

Estudo de Estaca Metálica com Ponta Aberta Cravada em Solo Argiloso

Ellen Carreiro Abrahão 1

Graduanda em Engenharia Civil, Unilasalle-RJ, Niterói, Brasil, ellen.carreiro@gmail.com

Maurício José Azevedo Pinto dos Santos 2

Professor Assistente, Msc., Unilasalle, Niterói-RJ, Brasil, mauricio.pinto@lasalle.org.br

RESUMO:

O presente trabalho procura colaborar para o estudo da determinação do atrito negativo em estacas metálicas de ponta aberta para o caso de uma edificação vizinha a uma escavação profunda. Além disso, procurou-se explorar e abordar o fenômeno do embuchamento (“pile plug”) para o caso de obra citado. O caso em estudo é de uma edificação industrial, cujo maciço possui uma camada superficial de aterro hidráulico seguida de uma camada de solo compressível, onde está prevista uma escavação vizinha após a execução das fundações dessa edificação. Para essas fundações são previstos perfis metálicos do tipo duplo HP 310x125. O atrito negativo gerado nas fundações do prédio industrial foi causado pela formação da bacia de recalque oriunda da escavação. No presente trabalho, serão adotados três métodos disponíveis na literatura para estimar o atrito negativo: o método de Endo et al. (1969), o de Garlanger (1973) e o de Zeevaert (1983). Na determinação da capacidade de carga das estacas, avaliou-se o efeito do embuchamento a partir de considerações práticas. E por fim, procurou-se demonstrar os resultados obtidos comparando-se os métodos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações Profundas, Atrito Negativo, Embuchamento, Escavações, Recalques.

ABSTRACT:

This academic work aims to contribute to the study of negative friction in open-ended metal piles for an industrial building located next to a deep excavation. In addition, it explores and approaches the metal piles embedding phenomenon (pile plug) in this situation. The case in question is an industrial building whose ground has a superficial layer of hydraulic landfill followed by layer of compressible soil. A nearby excavation is due at this region once the building's foundations have been laid. Steel H-piles are used in such foundations. The soil deformation caused by trench excavation produced negative friction on the piles. This study considers three different technical methods to estimate the negative friction: Endo et al. (1969), Garlanger (1973) and Zeevaert (1983). The plugging effect is evaluated based on practical considerations in order to determine the piles' load capacity. Finally, this study demonstrates the results obtained by comparing these three methods analyzed.

KEYWORDS: Deep Foundations, Negative Friction, Pile Plug, Excavations, Settlements.

1 Introdução

O atrito negativo ocasiona um acréscimo de carga axial nos elementos de fundação profunda e, por isso, é importante avaliá-lo. Suas causas podem estar relacionadas ao adensamento de uma camada de solo mole, às escavações vizinhas que produzem uma bacia de recalques em fundações existentes, entre outras causas.

O presente artigo refere-se a uma avaliação do atrito negativo em estacas metálicas cravadas, relativas às fundações de uma edificação industrial executada anteriormente a uma escavação vizinha. Essa escavação vizinha às fundações é contida por uma parede diafragma atirantada e produz uma bacia de recalques que provoca o atrito negativo. A partir das sondagens disponíveis, do comprimento cravado das estacas, do projeto da parede diafragma atirantada, e do comprimento estimado dos tirantes, presumiu-se o recalque oriundo das escavações, de modo a subsidiar uma análise quantitativa do atrito negativo por diferentes métodos escolhidos.

Ainda, por se tratar de uma estaca metálica de ponta aberta, procurou-se paralelamente abordar o efeito de embuchamento, conhecido como “plug pile”.

A partir das premissas consideradas e das análises realizadas, buscou-se discutir os resultados obtidos.

2 Contextualização teórica

2.1 Avaliação do Atrito Negativo

O fenômeno do atrito negativo é de fácil entendimento porém sua quantificação é complexa. Peck (1969) observou que, por mais que as estruturas de contenção possam possuir grande rigidez, como as paredes diafragma atirantadas devidamente escoradas, verificam-se deslocamentos. Peck ressalta também que os movimentos no entorno de uma escavação profunda são responsáveis por recalques numa região, denominada bacia de recalque, e que no caso de argilas moles a área de incidência desses recalques pode ocorrer de 3 a 4 vezes a profundidade da cava.

