

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA GEOMÉTRICA NA RESPOSTA LATERAL DE ESTACAS LONGAS

Davi Martins de Aragão*

Aluno de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF

RESUMO

Este estudo investiga o comportamento de estacas longas submetidas a carregamento lateral, utilizando o solo de Brasília como meio receptor. O objetivo principal foi analisar a resposta das estacas quando submetidas a um deslocamento horizontal correspondente a 3% do seu diâmetro. Utilizando o modelo Hardening Soil, foram coletados parâmetros geotécnicos do solo no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB. Estacas com diferentes dimensões foram modeladas no software Plaxis 3D para avaliar a influência de suas proporções (altura/diâmetro) na resistência ao deslocamento horizontal. Os resultados mostraram que os deslocamentos horizontais se concentram no terço superior das estacas longas e na metade superior das estacas curtas, podendo haver deslocamentos na base de estacas curtas devido à possibilidade de rotação do conjunto. A curva de força horizontal versus deslocamento exibiu um comportamento logístico, com crescimento inicial rápido e convergência para valores constantes. Observou-se uma descontinuidade para a relação H/D de 4, atribuída ao início de fluxo plástico do solo ao redor da estaca. A resistência lateral das estacas é diretamente influenciada pelos parâmetros geotécnicos do solo e pelas dimensões das estacas, conforme corroborado por estudos anteriores.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca Longa, Carregamento Lateral, Deslocamento Lateral, Hardening Soil.

ABSTRACT

This study investigates the behavior of deep piles subjected to lateral loading, using the soil of Brasília as the receiving place. The main objective was to analyze the response of the piles when subjected to a horizontal displacement corresponding to 3% of their diameter. Using the Hardening Soil model, geotechnical parameters of the soil were collected at the Experimental Field of the Graduate Program in Geotechnics at UnB. Piles with different dimensions were modeled in the Plaxis 3D software to evaluate the influence of their proportions (height/diameter) on the resistance to horizontal displacement. The results showed that horizontal displacements concentrate in the upper third of long piles and in the upper half of short piles, with possible displacements at the base of short piles due to the possibility of rotation of the set. The horizontal force versus displacement curve exhibited a logistic behavior, with initial rapid growth and convergence to constant values. A discontinuity was observed for the H/D ratio of 4, attributed to the onset of plastic flow of the soil around the pile. The lateral resistance of the piles is directly influenced by the geotechnical parameters of the soil and the dimensions of the piles, as corroborated by previous studies.

KEYWORDS: Deep Pile, Side Loading, Side Displacement, Hardening Soil.

1. INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão são obras de grande porte essenciais para o abastecimento de energia elétrica nacional, visto que ligam uma unidade geradora de energia a uma unidade de distribuição e cuja demanda é crescente pelo aumento do consumo populacional e industrial de energia (Jung, 2009).

O projeto de linhas de transmissão de energia e postes de iluminação devem considerar a presença de carregamento lateral devido a ações do vento e a propagação de esforços entre as unidades pelos cabos de energia. A estabilidade de cada unidade estrutural é extremamente importante para o conjunto, podendo afetar a transmissão de energia na ocorrência de ruptura ou demais patologias

*Autor correspondente: dvmartins05@gmail.com

(Lautenschläger, 2010).

Nesse contexto, este trabalho estuda a influência de um carregamento lateral atribuído a estacas longas de diferentes dimensões, considerando o solo de Brasília como o solo receptor da fundação e seus parâmetros de estabilidade e resistência obtidos pelo modelo Hardening Soil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa investigou o comportamento de estacas submetidas a deslocamento horizontal, focando em como diferentes parâmetros das estacas influenciam essa resposta. O objetivo principal é compreender o comportamento das estacas quando um deslocamento horizontal correspondente a 3% do seu diâmetro é aplicado.

Inicialmente, foram coletados parâmetros geotécnicos do solo do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB com base na proposta de Rebolledo, León e Camapum de Carvalho (2019). Esses parâmetros incluem propriedades do modelo Hardening Soil. Também foram definidos parâmetros geométricos e materiais da estaca, incluindo comprimento, diâmetro, material e suas propriedades mecânicas.

Além disso, são avaliadas as relações entre o comprimento e o diâmetro da estaca para entender sua influência no comportamento sob carga horizontal, determinando quais proporções de altura/diâmetro proporcionam maior resistência ao deslocamento horizontal.

Na etapa seguinte, aplicou-se um deslocamento horizontal de 3% do diâmetro da estaca. A força horizontal necessária para alcançar o deslocamento aplicado foi medida, permitindo a determinação da resistência lateral da estaca e sua variação com os diferentes parâmetros da estaca.

Por fim, foi verificado o comportamento dos campos de deslocamento atuantes no solo e na estaca. A Figura 1 apresenta um fluxograma resumo.

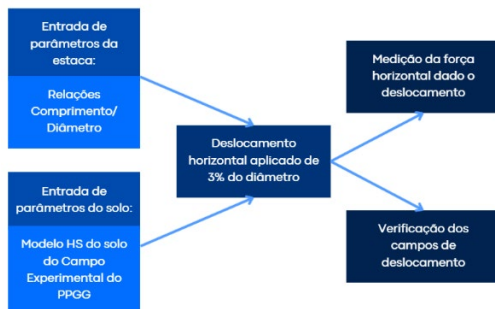


Figura 1. Fluxograma de pesquisa.

