XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/24

Atrito Negativo na Engenharia de Fundações: Um Panorama Teórico e Experimental da Literatura

José Guilherme Sacilotto
Mestrando, FECFAU/Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas - SP, Brasil, josesaciloto@outlook.com

Ana Beatriz de Castro Fernandes
Discente, FECFAU/Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas - SP, Brasil, a193759@dac.unicamp.br

Graziela Santolia da Silva
Mestranda, FECFAU/Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas - SP, Brasil, g233503@dac.unicamp.br

Jherry Lobaton Phocco Minaya
Discente, FECFAU/Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas - SP, Brasil, j212503@dac.unicamp.br

Paulo José Rocha de Albuquerque
Professor Titular, FECFAU/Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas - SP, Brasil, pjra@unicamp.br

RESUMO: O atrito negativo em estacas corresponde à mobilização de tensões de cisalhamento descendentes ao longo do fuste, decorrentes do deslocamento vertical do solo em relação à estaca. Esse fenômeno pode comprometer a capacidade de carga e induzir recalques excessivos, sendo frequentemente associado a solos moles submetidos a processos de adensamento, à aplicação de sobrecargas ou a variações no nível d'água. Considerando a relevância técnica do fenômeno e a evolução do entendimento sobre o tema desde a década de 1960, este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre o atrito negativo em estacas. Para a seleção das publicações foi empregado o método *Methodi Ordinatio*, com base em critérios relacionados ao ano de publicação, número de citações e fator de impacto do periódico. Foram analisados trabalhos nacionais e internacionais. A literatura analisada aborda aspectos conceituais do fenômeno, suas causas e implicações, métodos de cálculo e estratégias de mitigação, além de discussões sobre o efeito de grupo e sobre a consideração do atrito negativo no contexto geotécnico.

PALAVRAS-CHAVE: Interação solo-estrutura, Adensamento, Solos moles, Atrito lateral, Plano neutro.

ABSTRACT: Negative skin friction in piles corresponds to the mobilization of downward shear stresses along the pile shaft, resulting from the vertical displacement of the soil relative to the pile. This phenomenon may compromise the load-bearing capacity and induce excessive settlements, being frequently associated with soft soils subjected to consolidation processes, the application of surface loads, or variations in the groundwater level. Considering the technical relevance of this phenomenon and the evolution of the understanding of the subject since the 1960s, this study presents a systematic literature review on negative skin friction in piles. The *Methodi Ordinatio* method was employed for the selection of publications, based on criteria related to year of publication, number of citations, and journal impact factor. Both national and international studies were analyzed. The reviewed literature addresses conceptual aspects of the phenomenon, its causes and implications, calculation methods, and mitigation strategies, as well as discussions on the group effect and on the consideration of negative skin friction in the geotechnical context.

KEYWORDS: Soil-structure interaction, Consolidation, Soft soils, Skin friction, Neutral plane.

1 1 INTRODUÇÃO

O atrito negativo é um fenômeno geotécnico decorrente do deslocamento vertical descendente do solo em relação a uma fundação profunda. Essa condição gera tensões de cisalhamento descendentes na interface solo–estaca, resultando em forças adicionais que atuam no mesmo sentido da carga estrutural, podendo reduzir a capacidade de carga útil da fundação e induzir deformações excessivas. Esse comportamento é frequentemente observado em solos moles submetidos a adensamento, construção de aterros ou rebaixamento do lençol freático, sendo de grande relevância em projetos de fundações profundas instaladas em ambientes deformáveis.

O conhecimento técnico sobre o atrito negativo em estacas começou a ser desenvolvido de forma sistemática a partir da década de 1960, com base em observações empíricas, investigações de campo e propostas analíticas que passaram a descrever e interpretar o comportamento observado em obras executadas em solos moles. Um dos primeiros registros sistematizados sobre o tema foi apresentado por Elmasry, (1963) que desenvolveu um estudo experimental sobre os efeitos do adensamento na interface solo–estaca. Ainda na mesma década, diversos estudos de campo começaram a ser realizados, entre os quais se destaca o trabalho de Johannessen; Bjerrum (1965), que investigaram o comportamento de estacas instrumentadas cravadas em solos argilosos, com foco no desenvolvimento progressivo do atrito negativo durante a dissipação das pressões neutras e a consolidação do solo ao redor.