No presente estudo são apresentados três métodos de cálculo para estimativa do atrito negativo oriundo de escavação vizinha a uma edificação existentes. Os métodos escolhidos foram o método de Endo et al. (1969), o de Garlanger (1973) e o de Zeevaert (1983). Procurou-se utilizar premissas e aproximações julgadas adequadas para utilização desses métodos no presente estudo.

2.1.1 Método de Endo et al. (1969)

Endo et al. (1969) produziram um estudo elaborado em estacas cravadas instrumentadas que propõe o maior valor do atrito negativo dado pela equação (1):

$$AN_{m\acute{a}x} = \eta \cdot U \cdot \alpha \cdot \int_0^{\beta l} \sigma'_v dz \quad (1)$$

Onde:

η = coeficiente que depende da ponta da estaca. Para estacas de ponta aberta $\eta = 0,6$ e para estacas de ponta maciça, $\eta = 1$;

U = perímetro da estaca;

$\alpha = K \cdot \tan\phi'_a$;

K = coeficiente de empuxo do solo no repouso;

ϕ'_a = ângulo de atrito estaca-solo;

$\beta = \frac{ln}{l}$ = profundidade relativa do ponto neutro. Os autores indicam que $0,73 < \beta < 0,78$;

ln = distância entre o topo da estaca e o ponto neutro;

l = comprimento da estaca.

Endo et al verificou que os valores referentes à profundidade relativa do ponto neutro $\left(\frac{ln}{l}\right)$ variam de 0,73 a 0,78. No presente estudo, a partir da determinação da bacia de recalque oriunda da escavação e dado o comprimento das estacas da fundação existente, definiu-se o ponto neutro cuja relação $\left(\frac{ln}{l}\right)$ foi de 0,78.

2.1.2 Método de Garlanger (1973)

O estudo de Garlanger (1973) propõe que o atrito negativo, em qualquer altura ao longo do fuste de uma estaca isolada, seja proporcional a tensão efetiva que atua naquela profundidade, sendo expressa pela equação (2) fornecida abaixo:

$$F_n = \sum U \cdot \tau \cdot dz = \int_0^H U \beta \cdot \sigma'_v dz \quad (2)$$

Onde:

U = Perímetro da estaca

β = Parâmetro que varia de acordo com o tipo de solo

De acordo com Garlanger (1973) a forma mais confiável de definir o parâmetro β é executar a cravação de variados tipos de estacas em diferentes solos, submetendo o solo a um recalque em relação à estaca, medir a carga a diferentes profundidades na estaca, e assim, alcançando o valor de β por retro análise. Garlanger, a partir de seus estudos, recomenda os valores para β fornecidos tabela 1, que são dependentes do tipo de solo.

Tabela 1. Valores estimados de β , sugeridos por Garlanger (1973). (Adaptado de Long e Healy, 1974)

Solo	β
Argila	0,20 a 0,25
Silte	0,25 a 0,30
Areia	0,35 a 0,50

Ao penetrar em camadas de solo com propriedades diferentes, as estacas apresentem o atrito negativo total pela soma da atuação de cada camada acima do ponto neutro, dado pela expressão:

$$F_n = U \cdot [\beta_1 \cdot A_1 + \beta_2 \cdot A_2 + \dots + \beta_n \cdot A_n] \quad (3)$$

Sendo:

β_1, β_2 e β_n = valores do parâmetro β para as camadas 1, 2 e n ;

A_1, A_2 e A_n = áreas dos diagramas de tensões efetivas de cada uma das camadas;

U = perímetro da estaca.

A maior limitação desse método é a ponderação do parâmetro β , em virtude de seus valores exatos serem obtidos por meio de ensaios. Entretanto, no presente estudo, adotou-se $\beta=0,25$ por se tratar de solo com horizonte argilo-siltoso.

2.1.3 Método de Zeevaert (1983)

Zeevaert foi um dos autores que mais aprofundou seus estudos sobre o atrito negativo. Em seu estudo fez uma análise bem detalhada do problema em estacas isoladas e em grupo.

