

Revisitando um caso de estacas diafragmas de um silo vertical de 100.000 toneladas no Porto de Paranaguá-PR

Caio Duque Estrada Amendola
UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, caiodeamendola@gmail.com

Bernadete Ragoni Danziger
UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, bernadeterd@hotmail.com

Alessandra Conde de Freitas
UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, alessandracfreitas@poli.ufrj.br

RESUMO: O trabalho revisita um caso de “estacas diafragmas” de concreto armado (estacas barretes), com seção transversal de 1,00x2,20m, reportado anteriormente por Velloso, Aoki e Salamoni (1978). Trata-se das fundações do silo vertical de 100.000 toneladas no Porto de Paranaguá-PR. O subsolo local é composto por espessa camada de solo sedimentar, seguido por camada de solo residual e com o substrato rochoso a uma profundidade variável de 42 a 50m, corroborado por 46 sondagens. São apresentadas as estimativas de capacidade de carga geotécnica por três métodos estáticos semiempíricos e dois métodos estáticos teóricos, e sua comparação com resultados da prova de carga estática (PCE) instrumentada em profundidade. Dentre as estimativas, o método de Aoki e Velloso (1975) gerou o valor mais baixo para o atrito lateral e o de Velloso (1981) resultou no valor mais baixo para a ponta. Por outro lado, os valores mais elevados para o atrito lateral e ponta foram obtidos pelo método de Décourt e Quaresma (1978, 1982) e pelo método β , respectivamente. Em função da prova de carga ter sido interrompida num trecho ainda majoritariamente elástico, não foi possível determinar adequadamente o valor da carga de ruptura por extrapolação. Constatou-se que os resultados das leituras dos *tell-tales* ficaram compreendidas entre as estimativas do atrito lateral acumulado pelos métodos semiempíricos e teóricos de capacidade de carga geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Capacidade de carga, métodos teóricos, métodos semiempíricos, prova de carga estática, curva carga-recalque.

ABSTRACT: This study revisits a well-documented case involving reinforced concrete “diaphragm wall piles” with a cross-section of 1.00 x 2.20m, originally reported by Velloso, Aoki and Salamoni (1978). The foundation system supports a 100,000-ton vertical silo located at the Port of Paranaguá, in the state of Paraná, Brazil. The local subsurface profile comprises a thick stratum of sedimentary soil, underlain by residual soil, with the bedrock encountered at depths ranging from 42 to 50 meters, as confirmed by 46 boreholes. Geotechnical load-bearing capacities were estimated by using three semi-empirical static methods and two theoretical static approaches. These estimates were compared to results obtained from an instrumented static load test. Among the semi-empirical methods, the Aoki and Velloso (1975) approach produced the lowest friction skin resistance estimation, while the method proposed by Velloso (1981) showed the lowest end-bearing resistance. On the other hand, the highest values for friction skin and end-bearing were obtained using the Décourt and Quaresma method (1978, 1982) and the β -method, respectively. Due to the premature interruption of the load test, while the pile behavior remained predominantly elastic, it was not possible to accurately determine the ultimate load by extrapolation. Finally, the tell-tale measurements were within the range of both the semi-empirical and theoretical methods.

KEYWORDS: Load capacity, theoretical methods, semi-empirical methods, static load test, load-settlement curve.

1 INTRODUÇÃO

As fundações profundas desempenham um papel fundamental na transferência segura de cargas de estruturas para camadas mais resistentes do subsolo, especialmente em terrenos onde as camadas superficiais

apresentam baixa capacidade de suporte. A escolha adequada do tipo de fundação, assim como uma estimativa adequada de sua capacidade de carga, é essencial para garantir a segurança, estabilidade e desempenho da estrutura ao longo de sua vida útil.

Estimativas de capacidade de carga geotécnica por métodos semiempíricos e teóricos são amplamente utilizados na prática. Aliados à resultados de provas de carga, nos permitem ampliar banco de dados para diversas regiões do Brasil, por exemplo.

O presente artigo tem por objetivo revisitar um caso de obra com prova de carga estática (PCE) instrumentada ao longo do comprimento de forma a discutir alguns aspectos interessantes quanto: aplicação dos métodos usuais de previsão de capacidade de carga (semiempíricos e teóricos) e comparação dos métodos com resultados da PCE.

2 CAPACIDADE DE CARGA GEOTÉCNICA DE ESTACAS

A capacidade de carga axial nos métodos estáticos é calculada considerando a mobilização plena da resistência disponível do solo. A equação (1) apresenta a formulação geral em função das resistências unitárias ($q_{p,rup}$ e $q_{l,rup}$), representando as variáveis geotécnicas, e as variáveis geométricas da estaca (área da base A_b , perímetro U e comprimento L).

$$Q_{rup} = q_{p,rup} \cdot A_b + U \int_0^L q_{l,rup} dz \quad (1)$$

Vários métodos já foram estabelecidos e dividem-se basicamente em métodos teóricos, os quais utilizam princípios da Mecânica dos Solos, e semiempíricos, que se baseiam em ensaios *in situ* de penetração.

