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/COBRAMSEG2026.5/74

Influência de Carregamentos Superficiais na Mobilização de Resistência por Atrito Lateral em Estacas

Charleston José da Silva Roice Filho
Engenheiro civil, UFG, Goiânia, Brasil, cjsroice@discente.ufg.br

Maria Tâmara de Moraes Guimarães Silva
Engenheira civil, IFG, Anápolis, Brasil, tamara.moraes@ifg.edu.br

Maurício Martines Sales
Engenheiro civil, UFG, Goiânia, Brasil, mmartines@ufg.br

Este trabalho analisa a influência de carregamentos superficiais aplicados nas proximidades de estacas isoladas na redistribuição de esforços ao longo do fuste. A investigação foi conduzida por meio de simulações tridimensionais no software Plaxis 3D, utilizando o Método dos Elementos Finitos e considerando comportamento linear elástico para o solo. O modelo numérico incluiu estaca volumétrica, elementos de interface representando a interação solo–estaca e um elemento estrutural auxiliar (*dummy beam*) coincidente com o eixo da estaca para obtenção do esforço normal ao longo da profundidade. Foram avaliadas diferentes relações de esbeltez da estaca (L/D), valores de rigidez relativa solo–estaca e extensões radiais da área carregada. Os resultados indicam a formação de uma zona superficial de arraste e mostram maior sensibilidade ao carregamento superficial em estacas mais curtas e solos menos rígidos.

PALAVRAS-CHAVE: Interação Solo-Estaca, Carregamento Superficial, Fundações Profundas, Atrito Lateral.

ABSTRACT: This study investigates the influence of surface loads applied near isolated piles on load redistribution along the pile shaft. The analysis was performed through three-dimensional numerical simulations using the Finite Element Method in Plaxis 3D, considering the soil as a linear elastic medium. The numerical model included a volumetric representation of the pile, interface elements to simulate pile–soil interaction, and an auxiliary structural element (dummy beam) positioned along the pile axis to obtain axial force distribution with depth. Different pile slenderness ratios (L/D), relative stiffness values between pile and soil, and radial extents of the loaded area were evaluated. Results indicate the formation of a superficial drag zone and greater sensitivity to surface loading in shorter piles and softer soils.

KEYWORDS: Pile–Soil Interaction, Surface Loading, Deep Foundations, Shaft Friction.

1 INTRODUÇÃO

A interação entre estacas isoladas e o solo pode ser significativamente alterada quando carregamentos superficiais são aplicados nas proximidades da fundação. Nessas condições, a sobrecarga aplicada na superfície modifica o campo de tensões no maciço e pode alterar o mecanismo de transferência de carga ao longo do fuste, influenciando a mobilização do atrito lateral. Estudos experimentais e numéricos indicam que carregamentos dessa natureza podem provocar redistribuição de esforços em estacas próximas à área carregada, conforme discutido por Li et al. (2019) e Abdel-Azim et al. (2020). Em determinadas situações pode ocorrer a formação de uma zona superficial de arraste, na qual o deslocamento do solo adjacente supera o deslocamento da estaca, gerando esforços de atrito dirigidos para baixo e aumento do esforço normal ao longo do trecho inicial do fuste. Esse comportamento está associado à redistribuição de tensões no sistema solo–estaca, como apresentado por Katzenbach et al. (1998) e Katzenbach, Arslan e Moormann (2000).

Em projetos geotécnicos, espera-se que as fundações operem predominantemente em regime de pequenas deformações, isto é, em condições próximas ao comportamento linear elástico do sistema solo–estaca. Nesse regime, correspondente às cargas de serviço, os deslocamentos são limitados e não ocorre

plastificação significativa do maciço. Assim, análises baseadas na hipótese de comportamento linear elástico permitem compreender com maior clareza os mecanismos de redistribuição de tensões e transferência de carga ao longo do fuste.

