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/COBRAMSEG2026.3/2

Análise Comparativa entre Modelos Analíticos, Computacionais e Físicos em Escala Reduzida, Aplicados à Engenharia Geotécnica

Maria Gabriela Cogo Fanela
Discente, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, maria.gabriela1@uel.br

Pedro Henrique Lopes Dal-Cól
Docente, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, eng.pedro.dalcol@uel.br

Raquel Souza Teixeira
Docente, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, raquel@uel.br

Carlos José Marques da Costa Branco
Docente, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, costabranco@uel.br

RESUMO: Os modelos físicos reduzidos e computacionais têm se consolidado como ferramentas complementares aos métodos analíticos tradicionais na geotecnia, permitindo a análise de fenômenos complexos e a verificação da coerência entre teoria e prática, garantindo a segurança de estruturas e a redução de custos em projetos. Justifica-se, portanto, o estudo de diferentes métodos de cálculo, que também contribui para o aprimoramento do ensino, possibilitando a compreensão prática dos conceitos teóricos e desenvolvimento crítico dos estudantes. Esta pesquisa busca analisar resultados obtidos por autores da Universidade Estadual de Londrina (UEL) sobre: contenções, fundações rasas e percolação de água em maciços de solo de barragens, com o objetivo de comparar os resultados e limitações de modelos analíticos, computacionais e experimentais em escala reduzida. Cada um utilizou modelos analíticos clássicos juntos a experimentos em escala reduzida em laboratório, por meio de um tanque, desenvolvido para essa finalidade e simulações numéricas com softwares geotécnicos como; GeoStudio SEEP/W e SIGMA/W. As comparações evidenciaram boa correspondência entre as previsões teóricas e os resultados experimentais, embora diferenças significativas tenham sido observadas quando a representação física foi limitada pela impossibilidade de reproduzir com exatidão as condições de campo e de escala. No caso das cortinas de estacas, as discrepâncias entre resultados analíticos e físicos chegaram a 66%, enquanto para os modelos de fundações e percolação as variações foram inferiores a 26%. Tais diferenças são atribuídas às simplificações geométricas e às restrições de similitude física relacionadas aos modelos reduzidos, por exemplo a cortina de estacas é um modelo reduzido 1g (com condições normais de gravidade), esse modelo possibilita observar fenômenos reais e compreender mecanismos de instabilidade, mas apresentam limitações de escala, como a correta representação e distribuição das tensões reais. Os resultados reforçam que, embora os modelos teóricos forneçam previsões conservadoras, a combinação de métodos analíticos, físicos e computacionais é essencial para aprimorar a confiabilidade dos projetos e compreender a interação solo-estrutura de forma mais realista. A análise integrada permite validar coeficientes empíricos, ajustar parâmetros de simulação e compreender fenômenos como plastificação, redistribuição de tensões e comportamento não linear do solo. Dessa maneira o uso conjunto desses métodos constitui uma abordagem didática e técnica eficaz, especialmente para o ensino e o desenvolvimento de pesquisas experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos, Reduzido, Analítico, Computacional, Comparação, Avaliação.

ABSTRACT: Reduced-scale physical and computational models have become consolidated as complementary tools to traditional analytical methods in geotechnical engineering, enabling the analysis of complex phenomena and the verification of consistency between theory and practice, thus ensuring structural safety and cost reduction in projects. Therefore, the study of different calculation methods is justified, as it also contributes to the improvement of engineering education by promoting a practical understanding of theoretical concepts and fostering students' critical thinking. This research aims to analyze results obtained by authors from the State University of Londrina (UEL) regarding retaining structures, shallow foundations, and water