Toda a modelagem foi feita no programa Plaxis 3D, software que calcula estruturas geotécnicas por meio do método de elementos finitos. Foi adotado um valor de 0,3 para o fator de aspereza da estaca e 0,5 para o solo. Esse fator indica a granularidade da malha de elementos finitos, onde um valor menor resulta em uma malha mais fina e detalhada. A Figura 2 mostra a modelagem do conjunto solo estaca. A estaca foi desenvolvida na metade da sua seção pelas condições de simetria.

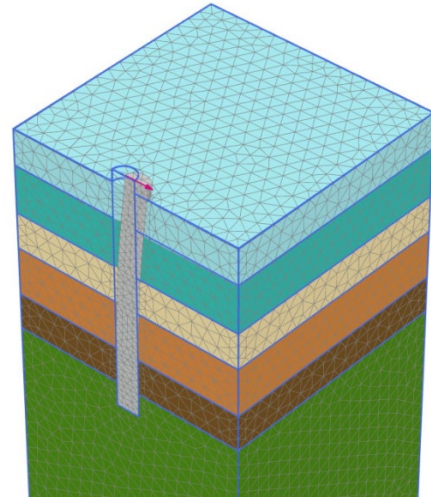


Figura 2. Modelagem do conjunto solo-estaca.

2.1 Modelagem da estaca

A estaca foi modelada com quatro relações de altura por diâmetro (H/D) conforme Lautenschläger (2010), com simulação pelo modelo elástico linear do Plaxis 3D. Foi considerado um concreto armado de resistência característica à compressão de 25 MPa.

Procurou-se definir valores de deflexão de 3% do diâmetro da estaca, no intuito de verificar a força horizontal necessária para que ocorresse o deslocamento em cada caso. Os parâmetros da estaca podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros da estaca.

| γ (kN/m ³) | E (GPa) | H (m) | D (m) | Rela- ção H/D | Defle- ção (m) |
|----------------------------------|------------|----------|----------|------------------|-------------------|
| 25 | 24 | 10 | 1 | 10 | 0,03 |
| | | 10 | 0,5 | 20 | 0,015 |
| | | 4 | 1 | 4 | 0,03 |
| | | 4 | 0,5 | 8 | 0,015 |

Foram medidas as forças horizontais em dois pontos, mostrados na Figura 3. O Ponto A está no local onde foi aplicada a carga e o Ponto B está imediatamente acima do solo, no lado oposto ao Ponto A.

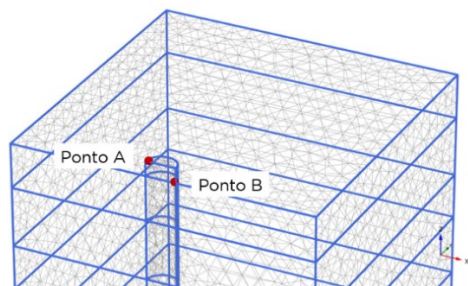


Figura 3. Localização dos pontos para medição da força horizontal e deslocamento.

A modelagem foi dividida em três etapas, sendo a etapa inicial apenas a disposição das camadas de solo, a segunda etapa a alocação da estaca no solo, e a terceira etapa a aplicação da deflexão na ponta da estaca. Esta foi definida com 0,5 m acima do solo para todas as simulações.

2.2 Estratigrafia do solo e modelo Hardening Soil

A estratigrafia do solo utilizada é a proposta por Rebolledo, León e Camapum de Carvalho (2019), onde são descritas seis camadas de solo do Campo Experimental de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB para o modelo Hardening Soil, presentes na Tabela 2.

Tabela 2. Proposta de modelo do solo de Rebolledo, León e Camapum de Carvalho (2019).

| Parâmetros | Número da camada | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | Argila arenosa porosa | | | Solo laterítico residual | | Solo saprolítico |
| H (m) | 0 - 1,5 | 1,5 - 3,5 | 3,5 - 5,0 | 5,0 - 7,0 | 7,0 - 8,5 | 8,5 - 20,0 |
| γ (kN/m ³) | 13,1 | 12,8 | 13,9 | 14,3 | 16,0 | 18,2 |
| c' (kPa) | 5 | 5 | 5 | 20 | 75 | 20 |
| φ' (°) | 25 | 25 | 26 | 32 | 20 | 22 |
| ψ (°) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E_{50}^{ref} (MPa) | 3,2 | 2,5 | 4,0 | 12,0 | 13,2 | 12,2 |
| E_{oed}^{ref} (MPa) | 4,9 | 1,45 | 2,2 | 6,9 | 7,0 | 5,7 |
| E_{ur}^{ref} (MPa) | 14,0 | 14,0 | 36,9 | 37,5 | 54,0 | 54,0 |
| m | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,7 |
| ν_{ur} | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| p^{ref} (kPa) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| R_f | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 |
| POP (kPa) | 65,7 | 31,8 | 0 | 31,4 | 0 | 0 |
| K_0^{nc} | 0,58 | 0,58 | 0,56 | 0,47 | 0,66 | 0,63 |
| K_0 | 1,37 | 0,77 | 0,56 | 0,56 | 0,66 | 0,63 |

Onde:

H = altura da camada de solo;

γ = peso específico aparente;

φ' = ângulo de atrito efetivo;

c' = coesão efetiva;

ψ = ângulo de dilatância;

E_{50}^{ref} = módulo secante de rigidez para o ensaio triaxial CD;

E_{oed}^{ref} = módulo tangente de rigidez de referência para o carregamento primário no ensaio oedométrico;

E_{ur}^{ref} = módulo de rigidez de referência para descarregamento/recarregamento;

m = expoente que define a dependência da deformação pelo estado de tensão;

ν_{ur} = coeficiente de Poisson para descarregamento/recarregamento;

p^{ref} = tensão isotrópica de referência;

R_f = razão de ruptura;
POP = pressão de pré-sobrecarga;
 K_0^{nc} = coeficiente de empuxo no repouso para solo normalmente adensado;
 K_0 = coeficiente de empuxo no repouso.