Nos anos subsequentes, novos estudos aprofundaram a compreensão do fenômeno, incluindo a definição do plano neutro - região ao longo do fuste da estaca onde não há deslocamento relativo entre solo e fundação. Nesse sentido, o trabalho de Bjerrum; Johannessen; Eide (1969), apresentado no 7º Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, examinou a influência de diferentes cenários de carregamento e investigou métodos de mitigação baseados na alteração da aderência ao longo do fuste. De forma complementar, Bozozuk; Labrecque (1969) e, posteriormente, Bozozuk, (1972, 1981) realizaram extensas campanhas experimentais no Canadá, analisando o comportamento do atrito negativo em estacas metálicas e de concreto submetidas a recalques induzidos, sob diferentes condições de instalação e perfil geotécnico.

O avanço na formulação teórica do problema ocorreu com os trabalhos de Fellenius; Broms (1969) e Fellenius (1972), que propuseram modelos analíticos simplificados para estimativa do atrito negativo mobilizado e da localização do plano neutro, com base na resistência ao cisalhamento do solo e nas propriedades geométricas da fundação. Esses modelos foram amplamente adotados e influenciaram práticas de projeto e diretrizes técnicas ao longo das décadas seguintes.

Com foco específico no comportamento de grupos de estacas, o estudo de Kuwabara; Poulos (1989) analisou os efeitos da interação entre estacas na mobilização do atrito negativo, com base em modelos analíticos e comparações com resultados de campo. Os autores demonstraram que a presença de estacas vizinhas reduz significativamente o atrito negativo mobilizado em cada elemento do grupo, sendo esse efeito mais acentuado nas estacas internas. Verificaram, ainda, que o deslocamento necessário para a plena mobilização do atrito negativo tende a ser maior em grupos do que em estacas isoladas.

Na literatura mais recente, observam-se avanços associados à simulação do comportamento do atrito negativo em cenários geotécnicos específicos. Zhang et al. (2021) analisaram a redistribuição de tensões ao longo do fuste em situações de rebaixamento do lençol freático. Li, Lin e Liu (2023) avaliaram os efeitos de carregamentos dinâmicos sobre a estabilidade da interface solo–estaca em contextos sísmicos. Wu et al., (2023) propuseram uma formulação semi-analítica acoplada à teoria do adensamento para representar a evolução do atrito negativo ao longo do tempo.

O presente trabalho tem por objetivo realizar uma revisão crítica e sistemática da literatura sobre o atrito negativo em estacas, com base nas contribuições históricas e nos desenvolvimentos recentes.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão sistemática da literatura com enfoque no atrito negativo em fundações profundas. Para a ordenação e seleção das publicações mais relevantes, empregou-se o método *Methodi Ordinatio* (Pagani, Kovaleski e Resende, 2015), considerando os seguintes critérios: ano de publicação, número de citações e fator de impacto do periódico.

As buscas foram realizadas nas bases de dados Scopus, Web of Science, Google Scholar e também por meio da plataforma CAFe, utilizada como meio complementar de acesso ao conteúdo. Foram empregados os seguintes termos em inglês, combinados com operadores booleanos: *"negative skin friction"*, *"downdrag"*, *"pile foundation"*, *"neutral plane"*, *"soft soils"*, *"dragload"*, *"shaft resistance"*, *"pile settlement"* e *"pile–soil interaction"*.

A triagem inicial considerou a ocorrência dos termos de busca nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos identificados. Em seguida, realizou-se a classificação dos trabalhos segundo os critérios do *InOrdinatio*, permitindo o ranqueamento prévio das publicações conforme sua relevância científica. A partir desse ordenamento, definiu-se o conjunto de artigos a serem lidos integralmente, de modo a direcionar a análise crítica para aqueles com maior potencial de contribuição aos objetivos da pesquisa.

3 GENERALIDADES

Quando há um deslocamento relativo entre a estaca e o solo, o atrito se manifesta.