seepage through dam soil embankments, with the objective of comparing the results and limitations of analytical, computational, and reduced-scale experimental models. Each study employed classical analytical models combined with reduced-scale laboratory experiments conducted in a testing tank specifically developed for this purpose, as well as numerical simulations using geotechnical software such as GeoStudio SEEP/W and SIGMA/W. The comparisons demonstrated good agreement between theoretical predictions and experimental results, although significant differences were observed when physical modeling was limited by the inability to accurately reproduce field and scaling conditions. In the case of sheet pile walls, discrepancies between analytical and physical results reached 66%, whereas for foundation and seepage models the variations were below 15%. These differences are attributed to geometric simplifications and physical similitude constraints inherent to reduced-scale models. For example, the sheet pile wall was tested under a 1g reduced-scale condition (normal gravity), which allows the observation of real phenomena and the understanding of instability mechanisms but presents scale limitations, particularly regarding the accurate representation and distribution of in situ stresses. The results reinforce that although theoretical models provide conservative predictions, the combination of analytical, physical, and computational methods is essential to enhance project reliability and to better understand soil–structure interaction in a more realistic manner. The integrated analysis allows the validation of empirical coefficients, calibration of simulation parameters, and improved understanding of phenomena such as plasticization, stress redistribution, and nonlinear soil behavior. Thus, the combined use of these methods constitutes an effective technical and educational approach, especially for teaching purposes and the development of experimental research.

KEYWORDS: Models, Reduced-Scale, Analytical, Computational, Comparison, Evaluation.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Mendonça (2005), historicamente, o processo de desenvolvimento da ciência e, portanto, da sociedade, tem-se confundido com o advento de novas descobertas e com a evolução permanente do conhecimento. Com base na sua capacidade de observação, experimentação e análise, o ser humano vem desenvolvendo teorias e modelos cada vez mais complexos para representação dos mais diversos fenômenos e comportamentos.

Nesse contexto, a engenharia geotécnica está inserida em uma área que acompanha essa evolução científica, baseando-se em métodos de cálculo para predizer o comportamento dos solos e suas interações com estruturas. Tradicionalmente, a análise de problemas geotécnicos esteve apoiada nos conceitos da Mecânica dos Solos, na Teoria da Elasticidade e nas teorias de análise limite, sendo que os primeiros modelos desenvolvidos eram relativamente simples e de fácil aplicação, embora apresentassem limitações na representação de situações reais (Mendonça, 2005). Dessa forma, embora fundamentais para o dimensionamento inicial de obras geotécnicas, tais formulações apresentam restrições quando aplicadas a problemas reais, especialmente em situações que envolvem comportamento não linear do solo, efeitos de drenagem e condições de contorno complexas.

Diante dessas limitações, os métodos computacionais passaram a desempenhar papel cada vez mais relevante na geotecnia. A evolução do conhecimento científico, associada ao avanço dos recursos computacionais, tem permitido o desenvolvimento de modelos mais sofisticados e capazes de representar fenômenos complexos com maior precisão, ampliando a capacidade de análise dos engenheiros (Mendonça, 2005). Por meio de métodos como o Método dos Elementos Finitos (MEF), é possível resolver equações de equilíbrio com maior nível de detalhamento, como ocorre em softwares especializados. A aplicação desses métodos tem sido amplamente reconhecida na literatura, pois possibilita simular fenômenos complexos, como plastificação, redistribuição de tensões, heterogeneidade, anisotropia e interação solo-estrutura, que dificilmente são capturados por modelos analíticos tradicionais (Neves, 1993).

Complementarmente às abordagens analíticas e numéricas, os modelos físicos em escala reduzida também têm sido empregados como ferramentas experimentais para investigar o comportamento de sistemas geotécnicos em laboratório. Esses modelos possibilitam a observação direta de diversos mecanismos da geotecnia, entretanto, sua aplicação apresenta limitações associadas à imposição de condições de gravidade normal (modelos 1g) e às dificuldades de atender aos critérios de similitude física. Nesse sentido, ressalta-se

que, para que as análises numéricas sejam confiáveis, é fundamental que seus resultados sejam comparados e validados com dados experimentais ou observações de campo (Neves, 1993).

Em vista disso, a integração entre modelos analíticos, computacionais e físicos se mostra essencial, uma vez que tais abordagens se complementam e são capazes de reduzir as limitações causadas pelo uso isolado de cada método, permitindo validar previsões teóricas com observações experimentais, além de aproveitar os avanços proporcionados pelas ferramentas computacionais.