No modelo Hardening Soil, as deformações totais são calculadas usando um módulo de rigidez dependente da tensão, diferente para o carregamento e descarregamento. Assume-se endurecimento isotrópico e dependente das deformações plásticas de cisalhamento e deformações volumétricas (Surarak *et al.*, 2012).

Schanz *et al.* (1999) explicam a formulação e verificação do modelo a partir dos parâmetros de entrada presentes na Tabela 2 e é assumida a relação tensão-deformação como uma curva hiperbólica. Esta função hiperbólica é apresentada por Kondner (1963) para o ensaio triaxial drenado (CD) como:

$$\varepsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \frac{q}{q_a - q}, \text{ para } q < q_f \quad (1)$$

onde ε_1 é a deformação axial e q é a tensão desviatória. A tensão desviatória final q_f pode ser definida como:

$$q_f = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} (\sigma_3' + c' \cot \phi') \quad (2)$$

que é derivada da envoltória de Mohr-Coulomb envolvendo os parâmetros de c' e ϕ' . O valor assintótico da resistência ao cisalhamento q_a é expresso como:

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (3)$$

No caso de $q_a = q_f$ (Razão de ruptura = 1), a envoltória de ruptura é atingida e ocorre escoamento perfeitamente plástico. A Figura 4 mostra a relação hiperbólica de tensão-deformação para carregamento primário.

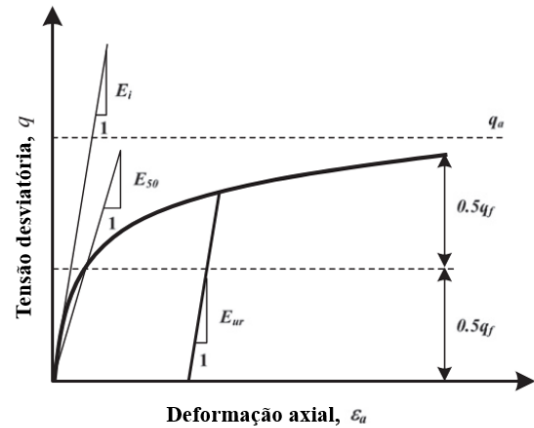


Figura 4. Relação hiperbólica de tensão-deformação (adaptado de Schanz *et al.*, 1999).

O comportamento tensão-deformação para carregamento primário é altamente não linear. O parâmetro E_{50} é um módulo de rigidez dependente da tensão confinante para carregamento primário, dado como:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' - p^{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (4)$$

onde E_{50}^{ref} é um módulo de rigidez de referência correspondente à tensão de referência p^{ref} . A rigidez real depende de σ_3' que é a pressão confinante efetiva em um teste triaxial.

Para o programa Plaxis, σ_3' é negativa em compressão. A dependência da tensão é dada pela potência (m). Para simular uma dependência de tensão logarítmica, a variável deve estar entre 0,5 e 1 (Soos von, 2001).

O módulo de rigidez dependente da tensão de descarregamento e recarga é calculado como:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' - p^{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (5)$$

onde E_{ur}^{ref} é o módulo de referência para descarregamento e recarga, que corresponde à pressão de referência p^{ref} . A função da superfície de endurecimento por cisalhamento (f_s) é dada como:

$$f_s = \underline{f} - \gamma^p \quad (6)$$

$$\underline{f} = \frac{q_a}{E_{50}} \left\{ \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{q_a - (\sigma'_1 - \sigma'_3)} \right\} - \frac{2(\sigma'_1 - \sigma'_2)}{E_{ur}} \quad (7)$$

onde σ'_1 e σ'_3 são as tensões principais efetivas, E_{50} é o módulo de rigidez secante de 50%, e γ^p é a deformação plástica por cisalhamento, e pode ser aproximada como:

$$\gamma^p \approx \varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p - \varepsilon_3^p = 2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p \approx 2\varepsilon_1^p \quad (8)$$

onde ε_1^p , ε_2^p e ε_3^p são as deformações plásticas e ε_v^p é a deformação volumétrica plástica.

Os módulos triaxiais E_{50}^{ref} e E_{ur}^{ref} são parâmetros que controlam as superfícies de endurecimento ao cisalhamento. As superfícies de escoamento também são estudadas no modelo, e estão relacionadas à deformação volumétrica plástica medida na condição de compressão isotrópica. A Figura 5 mostra as superfícies de endurecimento ao cisalhamento e de escoamento para solo sem coesão.

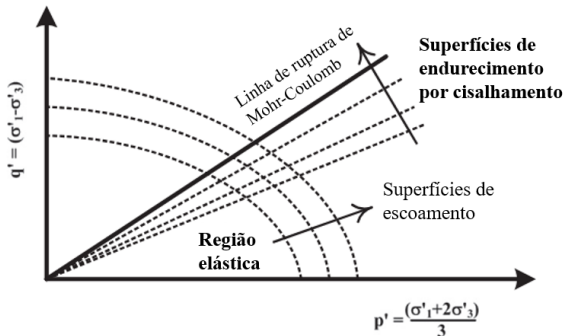


Figura 5. Endurecimento por cisalhamento e superfícies de escoamento no Modelo Hardening Soil (adaptado de Schanz et al., 1999).