Segundo Zeevaert, é necessário entender como se desenvolve a tensão efetiva horizontal ao longo do processo do atrito negativo. Após esse entendimento, Zeevaert (1983) indica sua proposta de avaliar a resistência ao cisalhamento do solo próximo ao fuste da estaca.

A equação apresentada pelo autor para o cálculo do atrito negativo é expressa por:

$$R_n = U \cdot k_0 \cdot \tan\phi \left(P_0 \cdot L + \frac{\gamma L^2}{2} \right) \quad (4)$$

Onde:

k_0 = coeficiente de empuxo no repouso $\cong 1 - \text{sen } \phi$;

ϕ = ângulo de atrito interno do solo;

U = perímetro da estaca;

P_0 = tensão vertical;

L = espessura da camada compressível;

γ = peso específico do solo em termos de tensão efetiva.

2.2 Embuchamento

Grande parte das pesquisas diz que a bucha ou “plug” acontece quando, durante o processo de cravação de uma estaca de ponta aberta, o solo em que a estaca está sendo colocada penetra em seu interior até que passam a se deslocar como um único corpo, como se fizesse parte da estaca. Para melhor entendimento do fenômeno do embuchamento, com intenção de identificar e quantificar sua influência no desempenho das estacas metálicas cravadas, cabe fazer uma abordagem sobre a ocorrência da bucha em estacas vazadas, também chamado de efeito “plug”. Em estacas metálicas de ponta aberta (ou vazada), as áreas laterais e de ponta podem variar de acordo com o solo em que elas serão cravadas devido à ocorrência do embuchamento. Esse fenômeno pode ser entendido como a compactação interna do solo ao se cravar esse tipo de estaca, a partir do qual pode-se considerar a contribuição dessa área vazada na parcela de ponta na capacidade de carga da estaca. Cabe destacar que esse é um assunto que ainda é motivo de grandes discussões e divergências no meio técnico. Entretanto, algumas considerações e simplificações foram adotadas nesse trabalho.

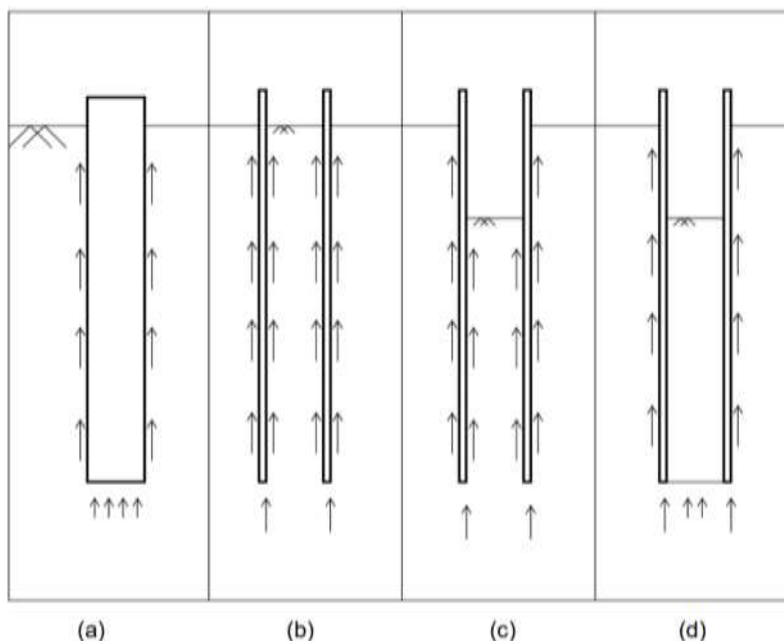
No início da cravação de estacas vazadas, o solo que preenche o interior da estaca é proporcional à penetração desta no solo. Quando no interior da estaca o comprimento do solo é semelhante à profundidade da penetração, não há a formação de bucha. Conforme a cravação continua, o solo adicional que penetra na estaca, pode desenvolver resistência ao atrito da parede interna da estaca suficiente para impedir a passagem de mais solo, constituindo o que chamamos de embuchamento.

Segundo Paikowski e Whitman (1990), estacas metálicas de ponta aberta podem possuir três estágios durante sua cravação, sendo eles o estágio da estaca plugada, não embuchada e parcialmente embuchada. As resistências desenvolvidas em uma estaca de ponta vazada conforme é feita a cravação podem ser observadas na Figura 1.

