

Avaliação dos Deslocamentos Horizontais e da Estabilidade Global em Cortinas de Estacas Justapostas e Espaçadas

Lethícia Raquel da Silva Gomes

Engenheira Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, lethiciaraquel30@gmail.com

Samuel Barbosa dos Santos

Graduando de Eng. Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, sbsbarbosa15@gmail.com

Moisés Antônio da Costa Lemos

Engenheiro Civil, Mestre, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, moisesalemos@gmail.com

André Luís Brasil Cavalcante

Professor Associado, Doutor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

RESUMO: Diante da crescente demanda por estruturas de contenção subterrâneas, as cortinas de estacas em concreto armado surgem como uma alternativa eficaz, de fácil execução e custo acessível. No caso das cortinas com estacas espaçadas, a viabilidade dessa solução deve-se ao efeito de arqueamento no solo, resultando em economia significativa de material em relação às estacas justapostas. Em Brasília, são comumente adotados espaçamentos de 0,5m a 1,5m. Verificar os deslocamentos horizontais é crucial para garantir a segurança estrutural e a conformidade com normas regulatórias. Este estudo compara os deslocamentos horizontais em cortinas de estacas justapostas e espaçadas, além de verificar a estabilidade global, utilizando parâmetros de um solo real e o *software* GEO5. Os resultados mostram uma diferença de 1,53% no fator de segurança entre as abordagens, com valores acima de 1,5 em todos os casos estudados. O comprimento de ficha teve um aumento de 7 cm no caso das cortinas com estacas espaçadas. Observou-se que a cortina com estacas espaçadas apresentou deslocamento horizontal máximo aproximadamente 7% maior, podendo ser mitigado com a implementação de vigas de coroamento, vigas de solidarização ou ancoragens.

PALAVRAS-CHAVE: Cortinas de Estacas, Concreto Armado, Contenção no Subsolo, Efeito de Arqueamento, Estacas Espaçadas.

ABSTRACT: Given the increasing demand for underground retaining structures, reinforced concrete pile walls have emerged as an effective, easily implementable, and cost-effective alternative. For walls with spaced piles, their feasibility stems from the arching effect in the soil, leading to significant material savings compared to contiguous piles. Verifying horizontal displacements is crucial for ensuring structural safety and compliance with regulatory standards. This study compares horizontal displacements in contiguous and spaced pile walls and verifies overall stability using parameters from real soil and the GEO5 *software*. The results reveal a 1.53% difference in the safety factor between the approaches, with values above 1.5 in all cases studied. The length of the pile increased by 7 cm in the case of spaced pile wall. It was observed that the spaced pile wall exhibited approximately 7% greater maximum horizontal displacement, which could be mitigated by the implementation of coping beams, tie beams, or anchors.

KEYWORDS: Pile Walls, Reinforced Concrete, Subsurface Retaining, Arching Effect, Spaced Piles.

1 INTRODUÇÃO

As cortinas de estacas são estruturas geotécnicas que podem ser executadas em concreto armado subdividindo-se em: secantes, justapostas e espaçadas. Essa solução é vantajosa devido ao seu baixo custo, rápida construção, versatilidade em diversos tipos de solo, capacidade de ser combinada com outras soluções de contenção e necessidade reduzida de medidas estabilizadoras. (MEIRELES & MARTINS, 2006) São estruturas de contenção esbeltas, projetadas para suportar esforços de flexão. Elas são recomendadas especialmente quando a obra não possui área suficiente para a utilização de um muro de contenção convencional. (GERSCOVICH; DANZIGER; SARAMAGO, 2019)

O projeto de estruturas de contenção tradicionalmente se baseia na determinação de um fator de segurança em relação aos momentos que atuam na estrutura, considerando o estado limite de ruptura e incorporando um fator de segurança apropriado para atender aos requisitos de serviço. Craig (2004) recomenda que, para evitar escavações excessivas da zona passiva, é aconselhável reduzir o nível de solo à esquerda da parede em 10% da altura livre H , limitado a uma redução máxima de 0,5m.

