



Revisão Sistemática do Uso de Solos Transparentes em Ensaios Geotécnicos

Bruno Mariano Shimo da Silva

Graduando, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil,
bruno.2022@alunos.utfpr.edu.br

Mariah Carneiro Dal Poz

Graduanda, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, poz@alunos.utfpr.edu.br

Mariana Souza e Silva

Graduanda, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil,
marianases.arq@hotmail.com

Ewerton Clayton Alves da Fonseca

Professor do Magistério Superior, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil,
ewertonfonseca@utfpr.edu.br

Rodrigo Cesar Pierozan

Professor do Magistério Superior, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil,
rodrigopierozan@utfpr.edu.br

RESUMO: Este artigo apresenta uma revisão sistemática sobre o uso de solos transparentes em ensaios geotécnicos, a fim de analisar os avanços recentes, as principais técnicas e suas aplicações práticas. A revisão seguiu o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), de modo a garantir a transparência e a reproduzibilidade do processo. Foi consultada a base de dados *Science Direct*, a partir da palavra-chave "*transparent soil*". Após a aplicação de critérios de inclusão e exclusão, 29 estudos foram analisados em profundidade. Os resultados destacaram a evolução dos materiais para solos transparentes, como sílica e quartzo saturados com diferentes misturas, que permitem visualizar fenômenos complexos como o deslocamento de partículas e a interação solo-estrutura. A técnica tem sido aplicada em estudos de estabilidade de taludes, investigação de mecanismos de colapso e validação de modelos numéricos. Conclui-se que os solos transparentes são uma ferramenta relevante para compreender processos geomecânicos complexos, com potencial de avanço por meio do desenvolvimento de novos materiais e integração com técnicas de imagem de alta resolução.

PALAVRAS-CHAVE: Solos transparentes, ensaios geotécnicos, modelagem física, estabilidade de taludes, interação solo-estrutura, PRISMA.

ABSTRACT: This article presents a systematic review on the use of transparent soils in geotechnical testing, analyzing recent advances, key techniques, and practical applications. The review followed the PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) protocol, ensuring transparency and reproducibility. The *Science Direct* database was consulted using the keyword "*transparent soil*." After applying inclusion and exclusion criteria, 29 studies were analyzed in depth. The results highlight the evolution of transparent soil materials, such as silica and quartz saturated with different mixtures, enabling the visualization of complex phenomena, including particle displacement and soil-structure interaction. This technique has been applied in studies on slope stability, collapse mechanisms, and numerical model validation. It is concluded that transparent soils are a valuable tool for understanding complex geomechanical processes, with potential advancements through the development of new materials and integration with high-resolution imaging techniques.

KEYWORDS: Transparent soils, geotechnical testing, physical modeling, slope stability, soil-structure interaction, PRISMA.



1 INTRODUÇÃO

Os solos transparentes representam uma abordagem inovadora na modelagem física de fenômenos geotécnicos, de modo a permitir a simulação de comportamentos de solos no laboratório com visualização de deslocamentos, deformação de reforços e condições de fluxo sem a necessidade de instrumentação interna. A aplicação dessa técnica tem se mostrado promissora para a investigação de problemas geotécnicos complexos, o que inclui mecanismos de interação solo-reforço, estabilidade de taludes, fluxo em meios porosos e comportamento de fundações submetidas a carregamentos variados.

Os materiais utilizados para a obtenção de solos transparentes variam conforme a necessidade do estudo, como indicado na Figura 1. As areias transparentes são geralmente compostas por partículas sólidas de quartzo fundido e saturadas com misturas de óleos minerais que possuem índice de refração compatível com a fase sólida, o que resulta em um material translúcido. Estudos demonstraram que areias sintéticas podem reproduzir, com precisão, o comportamento geotécnico das areias naturais em diferentes contextos experimentais, como, por exemplo, ensaios de arrancamento de geogrelhas, investigações do comportamento tensão-recalque sob sapatas corridas e experimentos com solos não saturados (e.g. Chen *et al.*, 2019; Peng & Zornberg, 2019). Um exemplo de areia transparente produzida com quartzo fundido triturado e saturada com vaselina líquida é apresentado na Fig. 1a.