O módulo de referência oedométrico E_{oed}^{ref} é usado para controlar a magnitude das deformações volumétricas plásticas ε_v^{pc} que se originam da superfície de escoamento. De maneira semelhante aos módulos triaxiais, o módulo oedométrico E_{oed} é expresso como:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma'_3 \sin \phi'}{c' \cos \phi' - p^{ref} \sin \phi'} \right)^m \quad (9)$$

A função da superfície de escoamento pode ser dada por:

$$f^c = \frac{q^2}{\alpha^2} + p^2 - p_p^2 \quad (10)$$

onde, α é um parâmetro auxiliar do modelo relacionado ao K_0^{nc} . Os parâmetros p e q são expressos como:

$$p = \frac{-(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \quad (11)$$

$$\underline{q}^2 = \sigma_1 + (\delta - 1)\sigma_2 - \sigma_3 \quad (12)$$

onde:

$$\delta = \frac{(3 + \sin \phi')}{(3 - \sin \phi')} \quad (13)$$

\underline{q} é a medida especial de tensão para tensões desviadoras. No caso do ensaio triaxial, reduz-se a $\underline{q} = -\delta(\sigma_1 - \sigma_3)$.

O tamanho da superfície de escoamento é determinado pela tensão de pré-adensamento isotrópica p_p . Relaciona-se a pressão de pré-adensamento p_p à deformação volumétrica da superfície de escoamento ε_v^{pc} por:

$$\varepsilon_v^{pc} = \frac{\beta}{1 - m} \left(\frac{p_p}{p^{ref}} \right)^{1-m} \quad (14)$$

onde ε_v^{pc} representa a deformação volumétrica plástica em compressão isotrópica. Tanto α quanto β são parâmetros da superfície de escoamento. Suas relações podem ser expressas como:

$$\alpha = K_0^{nc} = 1 - \sin \phi' \quad (15)$$

$$\beta = E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref} \quad (16)$$

de tal forma que K_0^{nc} e E_{oed}^{ref} podem ser usados como parâmetros de entrada que determinam a magnitude de α e β , respectivamente (Surarak et al., 2012). A Figura 5 mostra a superfície de escoamento no plano p' - q' .

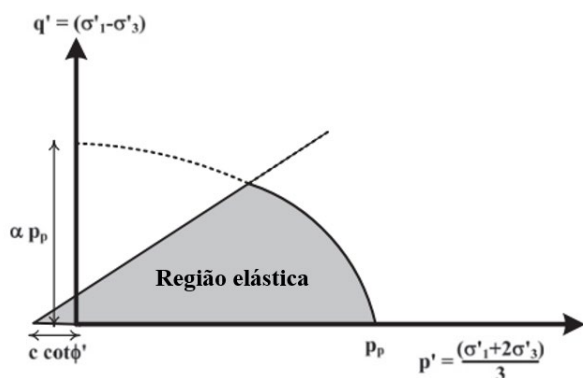


Figura 6. Superfície de escoamento do modelo Hardening Soil no plano p' - q (adaptado de Schanz et al., 1999).

3. RESULTADOS

Os resultados da pesquisa abrangem a apresentação do comportamento solo-estaca por meio de imagens extraídas das análises do Plaxis 3D. Inicialmente nas Figuras 7 a 10, são apresentados os campos de isovalores de deslocamentos dada a deflexão inicial.

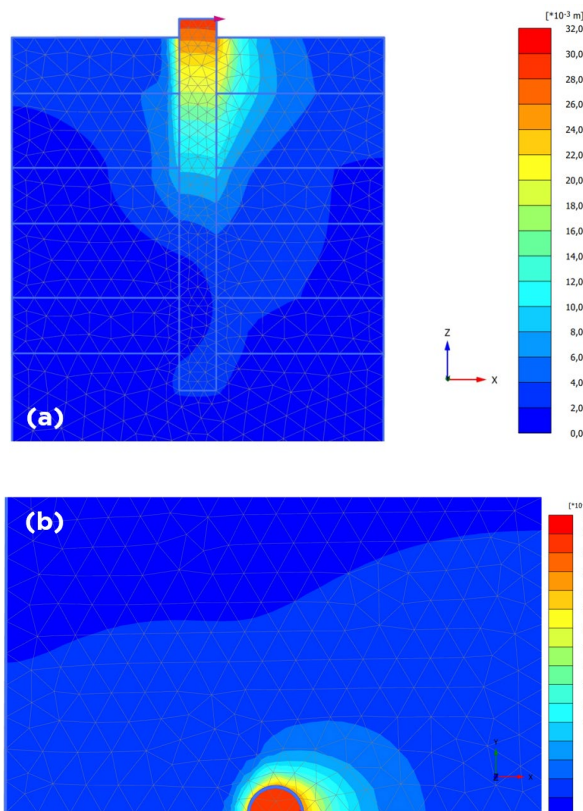


Figura 7. (a) Vista frontal do deslocamento para relação H/D de 10. (b) Vista superior do deslocamento para relação H/D de 10.