De acordo com a NBR 9061 (ABNT, 1985), os fatores de segurança adotados devem ser, no mínimo, iguais a 1,5 para os casos gerais, sendo necessária a justificativa para a adoção deste valor. Para a realização do dimensionamento é necessário se determinar os empuxos atuantes na estrutura. Dentre as alternativas disponíveis, a distribuição de empuxos de terra proposta por Rankine é muito utilizada, já que é mais conservadora em virtude de não se considerar os efeitos de atrito entre o solo e a estrutura.

O espaçamento das cortinas de estacas espaçadas pode ser estimado a partir da Teoria do Arqueamento em solos, descrita por Terzaghi (1943), que considera uma redistribuição de tensões no trecho de solo entre estacas, que garantem a sua sustentação. Nesse contexto, métodos como o de Li *et al.* (2020) foram desenvolvidos para determinar o espaçamento limite entre estacas, ou seja, o espaçamento máximo cujo efeito de arqueamento consegue transferir os esforços para a estaca em função de parâmetros de resistência do solo. (WU *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2020; LONG *et al.*, 2022)

Acerca dos deslocamentos horizontais desenvolvidos na contenção, Schmitt (1995) apresenta equacionamento que permite a sua estimativa. Esta formulação parte do método das molas de Winkler que, em suma, representa o solo como uma série de molas independentes e de comportamento elástico, aplicável a carregamentos horizontais. O deslocamento horizontal da parede frontal é um dos fatores importantes que caracterizam a segurança das estruturas de cortina de estacas. Embora grandes deslocamentos laterais possam ser mitigados pelo aumento do número de estacas de diâmetro maior, seu projeto e construção são difíceis e caros (TAGHAVI *et al.*, 2016b). A estabilidade global das cortinas de estacas dimensionadas pode ser verificada pelo Método de Morgenstern-Price.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os deslocamentos horizontais e estabilidade global em cortinas de estacas justapostas e espaçadas, com vistas à comparação dos resultados utilizando dados referentes a um solo real. A metodologia envolve o dimensionamento das cortinas de estacas, considerando o efeito de arqueamento no solo, utilizando o *software* GEO5.

2 METODOLOGIA

2.1 Apresentação do Estudo Hipotético

Neste estudo hipotético, serão analisados dois casos distintos: o Caso 1, que envolve o dimensionamento com estacas justapostas, e o Caso 2, que utiliza estacas espaçadas, com o espaçamento determinado pelo método de Li *et al.* (2020), os casos estão ilustrados na Figura 1. Nos dois casos estudados, os seguintes parâmetros serão considerados iguais: i) altura da contenção (H), ii) sobrecarga (q) e iii) diâmetro das estacas (d). A Figura 2 ilustra a geometria da contenção a ser analisada nos dimensionamentos, onde:

- Altura da contenção H : 5,5m;
- Diâmetro das estacas d : 0,5m;
- Sobrecarga superficial q : 10kN/m².

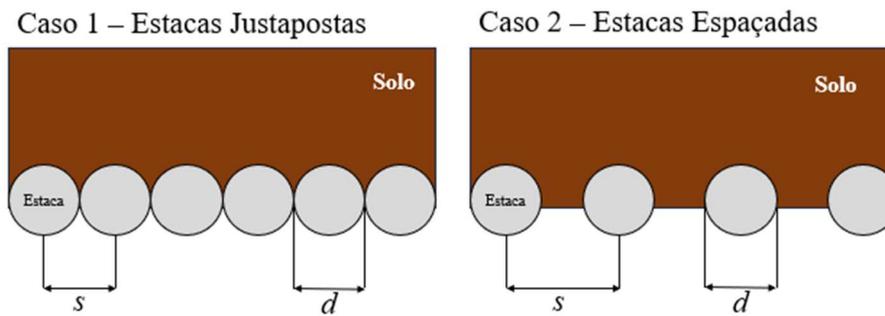


Figura 1. Vista superior da disposição das estacas nos casos analisados.

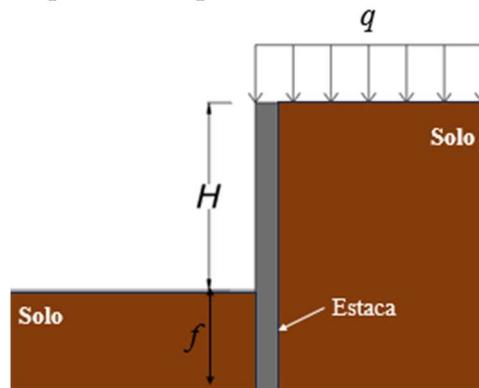


Figura 2. Geometria das contenções a serem analisadas.

