

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Contribuição ao Estudo do Embuchamento de Estacas de Aço em Argila Mole.

Victor Lisboa Silveira

Engenheiro Geotécnico, Vale, Rio de Janeiro, Brasil, victor.silveira@coc.ufrj.br

Francisco de Rezende Lopes

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, flopes@coc.ufrj.br

Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Professora, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, jannuzzi@poli.ufrj.br

Fernando Arthur Brasil Danziger

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, danziger@coc.ufrj.br

RESUMO: Este trabalho busca contribuir para entendimento do comportamento de estacas de aço cravadas em argilas moles, em particular na questão do embuchamento. Este fenômeno, em que o solo adere fortemente à estaca, faz com que a ruptura ocorra não na interface aço-solo, mas em uma área envolvente. Foram ensaiadas estacas modelo com três seções transversais diferentes: tubular (circular), quadrada e H, as duas primeiras com pontas abertas. As estacas foram cravadas em um campo experimental de argila mole, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, Brasil. As estacas foram cravadas e em seguida extraídas a velocidade constante com uma máquina de ensaios CPTu. Os ensaios forneceram curvas carga-deslocamento nas fases de cravação e extração. Após a cravação pôde-se medir a bucha formada nas estacas circular e quadrada; na estaca H, a bucha também pôde ser caracterizada. O registro contínuo da força de cravação indicou profundidades prováveis de formação da bucha e forneceu valores de atrito lateral unitário e resistência da ponta. Uma comparação dos registros da carga de cravação com os resultados obtidos de CPTu permitiu perfis da resistência ao cisalhamento não drenada, S_u , revelados pelos diferentes ensaios.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação em estacas, Estacas de aço, Estacas H, Embuchamento de estacas, Ensaio de Piezocone, Argilas moles.

ABSTRACT: The paper seeks to contribute to the understanding of the behavior of steel piles jacked into soft clays, in particular on the issue of plugging. This phenomenon, in which soil adheres strongly to the pile, causes failure to occur not at the steel-soil interface but at an enveloping area. Model piles were tested with three different cross-sections: pipe (circular), square and H, the first two open-ended. The piles were jacked at Sarapui II soft clay test site in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil. The piles were jacked and then extracted with constant rate. The tests provided load-displacement diagrams in both driving and extraction phases. After extraction, it was possible to measure the plug formed in the pipe and square piles; in the H pile, a plug could also be observed. The continuous record of the jacking force indicated probable depths of plug formation and provided values of unit side friction and tip resistance. A comparison of the jacking load records with CPTu results allowed profiles of the undrained shear resistance, S_u , revealed by the different tests.

KEYWORDS: Pile foundations, Steel piles, H piles, Pile plugging, Piezocone test, Soft clays.

1 Introdução

Estacas de aço são uma solução comum para fundações profundas, pois são fáceis de manusear, cravar e emendar, sendo a estaca circular (tubular) e o perfil H as mais usadas. Estacas tubulares de ponta aberta tendem a desenvolver bucha a uma certa profundidade e comportar-se, a partir dessa profundidade, como estacas de ponta fechada. Nas estacas H, no entanto, a formação de bucha é mais difícil de prever. Esse fenômeno, em que o solo adere fortemente à estaca, leva à ruptura – não na interface aço-solo – mas em uma



área envolvente. Para a previsão da capacidade de carga de estacas H, portanto, sempre há dúvida quanto ao perímetro da estaca, para efeito da resistência lateral, e a área de base, para efeito da resistência de ponta.

Em relação às estacas tubulares abertas, existem vários estudos sobre o embuchamento, tais como Paikowsky e Whitman (1990), Randolph et al. (1991), Niyama (1992), Paik et al. (2003). No entanto, existem poucos estudos sobre o embuchamento em estacas H, podendo ser citados: Schenck (1966), Tschebotarioff (1973), De Beer et al. (1985), Biddle e Guide (2005), Salgado (2006), Alonso (2008), Alves (2019) e Alves et al. (2021).