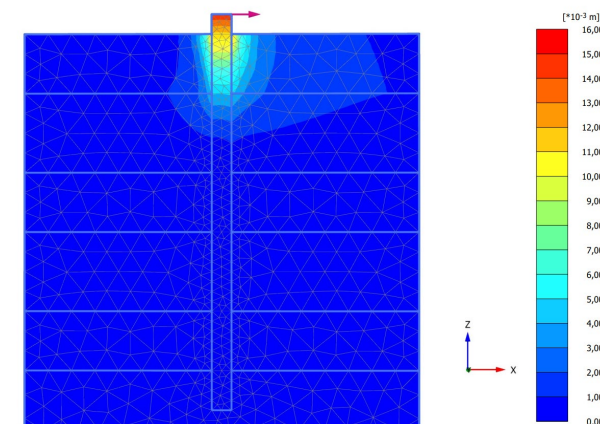


Figura 8. Deslocamento para relação H/D de 20.

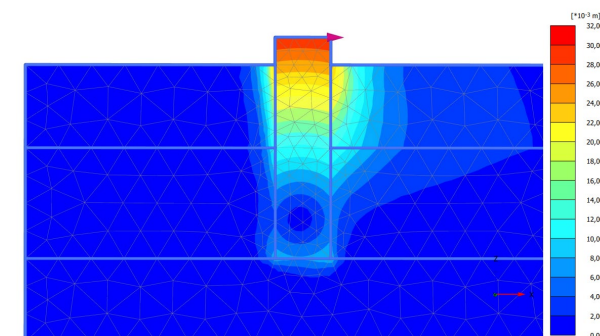


Figura 9. Deslocamento para relação H/D de 4.

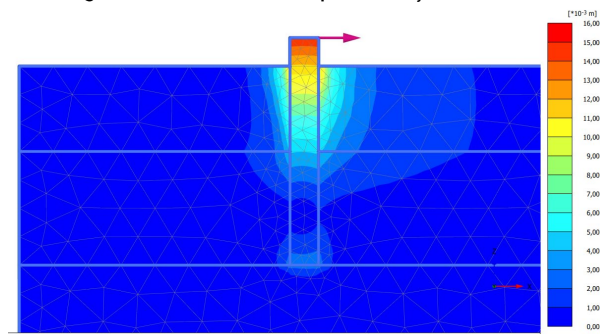


Figura 10. Deslocamento para relação H/D de 8.

Evidencia-se que os deslocamentos horizontais se concentram no terço superior da estaca para as estacas longas das Figuras 7 e 8. No caso das estacas curtas nas Figuras 9 e 10, houveram deslocamentos expressivos também no fundo, e os máximos deslocamentos se concentraram na metade superior. Na Figura 7(b), mostra-se a influência dos deslocamentos em vista superior, onde é notável que os deslocamentos são propagados a aproximadamente três vezes o diâmetro da estaca. O mesmo ocorreu de maneira semelhante para todos os casos.

Os resultados dos deslocamentos estão em acordo com o método de Broms (1965), que separa a análise de estacas submetidas a carregamentos laterais em estacas longas e curtas, fixas (no topo) e livres, em solos com e sem coesão. Para estacas

curtas, livres e em solo coesivo, os momentos máximos se encontram na metade superior da estaca. Para estacas longas na mesma condição, estão no terço superior, conforme Figuras 11 e 12.

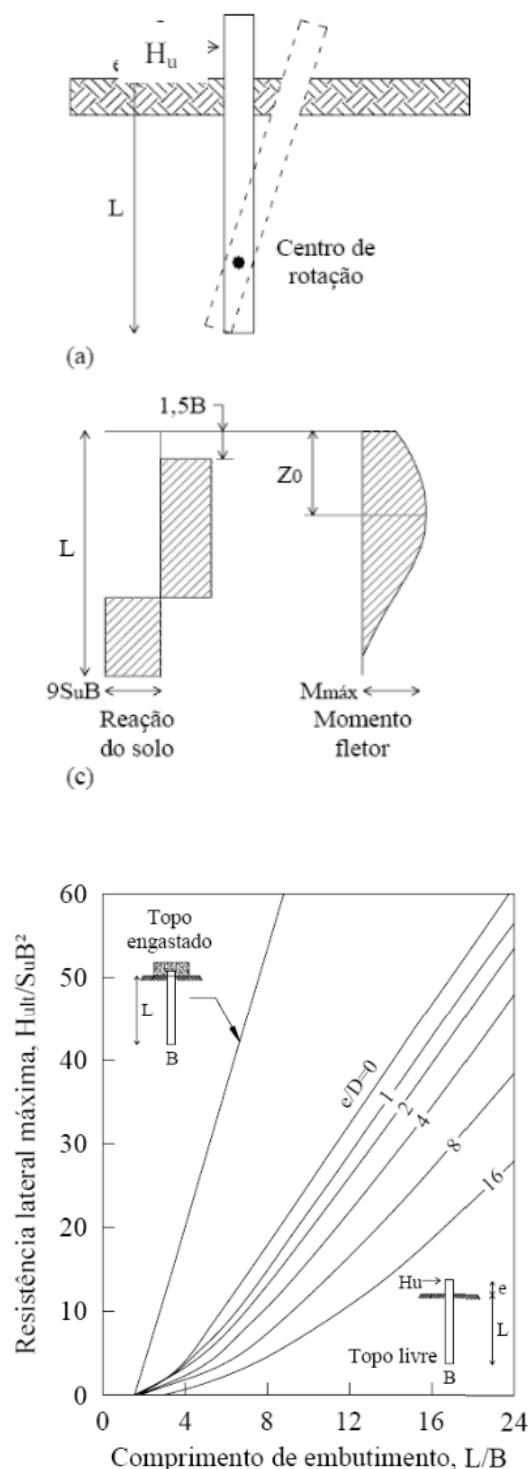


Figura 11. Mecanismo de ruptura do sistema e solução gráfica para estacas curtas em solo coesivo (Lautenschläger, 2010).