Por outro lado, a produção de argilas transparentes exige o uso de técnicas mais sofisticadas, dadas as características específicas desse tipo de solo, como sua plasticidade e comportamento dependente do tempo. Diversos materiais têm sido utilizados como substitutos de argilas naturais, como é o caso de agregados de sílica de fumo, pó de sílica amorfa e argilas sintéticas como a Laponite-RD® hidratada (e.g. Pierozan *et al.*, 2022; Almikati *et al.*, 2023), como apresentado na Fig. 1b.

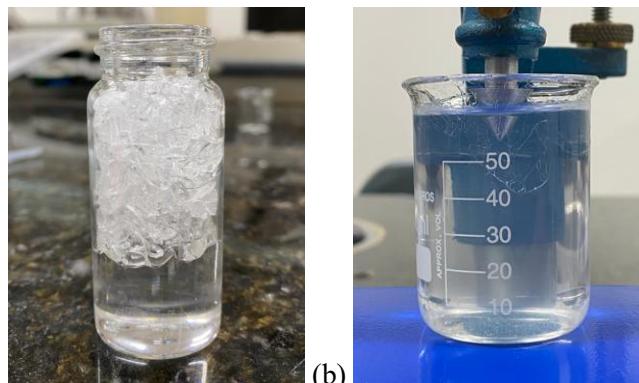


Figura 1. Exemplos de solos transparentes: (a) Areia transparente composta por quartzo fundido e saturada com vaselina; (b) Argila transparente obtida pela hidratação da Laponite-RD®.

Apesar dos avanços no desenvolvimento de solos transparentes e sua aplicação em geotecnia, ainda existem lacunas no entendimento dos critérios para a escolha do material ideal para diferentes contextos. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o estado da arte sobre o uso de solos transparentes em ensaios laboratoriais geotécnicos. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com base no protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), com o intuito de identificar tendências, desafios e oportunidades para o aprimoramento dessa técnica experimental. Os materiais e métodos adotados são apresentados na próxima seção, seguidos pela apresentação e discussão dos resultados obtidos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo consiste em uma revisão sistemática da literatura sobre o uso de solos transparentes em investigações geotécnicas laboratoriais. Para assegurar um procedimento metodológico estruturado, seguiu-se o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Page *et al.* 2021). O processo foi organizado em três etapas principais: definição do escopo e critérios de inclusão/exclusão, busca e seleção dos artigos e análise dos dados obtidos.



2.1 Definição do Escopo e Critérios de Inclusão e Exclusão

Foram incluídos estudos publicados em periódicos indexados no período de janeiro de 2018 a março de 2025. Apenas artigos classificados como “*research articles*” foram incluídos, de forma a evitar duplicidade com versões preliminares de trabalhos publicados em congressos e outros tipos de eventos. Foram excluídos artigos que não tratam especificamente da temática.

2.2 Procedimento de Busca e Seleção dos Artigos

A pesquisa bibliográfica foi conduzida na base de dados *ScienceDirect*, utilizando o termo-chave “*transparent soil*”. Para refinar os resultados, foi empregada a opção “*advanced search*”, com o objetivo de garantir que a palavra-chave estivesse presente nos campos “*title, abstract or author-specified keywords*”, além de restringir a busca ao período estabelecido.

2.3 Análise dos Dados e Síntese dos Resultados

Os artigos selecionados foram analisados e categorizados com base nas prioridades mencionadas acima (experimental, numérica ou revisão crítica), nos objetivos específicos de cada estudo, nos tipos de materiais e fluidos de saturação empregados, nas metodologias aplicadas, bem como nas limitações e principais considerações apresentadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A revisão sistemática identificou um total de 29 artigos que abordam o uso de solos transparentes em estudos geotécnicos, todos alinhados aos critérios de seleção estabelecidos neste trabalho e publicados no período de janeiro de 2018 a março de 2025, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Trabalhos selecionados por meio de revisão sistemática da literatura técnica.