Doherty, Gavin e Gallagher (2010), ao analisarem a influência do plug em argila mole, constataram que a resistência alcançada com a bucha é semelhante a resistência atingida por uma estaca de seção fechada. Resultado que também já havia sido encontrado por SOO et al. (1980).

Por ser um fenômeno de fácil compreensão mas de difícil quantificação, adota-se nesse trabalho a seguinte premissa: considerando a seção vazada, quando a parcela de resistência lateral disponível for maior que a parcela de resistência de ponta disponível a estaca é considerada embuchada. Ao se considerar a estaca embuchada, as características geométricas da seção transversal da estaca são alteradas, ou seja, a estaca passa a ser considerada como de ponta fechada (maciça) ao invés de vazada.

Figura 1. Resistências desenvolvidas em uma estaca de ponta vazada conforme é feita a cravação, para: (a) estacas de ponta fechada; (b) estacas vazadas sem formação de plug; (c) estacas vazadas na fase de formação de plug; (d) estacas vazadas em o plug formado. (Doherty, Gavin e Gallagher, 2010)



3 Estudo de Caso

O estudo de caso é relativo a uma obra de um prédio industrial, com fundações profundas em estacas metálicas cravadas de duplo perfil HP 310x125, com previsão em projeto de 40 metros de comprimento, cujo perímetro é de 243,4 centímetros e área da seção transversal igual a 318 cm².

O maciço é composto por uma camada espessa de aterro hidráulico, subjacente por camadas de argila siltosa e silte arenoso, conforme pode se observar no perfil geotécnico, elaborado com base nas sondagens disponíveis e mostrado na Figura 2.

O atrito negativo produzido nas estacas cravadas é oriundo das escavações vizinhas a edificação industrial, contida por paredes diafragmas atirantadas. A região da bacia de recalque produzida pela escavação adjacente pode ocorrer de 3 a 4 vezes a profundidade da cava, como citado por Peck (1969). Nesse sentido, parte das fundações executadas anteriormente as escavações se encontram dentro da bacia de recalques.

O estudo de caso, portanto, se resumiu a estimar o atrito negativo para a estaca, anteriormente descrita, situada a uma distância de 30 metros da estrutura de contenção, que sofrerá uma escavação de cerca de 17 metros de profundidade. A escavação é contida pela contenção em parede diafragma atirantada situada sobre a sondagem SP-01, enquanto que a estaca analisada se encontra próxima a sondagem SP-03, conforme indicado no perfil geotécnico (Figura 2).

O perfil geotécnico, elaborado com base nas sondagens disponíveis, subsidiou uma importante análise da determinação da profundidade do ponto neutro. Salienta-se que as análises nesse artigo foram realizadas com base na sondagem à percussão SP-03 por estar mais próxima da estaca em estudo.

Anteriormente a esse trabalho, realizou-se uma análise do deslocamento vertical do conjunto solo-estaca produzida pela escavação vizinha, com objetivo de determinar o ponto neutro. A figura 3 apresenta o deslocamento vertical produzido em função da profundidade, na região da estaca em estudo, onde foi possível adotar, como premissa para a determinação do atrito negativo, o ponto neutro na profundidade de 28 metros. Sendo assim, admitiu-se que acima da cota de -28 metros o atrito lateral seja negativo e abaixo desta cota o atrito lateral seja positivo. Como a magnitude do deslocamento vertical nas estacas variam de acordo com a distância da cava, os valores indicados servem apenas para a estaca em estudo, escolhida por estar mais próxima a escavação e consequentemente ser a mais crítica.