Este trabalho apresenta resultados de ensaios em estacas-modelo de aço submetidas a cravação e extração em argila mole. As estacas tinham três seções transversais: circular (tubular), quadrada e H, as duas primeiras com pontas abertas. As estacas foram cravadas no campo experimental de Sarapuú II, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, onde existe um depósito de argila orgânica muito mole. Neste campo experimental foram executadas várias investigações geotécnicas, tais como SPT, CPTu, DMT sísmico, ensaios de palheta e ensaios laboratoriais.

Os ensaios das estacas forneceram diagramas carga vs. deslocamento nas fases de cravação e extração. Após a extração, foi possível medir a bucha formada nas estacas. Os registros contínuos da força de cravação das estacas circular e quadrada indicaram profundidades prováveis de formação da bucha. Esses registros também forneceram valores de atrito lateral unitário médio e de resistência da ponta.

2 Embuchamento em estacas de aço

2.1 Embuchamento em estacas circulares de ponta aberta

As estacas de circulares de aço com ponta aberta geralmente desenvolvem uma bucha quando cravadas em solos arenosos e argilosos. Uma vez que a bucha é formada permanentemente (lembrando que ela pode se formar momentaneamente e depois ceder), a estaca se comporta como se fosse de ponta fechada, ou seja, o solo adere tão fortemente à estaca que passa a fazer parte dela, movendo-se junto com a estaca à medida que é cravada. A bucha ocorre quando a soma do atrito interno da bucha somada à resistência da ponta da área do anel de aço excede a resistência da ponta da estaca como se ela fosse fechada. Portanto, duas possibilidades são avaliadas (Paikowsky e Whitman, 1990):

$$Q_{sem\ bucha} = \sum f_{so} \cdot A_o + \sum f_{si} \cdot A_i + q_p \cdot A_t \quad (1)$$

$$Q_{com\ bucha} = \sum f_{so} \cdot A_o + q_p \cdot A_t \quad (2)$$

onde f_{so} e f_{si} são os atritos laterais unitários externo e interno da estaca

A_o e A_i são as áreas externa e interna da parede da estaca

A_t e A_p são as áreas da seção transversal total da estaca (área envolvente) e do perfil de aço

q_p é a capacidade de carga de ponta unitária.

A relação entre f_{so} e f_{si} depende da adoção de um anel de reforço interno, que provoca perturbação adicional do solo que entra na estaca, fazendo com que o atrito interno seja menor que o externo (De Nicola e Randolph, 1997). O menor valor entre os resultados das Equações (1) e (2) indicará se haverá bucha ou não. As equações (1) e (2) podem ser aplicadas ao longo da profundidade e, na profundidade em que os valores coincidem, é provável que a bucha seja formada. Essas previsões são feitas na fase de projeto, mas podem ser facilmente confirmadas na fase de obra medindo-se a profundidade do solo no interior da estaca.

Segundo Paikowsky e Whitman (1990), estacas circulares cravadas de ponta aberta formam bucha tanto em argilas como em areias, em profundidades cravadas tipicamente L/B de 10-20 em argilas e 25-35 em areias (sendo L o comprimento cravado e B a dimensão transversal da estaca).

2.2 Embuchamento em estacas perfil H

Uma revisão das recomendações para o embuchamento de perfis H pode ser vista em Alves et al. (2021). Essas recomendações estão resumidas na Figura 1 e Tabela 1.

Em relação à ponta da estaca, Biddle e Guide (2005) e Alonso (2008) sugerem não considerá-la embuchada, ao contrário dos outros autores. O Ministério da Infraestrutura da França (Ministère de l'Équipement, 1993) considera a ponta parcialmente embuchada.

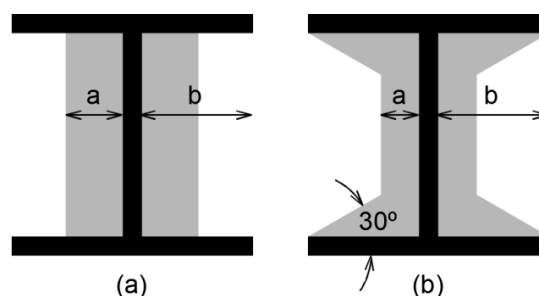


Figura 1. Possíveis embuchamentos de estacas de perfil H: (a) retangular e (b) poligonal