Neste trabalho são utilizados três métodos semiempíricos usuais na prática brasileira, Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978, 1982) e Velloso (1981), bem como os métodos teóricos do U.S. Army Corps of Engineers (2005) e o “Método β ”, proposto por Fellenius (2017). A Tabela 1 apresenta as formulações básicas dos métodos estáticos utilizados. A descrição de cada uma das variáveis da Tabela 1 e sua obtenção são mostradas nos artigos citados e listados nas referências.

Tabela 1. Formulações dos métodos estáticos para estimativa de capacidade de carga.

Método	Formulações propostas
Aoki e Velloso (1975)	$Q_{rup} = \frac{K \cdot N_p}{F_1} A_p + \frac{U}{F_2} \sum_{i=1}^n (\alpha \cdot K \cdot N_L \cdot \Delta_L)$
Décourt e Quaresma (1978, 1982) modificado por Décourt (1996)	$Q_{rup} = \alpha \cdot C \cdot N_p \cdot A_p + \beta \cdot 10 \cdot \left(\frac{\bar{N}_L}{3} + 1 \right) \cdot U \cdot L$
Velloso (1981)	$Q_{rup} = A_b \cdot \alpha \cdot \beta \cdot q_{p,rup} + U \cdot \alpha \cdot \lambda \cdot \sum \tau_{l,rup} \cdot \Delta l_i$
U.S. Army Corps of Engineers (2005)	<u>Solos de comportamento drenado</u> $Q_{rup} = (\sigma'_v \cdot N_q) \cdot A_b + (K \cdot \sigma'_v \cdot \tan \delta) \cdot A_s$
	<u>Solos de comportamento não-drenado</u> $Q_{rup} = 9 \cdot S_u \cdot A_b + (\alpha_1 \cdot \alpha_2) \cdot S_u \cdot A_s$
“Método β ” ou Método das Tensões Efetivas (FELLENIOUS, 2017)	$Q_{rup} = A_p \cdot N_t \cdot \sigma'_{z=D} + \int A_s (c' + \beta \cdot \sigma'_z) dz$

3 TRECHOS DA CURVA CARGA VERSUS RECALQUE

O trabalho de Vargas (1978) sugere a divisão da curva carga versus recalque em três possíveis trechos, tal como apresentado na Figura 1. O Trecho I, denominado de linear-elástico, apresenta uma região de quase linearidade entre carga e recalque. Este representaria uma prova de carga interrompida num trecho ainda

majoritariamente elástico, sendo difícil de determinar corretamente o valor da carga de ruptura. Já o Trecho II, elastoplástico, mostra uma região de deformação elastoplástica, onde os recalques são função da velocidade de carregamento, e a estimativa da carga de ruptura pode ser feita por métodos de extrapolação. Por fim, o Trecho III, caracterizado pela ruptura nítida, constitui-se por uma região onde o recalque aumenta indefinidamente com pequenos (ou sem) acréscimos de carga. Isto é, a carga de ruptura é claramente evidenciada, não necessitando de métodos de extrapolação.

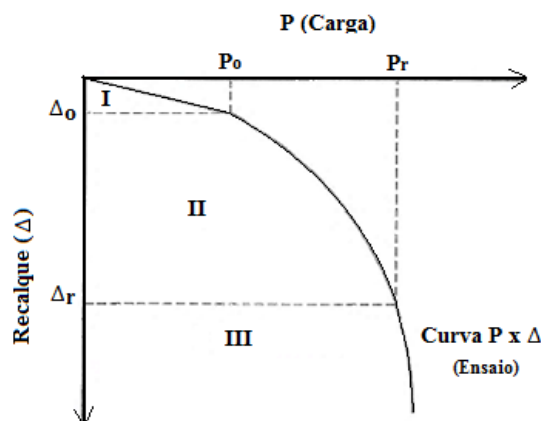


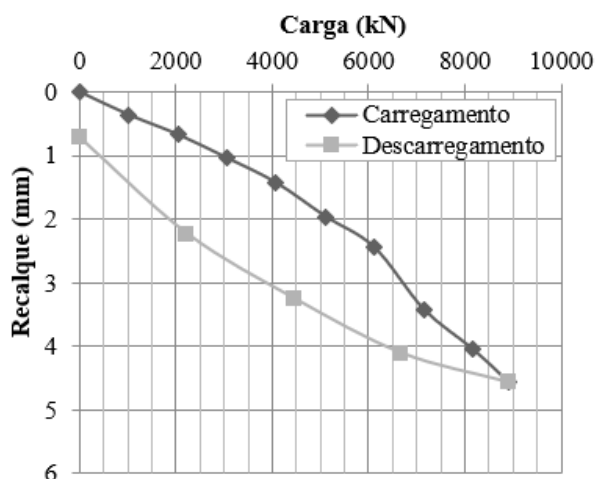
Figura 1. Possíveis trechos de curvas carga versus recalque (Modificado de VARGAS, 1978).