Ano	Referências
2018	Guzman & Alfaro (2018), Hunter & Bowman (2018), Yuzhou <i>et al.</i> (2018)
2019	Chen <i>et al.</i> (2019), Lanting <i>et al.</i> (2019), Peng & Zornberg (2019), Zhang <i>et al.</i> (2019)
2020	Ads <i>et al.</i> (2020), Irfan <i>et al.</i> (2020), Yuan <i>et al.</i> (2020)
2021	Jones <i>et al.</i> (2021), Li <i>et al.</i> (2021)
2022	Ma <i>et al.</i> (2022), Wang <i>et al.</i> (2022), Zhang <i>et al.</i> (2022a, 2022b), Zhong <i>et al.</i> (2022), Zhou <i>et al.</i> (2022)
2023	Ads <i>et al.</i> (2023), Jiang <i>et al.</i> (2023), Jia <i>et al.</i> (2023), Marx <i>et al.</i> (2023)
2024	Ads <i>et al.</i> (2024), Luo <i>et al.</i> (2024), Wang <i>et al.</i> (2024), Zhang <i>et al.</i> (2024a, 2024b), Zhou <i>et al.</i> (2024)
No Prelo	Morales <i>et al.</i> (No Prelo)

3.1 Categorias e Objetivos dos Estudos

A análise revelou que a maioria dos estudos é de natureza experimental, com apenas dois trabalhos apresentando abordagens complementares: combinando métodos experimentais e numéricos (Li *et al.*, 2021) e articulando revisão crítica com experimentação (Zhang *et al.*, 2022a).

Ao examinar os objetivos, foi possível classificar os estudos em cinco categorias principais, as quais estão representadas na Figura 2. A primeira categoria diz respeito à visualização dos mecanismos de ruptura e falha em estruturas subterrâneas (Wang *et al.*, 2022), enquanto a segunda categoria reúne investigações sobre interação solo-estrutura e reforço geotécnico (Guzman & Alfaro, 2018; Ads *et al.*, 2020, 2024; Luo *et al.*, 2024).

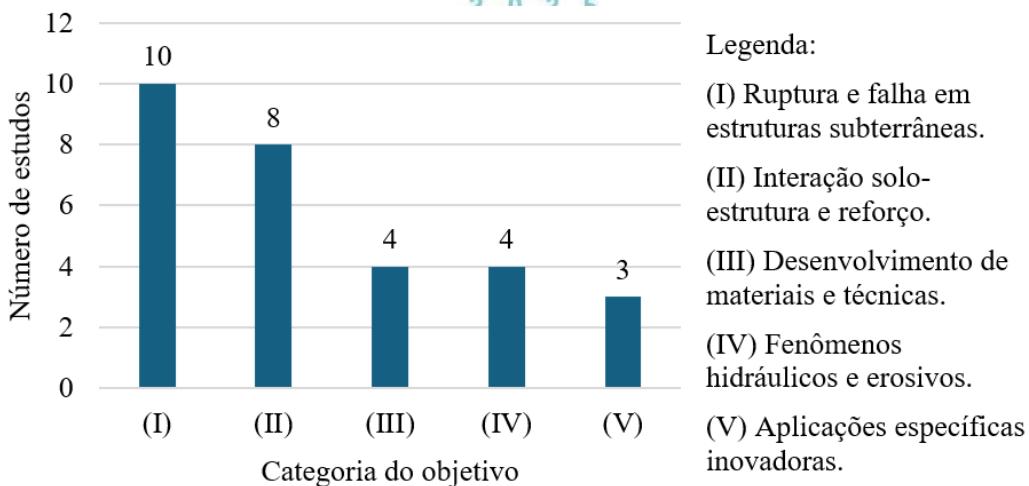


Figura 2. Distribuição dos estudos por categoria de objetivo.