Tabela 1. Dimensões sugeridas para buchas por diferentes autores - para a , b , ver Figura 1 - (Alves et al., 2021)

Autor	Tipo de solo			
	Argila		Areia	
	Fuste	Ponta	Fuste	Ponta
Schenck (1966)	$a/b = 0$	$a/b = 1$	$a/b = 0$	$a/b = 1$
Tschebotarioff (1973)	$a/b = 1$		$a/b = 1$	
De Beer <i>et al.</i> (1985)	$a/b = 1$	$a/b = 1$	$a/b = 0.25$	$a/b = 0.25$
M.E.L.T. (1993)	$a/b = 0$	$a/b = 0.5$	$a/b = 0$	$a/b = 0.75$
Biddle (2005)	$a/b = 0$	$a/b = 0$	$a/b = 0$	$a/b = 0$
Salgado (2006)	$a/b = 1^*$ $a/b = 0^{**}$	$a/b = 1$	$a/b = 0$	$a/b = 0$
Alonso (2008)	$a/b = 0$	$a/b = 0$	$a/b = 0$	$a/b = 0$

* = argila mole; ** = argila rijá

Em relação ao fuste da estaca, Schenck (1966), Ministère de l'Équipement (1993), Biddle e Guide (2005) e Alonso (2008) não consideram a formação de bucha, ou seja, o perímetro para atrito lateral corresponde ao perímetro da seção de aço. De Beer et al. (1985) e Salgado (2006) consideram o fuste embuchado, ou seja, o perímetro para atrito lateral corresponde a um retângulo envolvente, exceto no caso de argila dura segundo Salgado (2006).

Schenck (1966) sugeriu que, independente do tipo de solo, não há formação de bucha no trecho do fuste (portanto, o atrito se daria no perímetro desenvolvido do perfil de aço) e que há formação de bucha na ponta (a ruptura se daria no retângulo envolvente). Estas sugestões têm sido seguidas na prática brasileira, e correspondem aos valores mais altos possíveis tanto para o perímetro como para a área de ponta. Se a espessura do aço t for pequena em comparação com a largura B da estaca H, segue-se:

- Perímetro do fuste: com embuchamento $U \sim 4B$; sem embuchamento $U \sim 6B$
- Área de ponta: com embuchamento: $A_t \sim B^2$; sem embuchamento $A_p \sim 3B.t$

3 Ensaios realizados

3.1 Estacas ensaiadas, equipamento de cravação e sistema de aquisição de dados

Foram ensaiadas estacas metálicas com 3 seções transversais: circular, quadrada e H, com as dimensões indicadas na Figura 2a. A estaca quadrada (não utilizada na prática) foi testada por apresentar a mesma geometria de uma estaca H totalmente embuchada. Todas as estacas tinham 1,50 m de comprimento.



Para a cravação e extração das estacas, utilizou-se uma máquina desenvolvida pela COPPE/UFRJ para ensaios CPTu e em estacas-modelo, com capacidade de cravação de 200 kN e peso de 7 kN. A velocidade de cravação e extração varia entre 0,1 cm/s a 5 cm/s. No presente trabalho a velocidade de cravação foi 2 cm/s e de extração 1.64 cm/s. A medição da força durante a cravação e a extração foi feita por uma célula de carga Kyowa com capacidade de 10 kN. O sistema de aquisição utilizado foi Kyowa PCD-300B, e as leituras eram visualizadas durante os ensaios com o auxílio do software DCS-100A instalado em um notebook.

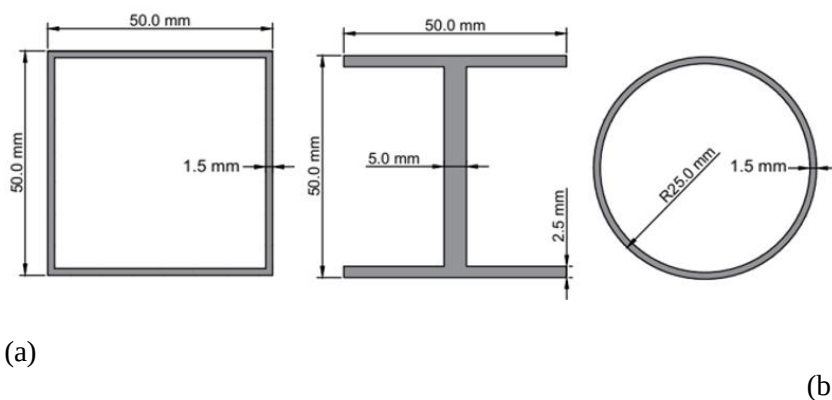


Figura 2. (a) Seções transversais dos perfis de aço utilizados e (b) observação da bucha na estaca H.