Diversos métodos foram propostos para a estimativa da carga de ruptura por extrapolação da curva carga-recalque, destacando-se o de Van der Veen (1953) e da NBR 6122 (ABNT, 2019).

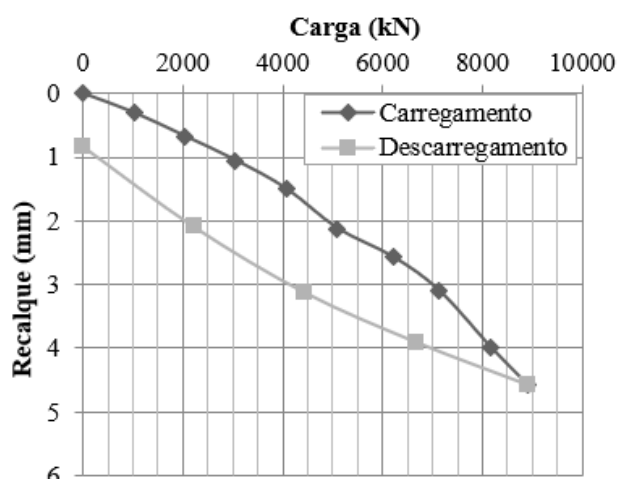
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se das fundações do Silo Vertical de 100.000 toneladas no Porto de Paranaguá-PR, com 154m de comprimento por 42m de largura, sendo dividido em 6 blocos: o bloco da torre de processamento de cereais com 66m de altura e cinco blocos de células de armazenamento, sendo cada célula cilíndrica com 34m de altura e 9m de diâmetro interno. As fundações foram constituídas por estacas do tipo “diafragma”, de concreto armado, com seção transversal de 1,00m x 2,20m.

Velloso, Aoki e Salamoni (1978) reportaram os resultados de duas provas de carga estáticas realizadas em estacas denominadas E104 e E413, com comprimentos totais, na devida ordem, de 44,80m e 42,60m, conforme a Figura 2. Na montagem da prova de carga optou-se por utilizar as estacas do próprio bloco para se obter a reação.



(a) Estaca E104



(b) Estaca E413

Figura 2. Resultados das provas de carga (Fonte: modificado de VELLOSO, AOKI E SALAMONI, 1978).

No presente caso, foram utilizados *tell-tales* (vide Figura 3), ou seja, barras de aço colocadas no interior de tubos com as pontas fixadas nas profundidades em que se quer medir o recalque. Procurou-se medir os recalques no topo, na base e em pontos intermediários da estaca.

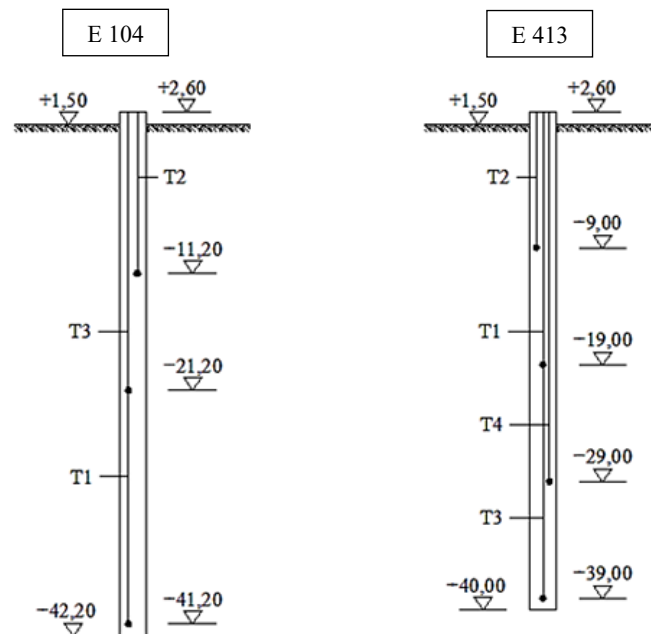


Figura 3. Esquema dos “tell-tales” nas estacas, com medidas em metros (VELLOSO, AOKI E SALAMONI, 1978)

Na área em estudo, como mostrado na Figura 4, foram realizadas 46 sondagens, sendo 7 mistas. As sondagens mistas indicaram que o substrato rochoso se encontra a uma profundidade variável de 42 a 50m, havendo uma camada de solo residual entre o substrato rochoso e o solo sedimentar. A sondagem mais profunda atingiu cerca de 62m de profundidade e lençol d'água é superficial.