Ferramentas numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos, como o software Plaxis 3D, permitem avaliar de forma detalhada a interação solo–estaca sob diferentes cenários de carregamento. O programa possibilita a modelagem tridimensional de problemas geotécnicos envolvendo interação solo–estrutura, incluindo diferentes modelos constitutivos e elementos estruturais para representação de fundações profundas. A formulação numérica e os recursos de modelagem são apresentados nos manuais técnicos da Bentley Systems (2017, 2018). Nesse contexto, a distribuição do esforço normal ao longo do eixo da estaca pode ser obtida por meio de estratégias de modelagem que utilizam elementos estruturais auxiliares, como um *dummy beam* coincidente com o eixo da estaca volumétrica.

Assim, este trabalho tem por objetivo analisar, em regime linear elástico, a influência de carregamentos superficiais na mobilização do atrito lateral em estacas isoladas. Para isso, são realizadas simulações tridimensionais no software Plaxis 3D considerando diferentes relações de esbeltez da estaca, valores de rigidez relativa solo–estaca, intensidades de carregamento superficial e extensões radiais da área carregada, buscando compreender como esses fatores influenciam a redistribuição de esforços ao longo do fuste e os recalques no topo da estaca.

2 METODOLOGIA

A investigação foi conduzida por meio de simulações numéricas tridimensionais no software Plaxis 3D, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para representar a interação entre o solo e uma estaca isolada submetida a carregamentos axial e superficial. O domínio de análise foi definido com dimensões laterais e verticais iguais a quatro vezes o comprimento da estaca L, de modo a minimizar a influência das fronteiras nas respostas de interesse. O solo foi modelado como meio contínuo tridimensional, discretizado por elementos tetraédricos de 10 nós, com refinamento progressivo na vizinhança da estaca e das regiões de aplicação de carregamento, e malha mais grosseira nas zonas periféricas. A Figura 1 evidencia a malha adotada e a metodologia de refinamento.

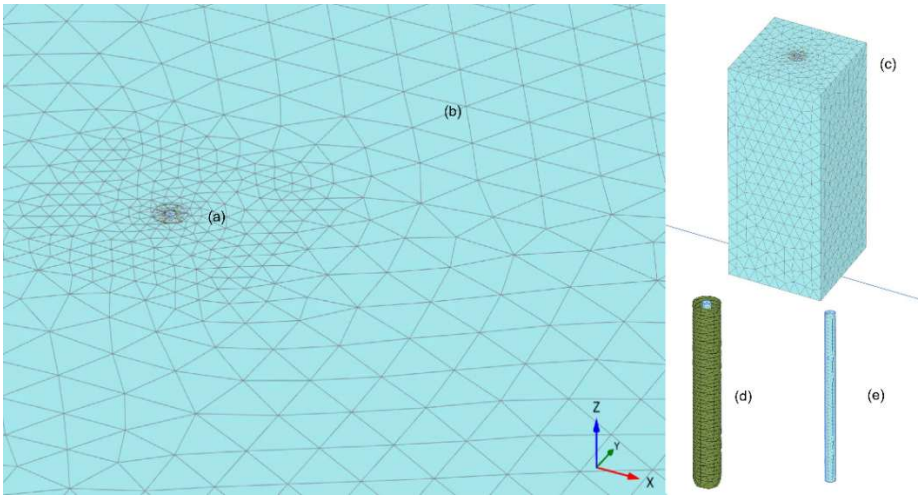


Figura 1. Malha de elementos finitos adotada na modelagem numérica. (a) região de refinamento da malha na vizinhança da estaca; (b) região externa do domínio com malha mais grosseira; (c) domínio tridimensional do solo evidenciando a distribuição do refinamento; (d) estaca envolvida por elementos de interface representando a interação solo–estaca; (e) estaca modelada como elemento volumétrico.