Conforme conceito definido por Azevedo et al. (2020), o atrito positivo é uma parcela da capacidade de carga da estaca que ocorre ao longo do contato entre a estaca e o solo sempre que o recalque da estaca é maior do que o recalque do solo.

Passa a ser chamado de atrito negativo quando o deslocamento relativo muda de sinal, ou seja, quando o recalque do solo é maior do que o recalque da estaca e passa a transferir carga adicional à estaca, além da carga da estrutura.

O ponto neutro se caracteriza pelo ponto onde os deslocamentos relativos são nulos, conforme pode ser observado na figura a seguir.

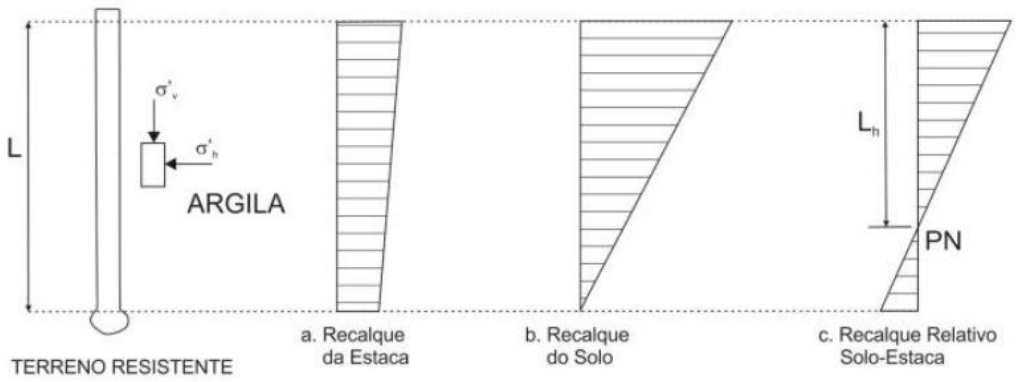


Figura 1. Ocorrência do ponto neutro (Azevedo et al., 2020 adaptado de Neto, 1981)

Ainda de acordo com Azevedo et al. (2020), quanto mais compressível e maior a espessura da camada argilosa, mais elevado será o atrito negativo e maior sua influência no projeto de fundações.

3.1 Causas

O trabalho de Neto (1981) já considerava a causa imediata dos recalques devido ao atrito negativo, dividido em 6 grupos:

a) Adensamento por alívio de pressão em aquíferos confinados ou rebaixamento do lençol freático
b) Sub-adensamento de argilas

Se trata de solos que ainda estão em adensamento devido ao peso próprio, cujos recalques que ocorrerão nessa argila induzirão o atrito negativo nas estacas.

c) Amolgamento do terreno devido à cravação
Amolgamento se trata de perda de resistência ao cisalhamento da camada compressível em pontos próximos da estaca quando sua estrutura é destruída ou perturbada.

d) Colocação de sobrecarga na superfície do terreno
Adensamento por conta de um lançamento de um aterro ou estoque de materiais;

e) Flutuação natural do nível d'água
Em locais de fundações de cais ou de construções próximas ao mar com aterro de areia fofa, em regiões de grande variação pluviométrica entre inverno e verão ou regiões onde haja ocorrência de solos colapsíveis

f) Recalques provocados pelo deslocamento de estruturas de contenção próximo de estacas em terrenos adjacentes

Alonso (2003) ainda cita como outras causas de recalque por atrito negativo nas estacas, o carreamento de partículas de solo provocado pela percolação da água ou por ruptura de grandes vazios (cavernas), que ocorrem, por exemplo, em solos calcários.

3.2 Implicações e importância no contexto das fundações

Quando o fenômeno geotécnico do atrito negativo não previsto acontece, isso pode implicar em um problema crônico de recalque da fundação e tem grande impacto na segurança da obra.

Os níveis de segurança da obra, ou a probabilidade de ruptura, variam ao longo do tempo. Um bom comportamento, a curto prazo, não garante um bom comportamento a longo prazo (Azevedo et al., 2020).