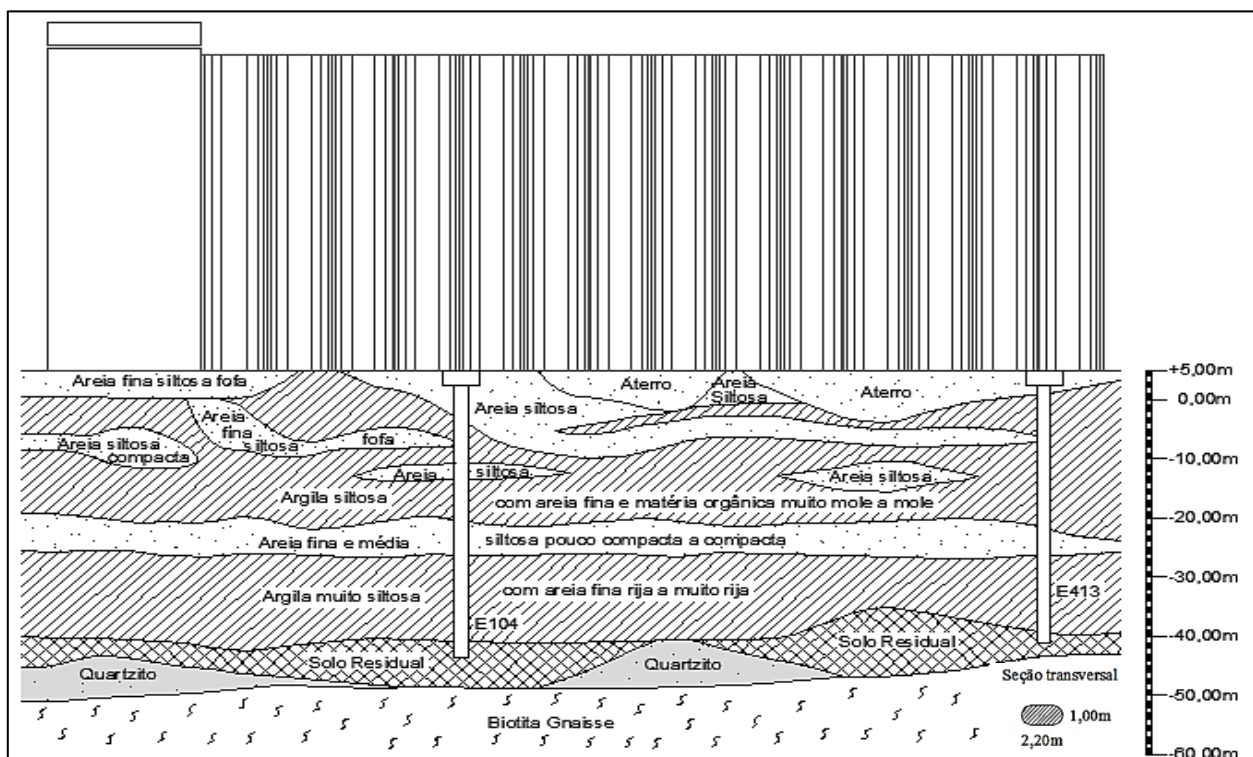


Figura 4. Perfil geotécnico simplificado do terreno (VELLOSO, AOKI E SALAMONI., 1978).

Segundo Mineropar (2006), as rochas do Estado do Paraná estão local e parcialmente recobertas por sedimentos inconsolidados (unidade litoestratigráfica Qm), oriundos da erosão e deposição das litologias mais antigas intemperizadas. Esta unidade litoestratigráfica é descrita como sedimentos marinhos de planície costeira indiferenciados, com cordões litorâneos. Também é possível observar uma área de aterro, a qual engloba a execução de aterros e modificações antrópicas.

No que tange à metodologia utilizada no presente artigo, inicialmente, foi efetuada a estimativa da capacidade de carga geotécnica pelos métodos semiempíricos e teóricos resumidos no item 2. Foi adotado o perímetro colado para a previsão da carga resistida por atrito lateral e a área circunscrita para a carga resistida pela ponta. As estimativas foram realizadas nas cotas -42m e -40m, cotas de assentamento das estaca E104 e E413, respectivamente.

Em seguida, foi verificada a possibilidade de extrapolação da carga de ruptura através da curva carga *versus* recalque, para comparação com as estimativas supracitadas.