Estudos anteriores realizados na Universidade Estadual de Londrina (UEL) investigaram casos relacionados a contenções, fundações rasas e percolação de água em maciços de barragens, evidenciando diferenças entre as metodologias e a necessidade de análises comparativas mais abrangentes.

Nesse contexto, este estudo busca comparar modelos analíticos, computacionais e físicos em escala reduzida aplicados à geotecnia, com o objetivo de discutir as contribuições e limitações de cada abordagem na representação do comportamento solo–estrutura e demonstrar como a utilização integrada desses métodos pode proporcionar uma compreensão mais abrangente dos fenômenos geotécnicos, contribuindo para o aprimoramento dos projetos. Além disso, contribui para a formação crítica dos estudantes ao evidenciar as limitações de cada método, sendo uma abordagem eficaz para o ensino e a pesquisa experimental.

2 METODOLOGIA

2.1 Descrição Geral dos Estudos Avaliados

O presente trabalho baseia-se na análise comparativa de três estudos desenvolvidos na Universidade Estadual de Londrina (UEL), cujos dados experimentais de modelos físicos reduzidos, analíticos e numéricos foram utilizados como referência. Os casos selecionados representam problemas clássicos da engenharia geotécnica e permitem avaliar diferentes mecanismos de interação solo–estrutura.

- Estudo 1: O primeiro estudo refere-se a análise e dimensionamento da ficha de uma cortina de estacas em balanço utilizando modelos analíticos e modelo físico em escala reduzida (Luz, 2025).
- Estudo 2: O segundo aborda o a avaliação do comportamento de fundações rasas assentadas sobre areia fofa, com ênfase na capacidade de carga e nos recalques obtidos por meio de modelos analíticos, físicos e numéricos (Santos, 2016).
- Estudo 3: O terceiro estudo investiga a percolação de água em maciços de solo, avaliando as vazões e cargas hidráulicas em qualquer ponto do maciço à partir de métodos analíticos, modelos reduzidos e simulações computacionais (Souza, 2014).

Esses casos foram selecionados por contemplarem diferentes estados de tensões e mecanismos de comportamento do solo, possibilitando a análise comparativa, a partir de dados consolidados na literatura produzida pela UEL.

2.2 Modelos Analíticos Utilizados

Para os três casos analisados, foram empregados modelos analíticos clássicos amplamente utilizados na geotecnia, conforme descrito nos estudos desenvolvidos na UEL.

- Estudo 1: No caso da cortina de estacas em balanço, a determinação dos empuxos foi realizada por meio do desenvolvimento de uma planilha do Excel, utilizando o método simplificado, que substitui o empuxo passivo na base da ficha por uma força equivalente, baseado no método convencional, que calcula o diagrama simplificado conforme as equações de Rankine, descrito por Gerscovich, Saramago e Danziger (2016) e no método de dimensionamento apresentado por Alonso em seu livro Exercícios de Fundações (3ª ed., 2019).
- Estudo 2: Para as fundações rasas em areia fofa, a capacidade de carga foi estimada a partir da formulação clássica de Terzaghi (1943) com a utilização das tabelas de Vésic (1975) para simplificação dos cálculos, enquanto os recalques foram avaliados com base no método proposto por Schmertmann (1978).

- Estudo 3: Já para o estudo de percolação em maciço de barragem, adotou-se a teoria do fluxo em meios porosos, fundamentada na Lei de Darcy (1856), a solução analítica para determinação da linha freática foi baseada em soluções gráficas dos estudos de Arthur Casagrande (1937).

De modo geral, os estudos assumem hipóteses simplificadoras, como solo homogêneo e isotrópico, comportamento elastoplástico (quando aplicável), condições bidimensionais, ausência de efeitos tridimensionais e distribuição idealizada de tensões.

Destaca-se que tais formulações, embora fundamentais para o dimensionamento preliminar, envolvem simplificações que podem não representar integralmente o comportamento real do solo, principalmente em situações que envolvem não linearidade, redistribuição de tensões e efeitos de escala.

