obriga LC acima de 900 kN).

Tabela 1. Previsão da curva SLT 3 com base nas equações polinomiais em kN

SLT 3			Carga (Equações Polinomiais)						Deslocamento (mm)
Estágio	Carga (kN)	Manômetro (MPa)	SLT 4 (kN)	P45 (kN)	PCE-10 L (kN)	P22 Lg (kN)	P53 (kN)	P114 (kN)	
0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0,00
1	49	1,0	64	31	36	44	36	43	0,54
2	133	2,5	153	86	95	115	100	108	1,77
3	196	4,5	261	177	184	218	202	201	2,77
4	259	5,5	312	229	232	272	258	251	3,83
5	323	6,0	338	256	258	300	287	277	4,91
6	388	7,5	413	340	337	386	375	360	6,00
7	451	8,5	464	400	392	446	435	421	7,09
8	516	9,5	516	461	450	507	495	486	8,13
9	579	10,5	569	523	510	569	553	556	9,18
10	640	12,0	655	617	603	665	636	672	10,16

Tabela 2. Previsão da curva SLT 3 com base nas equações polinomiais em porcentagem

SLT 3			Carga (Equações Polinomiais)						Deslocamento (mm)
Estágio	Carga (kN)	Manômetro (MPa)	SLT 4 (%)	P45 (%)	PCE-10 L (%)	P22 Lg (%)	P53 (%)	P114 (%)	
0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
1	49	1,0	-30,4	37,7	26,9	9,4	27,2	12,7	0,54
2	133	2,5	-14,5	35,1	28,6	13,3	24,8	18,7	1,77
3	196	4,5	-32,9	9,6	6,2	-11,1	-3,0	-2,5	2,77
4	259	5,5	-20,7	11,6	10,1	-5,3	0,2	3,0	3,83
5	323	6,0	-4,6	20,8	20,2	7,0	11,2	14,2	4,91
6	388	7,5	-6,4	12,4	13,3	0,5	3,3	7,2	6,00
7	451	8,5	-2,8	11,4	13,1	1,2	3,6	6,8	7,09
8	516	9,5	0,0	10,6	12,7	1,7	4,1	5,7	8,13
9	579	10,5	1,6	9,7	11,9	1,7	4,5	3,9	9,18
10	640	12,0	-2,3	3,5	5,7	-3,9	0,7	-5,1	10,16
		Máximo	1,6	37,7	28,6	13,3	27,2	18,7	
		Mínimo	-32,9	0,0	0,0	-11,1	-3,0	-5,1	
		Média	-10,3	14,8	13,5	1,3	7,0	5,9	

O resultado obtido foi impressionante: as 6 curvas obtidas através das equações polinomiais do manômetro dadas pelas figuras 3 a 9 ficaram entre as curvas MA e TH, o que indica que a curva MA deva ser o limite superior da curva da PCE e a curva TH deva ser o limite inferior da curva da PCE quando se utiliza o manômetro como referência para leitura da carga. Além disso, nos estágios iniciais algumas curvas ficaram à esquerda da curva TH, o que indicaria que em cargas menores pode haver um maior desvio em relação à curva de referência (neste caso a curva de referência foi a SLT3).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo tem como objetivo mostrar que a utilização do manômetro como referência para leitura da carga aplicada pode conduzir a resultados diferentes do esperado em relação a uma curva calibrada em laboratório, uma vez que o macaco hidráulico no laboratório se comporta de forma diferente em relação a uma PCE real. De fato, na PCE ocorre variação da altura do curso cilindro do macaco hidráulico ao longo dos estágios, além de outros fatores mencionados, enquanto que no laboratório o curso do cilindro é constante durante toda a calibração.

Em uma obra localizada em Jacarepaguá, Rio de Janeiro, RJ, foram realizadas 7 PCEs utilizando-se simultaneamente manômetro e célula de carga. Em cada PCE se verificou uma curva diferente de carga da LC vs. pressão do manômetro. Em cada curva foi realizada regressão polinomial de grau 3 com  $R^2$  maior que 0,99.

Adotando-se como referência uma das PCEs (SLT3), realizou-se uma simulação para prever como seria a curva da PCE caso fosse utilizada a pressão do manômetro desta SLT3 nas demais equações polinomiais das outras 6 PCEs. Os resultados observados foram muito divergentes, apresentando diferenças de cargas entre -32,9% e +37,7% em relação à SLT3, principalmente nos estágios iniciais de menor carga aplicada. Já na carga de trabalho se observou uma diferença entre -4,6% e +20,8%, enquanto que na carga máxima essa diferença ficou entre -5,1% e +5,7%. De forma geral, as diferenças observadas foram maiores entre o primeiro estágio e o quinto (carga de trabalho). Tais diferenças mostram o motivo do  $R^2$  dos métodos de extrapolação da curva de PCEs realizadas com manômetros serem menores do que uma PCE realizada com célula de carga (menor precisão da leitura da carga aplicada com manômetro), conforme observado por Murakami et al. (2022).

As curvas obtidas pelas equações polinomiais do manômetro ficaram entre as curvas MA e TH, sugerindo que a MA representa o limite superior e a TH o limite inferior da curva da PCE. Em cargas menores, algumas curvas ficaram à esquerda da TH, indicando maior desvio em relação à curva de referência (SLT3).

O estudo mostrado neste artigo mostra a importância do uso da LC em todas as PCEs, independentemente da carga máxima aplicada (ASTM D1143 obriga LC acima de 900 kN), uma vez que a utilização do manômetro como referência da leitura da carga aplicada pode conduzir a incertezas quanto às cargas aplicadas, assim como ao real formato da curva carga vs. recalque, podendo inclusive apresentar divergências quando comparado com o CAPWAP no ensaio dinâmico (Murakami e Corgnier, 2023).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo- Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- ASTM D1143 / D1143M-07(2013)e1, Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Fellenius, B. H. (1984) Ignorance is bliss – and that is why we sleep so well. Geotechnical News, Canadian Geotechnical Society and United States National Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2., No. 4, pp. 14-15.
- Murakami, D. K., Corgnier, F., Silva, A., Bozan, G. (2020). A Comparison between the Measured Load through a Load Cell and a Manometer on the Static Load Test in Piles. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Campinas, SP.
- Murakami, D. K., Corgnier, F., Godinho, H., Saito, E. (2022). Different Possible Interpretations Depending on The Load Measurement Method on the Static Load Test in Piles. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Campinas, SP.
- Murakami, D. K., Corgnier, F. (2023) The Influence of The Load Measurement Method in The Static Load Test to Correlate With The Dynamic Test in Piles. 10º Seminário de Fundações Especiais e Engenharia Geotécnica. São Paulo, SP.
- Velloso, D. A., Lopes, F.R. (2010) *Fundações Vol. 2*. Editora COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.