Por fim, foram comparados os valores registrados pelas instrumentações *tell-tales*, instalados em determinadas profundidades nas estacas, e as estimativas de capacidade de carga, em profundidade, pelos métodos apresentados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a estaca E104, assentada na cota -42m, percebe-se que a estimativa pelo método de Aoki e Velloso (1975) gerou o valor mais baixo de capacidade de carga por atrito lateral, e o método de Velloso (1981) resultou no valor mais baixo de capacidade de carga de ponta. Por outro lado, os valores mais elevados para o atrito lateral e ponta foram obtidos pela metodologia de Décourt e Quaresma (1978, 1982) modificado por Décourt (1996) e pelo método β , respectivamente.

Já para a estaca E413, cuja cota de assntamento foi -40m, a estimativa pelo método β gerou o valor mais baixo de capacidade de carga por atrito lateral, e a metodologia do US Army Corps of Engineers (2005) resultou no valor mais baixo de capacidade de carga de ponta. Em contrapartida, os valores mais elevados para o atrito lateral e ponta foram obtidos, na devida ordem, pela metodologia de Velloso (1981) e pela metodologia proposta por Décourt e Quaresma (1978, 1982) modificado por Décourt (1996).

A Figura 5 e a Tabela 2 mostram a comparação das estimativas de capacidade de carga para as duas estacas instrumentadas, nas respectivas profundidades de assentamento.

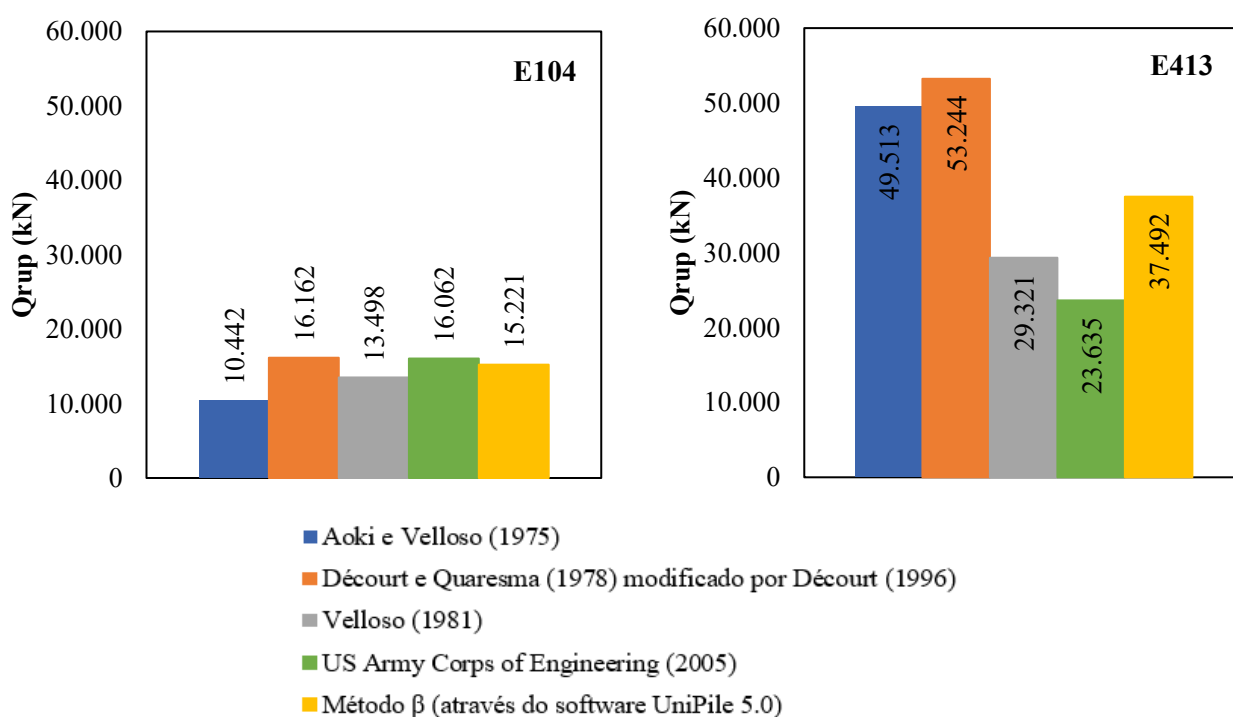


Figura 5. Comparação das estimativas de capacidade de carga.

Tabela 2. Comparação das previsões de capacidade de carga para as duas estacas.