Figura 2. Perfil geotécnico

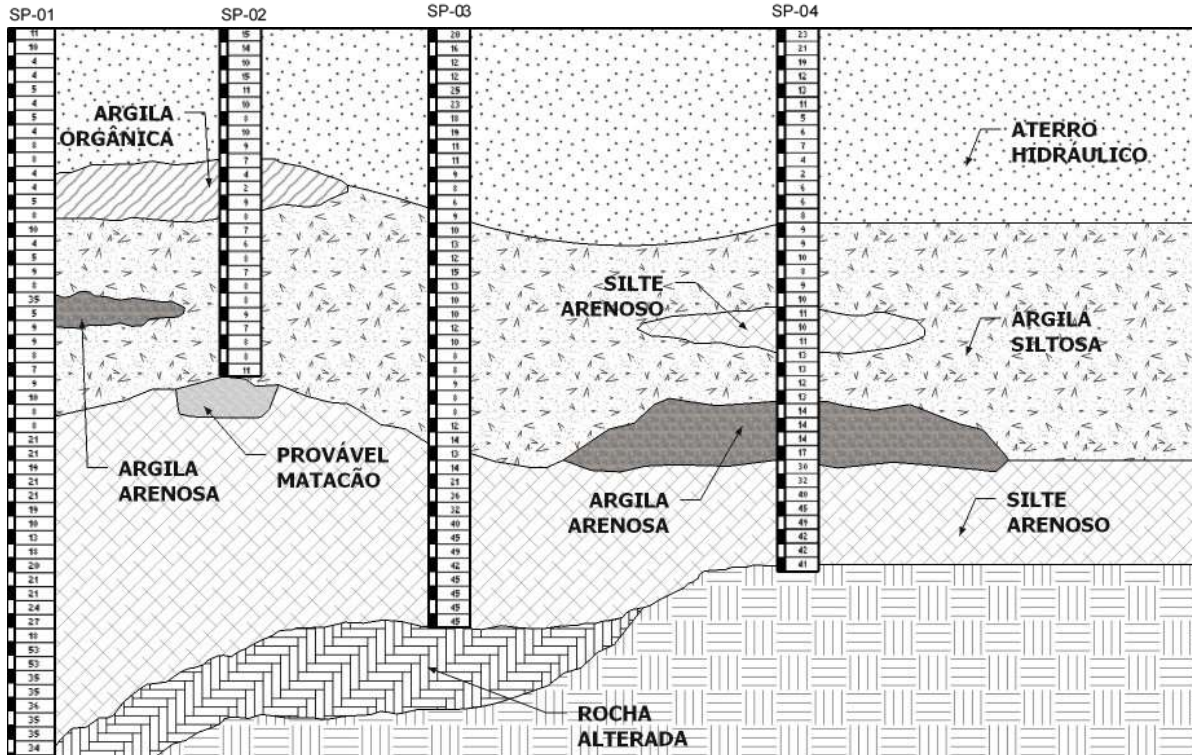
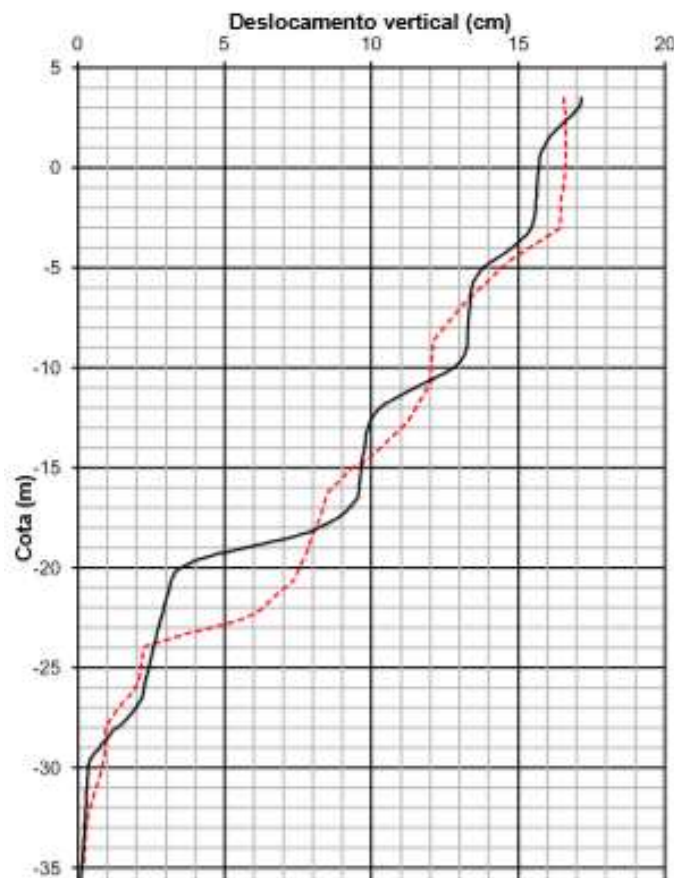


Figura 3. Análise de deslocamento vertical na região da estaca em estudo



3.1 Capacidade de Carga

Para a determinação da capacidade de carga da estaca em estudo utilizou-se o método Aoki-Velloso (1975). Realizou-se uma análise considerando ou não o embuchamento da estaca. Quando não embuchada, a estaca possui perímetro de 3,62 m e área da ponta 0,032 m² e, considerando-a embuchada, possui perímetro de 2,43 m e área de ponta 0,12 m².