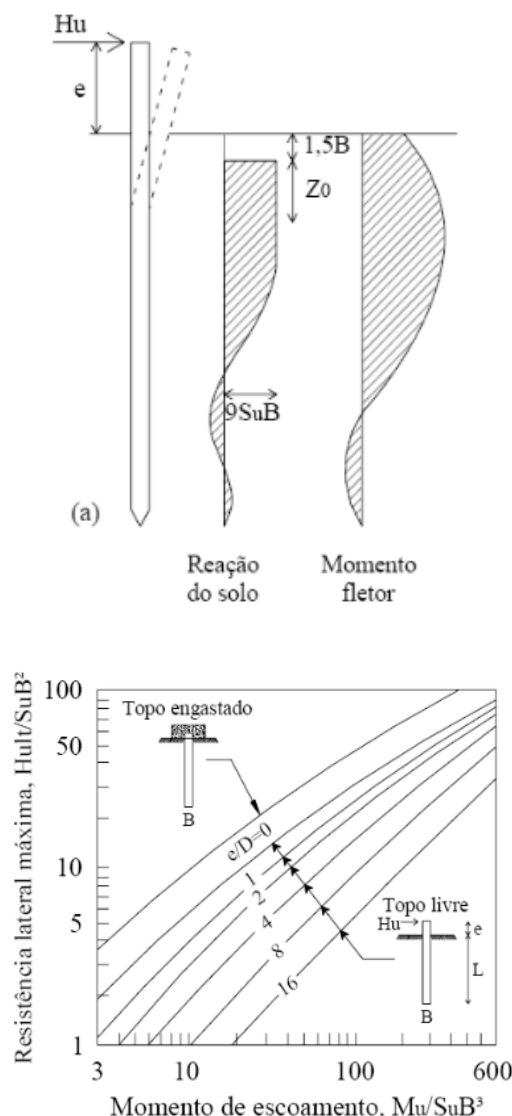


Figura 12. Mecanismo de ruptura do sistema e solução gráfica para estacas longas em solo coesivo (Lautenschläger, 2010).

Outrossim, ocorrem deslocamentos na base das estacas curtas pela ocorrência de rotação em relação a uma seção transversal crítica, com ruptura da massa de solo. Em estacas longas, a ruptura ocorre com a plastificação do material no local de momento máximo (Broms, 1965).

Com base nas deflexões aplicadas para as quatro simulações foi possível obter a força horizontal necessária para o deslocamento de 3% do diâmetro da estaca. Nas Figuras 13 a 16, a curva azul indica a força horizontal e deslocamento no Ponto A, enquanto a curva laranja, as mesmas variáveis no Ponto B, pontos determinados na Figura 3.

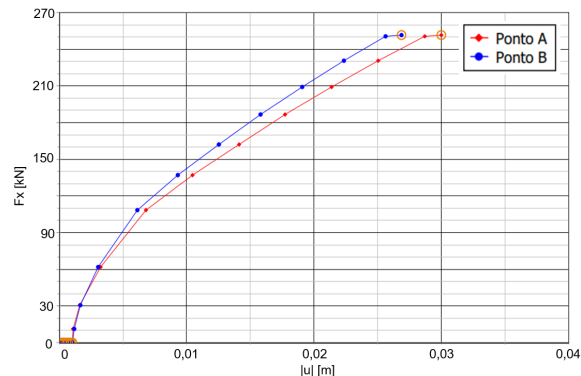


Figura 13. Força horizontal em função do deslocamento para a relação H/D de 10.

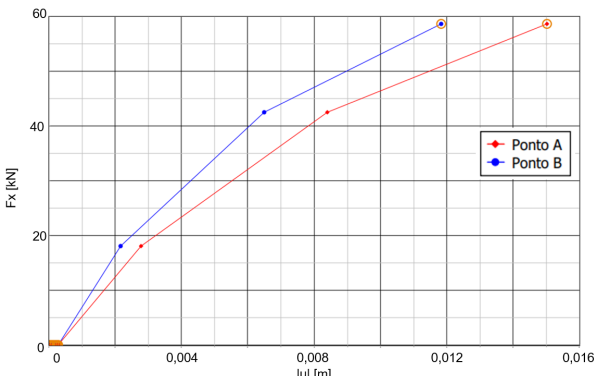


Figura 14. Força horizontal em função do deslocamento para a relação H/D de 20.

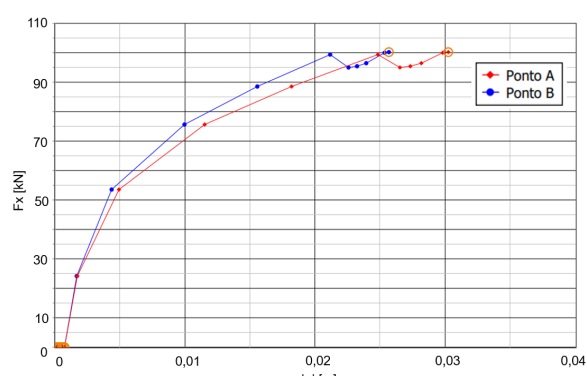


Figura 15. Força horizontal em função do deslocamento para a relação H/D de 4.