Estaca	Método de previsão	Q_l (kN)	Q_p (kN)	Q_{rup} (kN)
E104	Aoki e Velloso (1975)	5.739 (55,0%)	4.703 (45,0%)	10.441
E104	Décourt e Quaresma (1978, 1982) mod. por Décourt (1996)	11.024 (68,2%)	5.138 (31,8%)	16.162
E104	Velloso (1981)	10.853 (80,4%)	2.645 (19,6%)	13.498
E104	US Army Corps of Engineering (2005)	10.678 (66,5%)	5.384 (33,5%)	16.062
E104	Método β (FELLENIOUS, 2017)	8.833 (58,0%)	6.388 (42,0%)	15.221
E413	Aoki e Velloso (1975)	8.685 (17,5%)	40.828 (82,5%)	49.514
E413	Décourt e Quaresma (1978, 1982) mod. por Décourt (1996)	12.283 (23,1%)	40.961 (76,9%)	53.244
E413	Velloso (1981)	15.543 (47,0%)	13.778 (53,0%)	29.321
E413	US Army Corps of Engineering (2005)	10.074 (42,6%)	13.561 (57,4%)	23.635
E413	Método β (FELLENIOUS, 2017)	7.447 (19,9%)	30.045 (80,1%)	37.492

Complementarmente, as Figuras 6 e 7 exibem os gráficos com as estimativas de capacidade de carga (Q_p , Q_l e Q_{ult}), em profundidade, pelos métodos apresentados anteriormente. Observa-se uma maior influência da segunda camada de areia siltosa (da superfície em profundidade) e da camada silte arenosa (mais profunda) na capacidade de carga de ponta em ambos os casos, deflagrado pela mudança de inclinação brusca nas curvas. Já para a capacidade de carga lateral, a camada silte arenosa mais profunda foi a que mais influenciou, porém com menor relevância, no geral, se comparado com a ponta.

As leituras das instrumentações nas estacas E104 (profundidades -11,20m, -21,20m e -41,20m) e E413 (profundidades -9,00m, -19,00m, -29,00m e -39,00m) estão indicadas como pontos negritados com o valor de carga de atrito acumulada na instrumentação, em cada seção. Estas informações também podem ser observadas nas Tabelas 3 e 4, a qual compara as estimativas pelos métodos estáticos e as leituras das instrumentações nas profundidades supracitadas.

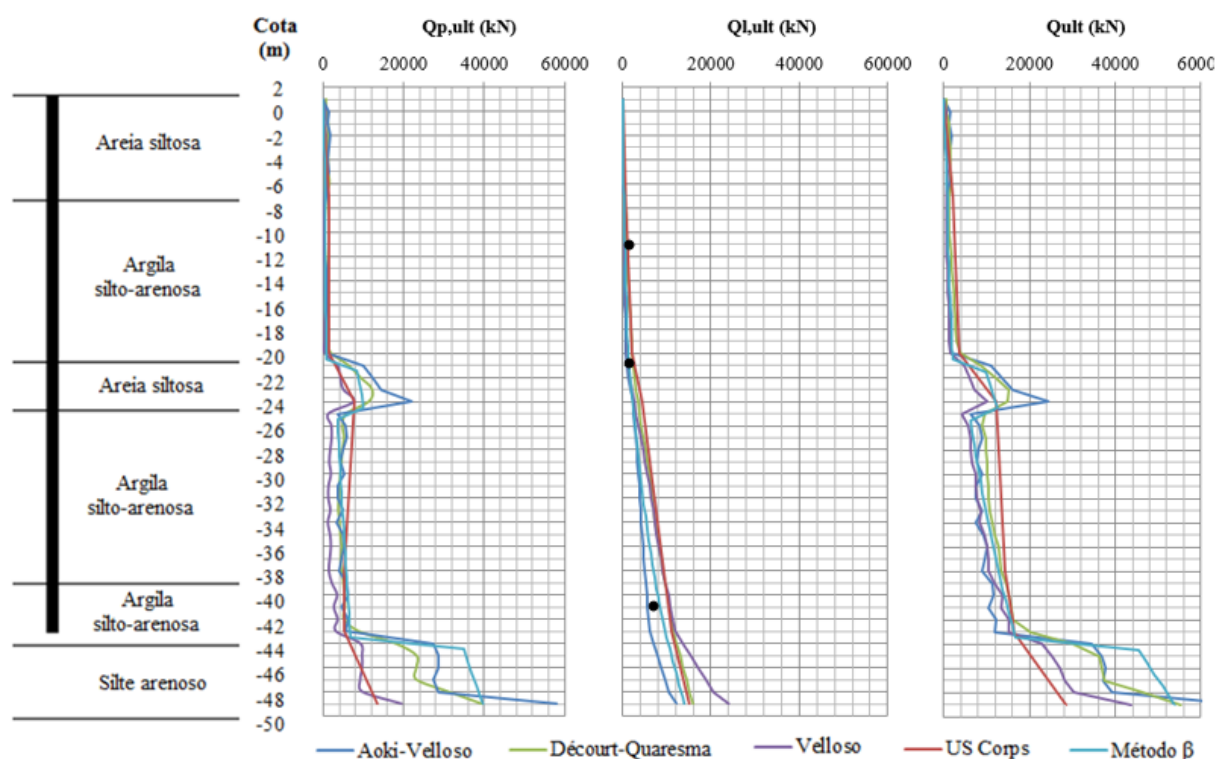


Figura 6. Estimativa de capacidade de carga (em profundidade) pelos métodos apresentados, Estaca E104 (modificado de AMENDOLA, 2018).