3.2 Local dos ensaios

Os ensaios foram realizados no campo experimental de argila mole Sarapuí II, localizado na região metropolitana do Rio de Janeiro, Brasil. A caracterização deste depósito pode ser vista em Jannuzzi (2009, 2013), Jannuzzi et al. (2015) e Danziger et al. (2019). O subsolo apresenta uma camada de 8 m de argila orgânica muito mole, cinza escuro, com fragmentos de concha. O lençol freático está acima ou ao nível do terreno. No local foram realizados ensaios de palheta (*vane tests*), ensaios de Barra T (*T-bar*) e CPTu. O piezocone mediu a poro pressão na face (u_1) e na base do cone (u_2). Resultados típicos de CPTu são apresentados na Figura 3, juntamente com perfis de S_u e S_{ur} (resistência indeformada e amolgada) obtidos de *vane tests*. A sensibilidade da argila é aproximadamente 5.

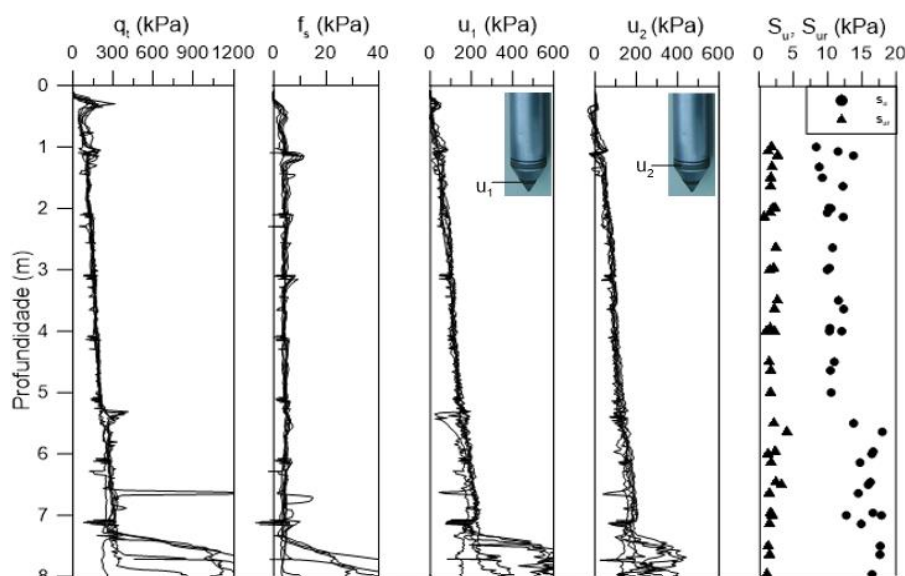


Figura 3. Perfis de (a) q_t ; (b) f_s ; (c) u_1 ; (d) u_2 , de CPTu, e (e) de S_u and S_{ur} de *vane tests* (Jannuzzi, 2009).



4 Ensaios de estacas

4.1 Diagramas de cravação e interpretação do embuchamento

A Figuras 4 mostra os diagramas carga x deslocamento (penetração e extração) para as estacas circular e quadrada e a Figuras 5 para a estaca H e todas as estacas juntas. A Tabela 2 mostra o valor máximo da carga de cravação, a força máxima de extração e o comprimento embuchado conforme inferido dos diagramas de cravação e medido após a extração (por exemplo, Figura 2b). As profundidades de formação da bucha nas estacas foram inferidas por mudanças nos diagramas carga vs. penetração. Essas mudanças – já observadas na cravação de tubos de parede fina para amostragem de argila –, são indicados nas Figuras 4 e 5.