A estaca foi representada por um elemento volumétrico tridimensional, com diâmetro $D = 0{,}40$ m e relações de esbeltez L/D = 10, 25 e 50. As propriedades mecânicas da estaca foram mantidas constantes ao longo das simulações, adotando-se módulo de elasticidade $E_p = 20$ GPa, peso específico de $25\ \mathrm{kN/m^3}$ e coeficiente de Poisson igual a 0,20. A interação solo–estaca foi modelada por meio de elementos de interface

ao longo do fuste, adotando-se fator de redução de resistência $R_{inter} = 1{,}0$, de modo a representar aderência plena entre os materiais no regime de pequenas deformações.
O solo foi representado como meio homogêneo, isotrópico e linear elástico, permitindo avaliar de forma paramétrica a influência da rigidez relativa solo–estaca. Foram considerados três valores de módulo de elasticidade do solo E_s, resultando em diferentes relações de rigidez relativa K (equação 1) conforme apresentado na Tabela 4.

$$K = E_p/E_s \tag{1}$$

A obtenção do esforço normal ao longo do eixo da estaca, denotado por N, foi realizada com o apoio de um elemento estrutural auxiliar do tipo *dummy beam*, coincidente com o eixo longitudinal da estaca e inserido no interior do elemento volumétrico. Esse elemento foi utilizado exclusivamente para a leitura dos esforços internos ao longo da profundidade, sendo posteriormente aplicada uma correção por fator de proporcionalidade para representar adequadamente a rigidez axial da estaca.

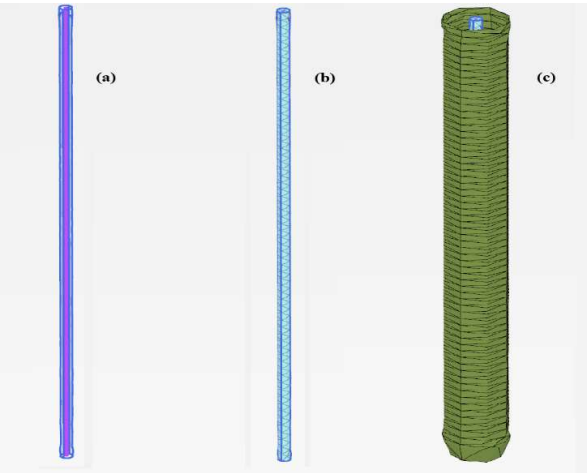


Figura 2. Estratégia de modelagem adotada para obtenção do esforço normal ao longo do eixo da estaca utilizando elemento auxiliar (*dummy beam*). (a) elemento *embedded beam* com propriedades geométricas equivalentes às da estaca volumétrica e módulo de elasticidade reduzido para 1% do módulo do material da estaca; (b) estaca modelada como elemento volumétrico contendo o *dummy beam* coincidente com seu eixo longitudinal; (c) modelo completo contendo estaca volumétrica, *dummy beam* interno e elementos de interface ao longo do fuste.

A análise baseou-se na avaliação da distribuição do esforço normal N ao longo da profundidade absoluta z (negativa para baixo) e em termos de profundidade normalizada z/L. A metodologia se dividiu em três etapas: Na primeira, fixou-se a carga axial P no valor de 500 kN, e variou-se o carregamento σ na superfície, conforme Tabela 1. Na segunda, os carregamentos foram aplicados por meio de carga axial P na cabeça da estaca e tensão superficial σ aplicada em uma coroa circular concêntrica à estaca, com raio interno R_i = D/2, e raio externo R_e variável. Essa configuração foi adotada para representar o efeito dos carregamentos superficiais aplicados nas proximidades da fundação, permitindo avaliar a influência da extensão radial da área carregada na redistribuição de esforços ao longo do fuste. Em ambos os casos, a estaca simulada possuía L=10 m, isto é, L/D=25, e K=1000.