Conforme exposto por Fernandes et al. (2019), em princípio, este carregamento adicional não leva a estaca à ruptura geotécnica, já que esta seria acompanhada de grandes recalques, revertendo o sentido do atrito. Por outro lado, se a ponta da estaca encontra material muito rígido, como uma alteração de rocha, o atrito negativo pode causar danos estruturais à estaca por conta do aumento da carga axial. Os recalques levam a danos à obra, arquitetônicos e/ou estruturais.

3.3 Minimização da ação do atrito negativo

A nível de projeto pode ser citado:

a) Aceleração do adensamento da camada compressível (pré-carregamento, uso de vácuo, etc.);
b) Encamisamento ou pintura betuminosa da estaca no trecho acima do ponto neutro, eliminando o contato direto do solo com a estaca;
c) Emprego de maior quantidade de estacas;
d) Instalar as estacas de modo que recalquem da mesma ordem de grandeza do recalque da camada compressível, Alonso (2003) cita essa solução proposta em 1976 na Cidade do México;

3.4 Normativa Brasileira

De acordo com a atual norma brasileira NBR 6122:2022 "Projeto e Execução de Fundações", sempre que houver a possibilidade de desenvolvimento de atrito negativo, a sua ação deve ser considerada no dimensionamento geotécnico e estrutural dos elementos de fundação. Essa consideração explicita só passou a fazer parte da edição de 1996.

Desde a edição de 2010, a abordagem do atrito negativo foi ampliada, reforçando a necessidade de considerá-lo como uma ação adicional que pode reduzir a capacidade de carga útil da estaca ou exigir maior resistência da fundação.

4 MÉTODOS DE CÁLCULO

Nesta seção, são apresentadas as principais técnicas utilizadas para estimar o atrito negativo em estacas, abrangendo desde modelos analíticos tradicionais até abordagens mais atuais e aplicações práticas. A escolha do método baseia-se em fatores como o tipo de solo, o nível de precisão exigido e a disponibilidade de informações geotécnicas.

4.1 Fellenius (1972)

O modelo sugerido por Fellenius (1972) é um dos mais antigos e frequentemente utilizados. Assume-se que a fricção negativa ocorre na seção da estaca localizada acima do ponto neutro, sendo calculada com base na tensão de cisalhamento mobilizada na interface entre o solo e a estaca.

A equação fundamental para a fricção total negativa é:

$$Q_n = \sum \alpha \cdot \acute{\sigma_v} \cdot A_f \quad (1)$$

Onde: Q_n: carga negativa total mobilizada (atrito negativo); α:coeficiente de adesão (empírico, depende do tipo de solo); $\acute{\sigma_v}$: tensão efetiva vertical média para o trecho considerado; A_f: área lateral da estaca (ao longo do trecho com atrito negativo)

4.2 NBR 6122:2022

A regulamentação brasileira sugere que o atrito negativo seja considerado como uma ação adicional permanente. Para estimá-lo, é permitida a utilização da metodologia de resistência por fuste, da mesma forma que se determina o atrito positivo, porém com a força invertida na direção.

$$Q_n = f_s \cdot A_f \quad (2)$$

Onde: f_s: Resistência por fuste (kPa); A_f: Área lateral do trecho da estaca com recalque relativo do solo

4.3 Poulos e Kuwabara (1989)

Poulos e Kuwabara (1989) desenvolveram modelos que incluem os efeitos de interação entre as estacas dentro de um grupo. Eles observaram que o atrito negativo não se distribui de maneira linear em grupos, devido à superposição das áreas de influência.

- Para as estacas internas, o atrito negativo é significativamente menos relevante.
- Considera-se o deslocamento necessário para a mobilização total do atrito.