A terceira categoria inclui estudos voltados a novos materiais e métodos experimentais (Lanting *et al.*, 2019; Zhong *et al.*, 2022; Marx *et al.*, 2023). A quarta categoria abrange os estudos que tratam de processos hidráulicos e erosivos (Hunter & Bowman, 2018; Jiang *et al.*, 2023). Por fim, a quinta categoria contempla aplicações específicas e inovadoras, como o uso de sondas moleculares em rizosferas (Jones *et al.*, 2021), o estudo de elementos bender (Irfan *et al.*, 2020) e a análise de interferência térmica entre estacas energéticas (Zhou *et al.*, 2024).

3.2 Materiais e Fluidos de Saturação

A modelagem física com uso de solos transparentes depende fundamentalmente da combinação entre materiais sólidos com propriedades ópticas específicas e fluidos de saturação que possibilitem a correspondência de índice de refração (*RI*, do inglês), com objetivo de assegurar a transparência do meio. Dentre os materiais sólidos, o quartzo fundido foi o mais recorrente nos estudos analisados, sendo empregado em diferentes faixas granulométricas para simular solos granulares, como pode ser observado nos trabalhos de Chen *et al.* (2019), Zhang *et al.* (2019), Wang *et al.* (2022), por exemplo.

A Laponite RD®, um filossilicato sintético de magnésio-lítio, foi frequentemente empregada na simulação de solos coesivos transparentes, como nas pesquisas de Ads *et al.* (2020, 2023, 2024) e Ma *et al.* (2022). Por sua natureza coloidal e estabilidade reológica, esse material permite reproduzir o comportamento de argilas naturais em escala laboratorial. Além disso, foram identificados o uso de materiais como vidro borossilicato (Hunter & Bowman, 2018), pós de sílica amorfa e sílica de fumo (Guzman & Alfaro, 2018), bem como materiais alternativos como Nafion® e aquabeads.

Para garantir a transparência do modelo, os fluidos de saturação devem possuir índice de refração compatível com o material sólido utilizado. A solução mais empregada foi a mistura de óleo mineral com n-dodecano, com destaque para sua versatilidade na equalização do índice de refração em estudos com quartzo fundido (e.g., Irfan *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022b; Luo *et al.*, 2024).

Outras misturas de óleos minerais, como Puretol 7, Paraflex HT4 e Norpar 12, foram frequentes, destacando-se pelo possível ajuste do *RI* em diferentes contextos experimentais. Soluções aquosas com adição de sais ou sacarose, utilizadas especialmente com materiais argilosos ou artificiais, também apareceram em estudos como os de Ma *et al.* (2022) e Zhang *et al.* (2022a). A água desionizada foi adotada em casos onde o índice de refração do sólido era naturalmente próximo ao da água, enquanto soluções especiais com corantes fluorescentes foram aplicadas em contextos específicos de rastreamento de fluxo, como no estudo de Jones *et al.* (2021).

A Figura 3 sintetiza os materiais sólidos e fluidos mais frequentes entre os estudos analisados, servindo como referência para trabalhos futuros.