Os parâmetros adotados para o perfil de solo multicamadas da análise descrita neste artigo, apresentados na Tabela 1, baseia-se nos resultados de ensaios realizados por Mota (2003) e Castillo (2013) no Campo Experimental de Fundações e Ensaio de Campo da Universidade de Brasília, situado em frente ao prédio SG 12, onde se localiza o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (apud PEREZ COLLANTES, 2017). As coordenadas do campo experimental são 15°46' Latitude Sul e 47°52' Longitude Oeste.

Tabela 1. Parâmetros do solo das análises

| Profundidade(m) | Peso específico (kN/m ³) | Módulo de elasticidade (MPa) | Poisson | Coesão (kPa) | Ângulo de atrito (°) |
|-----------------|--------------------------------------|------------------------------|---------|--------------|----------------------|
| 0-3 | 13,88 | 8 | 0,35 | 16 | 27 |
| 3-8 | 15,45 | 13 | 0,35 | 24 | 27 |
| 8-12 | 17,66 | 20 | 0,2 | 40 | 27 |

2.2 Comprimento de Ficha

A determinação da ficha de estruturas de contenção é convencionalmente obtida conforme ilustrado na Figura 3. Nessa abordagem, presume-se que as tensões abaixo do ponto O são representadas por uma força concentrada R (kN) atuando no ponto O, a uma profundidade d' à esquerda da contenção.

O método de cálculo envolve determinar a profundidade d' a partir do equilíbrio dos momentos entorno de O. Um fator de segurança FS é aplicado na parcela resistente, ou seja, a resistência passiva do solo é dividida por FS . Em seguida, é calculada a força R a partir do equilíbrio das forças horizontais. Esta força deve ser maior ou igual a força proporcionada pelo empuxo passivo menos o ativo abaixo do ponto O. O comprimento da ficha é dado por:

$$f = 1,2 d' \tag{1}$$

onde f é o comprimento da ficha (m) e d' é a profundidade do ponto de rotação em relação ao nível de escavação (m).

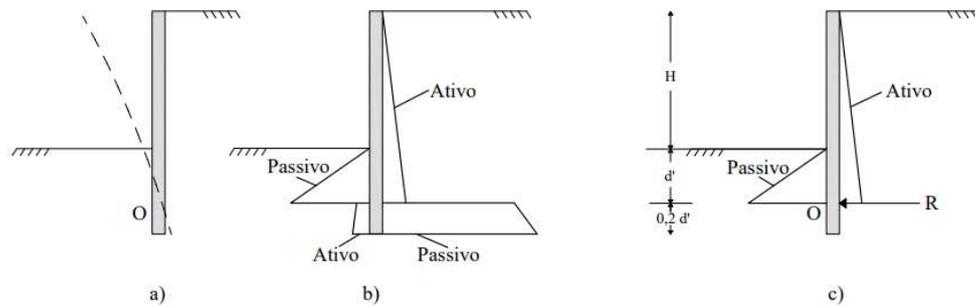


Figura 3. Parede de contenção: (a) rotação da parede, (b) distribuição dos empuxos de terra ativos de passivos para rotação ilustrada, (c) distribuição simplificada dos empuxos de terra (Adaptado de CRAIG, 2004).

2.2.1 Determinação do Espaçamento entre Estacas

No dimensionamento referente a estacas espaçadas, o espaçamento entre as estacas foi calculado no *software* Microsoft Excel pelo método de Li *et al.* (2020) em que:

$$L = \frac{4b H \tan\left(45 + \frac{\delta}{2}\right) \tan \delta + 2c' b H}{P - \gamma H \tan \delta - cb} \quad (2)$$

$$s = L + a \quad (3)$$

Sendo que:

$$\delta' = \frac{\delta}{2} \quad (4)$$

$$c' = \frac{c \tan \delta'}{\tan \delta} \quad (5)$$

onde a é a largura da seção transversal da estaca, b é o comprimento da estaca, L é a largura do arco, P é a carga atuante e δ é o ângulo de atrito solo estrutura.