4.4 Modelos numéricos e Semi Analíticos recentes

Os estudos mais recentes propuseram modelos que incluem a teoria do adensamento, a dinâmica dos recalques ao longo do tempo e até mesmo carregamentos cíclicos. Alguns exemplos são:

a) (Emani et al., 2025)
   Modelo semi-analítico baseado na teoria de Terzaghi, com o objetivo de simular o atrito negativo ao longo do tempo, considerando a dissipação das tensões neutras (Poulos, 2008)
b) (Wang et al., 2021)
   Avaliação da redução do nível freático e da redistribuição das tensões. Emprega modelagem limitada e simulações transientes

5 EFEITO DE GRUPO

Lee (1993) utilizou dados de ensaios realizados por Bjerrum et al. (1969) e Shibata et al. (1982) para analisar o comportamento de estacas isoladas e grupos de estacas. Para estacas isoladas, observa-se um maior recalque no topo da estaca, assim como forças de atrito negativo mais intensas ao longo do fuste. Por outro lado, para grupos de estacas, a soma dos esforços de atrito negativo de cada estaca é reduzida, assim como o recalque medido no topo do grupo. Isso ocorre devido à redistribuição das cargas e ao aumento da rigidez do sistema, pois as estacas atuam em conjunto, funcionando como um bloco.

Esse efeito é explicado pelo estudo de Poulos & Davis (1980), que indica que, quando o espaçamento entre estacas é pequeno, entre 3 e 5 vezes o diâmetro da estaca, as zonas de influência das estacas se sobrepõem, promovendo a rigidez do grupo. Estudos de Huang, Zheng e Gong (2015) também mostram que quanto menor o espaçamento entre as estacas, menor é o efeito do atrito negativo, já que o plano neutro atinge maior profundidade e a soma dos esforços de atrito diminui. Mas vale ressaltar que quando o espaçamento alcança cerca de 5 vezes o diâmetro da estaca, o efeito de grupo torna-se desprezível.

O efeito do atrito negativo também é afetado pela localização das estacas do grupo, tanto Poulos (1989) quanto Lee (1993) destacam que as estacas localizadas nas extremidades do grupo sofrem maior influência do atrito negativo, enquanto as estacas centrais são relativamente protegidas pelas vizinhas. Essa característica pode ser explorada como uma estratégia para mitigar os efeitos do atrito negativo na construção de estacas em solos moles.

Por fim, apesar das diferenças na rigidez entre estacas isoladas e grupos de estacas, o tempo de consolidação do solo, ou seja, o tempo para estabilização, é bastante similar para ambos os casos, atingindo aproximadamente 90% da consolidação em cerca de 5 anos, conforme evidenciado por Znamenskiy, Hegazy e Sayed (2020).

6 CONCLUSÕES

Apesar de o fenômeno do atrito negativo ter sido inicialmente estudado e reconhecido na década de 1960 é evidente a importância de seu reconhecimento e correta consideração nos projetos de fundações, especialmente em solos moles e altamente compressíveis (Azevedo et al., 2020). O não dimensionamento adequado pode resultar em recalques excessivos e sobrecargas estruturais indesejadas, comprometendo a segurança e a durabilidade das obras. A literatura demonstra que, embora o atrito negativo nem sempre conduza à ruptura geotécnica imediata, ele pode causar danos estruturais significativos, sobretudo quando a estaca encontra materiais muito rígidos em sua base (Fernandes et al., 2019), já que a estabilização do solo ocorre aproximadamente após 5 anos da sobrecarga.

Algumas soluções de projeto, como o encamisamento das estacas, o pré-carregamento do solo, pintura betuminosa da estaca ou o posicionamento estratégico das estacas dentro do grupo, são alternativas viáveis para mitigar os efeitos do atrito negativo. Além disso, os avanços recentes em modelagem computacional e simulações geotécnicas vêm permitindo maior precisão na estimativa de cargas induzidas, posição do ponto neutro e redistribuição de tensões ao longo do tempo.

Contudo, é necessário que haja mais estudos voltados à previsão precisa do atrito negativo e à investigação de formas mais eficazes e economicamente viáveis de mitigá-lo, de modo a ampliar a segurança sem comprometer a viabilidade técnica e financeira dos empreendimentos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 (Autor 1).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.

Azevedo, R. S. Carneiro, R. F., Danziger, B. R., Gerscovich, D., (2022) Estudo de caso da confiabilidade do estaqueamento com o tempo. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG XX, Campinas – SP. *Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica,* ABMS v.9, pt.1, p. 6410 - 6417

Bjerrum, L., Hamre, L., Eide, O. T. (1969) Soil properties and pile foundation behavior in marine clays. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, v. 1, p. 1–12.