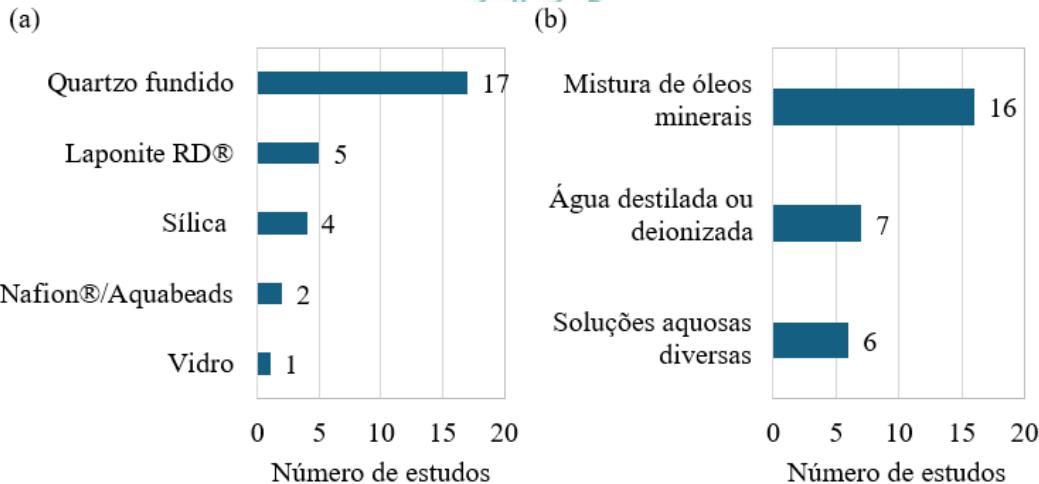


Figura 3. Frequência de uso dos: (a) Materiais sólidos; (b) Fluidos de saturação.

De maneira comparativa, observa-se que os solos granulares transparentes, produzidos majoritariamente a partir de quartzo fundido, apresentam como principais vantagens a elevada similaridade com areias naturais, a facilidade de preparo e a estabilidade óptica ao longo do tempo. Em contrapartida, seu elevado custo e a dificuldade de utilização em grandes volumes constituem limitações importantes, sobretudo para modelos físicos de maior escala. Já os solos coesivos transparentes, obtidos com Laponite-RD® ou sílicas sintéticas, permitem reproduzir propriedades reológicas de argilas, sendo indicados para o estudo de deformações dependentes do tempo. Entretanto, tais materiais apresentam desafios associados à manutenção da transparência em ensaios prolongados, além de diferenças significativas em relação ao comportamento de argilas naturais, especialmente no que se refere à heterogeneidade e anisotropia.

Portanto, a escolha entre materiais granulares e coesivos transparentes deve considerar não apenas a compatibilidade óptica, mas também o tipo de fenômeno geotécnico a ser investigado. Enquanto os primeiros são mais adequados para estudos de ruptura e interação com reforços, os segundos se mostram promissores em pesquisas que envolvem deformações lentas, fluxo em meios coesivos e processos de consolidação.

3.3 Métodos de Investigação

Os métodos de investigação empregados nos estudos que utilizam solos transparentes são caracterizados por uma combinação de modelagem física em laboratório com técnicas de captura e análise de imagens. Essa abordagem permite a observação de fenômenos geotécnicos internos, como deformação de reforços, deslocamentos internos do solo, ruptura e fluxo de água e contaminantes, os quais possuem visualização limitada em solos convencionais.

A modelagem física em escala reduzida foi utilizada para simular diferentes situações geotécnicas, como escavações de túneis (Ma *et al.*, 2022; Luo *et al.*, 2024), fundações (Chen *et al.*, 2019; Morales *et al.*, 2024), taludes (Zhang *et al.*, 2024a; Zhou *et al.*, 2022), aterros sobre solos moles (Guzman & Alfaro, 2018) e interação solo-reforço (Ads *et al.*, 2020, 2024). Esses modelos permitiram a aplicação de carregamentos controlados e a observação dos mecanismos de resposta do solo.

Entre os métodos de medição mais empregados, destacam-se a *Particle Image Velocimetry* (PIV) e *Digital Image Correlation* (DIC). A técnica de PIV, que consiste na análise de imagens consecutivas para rastrear o movimento de partículas no solo, foi utilizada em diversos estudos para quantificar deslocamentos e deformações de reforços (Yuzhou *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2024). Já a DIC foi aplicada para capturar os campos de deslocamento em testes de penetração, escavação e arrancamento (Ads *et al.*, 2020, 2023; Zhang *et al.*, 2022b).

Outras técnicas específicas incluíram a fluorescência induzida por laser, empregada por Hunter



2 0 2 5

& Bowman (2018) para visualizar a migração de partículas finas em planos 2D sob fluxo ascendente, e a microscopia confocal. Além das técnicas ópticas, alguns estudos integraram dispositivos embutidos e sensores para avaliação de erosão interna (Hunter & Bowman, 2018; Yuan *et al.*, 2020).