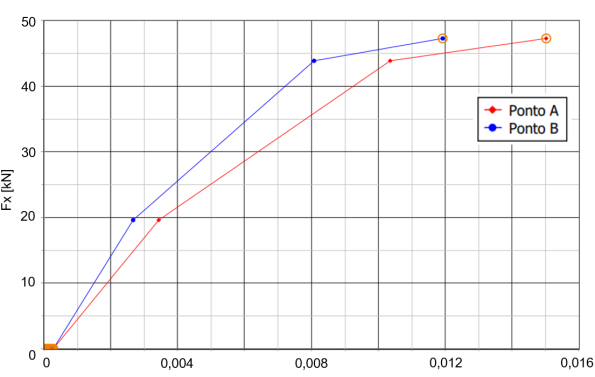


Figura 16. Força horizontal em função do deslocamento para a relação H/D de 8.

Relata-se que o ponto B recebe 3 mm a menos do deslocamento imposto ao ponto A. Também é perceptível que as curvas se assemelham a curvas logísticas, com aparente crescimento exponencial inicial e convergência para um valor final constante. Na Figura 15, entretanto, os valores da força horizontal apresentam uma descontinuidade, que pode ser explicada por um nível de deslocamento onde o solo ao redor começa a fluir plasticamente, causando uma redução temporária na resistência horizontal antes de estabilizar novamente.

Na Figura 17 e Tabela 3 são comparados os resultados para todos os casos. A estaca com diâmetro de 1 m e altura de 10 m teve o melhor resultado de resistência. Já as estacas de 0,5 m de diâmetro obtiveram valores finais próximos, para as duas alturas definidas.

A estaca de 1 m de diâmetro e altura de 4 m, entretanto, apresentou valores consideravelmente menores que a primeira estaca citada de mesmo diâmetro.

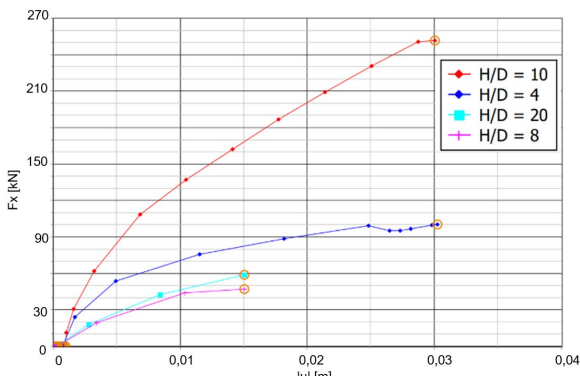


Figura 17. Comparação das forças horizontais e deslocamentos no Ponto A para todas as relações.

Tabela 3. Forças horizontais máximas e deslocamentos finais.

| Relação H/D | Força (kN) | Deslocamento A (m) | Deslocamento B (m) |
|-------------|------------|--------------------|--------------------|
| 10 | 251,73 | 0,03 | 0,027 |
| 4 | 85,085 | 0,03 | 0,027 |
| 20 | 58,664 | 0,015 | 0,012 |
| 8 | 47,222 | 0,015 | 0,012 |

Lautenschläger (2010) atribui o fenômeno a uma profundidade crítica até onde o carregamento lateral influencia o solo, podendo ainda ocorrer empuxo

passivo devido à tendência de rotação caso a estaca não ultrapasse essa profundidade crítica. Essa propriedade recebe a hipótese de estar diretamente relacionada a parâmetros geotécnicos do solo e ao diâmetro da estaca.

Em seu estudo com estaca de módulo de elasticidade E de 250 MPa (próxima a definida neste trabalho) e solo de coesão de 60 kPa, Lautenschläger (2010) apresentou que para as relações de H/L de 4 e 10, os valores de resistência foram similares, enquanto para coesão de 2 kPa, houve redução significativa entre os dois casos, conforme Figuras 18 e 19. Considerando que o substrato extraído do PPGG possui coesão de 5 kPa nos 5 m de profundidade iniciais, os resultados corroboram para a mesma hipótese inicial.

Estudos internacionais, como o de Surarak et al. (2012), evidenciaram que a variação de E_{50} e c' tem impacto direto na resposta lateral de estacas modeladas com o Hardening Soil. Em comparação com os solos de Bangkok, os solos tropicais brasileiros apresentaram rigidez inicial inferior nas primeiras camadas, o que contribuiu para maiores deslocamentos próximos à superfície. Tais semelhanças indicam que o modelo se comporta de forma coerente entre diferentes tipos de solo, respeitadas suas propriedades geotécnicas.

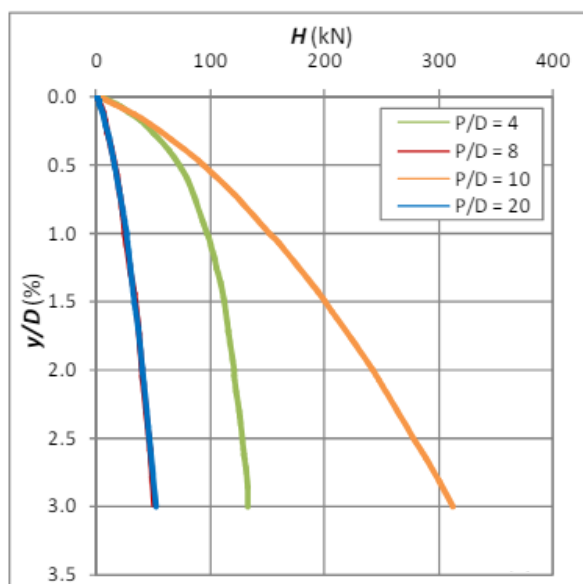


Figura 18. Comportamento força horizontal x deflexão de 3% para $E = 250$ MPa: (a) $c' = 2$ kPa (Lautenschläger, 2010).