A partir do comprimento da estaca definido em 40 metros, e conhecido a cota do ponto neutro, determinou-se a resistência lateral e a parcela de ponta como se a estaca não estivesse embuchada (seção vazada). Após a realização desses cálculos admitiu-se, por premissa de projeto, que quando a parcela de resistência lateral disponível for maior que a parcela de resistência de ponta disponível, a estaca seja considerada embuchada. Ou seja, em todo trecho da estaca em que há atrito lateral positivo e a premissa adotada para o embuchamento seja satisfeita, admite-se que a estaca tenha sua ponta com comportamento de seção maciça. Sendo assim, determinou-se novamente a capacidade de carga da estaca utilizando os valores de perímetro e área da seção da estaca de ponta fechada, no trecho embuchado. Comparando esses resultados com os valores encontrados para carga de ruptura para a seção vazada, adotou-se, ainda, o menor valor encontrado entre as duas análises. Destaca-se ainda que nos 4 metros finais à estaca se comportou como embuchada, de acordo com o critério adotado.

Com o comprimento da estaca definido em 40 m, a partir de um estudo prévio de cravabilidade, a carga de ruptura é menor pra estaca considerando a seção fechada na região da cota de assentamento, e por isso, a estaca é admitida como embuchada (ponta fechada). Da mesma forma, os valores da resistência lateral são relativos à estaca embuchada, bem como a carga disponível, considerando o fator de segurança igual a 2 indicado pela ABNT NBR 6122/2010.

3.1.1 Estaca Metálica de ponta aberta

A seguir apresenta-se a tabela 2 com a determinação da capacidade de carga da estaca metálica considerada de ponta aberta.

Tabela 2. Capacidade de carga na estaca metálica de ponta aberta

RI (kN)	Rp (kN)	PR (kN)	P adm (kN)
5497,27	398,57	5895,84	2947,9

3.1.2 Estaca Metálica de ponta fechada

A seguir apresenta-se a tabela 3 com a determinação da capacidade de carga da estaca metálica considerada de ponta fechada.

Tabela 3. Capacidade de carga na estaca metálica de ponta fechada

RI (kN)	Rp (kN)	PR (kN)	P adm (kN)
3696,23	1478,57	5174,80	2587,4

3.2 Verificação do Embuchamento

A seguir apresenta-se a tabela 4 com a determinação da capacidade de carga da estaca considerando ou não o embuchamento. No caso do presente trabalho, adotou-se para a capacidade de carga o menor dos dois valores, conforme já explicitado anteriormente.

Tabela 4. Verificação do embuchamento

Rl (kN)	Rp (kN)	PR (kN)	Rl (emb) (kN)	Rp (emb) (kN)	PR (emb) (kN)	P adm final (kN)
145,21	55,27	200,48	97,64	205,03	302,67	100,2
314,63	64,48	379,11	211,55	239,20	450,75	189,6
503,95	101,33	605,27	338,84	375,89	714,73	302,6
707,82	109,12	816,94	475,92	404,80	880,72	408,5
1.013,64	163,68	1177,32	681,55	607,20	1288,75	588,7
1.572,16	318,86	1891,01	1057,08	1182,86	2239,94	945,5
2.068,61	283,43	2352,04	1390,88	1051,43	2442,31	1176,0
2.689,18	354,29	3043,47	1808,14	1314,29	3122,43	1521,7
3.387,33	398,57	3785,90	2277,56	1478,57	3756,13	1878,1
4.147,53	434,00	4581,53	2788,70	1610,00	4398,70	2199,3
4.799,13	372,00	5171,13	3226,82	1380,00	4606,82	2303,4
5.497,27	398,57	5895,84	3696,23	1478,57	5174,80	2587,4

3.3 Atrito Negativo

Foram elaboradas estimativas do valor do atrito negativo na estaca metálica estudada por 3 métodos: Endo et al. (1969); Garlanger (1973); Zeevaert (1983), conforme apresenta a tabela 5 abaixo.