A validação e complementação dos resultados experimentais por meio de simulações numéricas, como autores que empregaram softwares de elementos discretos (Yuzhou *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2021), ou de elementos finitos, como o ABAQUS (Wang *et al.*, 2022), para analisar campos de tensão, efeitos de arqueamento do solo e comportamento de fundações.

Alguns estudos utilizaram ensaios clássicos da engenharia geotécnica adaptados ao uso de solos transparentes. Isso inclui ensaios triaxiais (Lanting *et al.*, 2019; Marx *et al.*, 2023), cisalhamento direto (Zhong *et al.*, 2022) e permeâmetros (Hunter & Bowman, 2018), que, ao serem combinados com visualização óptica, ofereceram informações mais completas sobre a resposta do solo.

3.4 Limitações e Considerações dos Autores

Um dos aspectos mais recorrentes diz respeito à escala reduzida dos modelos físicos, o que em geral limita a representatividade dos comportamentos observados. Estudos como os de Guzman & Alfaro (2018), Peng & Zornberg (2019), Zhang *et al.* (2019), Ads *et al.* (2020, 2024) e Jia *et al.* (2023) alertam que a construção de modelos reduzidos pode comprometer a simulação de tensões atuantes no campo, dos efeitos gravitacionais e a fidelidade da interação solo-estrutura.

Outro fator crítico diz respeito à fidelidade dos materiais utilizados como solo transparente. Pesquisas como as de Lanting *et al.* (2019), Yuzhou *et al.* (2018), Zhang *et al.* (2022a) e Yuan *et al.* (2020) destacam que, embora certos materiais permitam visualização interna dos deslocamentos, eles por vezes não replicam com precisão a anisotropia e a heterogeneidade de certas categorias de solos naturais. Além disso, há desafios associados à manutenção da transparência quando do emprego de grandes volumes ou em profundidades significativas, como relatado por Hunter & Bowman (2018), Irfan *et al.* (2020) e Ma *et al.* (2022).

Apesar dessas limitações, considera-se que a técnica é eficaz em permitir a visualização de deslocamentos internos, identificação de mecanismos de falha, e validação de modelos numéricos (Yuzhou *et al.*, 2018; Ads *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022b; Luo *et al.*, 2024). Métodos de análise como PIV, PLIF e segmentação digital de imagens mostraram-se fundamentais para a medição não intrusiva de deformações de elementos de reforço e deslocamentos internos do solo.

A literatura indica que ainda não há um material transparente capaz de reproduzir, simultaneamente, todas as propriedades relevantes dos solos naturais. Assim, cada escolha implica em compromissos entre fidelidade mecânica, custo, escalabilidade e facilidade de manipulação, o que reforça a necessidade de pesquisas orientadas a contextos de aplicação específicos.

4 CONCLUSÕES

A modelagem física com solos transparentes tem se mostrado uma técnica inovadora e eficaz na geotecnia experimental, uma vez que permite a visualização direta de mecanismos internos do solo. A seguir, são destacadas as principais conclusões da presente revisão sistemática:

- a técnica permite a visualização e medição da deformação de elementos de reforço, zonas de cisalhamento, deslocamentos internos e interação solo-estrutura com precisão;
- a escolha adequada dos fluidos de saturação (como óleos minerais e soluções salinas) tem sido essencial para garantir a correspondência do índice de refração e manter a transparência;
- técnicas como PIV e PLIF têm sido amplamente aplicadas para quantificar deslocamentos e mapear gradientes de concentração.