Bjerrum, L., Johannessen, J., Eide, O. (1969) Reduction of negative skin friction on steel piles to rock. In: *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, p. 27–34.

Bozozuk, M. (1972) Downdrag measurements on a 160-ft floating pipe test pile in marine clay. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 9, n. 2, p. 127–136.

Bozozuk, M. (1981) Bearing capacity of pile preloaded by downdrag. In: *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, p. 631–636.

Bozozuk, M., Labrecque, A. (1969) Downdrag measurements on 270-ft composite piles. In: *Performance of Deep Foundations*, STP 444. Philadelphia: ASTM International, p. 15–40.

Emani, G. F., Xu, W., Kas-Avortri, P., Nattabi, F. S., Khursheed, Z., Etine, C. E. (2025) Numerical investigation of negative skin friction in battered piles group based on pile position: A consolidation study. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, p. 1-29. DOI: https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2472995.

Elmasry, M. A. (1963) *The Negative Skin Friction of Bearing Piles*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology.

Fellenius, B. H. (1972) Down-drag on piles in clay due to negative skin friction. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 9, n. 4, p. 323–337.

Fellenius, H. B., Broms, B. B. (1969) Negative skin friction for long piles driven in clay. In: *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico.

Fernandes, B. B. L., Gomes, R. M., Maria, P. E. L. S., Lopes, F. R., Danziger, F. A. B., (2019) Uma comparaão de métodos de previsão do atrito negativo em estacas. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 9, São Paulo – SP. *Anais do Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia,* ABEF

Huang, T., Zheng, J., Gong, W. (2015) The group effect on negative skin friction on piles. *Procedia Engineering*, v. 116, p. 802-808. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.367.

Johannessen, J., Bjerrum, L. (1965) Measurement of the compression of a steel pile to rock due to settlement of the surrounding clay. In: *6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montréal, p. 261–264.

Kuwabara, F., Poulos, H. G. (1989) Downdrag forces in group of piles. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 115, n. 6, p. 806–818. Acesso em: 2 maio 2025.

Lee, C. Y. (1993) Pile groups under negative skin friction. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 119, n. 10, p. 1587-1600. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:10(1587).

Li, P., Lin, M., Liu, Y. (2023) Shaking table test of the negative skin friction of a single pile induced by seismic settlement of model soft soil. *Applied Sciences*, v. 13, n. 6, p. 3588.

Neto, P. M. S. (1981) *Métodos de cálculo de atrito negativo em estacas – estudo e discussão*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ

Pagani, R. N., Kovaleski, J. L., Resende, L. M. (2015) Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. *Scientometrics*, v. 105, n. 3, p. 2109–2135. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-015-1744-x. Acesso em: 11 maio 2025.

Peng, Y. et al. (2020) Performance of X-section concrete pile group in coral sand under vertical loading. *China Ocean Engineering*, v. 34, n. 5, p. 621–630. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/s13344-020-0056-y.

Poulos, H. G. (2008) A practical design approach for piles with negative friction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, v. 161, n. 1, p. 19–27. DOI: https://doi.org/10.1680/geng.2008.161.1.19.

Poulos, H. G., Davis, E. H. (1980) *Pile foundation analysis and design*. Chichester: John Wiley & Sons, 397 p.

Rodrigues, U. A., (2008) *Dimensionamento de fundações profundas*. 3rd ed., Edgard Blucher, c2012, São Paulo, SP:. 157 p., il.

Shibata, T., Yamada, M., Hiraishi, K. (1982) Model tests on the negative skin friction of single and group piles. *Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, p. 295–310.

Wang, L., Cao, Y., Xianpeng, L., Chen, Z., Nie, Z. (2021) Experimental study on negative skin friction characteristics of double-sleeve pile—PMC. *Scientific Reports*. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-77967-6.

Wu, W. et al. (2023) Semi-analytical solution for negative skin friction development on deep foundations in coastal reclamation areas. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 241, p. 107981. Acesso em: 2 maio 2025.

Znamenskiy, V; Hegazy, O; Sayed, D. (2020) Behavior of single pile and pile groups in consolidating clay. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, [*s. l.*], v. 883, n. 1, p. 012208.