A extensão radial do carregamento superficial foi variada no intervalo de D/2 < R < 50D, conforme Tabela 2, mantendo-se constante a intensidade da tensão aplicada, no valor de 500 kPa, bem como a carga axial, na magnitude de 500 kN. Essa abordagem permitiu investigar a profundidade característica de influência do carregamento superficial sobre a transferência de carga ao longo da estaca.

Tabela 1. Variação da intensidade do carregamento superficial na primeira etapa de análise.

σ (kPa)
0; 100; 200; 300; 400; 500

Tabela 2. Variação do raio externo do carregamento superficial na segunda etapa de análise.

R_e
D = 0,40 m
3D = 1,20 m
10D = 4,00 m
20D = 8,00 m
50D = 20,00 m

A Figura 3 ilustra as configurações adotadas de carregamento e geometria.

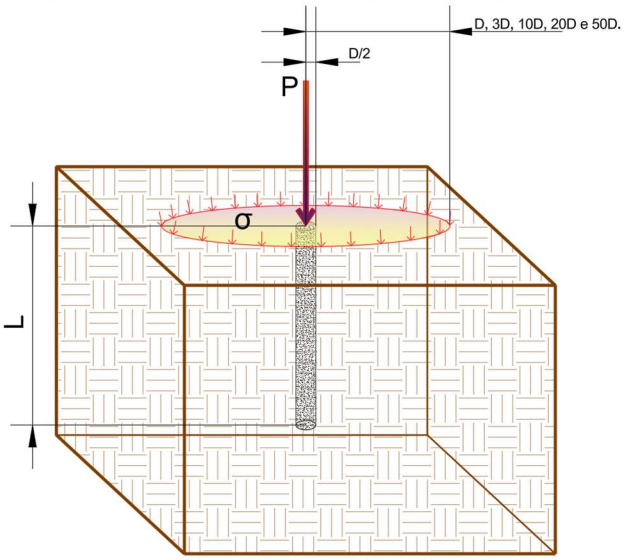


Figura 3. Configuração de carregamento e geometria adotada.

Em todas as etapas, antes da aplicação dos carregamentos estruturais, foi executada uma fase geostática no modelo numérico, com o objetivo de estabelecer o estado inicial de tensões no maciço. Os deslocamentos associados a essa etapa foram posteriormente desconsiderados na avaliação dos recalques, garantindo que os resultados apresentados correspondam apenas aos efeitos dos carregamentos aplicados.

Já na terceira etapa, foram variados os parâmetros L e E_s, conforme Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3. Geometrias adotadas para estaca.

Parâmetro	$L/D = 10$	$L/D = 25$	$L/D = 50$
D (m)	0,40	0,40	0,40
L (m)	4	10	20

Tabela 4. Módulo de Elasticidade do solo e rigidez relativa.

E_s (MPa)	$K=Ep/Es$
10	2000
20	1000
40	500

Nesta última etapa, inicialmente, fixou-se L/D nos três valores da Tabela 3, e variou-se o valor de K conforme Tabela 4 e os carregamentos P e σ, nas magnitudes de 0 e 100 kN e de 0 e 500 kPa, respectivamente. A extensão da carga superficial foi fixada em 3D. Os resultados foram expressos em gráficos de Esforço normal x Profundidade. Por fim, variou-se L/D e fixou-se K, considerando P=100 kN e σ=500 kPa. Os resultados foram expressos em Esforço normal x Profundidade normalizada (z/L), para que fosse possível comparar a normal no eixo de estacas com diferentes comprimentos relativos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas simulações realizadas em regime linear elástico, identificou-se a presença de uma zona superficial de arraste, caracterizada pelo aumento do esforço normal N ao longo do trecho inicial do fuste. Esse comportamento está associado ao recalque relativo do solo adjacente à estaca quando submetido a carregamento superficial, o que induz deslocamentos verticais descendentes no maciço superiores aos deslocamentos da própria estaca nas regiões rasas. Como consequência, mobilizam-se esforços de atrito dirigidos para baixo ao longo da interface solo–estaca, provocando incremento do esforço normal transmitido ao longo da profundidade inicial do fuste.