Além de reunir os avanços recentes sobre o tema, este trabalho se diferencia de revisões anteriores por sistematizar de forma comparativa os diferentes materiais empregados como solos



transparentes, discutindo suas vantagens, limitações e contextos de aplicação. Tal análise crítica evidencia que não existe um único material ideal, mas sim alternativas mais apropriadas conforme o fenômeno investigado. Dessa forma, o presente estudo contribui para orientar a seleção de materiais em futuros trabalhos experimentais, além de indicar lacunas a serem exploradas, como o desenvolvimento de misturas híbridas que conciliem maior fidelidade mecânica com transparência estável em larga escala.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO) pelo suporte institucional e recursos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ads, A., Iskander, M., Bless, S., Omidvar, M. (2020) Visualizing the effect of fin length on torpedo anchor penetration and pullout using a transparent soil. *Ocean Engineering*, 216 (1), p.108021.
- Ads, A., Islam, M. S., Iskander, M. (2023) Longitudinal settlements during tunneling in soft clay, using transparent soil models. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 136 (1), p.105042.
- Ads, A., Iskander, M., Bless, S., Omidvar, M. (2024) Effect of fin width on torpedo anchor penetration and pullout using model tests with transparent soils. *Ocean Engineering*, 298 (1), p.117247.
- Almikati, A., Pierozan, R. C., Salah, S., Zornberg, J. G. (2023) Geotechnical characterization of Laponite as transparent clay surrogate. *Geotechnical Testing Journal*, 46 (3), p.535–558.
- Chen, J. -F., Guo, X. -P., Xue, J. -F., Guo, P. -H. (2019) Load behaviour of model strip footings on reinforced transparent soils. *Geosynthetics International*, 26 (3), p.251–260.
- Guzman, E. M. B. de, Alfaro, M. C. (2018) Laboratory-scale model studies on corduroy-reinforced road embankments on peat foundations using transparent soil. *Transportation Geotechnics*, 16 (1), p.1–10.
- Hunter, R. P., Bowman, E. T. (2018) Visualisation of seepage-induced suffusion and suffosion within internally erodible granular media. *Geotechnique*, 68 (10), p.918–93.
- Irfan, M., Cascante, G., Basu, D., Khan, Z. (2020) Novel evaluation of bender element transmitter response in transparent soil. *Geotechnique*, 70 (3), p.187–198.
- Jia, Z., Bai, Y., Liu, C., Zhang, D., Ji, Y., Zhao, H. (2023) Visualization investigation on stability of shield tunnel face with transparent soil, considering different longitudinal inclination angles. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 137 (1), p.105154.
- Jiang, L. -J., Zhang, B., Huang, S. -H., Shao, Y. (2023) Analysis of fluidized zone in transparent soil under jet induced by pipe leakage. *Water Science and Engineering*, 16 (2), p.203–210.
- Jones, C. Y., Engelhardt, I., Patko, D., Dupuy, L., Holden, N., Willats, W. G. T. (2021) High-resolution 3D mapping of rhizosphere glycan patterning using molecular probes in a transparent soil system. *The Cell Surface*, 7 (1), p.100059.
- Lanting, W., Qiang, X., Shanyong, W., Cuilin, W., Jianfeng, C. (2019) Development of transparent cemented soil for geotechnical laboratory modelling. *Engineering Geology*, 262 (1), p.105354.
- Li, C., Wang, Z., Ding, X. -M. (2021) Anti-sliding mechanism of soil-rock slope in transparent soil and discrete-element method. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 21 (4), p.186–195.
- Luo, G., Wang, Z., Kong, G., Tang, L., Li, Y., Yang, Q. (2024) Model tests on chain-soil interaction of anchor pile for taut mooring system through transparent sand. *Ocean Engineering*, 309 (1), p.118419.
- Ma, S., Duan, Z., Huang, Z., Liu, Y., Shao, Y. (2022) Study on the stability of shield tunnel face in clay and clay-gravel stratum through large-scale physical model tests with transparent soil. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 119 (1), p.104199.