Após o cálculo do espaçamento, esse valor foi implementado no *software* GEO5 – Projeto de Contensões para a determinação do comprimento de ficha, O GEO5 considera o espaçamento no dimensionamento aplicando um coeficiente de redução da pressão abaixo do fundo da vala k e este é calculado automaticamente da seguinte forma:

$$k = \frac{0,9(1,5d+0,5)}{s} \quad (6)$$

$$k = \frac{0,9(d+1)}{s} \quad (7)$$

onde k é o coeficiente de redução, d é o diâmetro da estaca e s é o espaçamento entre estacas.

Com a aplicação desse coeficiente de redução, o comprimento das estacas aumenta à medida que o espaçamento entre elas é ampliado, visando garantir a estabilidade da estrutura de contenção.

2.2.2 Determinação do Comprimento de Ficha

O comprimento de ficha dos dimensionamentos foi calculado no *software* GEO5 – Projeto de contenções. Com base na teoria dos estados limite, o programa procura o equilíbrio da equação de momentos, através de um método iterativo:

$$M_{at} = M_{res} \quad (8)$$

onde M_{at} é o momento atuante (kN.m) e M_{res} é o momento resistente (kN.m).

Após alcançar este equilíbrio, o *software* determina a localização do ponto de equilíbrio das forças. Ao aplicar a abordagem baseada no fator de segurança, o programa procura verificar, através de iterações, a equação seguinte:

$$\frac{M_{at}}{M_{res}} = FS \quad (9)$$

Nos dimensionamentos efetuados, aplicou-se um fator de segurança FS igual a 1,5, correspondente a obras permanentes segundo a NBR 11682 (ABNT, 2009).

2.3 Verificação da Estabilidade Global

Para garantir a segurança de obras de terra como escavações, encostas, barragens e aterros, utiliza-se amplamente a análise da estabilidade de taludes (RABIE, 2014). Nesse contexto, é comum o uso da Teoria de Equilíbrio Limite, em que se determina o equilíbrio de uma massa de solo cuja ruptura possa ocorrer em uma superfície plana, circular, poligonal ou mista (SILVA, 2011).

O Método de Morgenstern-Price é mais generalizado e pode ser aplicado a uma superfície qualquer. São consideradas fatias de largura infinitesimal e as forças de interação entre essas fatias são aproximadas por uma função, que é multiplicada por um fator adimensional λ . O fator de segurança, assim como o valor de λ são determinados com a combinação de equações de equilíbrio de forças e momentos. É necessário ainda um processo iterativo em virtude da não-linearidade das expressões (SILVA, 2011).

A relação entre as forças cisalhantes e as normais é dada por:

$$X = \lambda f(x)E \quad (10)$$

onde X e E são respectivamente as forças verticais e horizontais entre as fatias. A função $f(x)$ é determinada de acordo com a variação da inclinação das forças que atuam entre as fatias.

O *software* GEO5-Projeto de contenções permite exportar o modelo para o GEO5 – Estabilidade de taludes, que realiza uma análise 2D. Para as verificações desse trabalho foi considerada uma superfície de deslizamento circular e o método de Morgenstern-Price. Foi considerado como FS-mínimo 1,5, conforme especifica a NBR 11682, considerando-se alto nível de segurança contra danos a vidas humanas e alto nível de segurança contra danos materiais e ambientais. (ABNT, 2009).

2.4 Estimativa dos Deslocamentos Horizontais

Winkler (1867) propôs que o solo pode ser discretizado como uma série de molas elásticas, idênticas e independentes, que não se conectam entre si. Tal elasticidade, em conjunto com as considerações de solo homogêneo e isotrópico, são simplificações, contudo, o modelo é utilizável tanto em carregamentos verticais quanto horizontais, que é o caso da estaca (PINTO, 2021). Sobre isto, Schmitt (1995) apresentou equacionamento capaz de estimar os deslocamentos horizontais de estruturas no solo, a partir do módulo de reação do subsolo k_h , que advém do módulo edométrico E_{oed} e da rigidez da estrutura à flexão EI , conforme se segue:

$$k_h = 2,1 \cdot \left(\frac{E_{oed}^{4/3}}{(EI)^{1/2}} \right) \quad (11)$$

Assim como na Lei de Hooke para molas, existem o coeficiente das molas e uma força à obtenção do deslocamento, na proposição de Schmitt esses dados de entrada são respectivamente o módulo k_h e o empuxo desenvolvido pelo solo contido. Ainda, E_{oed} pode ser calculado a partir dos módulos de Young E e coeficiente de Poisson ν , conforme as equações seguintes:

$$\beta = I - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \quad (12)$$

$$E_{oed} = \frac{E}{\beta} \quad (13)$$

Por fim, a rigidez à flexão da estrutura EI pode ser obtida a partir da consideração do momento de inércia I para seções circulares de diâmetro d e módulo de elasticidade E para concreto de f_{ck} menor que 50 MPa. Sobre este último parâmetro, a NBR 6118 (2023) contém fórmula e sugere que o coeficiente adimensional α_E assume valor unitário quando o agregado tem origem no granito.

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (14)$$

$$E = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (15)$$

3 RESULTADOS

Com a utilização dos dados da Tabela 1, foi possível seguir aos cálculos necessários. Na determinação do comprimento de ficha no caso da cortina de estacas espaçadas, calculou-se o espaçamento entre estacas conforme proposto por Li *et al.* (2020), chegando-se ao valor de 1,20 m. Por conseguinte, este espaçamento foi implementado no *software* GEO5 permitindo a obtenção do comprimento de ficha para a cortina de estacas espaçadas, conforme supracitado no item 2.2. No caso das estacas justapostas, o espaçamento é igual ao diâmetro das estacas de 0,50 m. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nesta etapa e observa-se a proximidade entre eles.

Tabela 2. Comprimento de Ficha

| Tipo de cortina | Comprimento de ficha (m) |
|---------------------|--------------------------|
| Estacas justapostas | 2,53 |
| Estacas espaçadas | 2,60 |

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para o Fator de Segurança. Considerando que o valor mínimo recomendado pela NBR 9061 (ABNT, 1985) é de 1,5, pode-se afirmar que a contenção para ambos os casos analisados nesta pesquisa são estáveis. Destaca-se que ambas têm valor de FS duas vezes maior que o recomendado pela referida norma.

Tabela 3. Fator de Segurança

| Tipo de cortina | FS |
|---------------------|------|
| Estacas justapostas | 3,26 |
| Estacas espaçadas | 3,31 |

A Tabela 4 e a Figura 4 mostram os resultados obtidos aos deslocamentos horizontais das cortinas de estacas dimensionadas. Ressalta-se a proximidade dos valores encontrados, com discrepância de aproximadamente 7% entre eles.

Tabela 4. Deslocamentos máximos

| Tipo de cortina | Deslocamento (mm) |
|---------------------|-------------------|
| Estacas justapostas | 48,7 |
| Estacas espaçadas | 52,1 |

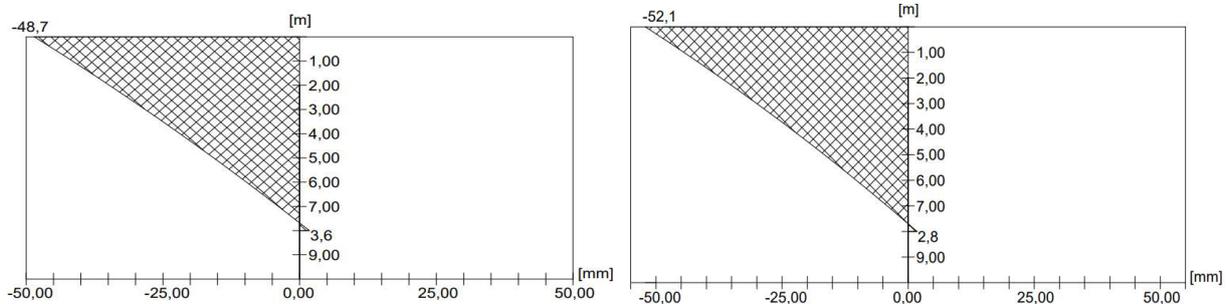


Figura 4 – Deslocamentos horizontais na cortina de estacas justapostas (à esquerda) e na cortina de estacas espaçadas (à direita) (GEO5, 2024).