Tabela 2. Forças e comprimentos de embuchamento medidos nos ensaios das estacas (Silveira, 2020)

Estaca	Força máxima de cravação (kN)	Força Máxima de extração (kN)	Comprimento de embuchamento inferido pelo diagrama (cm)	Comprimento de embuchamento medido (cm)
Circular	0,67	0,54	~ 20,0	20,5
Quadrada	0,77	0,63	~ 25,0	23,0
H	0,67	0,61	~ 70,0	72,5 de um lado; 57,0 do outro lado

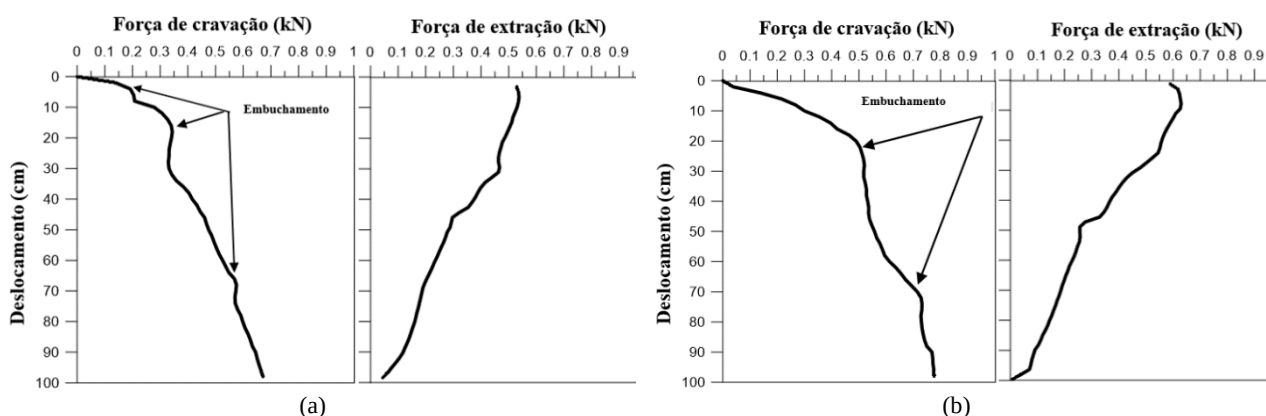


Figura 4. Diagrama carga x deslocamento para estaca (a) circular e (b) quadrada

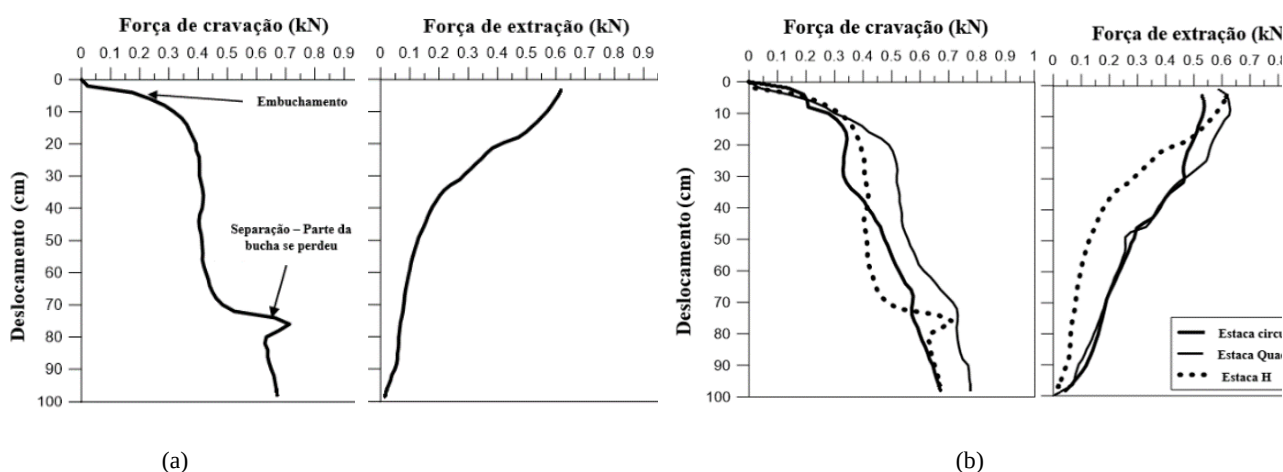


Figura 5. Diagrama carga x deslocamento para (a) estaca H e (b) todas as estacas



Acredita-se que ocorreram três momentos de embuchamento na estaca circular, dois na quadrada e um de maior magnitude na estaca H. O embuchamento é notado como uma mudança na tendência do diagrama carga vs. profundidade, e corresponderia à mudança da área da ponta, inicialmente como área da seção de aço, para a área envolvente.

A Figura 5b mostra os diagramas de cravação de todas as estacas juntos. Percebe-se que, durante a penetração dos primeiros 10 cm, as estacas apresentam praticamente o mesmo comportamento, ou seja, a mesma carga para uma determinada penetração. Observa-se também que no trecho de 0,15 m a 0,40 m, onde ocorre o pico de resistência de ponta do CPTu, e que corresponde à crosta sobre-adensada, ocorreram os primeiros sinais de embuchamento das estacas. Após essa profundidade, a taxa de aumento de carga com a penetração das estacas retangulares e quadradas é praticamente a mesma, a 0,48 kN/m. Percebe-se que, no momento em que a estaca H penetrou aproximadamente 0,15 m, ela começou a embuchar, o que ocorreu de forma mais significativa que nas demais estacas, em torno de 0,70 m.

Durante a extração, nos últimos 70 cm, tanto a estaca circular quanto a estaca quadrada apresentaram a mesma taxa de redução de carga: 0,57 kN/m. Observa-se que a estaca H apresentou um decréscimo de carga muito acentuado nos primeiros 0,50 m, e a seguir apresenta uma menor taxa de decréscimo de carga.