2 0 2 5

- Marx, D. H., Kumar, K., Zornberg, J. G. (2023) Quantification of geogrid lateral restraint using transparent sand and deep learning-based image segmentation. *Geotextiles and Geomembranes*, 51 (5), p.53-69.
- Morales, F. P., Siemens, G. A., Pinyol, N. M. (No Prelo) Footprints on the beach: visualising dilation-induced air entry. *Géotechnique*, p.1-11.
- Page, M. J.; McKenzie, J. E.; Bossuyt, P. M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.; Mulrow, C. D.; Shamseer, L.; Tetzlaff, J. M.; Aki, E.; Brennan, S. E.; Chou, R.; Glanville, J.; Grimshaw, J. M.; Hróbjartsson, A.; Lalu, M. M.; Li, T.; Loder, E. W.; Mayo-Wilson, E.; McDonald, S.; McGuinness, L. A.; Stewart, L. A.; Thomas, J.; Tricco, A. C.; Welch, V. A.; Whitting, P.; Moher, D. (2021) The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372 (1), p.71.
- Peng, X.; Zornberg, J. G. (2019) Evaluation of soil-geogrid interaction using transparent soil with laser illumination. *Geosynthetics International*, 26 (2), p.206-221.
- Pierozan, R. C., Almikati, A., Araujo, G. L. S., Zornberg, J. G. (2022) Optical and physical properties of laponite for use as clay surrogate in geotechnical models. *Geotechnical Testing Journal*, 45 (1), p.79–100.
- Wang, M., Li, S., Zhou, H., Peng, K., Yuan, C. (2024) Visualization investigation of the large deformation and instability failure of shield tunnel using transparent soil models. *Engineering Failure Analysis*, 166 (1), p.108861.
- Wang, Z., Luo, G., Kong, G., Zhang, Y., Lu, J., Chen, Y., Yang, Q. (2022) Centrifuge model tests on anchor pile of single point mooring system under oblique pullout load using transparent sand. *Ocean Engineering*, 264 (1), p.112441.
- Yuan, B., Sun, M., Xiong, L., Luo, Q., Pradhan, S. P., Li, H. (2020) Investigation of 3D deformation of transparent soil around a laterally loaded pile based on a hydraulic gradient model test. *Journal of Building Engineering*, 28 (1), p.101024.
- Yuzhou, X., Hanlong, L., Wengang, Z., Jian, C., Dong, Z., Yang, X. (2018) Application of transparent soil model test and DEM simulation in study of tunnel failure mechanism. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 74 (1), p.178–184.
- Zhang, M., Xu, P., Li, J., Wang, R. (2019) Mining-induced ground movements and displacements using transparent soil model test. *Geotechnical Research*, 6 (4), p.252-264.
- Zhang, W., Gu, X., Zhong, W., Ma, Z., Ding, X. (2022a) Review of transparent soil model testing technique for underground construction: ground visualization and result digitalization. *Underground Space*, 7 (4), p.702–723.
- Zhang, W., Zhong, H., Xiang, Y., Wu, D., Zeng, Z., Zhang, Y. (2022b) Visualization and digitization of model tunnel deformation via transparent soil testing technique. *Underground Space*, 7 (4), p.564–576.
- Zhang, W., He, X., Xu, Q., Wang, L., Zhu, X., Wang, P., Sun, W. (2024a) Investigation on internal evolution process of slope under seismic loading: insights from a transparent soil test and shaking table test. *Transportation Geotechnics*, 49 (1), p.101399.
- Zhang, L., Liu, H., Ding, X., Chen, R., Zhou, H., Li, Y., Ren, X. (2024b) Development of transparent soil grouting test system and its application in grouted gravel pile. *Measurement*, 234 (1), p.114899.
- Zhong, W., Liu, H., Gu, D., Zhang, W., Yang, C., Gao, X. (2022) Development of a preparation method of transparent soil-rock mixture for geotechnical laboratory modeling. *Engineering Geology*, 301 (1), p.106622.
- Zhou, C., Ma, W., Sui, W. (2022) Transparent soil model test of a landslide with umbrella-shaped anchors and different slope angles in response to rapid drawdown. *Engineering Geology*, 307 (1), p.106765.
- Zhou, Y., Wang, J., Li, C., Kong, G., Li, R. (2024) Thermal interference process between two energy piles in 2D model using transparent soil. *Energy*, 308 (1), p.132442.