4 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo apontam que, embora a utilização de estacas com espaçamento calculado para a cortina de estacas espaçadas possa proporcionar uma economia de material, algumas considerações fazem-se importantes quanto ao desempenho e segurança da contenção. Por se tratar de um solo com coesão, o desenvolvimento do efeito de arqueamento corroborou em um aumento de 7cm no comprimento de ficha em comparação com o caso de estacas justapostas. Neste sentido, o aumento do distanciamento entre estacas ocasionou uma variação pouco significativa do comprimento de ficha.

No tocante ao desempenho geotécnico, os valores de Fator de Segurança obtidos foram muito próximos em ambos os casos e substancialmente acima do valor mínimo de 1,5. Ainda, os deslocamentos horizontais máximos encontram-se na ordem de grandeza de milímetros. Apesar disto, é importante destacar que como o maior deslocamento ocorreu na cortinas de estacas espaçadas, em espaçamentos maiores essa diferença pode ser ampliada.

Assim, em situações em que são adotados espaçamentos maiores entre estacas, deve ser necessário recorrer à utilização de estruturas de travamento mais robustas, como vigas de coroamento e solidarização intermediária, visando a garantia da segurança da contenção, principalmente para evitar deslocamentos potencialmente danosos a estrutura. Além disso, pode ser necessário considerar a implementação de grampos e tirantes para reforçar a sua estabilidade.

Em síntese, embora a economia de material seja um aspecto atraente na escolha de cortinas espaçadas, é fundamental ponderar os impactos no desempenho da contenção, especialmente em situações que ocorram espaçamentos maiores entre as estacas.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 306975/2023-8) e pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF Projeto 00193-00001609/2023-44).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1985). NBR 9061. *Elementos pré-fabricados de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2023). NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR 11682. *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Castillo, D.Y.A. (2013). *Uso da Técnica de Radier Estaqueado para Pequenos Edifícios assentes sobre Solo Colapsível*. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G.DM-223/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154 p.
- Chen, G., Zou, L., Wang, Q., & Zhang, G. (2020). Pile-spacing calculation of anti-slide pile based on soil arching effect. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2020/7149379>.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's soil mechanics*. CRC Press.
- Gerscovich, D., Saramago, R., & Danziger, B. R. (2019). *Contenções: teoria e aplicações em obras*. Oficina de Textos.
- Li, H., Ni, W., Li, G., & Wang, D. (2020). Determination of maximum pile spacing of anti-slide pile with rectangular section considering soil arching effects. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 560, No. 1, p. 012045). IOP Publishing.
- Long, J., Li, M., Cui, L., Zhang, L., & Lu, J. (2022). A method for calculating stabilizing pile spacing by integrating the mechanical characteristics of soil arching. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(3). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09529-x>.
- Meireles, A. B. & Martins, J. G. (2006). *Fundações e Contenção Lateral de Solos*.
- Morgenstern, N. U. & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79-93.
- Mota, N. M. B. (2003). *Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Perez Collantes, C. A. (2017). *Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-286/17 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p.
- Pinto, C. P. J. (2021). *Análise de Estrutura com Interação Solo-Estrutura e as Molas de Winkler*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- Rabie, M. (2014). Comparison study between traditional and finite element methods for slopes under heavy rainfall. *HBRC Journal*, 10(2), 160-168.
- Schmitt, P. (1995). Méthode empirique d'évaluation du coefficient de réaction du sol vis-à-vis des ouvrages de soutènement souples. *Revue française de Géotechnique*, (71), 3-10.
- Silva, J. P. M. D. (2011). *Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes*. Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Taghavi, A., Muraleetharan, K. K., Miller, G. A., & Cerato, A. B. (2016). Centrifuge modeling of laterally loaded pile groups in improved soft clay. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 142(4), 04015099.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*.
- Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit: mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik, für polytechnische Schulen, Bauakademien, Ingenieure, Maschinenbauer, Architekten, etc.* H. Dominicus.
- Wu, J., Li, C., Liu, Q. & Fan, F. (2017). Optimal isosceles trapezoid cross section of laterally loaded piles based on friction soil arching. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(7), 2655–2664. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1311-5>.