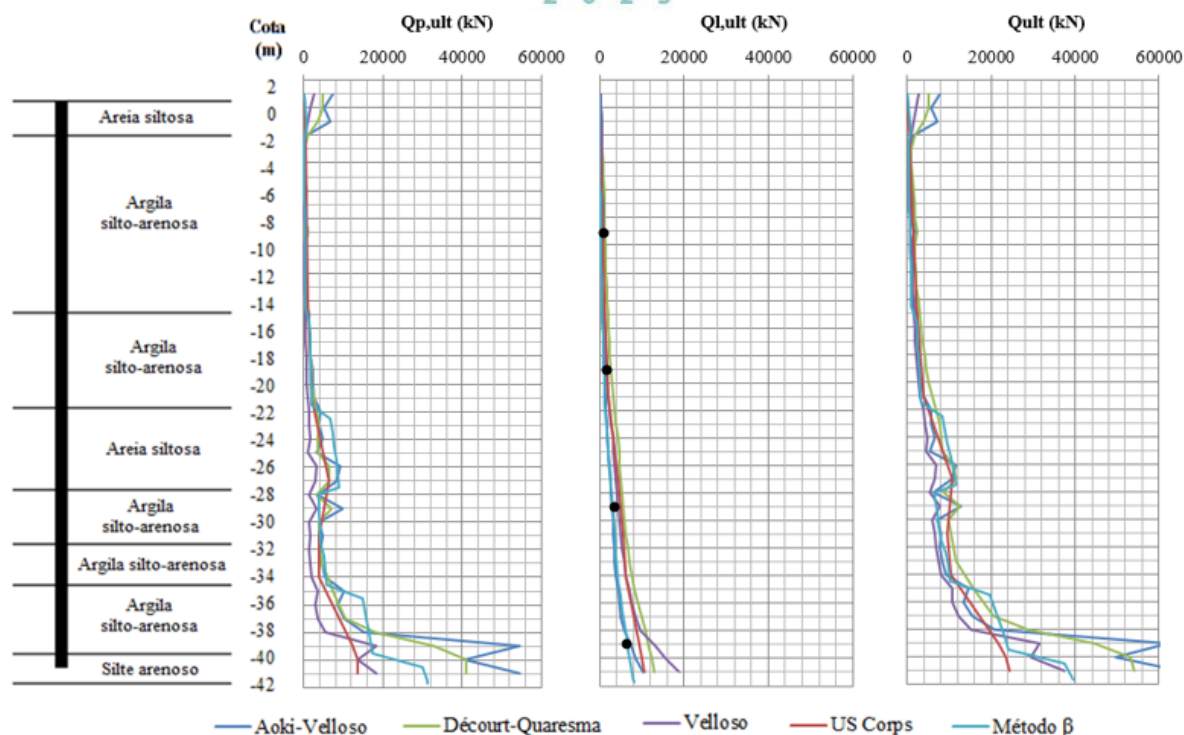


Figura 7. Estimativa de capacidade de carga (em profundidade) pelos métodos apresentados, Estaca E413 (modificado de AMENDOLA, 2018).

Tabela 3. Comparação entre as estimativas pelos métodos estáticos e as leituras dos *tell-tales* (Estaca E104).

Método de previsão	Atrito lateral acumulado (kN)		
	Cota -11,20m	Cota -21,20m	Cota -41,2m
Aoki e Velloso (1975)	390	1.004	5.738
Décourt e Quaresma (1978, 1982)	1.064	2.380	10.491
Velloso (1981)	484	1.384	10.852
U.S. Army Corps of Engineering (2005)	1.127	2.750	10.321
Método β (FELLENIOUS, 2017)	406	1.218	7.221
Prova de carga estática (E=21GPa)	2.550	3.309	7.401
Prova de carga estática (E=30GPa)	455	911	6.757

Tabela 4. Comparação entre as estimativas pelos métodos estáticos e as leituras dos *tell-tales* (Estaca E413).