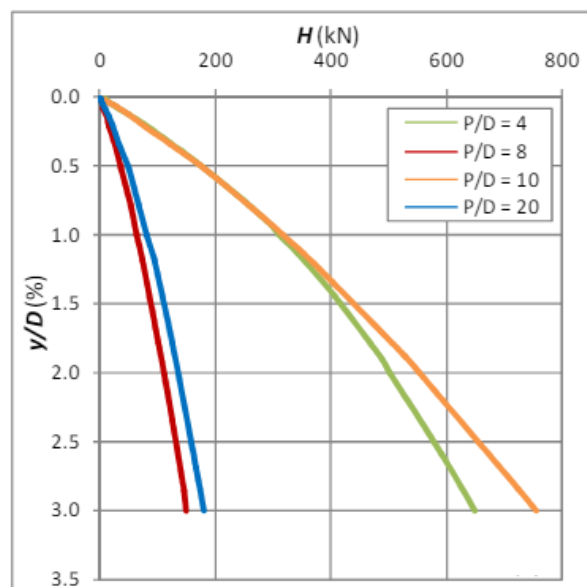


Figura 19. Comportamento força horizontal x deflexão de 3% para $E = 250$ MPa: $c' = 60$ kPa (Lautenschläger, 2010).

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir das análises realizadas com Plaxis 3D permitiram a compreensão do comportamento solo-estaca sob diferentes relações H/D para o solo modelado pelo modelo HS a partir de parâmetros do substrato de Brasília. Os deslocamentos horizontais, conforme evidenciado nas figuras, se concentram no terço superior das estacas longas e na metade superior das estacas curtas. Esse comportamento está em conformidade com o método de Broms (1965), indicando a validade das simulações.

As curvas de força horizontal versus deslocamento apresentaram comportamento logístico, com crescimento inicial rápido e convergência para valores constantes. Uma descontinuidade observada para a relação H/D de 4 foi atribuída ao início de fluxo plástico do solo ao redor da estaca. Os resultados mostram que a estaca com diâmetro de 1 m e altura de 10 m exibiu a melhor resistência horizontal, enquanto estacas de diâmetros menores tiveram resistências similares.

A análise também sugere que a resistência horizontal está diretamente relacionada às propriedades geotécnicas do solo e ao diâmetro da estaca, conforme corroborado por Lautenschläger (2010).

Cabe destacar que os resultados obtidos são condicionados ao perfil de solo estudado. Assim, a extrapolação para outras condições geotécnicas, como solos colapsíveis, solos saturados ou

fundações com diferentes condições de apoio (como engastamento), deve ser feita com cautela, sendo recomendável a realização de calibração numérica ou ensaios experimentais adicionais.

Do ponto de vista prático, os resultados reforçam a importância de considerar a interação entre geometria da estaca e os parâmetros específicos dos solos tropicais no dimensionamento de fundações submetidas a carregamentos laterais. Em especial, a presença de solos com coesão reduzida nas camadas superficiais pode afetar a eficiência da estaca curta, enquanto o comportamento das estacas longas tende a ser mais previsível devido à concentração de deslocamentos no terço superior.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se explorar o comportamento de estacas longas sob condições mais realistas de carregamento, como ações cíclicas (vento, tráfego ou eventos sísmicos), bem como a inclusão de condições de engastamento da cabeça da estaca. Além disso, estudos com instrumentação in situ permitiriam validar os modelos numéricos e aprimorar a calibração dos parâmetros do solo, elevando a confiabilidade dos projetos geotécnicos em ambientes tropicais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Juan Felix Rodriguez Rebolledo pela disponibilização do software Plaxis 3D e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pela possibilidade de realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Broms, B. (1965). Design of Laterally Loaded Piles. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 91 (SM3), 77-99.
- Jung, J. G. (2009). Fundações superficiais de linhas de transmissão submetidas a esforços de tração: comparação entre métodos de previsão de capacidade de carga. *Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil)*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil pp. 60.
- Kondner, R.L. (1963). Hyperbolic stress-strain response cohesive soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE 89, pp. 115-143.
- Lautenschläger, C. E. R., 2010, Modelagem Numérica do Comportamento de Fundações Profundas Submetidas a Carregamento Lateral, *Dissertação (mestrado)* - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, pp. 1-181.
- Oliveira, B. C., Sales, M. M., Angelin R. R., Junior, L. C. G. (2022). Modelagem Numérica de uma Estaca Prensada e Concretada in situ Instalada em um Perfil de Solo Tropical. *XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Campinas, São Paulo, Brasil, pp. 7888-7895.
- Rebolledo, J. F. R., León, R. F. P., Camapum de Carvalho, J. (2019). Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília. *Soils and Rocks*, 42(1), São Paulo, Brasil, pp. 61-74. doi:10.28927/sr.421061.
- Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. (1999). The hardening soil model: formulation and verification, *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Balkema, Rotterdam.
- Soos von, P. (2001). Properties of Soil and Rock (in German), *Grundbautaschenbuch*, vol. 1, 6th Ed., Ernst and Son, Berlin, pp. 117-201.
- Surarak, C., Likitlersuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A., Oh, E., Guan, H. (2012). Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays. *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society*, pp. 682-697.