Tabela 5. Valores estimados de atrito negativo

Método	Atrito negativo, máx (kN)
Endo et al. (1969)	1268,7
Garlanger (1973)	2354,8
Zeevaert (1983)	2858,4

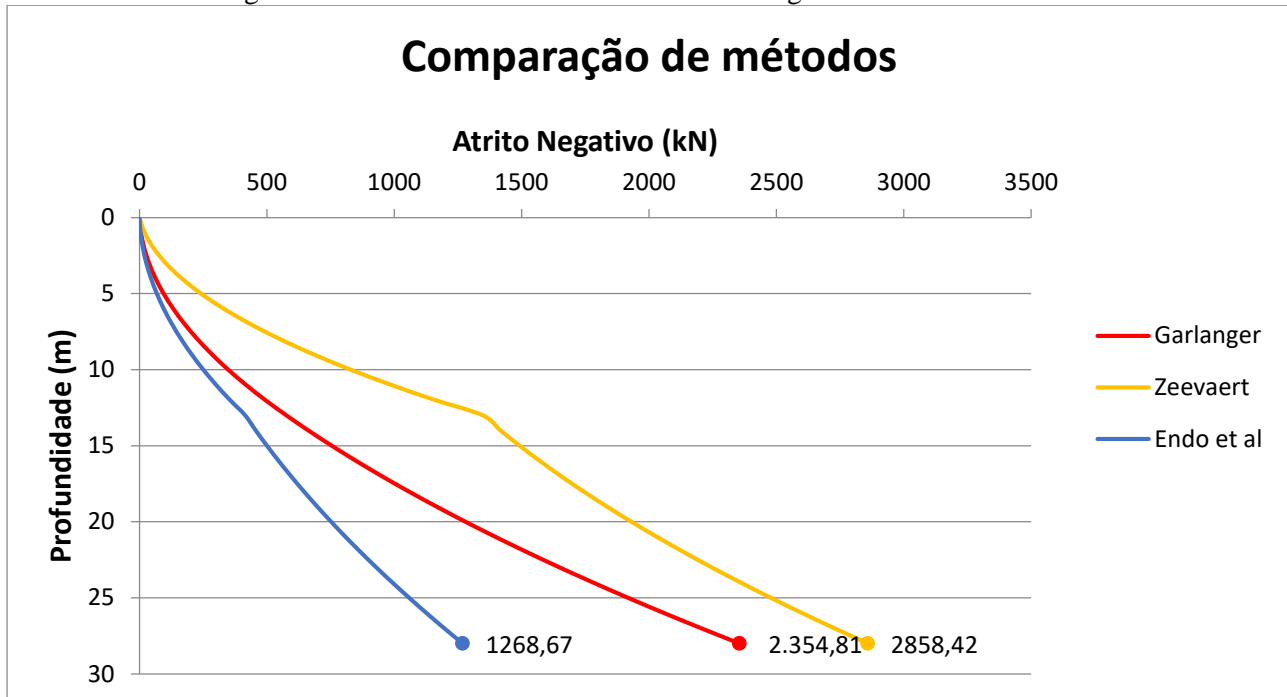
4 Considerações Finais

O objetivo dessa pesquisa foi estudar comparativamente métodos de estimativa do atrito negativo em estacas metálicas de ponta aberta cravada em solo de argila mole.

Os valores encontrados através dos métodos Endo et al (1969) Garlanger (1973) e Zeevaert (1983) foram divergentes, atribuindo-se esse aspecto ao fato de cada um dos métodos utilizar parâmetros bastante diferentes na estimativa do atrito negativo.