A Figura 4 apresenta os resultados de esforço normal no eixo da estaca pela profundidade para o caso em que se fixou a carga axial e se variou a carga superficial, mantendo-se a extensão em 3D. Para uma carga axial fixa de P = 500 kN, o aumento da tensão superficial σ no intervalo de 0 a 500 kPa resultou em incrementos proporcionais de N para uma mesma profundidade, com variações constantes entre níveis consecutivos de carregamento superficial. A Tabela 4 comprova essa relação. Esse comportamento confirma que, em regime linear elástico, o carregamento superficial atua como um incremento sistemático no campo de tensões do maciço, refletindo-se diretamente na redistribuição de esforços ao longo da estaca. Observou-se que a profundidade de transição entre a zona de arraste e a região onde passa a predominar a dissipação do esforço por atrito lateral ocorre aproximadamente em z/D ≈ -5,5 para L/D = 25 e σ até 500 kPa. Além disso, verificou-se que a extensão dessa zona aumenta à medida que cresce a extensão radial da área carregada *R*, conforme pode-se observar na Figura 5.

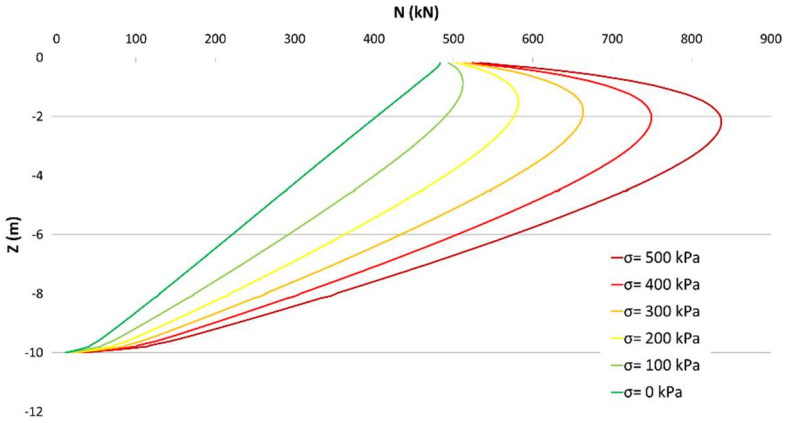


Figura 4. Esforço normal aferido no eixo da estaca x Profundidade para diferentes magnitudes de carregamentos superficiais. Carga axial constante e igual a 500 kN, extensão da carga superficial de 3D.

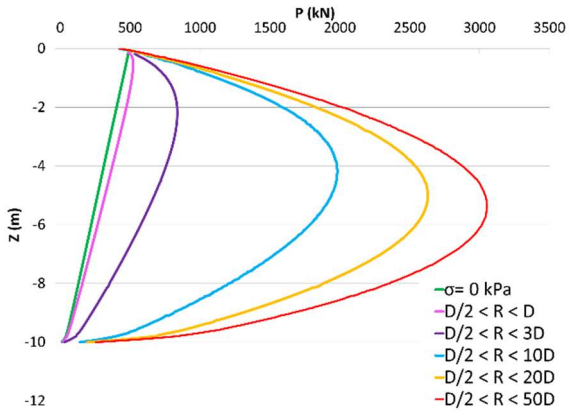


Figura 5. Esforço normal aferido no eixo da estaca x Profundidade para diferentes extensões de carregamento superficial.

Tabela 4. Variação constante de esforço normal para diferentes profundidades e carregamentos superficiais.