4.2 Interpretação em termos de atrito lateral unitário médio e resistência de ponta

A Tabela 3 apresenta os resultados dos cálculos de atrito lateral unitário médio e resistência de ponta unitária para as 3 estacas, consideradas embuchadas de acordo com as observações feitas. As estacas tinham um comprimento cravado de 1,00 m. A tabela também mostra resistências unitárias médias em ensaios CPTu.

Nos cálculos da resistência da ponta e do atrito lateral, considerou-se que a resistência lateral na extração é igual a da cravação (e que havia apenas resistência lateral na extração). O atrito lateral unitário médio foi obtido com:

$$\bar{f}_s = \frac{Q_{trac}}{U \cdot L} \quad (3)$$

Quanto à resistência da ponta unitária, ela foi calculada dividindo a diferença entre a força de cravação, Q_{comp} , e a força de extração, Q_{trac} , pela área da ponta, ou seja,

$$q_p = \frac{Q_{comp} - Q_{trac}}{A_t} \quad (4)$$

Observa-se que o atrito lateral unitário médio das estacas e no CPTu ficou muito próximo (~ 3 kPa), e próximo, ainda, da resistência não drenada amolgada da argila (S_{ur} da Figura 3). É natural que, no processo de cravação, a resistência lateral de uma estaca corresponda à resistência amolgada da argila. Com o tempo – em um processo de adensamento radial e recuperação da estrutura (conhecido como *recuperação* ou *set-up*) – a resistência lateral venha a se aproximar da resistência indeformada da argila.

Tabela 3. Atrito lateral unitário médio, $\bar{f}_s$, e resistência de ponta, q_p , em ensaios de estacas (Silveira, 2020) e CPTu (Jannuzzi, 2009)

Ensaio	Perímetro (cm)		Área de ponta (cm ²)		Atrito lateral médio com bucha $\bar{f}_s$ (kPa)	Resistência de ponta com bucha, q_p (kPa)	S_u (kPa)	S_{ur} (kPa)
	Sem bucha	Com bucha	Sem bucha	Com bucha				
Estaca circular	30,5	15,7	2,3	20,0	3,4	66	-	-
Estaca quadrada	38,8	20,0	2,9	25,0	3,1	56	-	-
Estaca H	29,0	20,0	4,8	25,0	3,0	24	-	-
CPTu (média)	-	~11,2	-	10,0	3,0	80	9,3	2,5