2.3 Modelos Físicos em Escala Reduzida

Os modelos físicos analisados foram desenvolvidos no laboratório de Geotecnia da UEL (Luz, 2025; Santos, 2016; Souza, 2014), utilizando um tanque experimental com dimensões internas de 150x20x60 cm (Figura 1), para simular problemas de contenção, fundações e percolação. A instrumentação utilizada em conjunto com o tanque metálico incluiu, extensômetros, anel dinamométrico e piezômetros para medir deslocamentos, cargas e pressão neutra.



Figura 1. Tanque metálico

A Tabela 1 apresenta as características do solo empregado nos experimentos dos modelos reduzidos, incluindo os parâmetros físicos e mecânicos adotados nos Estudos 1, 2 e 3.

Estudo	Peso específico do solo - γ (kN/m³)	Ângulo de atrito - φ (°)	Coesão - C (kPa)	Classificação do solo quanto a granulometria	Permeabilidade - k (cm/s)
1	12,00	27,80	0,00	Areia fina a média	-
2	12,00	27,80	0,00	Areia fina a média	-
3	-	26,60	0,00	Areia média a fina	1,20E-02

Tabela 1. Características do solo empregado nos experimentos dos modelos reduzidos

Além disso, cada estudo contempla configurações específicas dos modelos físicos reduzidos, conforme descrito a seguir e ilustrado na Figura 2, com um exemplo representativo de cada estudo:

- Estudo 1: Foram elaborados dois modelos reduzidos denominados de Cortina 1 (Rígida) e Cortina 2 (flexível). Na análise dos resultados deste trabalho considerou-se somente a Cortina 2.
- Estudo 2: Três modelos físicos semelhantes foram elaborados em escala reduzida e ensaiados sob as mesmas condições, para comprovar se os modelos teóricos, apresentavam boa aproximação com valores reais obtidos através dos experimentos e do resultado oriundo de modelagem computacional.
- Estudo 3: Para está análise, três modelos distintos foram elaborados, denominados de Modelo 1 (Maciço de solo homogêneo), Modelo 2 (Maciço de solo homogêneo com dreno horizontal) e Modelo 3 (Maciço de solo homogêneo com dreno de pé de talude).



(a) Estudo 1 – Cortina 2 (flexível); (b) Estudo 2 – Modelos físicos semelhantes; (c) Estudo 3 – Modelo 3 (maciço homogêneo com dreno no pé do talude).

Figura 2. Modelos físicos reduzidos

2.4 Modelos Computacionais

As análises numéricas foram realizadas com o Software GeoStudio, utilizando os módulos SIGMA/W para análises tensão–deformação (Estudo 2), ilustrado pela Figura 3 e SEEP/W para simulações de rede de fluxo (Estudo 3), representado pela Figura 4.

Os parâmetros de entrada foram obtidos a partir da caracterização do solo utilizada nos modelos físicos (Tabela 1). Entre os principais parâmetros de entrada destacam-se peso específico, ângulo de atrito, coesão (quando aplicável) e coeficiente de permeabilidade.

Conforme descrito nos estudos de (Santos, 2016; Souza, 2014), as condições de contorno mecânicas e hidráulicas foram definidas de forma compatível com os ensaios experimentais, buscando garantir coerência entre os modelos físico e computacional. Dessa forma, os parâmetros empregados nas simulações foram mantidos consistentes com aqueles determinados nos ensaios laboratoriais.