Esforço normal no eixo da estaca N(z)						
z (m)	**σ=0 kPa**	**σ=100 kPa**	**σ=200 kPa**	**σ=300 kPa**	**σ=400 kPa**	**σ=500 kPa**
	N_0	**N_1**	**N_2**	**N_3**	**N_4**	**N_5**
-1.98	404.39	490.77	577.15	663.54	749.92	836.30
-4.02	310.67	399.66	488.64	577.63	666.61	755.60
-6.00	220.69	291.40	362.11	432.82	503.53	574.23
-7.99	149.83	200.94	252.06	303.17	354.29	405.41
-10.00	14.37	19.51	24.65	29.79	34.92	40.06
Incrementos do esforço normal ΔN						
z (m)	**N_1-N_0**	**N_2-N_1**	**N_3-N_2**	**N_4-N_3**	**N_5-N_4**	
-1.98	86.38	86.38	86.38	86.38	86.38	
-4.02	88.98	88.98	88.98	88.98	88.98	
-6.00	70.71	70.71	70.71	70.71	70.71	
-7.99	51.12	51.12	51.12	51.12	51.12	
-10.00	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	

Constata-se, pelas Figuras 6 a 8, que a influência da rigidez relativa solo–estaca K e da esbeltez da estaca L/D mostrou-se mais pronunciada em estacas mais profundas. Para L/D = 10, as curvas N(z) apresentaram baixa sensibilidade a variações de K, indicando que a transferência de carga ocorre predominantemente nas regiões mais rasas do fuste. Por outro lado, para L/D = 50, observou-se maior carga remanescente ao longo do fuste em profundidades próximas à ponta em solos menos rígidos (menores valores de K), indicando menor mobilização de atrito lateral nessas condições.

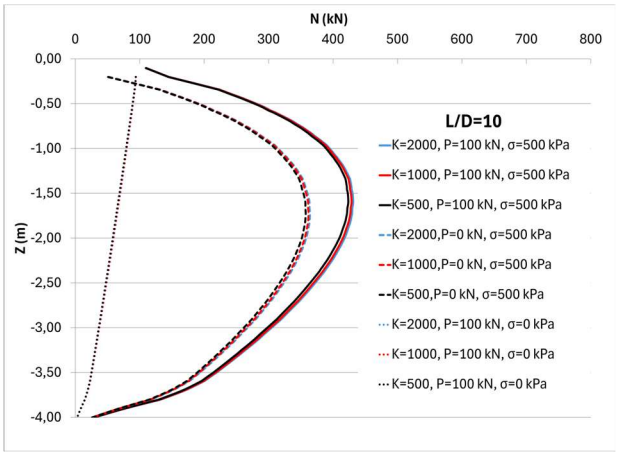


Figura 6. Esforço normal aferido no eixo da estaca x Profundidade para P= 0 e 100 kN, σ=0 e 500 kPa, K=500, 1000 e 2000 e L/D=10.

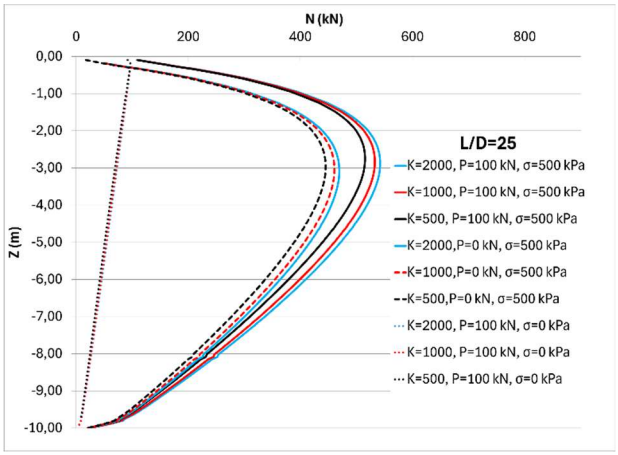


Figura 7. Esforço normal aferido no eixo da estaca x Profundidade para P= 0 e 100 kN, σ=0 e 500 kPa, K=500, 1000 e 2000 e L/D=25.