4.3 Interpretação em termos de perfil de resistência de ponta

Os diagramas de resistência de ponta vs. profundidade obtidos nos ensaios de estacas (q_p) e no CPTu (q_T) estão na Figura 6a. Para as estacas, em cada profundidade, a força de extração foi subtraída da força de cravação, indicando a força de ponta naquela profundidade; essa força foi dividida pela área da ponta para se obter a resistência de ponta unitária. Valores elevados até a profundidade de 25 cm se devem à consideração apenas da área da seção transversal do aço, A_p , uma vez que as estacas não estavam embuchadas até aquela profundidade.

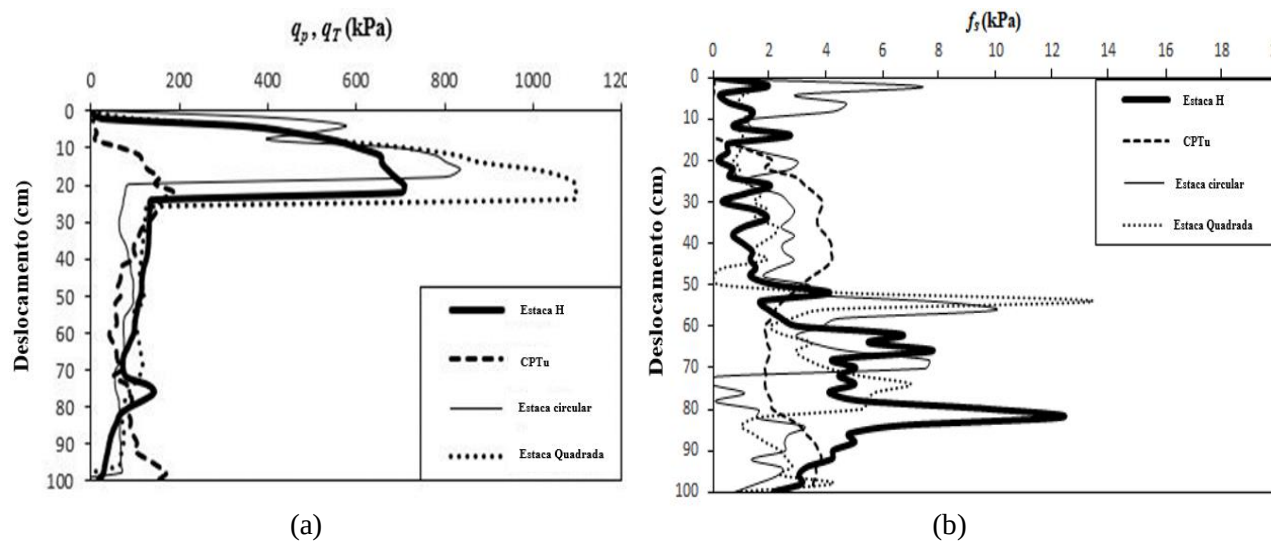


Figura 6. Perfis de (a) resistência de ponta nos ensaios de estacas e CPTu e (b) atrito lateral nos ensaios de estacas (na extração) e CPTu

4.4 Interpretação em termos de perfil de atrito lateral

Os diagramas de atrito lateral unitário (f_s) vs. profundidade obtidos a partir de ensaios de estacas e no CPTu estão na Figura 6b. Para as estacas, em cada profundidade, a força de extração foi dividida pela área do fuste embuchado.

5 Conclusões

Os ensaios realizados permitem as seguintes conclusões:

- Estacas circulares e quadradas desenvolveram bucha em $L/B \sim 5$;
- A estaca H apresentou argila mole aderida ao seu interior ao longo de quase todo o comprimento cravado, indicando que há formação de embucha tanto na ponta quanto no fuste; conseqüentemente, a capacidade do fuste deveria ser calculada com o perímetro de um retângulo envolvente, a partir da profundidade de embuchamento.
- Nas estacas ensaiadas, por serem relativamente curtas ($L/B = 20$), a contribuição da ponta para a capacidade total da estaca foi maior do que do fuste (diferente da prática de projeto, em que as estacas de aço são relativamente longas e derivam a maior parte de sua capacidade de carga do atrito lateral).
- Comparações de resistências de ponta unitária nas estacas e em ensaios CPTu realizados por Jannuzzi (2009) foram próximos, considerando as estacas embuchadas (comparações feitas abaixo da profundidade de embuchamento das estacas).
- Observou-se que, para a argila em questão, com uma sensibilidade em torno de 5, o atrito lateral durante a cravação corresponde à resistência amolgada da argila, enquanto a resistência da ponta corresponde a um valor intermediário entre a resistência indeformada e totalmente amolgada da argila.