Com base nos resultados obtidos elaborou-se um gráfico comparativo com os valores de atrito negativo estimados atuantes ao longo do comprimento da estaca até a profundidade de ponto neutro, conforme pode ser observado figura 4 a seguir:

Figura 4. Análise de deslocamento vertical na região da estaca em estudo



O método de Zeevaert (1983) é um dos mais usuais, que considera vários parâmetros e aspectos, podendo ser utilizado tanto em estacas isoladas quanto em grupo de estacas. Os resultados obtidos para esse método se mostraram mais conservadores se comparado com os outros dois. Ainda para o método de Zeevaert (1983), pode-se observar que até a profundidade aproximada de 14 metros, onde o tipo do solo se altera de Aterro Hidráulico para a Argila Siltosa, os valores do atrito negativo aumentam de forma mais acentuada em função dos parâmetros geotécnicos que utilizam, como coeficiente de empuxo no repouso, ângulo de atrito interno do solo, tensão vertical e peso específico do solo.

Observa-se pro método Garlanger (1973) que o atrito negativo aumenta de forma incremental ao longo da profundidade. Seus valores se situaram em níveis intermediários se comparado com os outros dois métodos.

O método de Endo et al (1969) apresentou resultados menos conservadores quando comparado com os demais.

A capacidade de carga da estaca metálica cravada foi determinada a partir do conhecido método de Aoki-Velloso (1975). Considerou-se o comportamento da estaca com relação ao efeito de embuchamento a partir das premissas adotadas. Entretanto, o estágio parcialmente embuchado da estaca não foi considerado na análise. Todavia, a partir das tabelas 2 e 3, pode-se observar que os resultados de capacidade de carga admissível das estacas apresentaram diferenças pequenas, da ordem de 13 %.

Nas estacas vazadas constatou-se que o perímetro é maior que nas estacas fechadas ($U_{vazada} = 3,62m$ e $U_{fechada} = 2,43m$), o que faz com que a resistência lateral disponível seja maior na estaca vazada. Entretanto, nas estacas de ponta fechada, onde a área da seção transversal, considerada maciça, é maior do que em estacas vazadas ($A_{vazada} = 0,03 m^2$ e $A_{fechada} = 0,12 m^2$), a resistência de ponta disponível é maior do que nas estacas de ponta aberta. Assim, como é de conhecimento, a geometria, da estaca e da sua seção transversal, influencia diretamente na capacidade de carga.

A carga admissível da estaca, determinada pelo método Aoki-Velloso (1975), foi de 2587,4 kN e o atrito negativo atuante, obtido pelo método de Zeevaert (1983), foi de 2858,4 kN. Analisando mais uma vez os resultados, observa-se que a parcela do atrito negativo é tão alta que a capacidade de carga da estaca é inferior a solicitação do atrito negativo. Ou seja, a estaca não suportaria o atrito negativo e tão pouco as cargas oriundas da superestrutura.

Por fim, propõe-se a adoção de soluções que reduzam o atrito negativo ou a escolha de outro tipo de fundação, visando o aumento da capacidade de carga da estaca disponível e redução do atrito negativo atuante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aoki, N.; Velloso, D. A. (1975) An Aproximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles. In: 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 1, p. 367-376, Buenos Aires.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2010). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Endo, M.; Minou, A.; Kawasaki, T.; Shibata, T. (1969) *Negative Skin Friction Acting on Steel Pipe in Clay*. In: 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 2, p. 85-92, México.
- Doherty, P.; Gavin, K.; Gallagher, D. (2010) *Field investigation of base resistance of pipe piles in Clay*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, v. 163, N°2, p. 13–22.
- Garlanger, J. (1973) *Prediction of the downdrag load at Culter Circle bridge*. In: Symposium on Downdrag of Piles. MIT.
- Long, R.; Healy, K. (1974) *Final Report on Negative Skin Friction on Piles*. School of Engineering - The University of Connecticut.
- Paikowsky, S.G.; Whitman, R.V. (1990) The Effects off Plugging on Pile Performance and Design. *Canadian Geotechnical Journal*, 247(3), p. 429-440.
- Peck, R. B. R. (1969) Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground, In: 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 1, p. 225-281, México.
- Soo, C.F.; Lin, C.C.; Wag, R.F.; Ou, C.D.; Moh, Z.C. (1980) Plugging of open-end steel pipe piles. In: 6th Southeast Asian Conference on Soil Engineering, v. 2, p. 315 – 325, Taipei.
- Zeevaert, L. (1983) *Foundation Engineering: For Difficult Subsoil Conditions*. 2nd ed., Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 676 p.