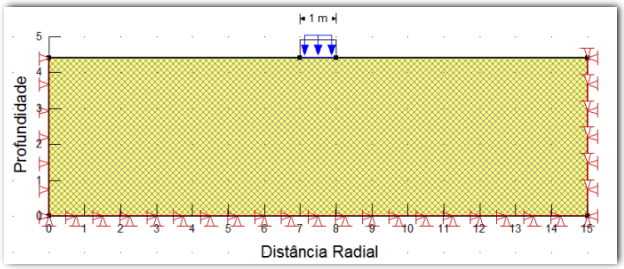


Figura 3. Análise tensão-deformação SIGMA/W (Estudo 2)

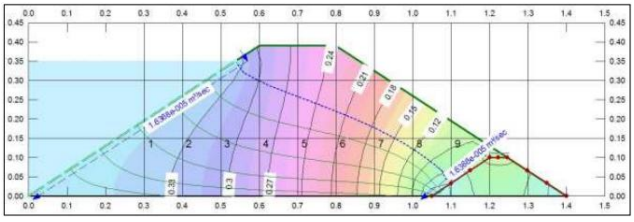


Figura 4. Simulações de rede de fluxo (Estudo 3)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação entre os modelos analíticos, físicos e computacionais foi realizada com base em grandezas representativas de cada problema: Comprimento da ficha (Estudo 1), recalques e capacidade de carga (Estudo 2), vazões, cargas hidráulicas e piezométricas (Estudo 3).

3.1 Cortina de Estaca em Balanço

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos por dois métodos: analítico e físico (modelo reduzido), para Cortina 2 (Flexível), bem como a diferença percentual entre os métodos.

Profundidade escavada (cm) [I]	Ficha modelo reduzido (cm) [II]	Ficha teoríca (cm) [III]	Ficha base (cm) [IV] = [III] -20%	Comprimento da estaca (cm) [V] = [I] + [IV]	Δ Ficha modelo reduzido e ficha base (%)
30,00	10,00	37,00	29,60	59,60	66,22

Tabela 2. Resultado Cortina 2 (Flexível)

A análise indicou uma diferença de 66,22% em relação à ficha observada no modelo físico reduzido e a ficha base, evidenciando caráter conservador dos métodos analíticos. Ressalta-se que o ensaio foi realizado em modelo físico reduzido do tipo 1g, desenvolvido com finalidade didática para a observação dos mecanismos de instabilidade. Embora esse tipo de modelo seja adequado para análises qualitativas do comportamento e dos modos de ruptura, a escala reduzida de tensões e a baixa tensão confinante podem limitar a representação fiel do campo geostático real.

A diferença observada entre os resultados experimentais e teóricos pode estar associada a efeitos de escala, simplificações adotadas nos métodos analíticos clássicos e condicionantes experimentais, como imperfeições de montagem, atrito lateral, interação do modelo com o material do tanque e à limitação do modelo físico quanto a similitude de tensões.

Assim, embora os métodos analíticos sejam fundamentais no dimensionamento inicial de cortinas de estacas, a validação experimental contribui para melhor compreensão do comportamento estrutural e para o ajuste das previsões teóricas.

Destaca-se ainda que, para simplificação da análise, foram desconsiderados efeitos de água subterrânea, adotando-se um solo homogêneo, sem coesão, sobrecargas ou nível d'água. Em condições reais, entretanto, a presença de água e as condições de drenagem podem alterar significativamente as pressões atuantes, influenciando diretamente a estabilidade da estrutura.

Os resultados indicam que, embora as tendências sejam coerentes entre os métodos, a magnitude das respostas depende fortemente das hipóteses e condições de modelagem adotadas.

3.2 Fundações rasas

A Tabela 3 exibe os resultados de capacidade de carga e recalques obtidos por formulações teóricas clássicas, ensaios com os modelo reduzidos e simulação numérica por elementos finitos.

Método de Cálculo	Cálculo Analítico	Modelo Computacional	1° Ensaio Modelo Físico	2° Ensaio Modelo Físico	3° Ensaio Modelo Físico	Desvio Padão	Coef. Variabilidade (%)
Tensão (kPa)	28,10	28,10	29,00	28,50	30,00	0,61	2,12
Recalque normal (mm/m)	30,00	25,00	26,00	25,00	22,00	1,92	7,50

Tabela 3. Resultados de capacidade de carga e recalques em fundações rasas

Os resultados indicaram boa concordância entre os métodos analíticos, computacionais e os modelos físicos, porem nota-se melhor desempenho do modelo numérico na representação do comportamento do solo. Para a tensão, os valores obtidos nos ensaios físicos apresentaram elevada proximidade com os valores previstos pelos métodos analítico e computacional, com baixo desvio padrão (0,61) e coeficiente de variabilidade de 2,12%, indicando pequena dispersão dos resultados.