6 Agradecimentos

Os autores agradecem à equipe do Laboratório de Ensaios In-Situ Prof. Márcio Miranda Soares, Laboratório Prof. Jacques de Medina, da COPPE/UFRJ, pelo apoio nos experimentos, ao CNPQ pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor e à CAPES pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Alonso, U. R. (2008). *Previsão da capacidade de carga geotécnica de estacas metálicas com a ponta em solo pouco competente*. SEFE VI, pp. 487-495, São Paulo.
- Alves, F.S (2019). *Estudo do embuchamento de estacas de aço perfil H em areias por ensaios em câmara de calibração*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Alves, F. S.; Lopes, F. R.; Danziger, F. A. B. & Santana, C. M. (2021). *Study of plugging of steel H piles, jacked in sand, in a calibration chamber*. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, vol. 21, Issue 4, pp. 206-219.
- Biddle, A. R. & Guide, H.-P. D. (2005). *H-pile design guide*. SCI Publication P335. The Steel Construction Institute, Ascot, England.
- Danziger, F. A. B.; Jannuzzi, G. M. F. & Martins, I. S. M. (2019). *The relationship between sea-level change, soil formation and stress history of a very soft clay deposit*. AIMS Geosciences, 461–479.
- De Beer, E. E.; Carpentier, R. & Weber, L. (1985). *Belgian geotechnical volume*. Published for the 1985 Golden Jubilee of the ISSMFE, pp. 9-25, Belcotec, Brussels.
- De Nicola, A. & Randolph, M. F. (1997). *The plugging behaviour of driven and jacked piles in sand*. Geotechnique, 47(4): 841–856.
- ISO - International Organization for Standardization (2016). *Petroleum and natural gas industries specific requirements for offshore structures: Part 4. Proc. Geotech. Found. Design Considerations*. Geneva.
- Jannuzzi, G.M.F. (2009). *Caracterização do depósito de solo mole de Sarapuú II através de ensaio de campo*. Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Jannuzzi, G.M.F. (2013). *Inovadoras, modernas e tradicionais metodologias para a caracterização geológico-geotécnica da argila mole de Sarapuú II*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Jannuzzi, G. M. F.; Danziger, F. A. B. & Martins, I. S. M. (2015). *Geological–geotechnical characterisation of Sarapuú II clay*. Engineering Geology, 190: 77–86.
- Ministère de l'Équipement (1993). *Titre V - Règles techniques de conception et de calculs des fondations des ouvrages de génie civil*. CCTG, Paris.
- Niyama, S. (1992). *Contribuição para o estudo do embuchamento em estacas cravadas de ponta aberta*. Tese de D.Sc., USP, São Paulo.
- Paik, K.; Salgado, R.; Lee, J. & Kim, B. (2003). *Behavior of open- and closed-ended piles driven into sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 129(4): 296-306.
- Paikowsky, S. G. & Whitman, R. V. (1990). *The effects of plugging on pile performance and design*. Canadian Geotechnical Journal, 27(4): 429–440.
- Randolph, M. F.; Leong, E. C. & Houlsby, G. T. (1991). *One-dimensional analysis of soil plugs in pipe piles*. Geotechnique, 41(4): 587–598.
- Salgado, R. (2006). *The engineering of foundations*. McGraw Hill, New York.
- Schenck, W. (1966). *Pfahlgründungen. Grundbau-Taschenbuch*, Ernst & Sohn, Berlin, 577–657.
- Silveira, V. L. (2020). *Contribuição ao estudo do embuchamento de estacas de aço em argila mole*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.