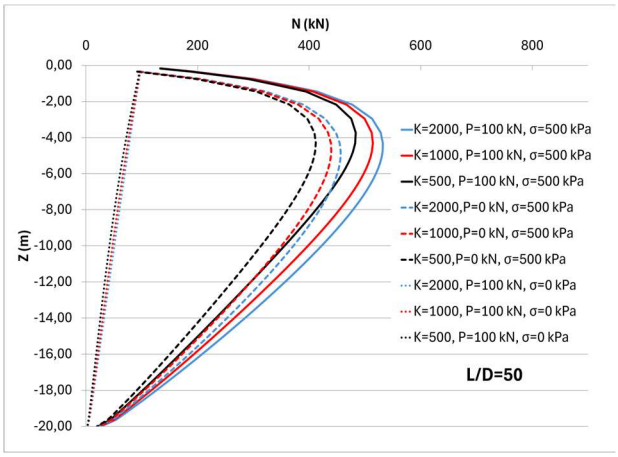


Figura 8. Esforço normal aferido no eixo da estaca x Profundidade para P= 0 e 100 kN, σ=0 e 500 kPa, K=500, 1000 e 2000 e L/D=50.

Quando os resultados são analisados em termos de profundidade normalizada z/L, através das Figuras 9 a 11, observa-se que estacas mais esbeltas apresentam dissipação mais progressiva da carga ao longo do fuste. Nessas condições, o ponto de máximo esforço normal ocorre em posição relativamente mais rasa para estacas mais longas, aproximadamente em z/L ≈ -0,20, enquanto para estacas curtas (L/D = 10) esse ponto ocorre em torno de z/L ≈ -0,40. Esse comportamento indica que a interação solo–estaca tende a concentrar maior parcela da transferência de carga nas regiões superiores do fuste à medida que a esbeltez da estaca aumenta.

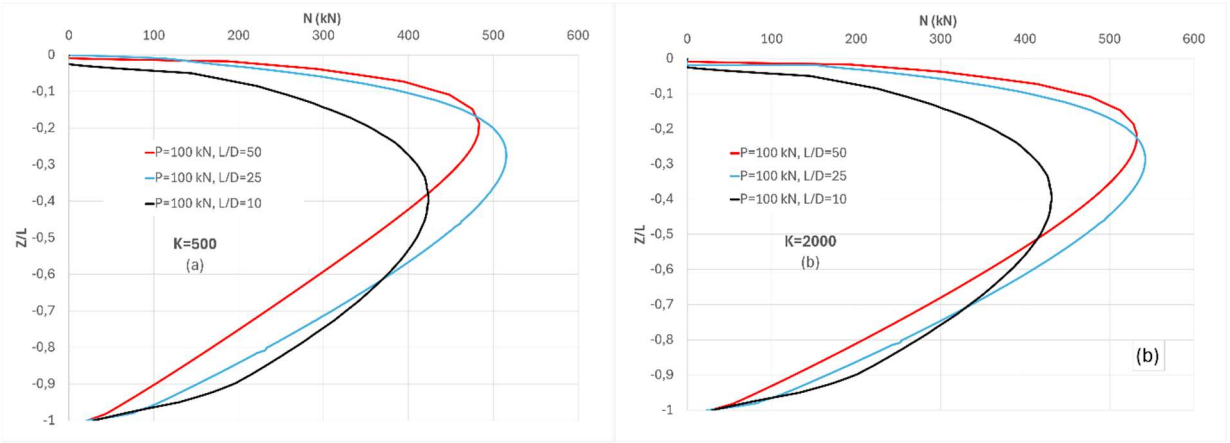


Figura 9. Esforço normal aferido no eixo da estaca x Profundidade normalizada, para P=100 kN, σ=500 kPa, L/D=10, 25 e 50 (a) K=500; (b) K=2000.