Para o recalque, os valores experimentais também apresentaram boa aproximação com as previsões analíticas e computacionais, com desvio padrão de 1,92 e coeficiente de variabilidade de 7,50%.

Esses resultados demonstram que as formulações de Terzaghi (1943) com as proposições de Vésic (1975) para capacidade de carga e o método de Schmertmann (1978) para recalque apresentaram desempenho satisfatório. Além disso, o modelo numérico SIGMA/W (GeoStudio) mostrou boa capacidade de previsão de recalques. A análise visual dos ensaios indicou modo de ruptura por puncionamento, em concordância com os mecanismos teóricos propostos por Vésic (1975) para solos de baixa resistência.

Valores baixos de desvio padrão e coeficiente de variabilidade indicam baixa dispersão dos resultados em relação à média, demonstrando maior consistência e repetibilidade dos ensaios. Isso significa que os modelos físicos apresentaram comportamentos semelhantes, reduzindo a influência de erros experimentais ou

variações nas condições do ensaio. Dessa forma, a baixa variabilidade observada aumenta a confiabilidade dos resultados e reforça a boa concordância entre os modelos experimentais, analíticos e computacionais.

3.3 Percolação em Barragens

A Tabela 4 apresenta os resultados das cargas hidráulicas totais e piezométricas, bem como das vazões, obtidos pelos métodos experimental, computacional e teórico, além das diferenças percentuais observadas entre as metodologias. Ressalta-se que esses resultados poderiam ser avaliados em diversos pontos do maciço analisado, contudo, foram selecionados os pontos mais representativos de cada modelo, correspondentes àqueles que apresentaram maiores diferenças percentuais, a fim de permitir uma comparação mais clara e significativa entre os métodos.

Cargas totais (H), cargas piezométricas (P) e vazão (Q)												
Modelo	Ponto	Experimental		Computacional			Teórico			Diferença de Carga Máx (m)	Diferença de Carga Máx (%)	Diferença de Vazão (%)
		H (m)	P (m)	H (m)	P (m)	Q (cm³/s.m)	H (m)	P (m)	Q (cm³/s.m)			
1	8	0,150	0,000	0,176	0,026	0,088	0,150	0,000	0,096	0,026	15,00	8,33
2	3	0,283	0,133	0,258	0,108	0,347	0,350	0,200	0,330	0,092	26,00	4,90
3	8	0,150	0,000	0,130	-0,020*	0,164	0,150	0,000	0,162	0,020	13,00	1,22
*Nota-se que o ponto 8 do Modelo 3 fornece uma carga piezométrica negativa, isto ocorre, pois, este ponto está localizado acima da linha freática na análise computacional												

Tabela 4. Resultados das cargas hidráulicas totais, piezométricas e vazões

A comparação entre os métodos mostra boa concordância geral entre os resultados de carga hidráulica, piezométrica e vazão. As diferenças máximas de carga variaram entre 0,020 m e 0,092 m, correspondendo a discrepâncias de 13% a 26%, sendo a maior observada no Modelo 2 (ponto 3). Essas variações podem ser associadas principalmente às simplificações do método teórico, já que pequenas alterações no traçado da rede de fluxo podem influenciar diretamente os valores estimados.

Para as vazões, a concordância entre os métodos foi ainda mais significativa, com diferenças de 8,33%, 4,90% e 1,22% para os Modelos 1, 2 e 3, respectivamente, indicando que tanto a modelagem computacional quanto a solução teórica representam adequadamente o comportamento do sistema quando comparadas aos resultados experimentais obtidos no tanque de permeabilidade.