Método de previsão	Atrito lateral acumulado (kN)			
	Cota -9,00m	Cota -19,00m	Cota -29,00m	Cota -39,00m
Aoki e Velloso (1975)	698	1.156	2.941	7.433
Décourt e Quaresma (1978, 1982)	1.299	2.687	5.569	11.548
Velloso (1981)	817	1.690	4.358	13.060
U.S. Army Corps of Eng (2005)	680	1.759	5.046	9.404
Método β (FELLENIOUS, 2017)	220	844	2.431	4.963
Prova de carga estática (E=21GPa)	1.417	3.504	5.829	6.883
Prova de carga estática (E=30GPa)	204	1.304	4.511	6.020

Conforme apresentado em Amendola, Danziger e Freitas (2022), o módulo de elasticidade do material da estaca influencia na transferência de carga e no atrito lateral em profundidade, sendo considerados os valores de 21 e 30GPa para os resultados da prova de carga estática. Constata-se que os resultados das leituras dos *tell-tales*, considerando as duas considerações de módulo de elasticidade da estaca, ficaram compreendidas entre as estimativas do atrito lateral acumulado pelos métodos semiempíricos e teóricos de capacidade de carga geotécnica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho comparou, para duas estacas tipo diafragma (barrete), a capacidade de carga geotécnica obtida por três métodos estáticos semiempíricos e dois teóricos, com o resultado da interpretação da transferência de carga de uma PCE instrumentada com *tell-tales*.

Para a estaca E104, percebe-se que a estimativa pelo método de Aoki e Velloso (1975) gerou o valor mais baixo de capacidade de carga por atrito lateral, e o método de Velloso (1981) resultou no valor mais baixo para a ponta. Por outro lado, os valores mais elevados para o atrito lateral e ponta foram obtidos pela metodologia de Décourt e Quaresma (1978, 1982) e pelo método β , respectivamente.

Já para a estaca E413, a estimativa pelo método β gerou o valor mais baixo de capacidade de carga por atrito lateral, e a metodologia do US Army Corps of Engineers (2005) resultou no valor mais baixo para a ponta. Já os valores mais elevados para o atrito lateral e ponta foram obtidos, na devida ordem, pela metodologia de Velloso (1981) e pela metodologia proposta por Décourt e Quaresma (1978, 1982).

Com relação às leituras dos *tell-tales*, a consideração de dois módulos de elasticidade para o material da estaca influenciou diretamente na transferência de carga em profundidade, isto é, quanto maior o módulo de elasticidade da estaca, maior a carga normal e, conseqüentemente, o atrito lateral é menos mobilizado. Maiores detalhes sobre esta influência poden ser consultados em Amendola, Danziger e Freitas (2022).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amendola, C. D. E. (2018) *Influência do modelo de transferência de carga de estacas isoladas na previsão do seu comportamento*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro / UERJ.
- Amendola, Danziger e Freitas (2022) *Influência da flexibilidade da estaca na transferência de carga e previsão do seu comportamento*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 20, São Paulo. Anais. São Paulo.
- Aoki, N.; Velloso, D. A. (1975) An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: Pan. Conf. Soil Mech. Geot. Eng, Buenos Aires. *Proc.*, v.1, p. 367-376.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Décourt, L., Quaresma, A. R. (1978) Capacidade de carga de estacas a partir de valores SPT. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 6, Rio de Janeiro. *Anais*. Rio de Janeiro, v. 1, p. 45-54.
- Décourt, L. (1982) Prediction of the bearing capacity of piles based exclusively on N values of SPT. In: European Symposium of Penetration Test, 2, Amsterdam. *Proceedings*, Amsterdam, v. 1, p. 29-34.
- Décourt, L. (1996) *Análise e projeto de fundações profundas: estacas*. In: HACHICH et al, (eds.), *Fundações: teoria e prática*, Pini, São Paulo, Brasil, p. 265-301.
- Fellenius, B. H. (2017) *Basics of Foundation Design*. Electronic Edition, 468 p.
- Mineropar (2006) *Mapa geológico do Estado do Paraná*. Paraná, Disponível em: http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/2_Geral/Geologia/PDF_Mapas_Geo_650000/Mapa_Geologico_PR_650000_2006.pdf. Acesso em: Setembro/2017.
- United States Army Corps of Engineers (2005) *Design of pile foundations*. University Press of the Pacific, Honolulu, Hawaii, USA.
- Van der Veen, C. (1953) The bearing capacity of a pile. In: Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3, Switzerland. *Proceedings*. Switzerland, v. 2, p. 84-90.
- Velloso, P. P. C. (1981) *Estacas em solo: dados para a estimativa do comprimento*
- Vargas, M. (1978) Uma experiência brasileira em fundações por estacas. 1ª parte: teoria das estacas verticais carregadas axialmente. *Revista Geotecnia*, Lisboa, n. 23, p. 3-33.