De forma geral, os resultados indicam que o carregamento superficial modifica a redistribuição de esforços ao longo da estaca principalmente nas regiões rasas do maciço, gerando aumento do esforço normal ao longo do fuste inicial e alterando a profundidade característica de dissipação da carga. Esse efeito torna-se mais pronunciado em estacas curtas e em solos menos rígidos, enquanto estacas mais esbeltas apresentam comportamento menos sensível à presença de carregamentos aplicados na superfície.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações numéricas realizadas em regime linear elástico permitiram avaliar de forma sistemática a influência de carregamentos superficiais na redistribuição de esforços ao longo do fuste de estacas isoladas. Os resultados indicaram que a aplicação de carregamento superficial nas proximidades da estaca induz a formação de uma zona superficial de arraste, caracterizada pelo aumento do esforço normal ao longo do trecho

inicial do fuste. Esse comportamento está associado ao recalque relativo do solo adjacente à estaca, que passa a se deslocar verticalmente de forma mais intensa do que o elemento estrutural nas regiões rasas do maciço, mobilizando esforços de atrito dirigidos para baixo na interface solo–estaca.

Observou-se que, em regime linear elástico, o aumento da tensão superficial produz incrementos praticamente proporcionais do esforço normal ao longo da profundidade da estaca, indicando comportamento compatível com a superposição dos campos de tensões gerados pelo carregamento axial e pelo carregamento aplicado na superfície do terreno.

A extensão radial da área carregada mostrou influência direta na profundidade de atuação desse fenômeno. À medida que o raio da região carregada aumenta, a zona de arraste tende a se aprofundar, ampliando o trecho do fuste no qual ocorre incremento do esforço normal.

Os resultados também evidenciaram que a esbeltez da estaca exerce papel relevante na redistribuição de esforços. Estacas mais curtas apresentaram maior concentração de esforços nas regiões rasas do fuste e maior sensibilidade à presença de carregamentos superficiais. Por outro lado, estacas mais esbeltas mostraram dissipação mais progressiva da carga ao longo da profundidade e menor influência relativa do carregamento aplicado na superfície.

A rigidez relativa solo–estaca também se mostrou um parâmetro importante. Solos menos rígidos apresentaram maior parcela de carga transmitida a maiores profundidades do fuste, indicando menor mobilização de atrito lateral nas regiões superiores. Em solos mais rígidos, por sua vez, observou-se dissipação mais eficiente da carga ao longo do fuste.

De modo geral, os resultados indicam que carregamentos superficiais podem modificar de forma significativa o mecanismo de transferência de carga em estacas isoladas, mesmo em condições representativas do regime de serviço das fundações profundas. Assim, a consideração explícita desses carregamentos em análises numéricas pode contribuir para avaliações mais consistentes da redistribuição de esforços e dos deslocamentos associados ao comportamento do sistema solo–estaca.

AGRADECIMENTOS

Ao Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), intitulado “Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs”, P&D ANEEL Sedimentos, código ANEEL PD.0394-1705/2017.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-AZIM, M.; EL-SHERBINY, R.; ABOU-KHALIL, A. (2020). *Behavior of piles subjected to surcharge loading in deep soft soils*. Geotechnical and Geological Engineering.

BENTLEY SYSTEMS (2017). *PLAXIS 3D Reference Manual.* Bentley Systems.

BENTLEY SYSTEMS (2018). *PLAXIS 3D Material Models Manual*. Bentley Systems.

KATZENBACH, R.; ARSLAN, U.; MOORMANN, C. (1998). *Piled raft foundation systems. In: International Conference on Soil-Structure Interaction in Urban Civil Engineering*. Darmstadt.

KATZENBACH, R.; ARSLAN, U.; MOORMANN, C. (2000). *Piled raft foundations: interaction between piles and raft.* In: International Conference on Soil-Structure Interaction in Urban Civil Engineering. Darmstadt.

LI, X.; ZHANG, Y.; SUN, J. (2019). *Influence of surcharge load on adjacent pile foundations.* Geotechnical and Geological Engineering.