De modo geral, cada método apresenta vantagens e limitações. O método experimental exige maior esforço na execução dos ensaios, o método computacional é mais rápido e detalhado, porém requer domínio do software, enquanto o método teórico é o mais simples e adequado para estimativas preliminares, pois fornece resultados satisfatórios de ordem de grandeza.

4 CONCLUSÃO

De modo geral, as análises comparativas apresentaram resultados satisfatórios, com boa correspondência entre as previsões teóricas, os resultados experimentais e as simulações computacionais. Nos Estudos 2 e 3, as diferenças observadas foram relativamente pequenas, em geral inferiores a 26%, indicando coerência entre os métodos e confirmando a aplicabilidade das abordagens utilizadas.

Entretanto, verificou-se maior discrepância no caso do modelo de cortina de estacas, em que as diferenças chegaram a aproximadamente 66%. Essa variação está associada principalmente às limitações aos modelos físicos reduzidos executados em condições de gravidade normal (1g). Nessas condições, embora seja possível observar qualitativamente os mecanismos de deformação, ruptura e fluxo, torna-se difícil reproduzir o estado de tensões presente em campo, devido aos efeitos de escala e às restrições de similitude física. Além disso, simplificações geométricas e limitações construtivas durante a execução dos ensaios laboratoriais também podem ter influenciado os resultados obtidos.

Observa-se ainda que os modelos analíticos clássicos tendem a fornecer estimativas mais conservadoras, uma vez que se baseiam em hipóteses simplificadoras, como homogeneidade do solo e comportamento linear.

Apesar dessas limitações, tais métodos continuam sendo fundamentais para o dimensionamento preliminar e para a verificação inicial de projetos geotécnicos.

Nesse contexto, os modelos computacionais demonstraram grande utilidade por possibilitarem análises mais refinadas, considerando comportamentos não lineares e interações solo-estrutura de forma mais detalhada, desde que devidamente calibrados com parâmetros representativos e validados por resultados experimentais.

Por fim, conclui-se que a utilização conjunta dessas ferramentas permite validar hipóteses teóricas, compreender fenômenos geotécnicos de forma mais realista e desenvolver uma visão crítica sobre os resultados obtidos. Dessa forma, além de contribuir para análises e projetos mais confiáveis, essa abordagem integrada possui grande relevância no ensino, pois favorece a aprendizagem prática dos conceitos e o desenvolvimento do pensamento crítico dos estudantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela infraestrutura disponibilizada, bem como aos pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento do material utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, U. R. (2019) *Exercícios de fundações.* 3. ed. São Paulo: Blucher. E-book. Disponível em: https://plataforma.bvirtual.com.br. Acesso em: 27 jan. 2026.

Casagrande, A. (1937) *Seepage Through Dams*. 2 ed., v. 51, Cambridge: Journal of New England Water Works Association.

Gerscovich, D.; Saramago, R.; Danziger, B. R. (2016) *Contenções: teoria e aplicações em obras.* Oficina de Textos.

Luz, H. M. (2025) *Análise e dimensionamento da ficha de uma cortina de estacas utilizando modelos analíticos e modelo físico em escala reduzida.* Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 95 p.

Mendoça, H. M. X. (2005) *Sobre a modelagem de problemas da engenharia geotécnica pelo método dos elementos finitos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 174 p.

Neves, M. (1993) *Análise elastoplástica pelo método dos elementos finitos de estacas escavadas*. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 332 p.

Santos, R. P. (2016) *Avaliação do comportamento de fundações rasas em areia fofa: cálculo analítico, modelo físico reduzido e modelo computacional*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 71 p.

Schmertmann, J. H.; Hartman, J. P.; Brown, P. R. (1978) "Improved Strain Influence Factor Diagrams", *Journal of Geotechnical Engng*. Div., ASCE.

Souza, V. M. C. (2014) *Estudo da percolação de água em maciços de solo, uma análise comparativa entre modelos teóricos, experimentais e computacionais.* Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 93 p.

Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*, New York: John Wiley & Sons, 510 p.

Vesic, A. S. (1975) *Principles of pile foundation design. Soil Mechanics Series*, n. 38, School of Engineering, Duke University.