

Aplicação de borracha de silicone líquida como elemento de vedação em ensaios de permeabilidade de solos argilosos utilizando permeâmetro

Patricia Casarotto de Oliveira

Professora, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, patriciac@utfpr.edu.br

Marcos Vinícius Schlichting

Técnico de Laboratório, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, mviniucius@utfpr.edu.br

Wilson Leobet

Técnico de Laboratório, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, wleobet@utfpr.edu.br

Débora de Oliveira Fernandes

Geóloga, Fundação Parque Tecnológico Itaipu, Foz do Iguaçu, Brasil, deboraof@pti.org.br

Marcos Antonio Costantin Filho

Engenheiro Especialista em Segurança de Barragens, Norte Energia S.A, Altamira, Brasil, marcosfilho@norteenergiasa.com.br

RESUMO: Para a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável com uso de permeâmetro, a normativa brasileira recomenda revestir a superfície lateral do corpo de prova com uma camada fina de parafina e depois preencher o restante do volume do permeâmetro com camadas de argila plástica (bentonítica). A colocação da argila é um processo delicado, desenvolvido em camadas e compactado cuidadosamente para evitar o aparecimento de fluxo lateral através da parede do permeâmetro. Em solos de baixa coesão, amostras indeformadas ou de estrutura frágil, esse processo é ainda mais complexo e a perturbação da amostra durante a compactação da argila compromete o resultado do ensaio. Ainda há a possibilidade da perda da amostra e retrabalho quando a vedação não é eficiente. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi testar uma borracha de silicone como material de vedação alternativo. Os resultados mostraram que a vedação com borracha de silicone foi eficiente e de fácil aplicação, preencheu todo o espaço entre o permeâmetro e o corpo de prova, corrigindo as imperfeições geométricas presentes. As atividades e resultados contemplados no artigo são parte dos estudos desenvolvidos no Programa de P&D Aneel (PD-07427-0322/2022) financiado pela Norte Energia S.A.

PALAVRAS-CHAVE: Permeabilidade, Permeâmetro, Solo Argiloso, Fluxo de Parede Lateral, Borracha Líquida de Silicone.

ABSTRACT: To determine the permeability coefficient of clays in a permeameter, Brazilian Standards recommend covering the lateral surface of the sample with a thin paraffin layer and then filling the remaining volume of permeameter with layers of plastic clay. Placing clay is a delicate process, executed in layers and carefully compacted to prevent side-wall leakage. This procedure becomes more complicated when dealing with low cohesion soils, undisturbed soil samples and soils with a fragile structure. The disturbance of the sample during clay compaction compromise the test result. Additionally, there is a risk of sample loss and the need for rework if seal is not efficient. In this context, the objective of the article was to investigate silicone rubber as an alternative replacement material. The results indicated that the silicone rubber seal was efficient and easy to apply, filling the entire space between the permeameter and the sample, thus correcting geometric imperfections. The activities and results outlined in the article are part of the research conducted within the Research and Development Program funded by Norte Energia S.A. (PD-07427-0322/2022) under the Aneel (Brazilian Electricity Regulatory Agency).

KEYWORDS: Permeability, Permeameter, Clay Soils, Side-Wall Leakage, Liquid Silicone Rubber.

1. INTRODUÇÃO

A NBR 14545 preconiza dois métodos de ensaio para a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. O método “A” utiliza uma câmara triaxial, com controle de tensões efetivas. Já o método “B” é conduzido como uma alternativa, quando não se dispõe dos equipamentos requeridos no método “A”, e faz uso de permeômetros. No método “A”, o corpo-de-prova deve ter diâmetro e altura mínima de 3,5 cm, enquanto no método “B”, o diâmetro e a altura devem ser da ordem de 10 cm. Especificamente no método “B”, a superfície lateral do corpo de prova é revestida com uma camada fina de parafina e envolta por uma camada de argila plástica (bentonítica), responsável pela vedação entre a amostra e a parede do permeômetro. A colocação da argila é um processo delicado, desenvolvido em camadas da ordem de 20 mm de altura, compactada cuidadosamente para evitar o aparecimento de caminhos preferenciais entre as paredes do cilindro e o corpo de prova (ABNT, 2021). Em solos de baixa coesão, amostras indeformadas ou de estrutura frágil, esse processo é ainda mais complexo. Destaca-se que durante o processo de montagem, devido à necessidade de compactação da argila plástica, podem ocorrer perturbações na amostra, bem como há a possibilidade de perda da amostra e retrabalho quando a vedação não é eficiente. Ainda, em caso de perturbação da amostra durante a compactação da argila de vedação, o resultado do ensaio fica comprometido.

A existência de caminhos de fluxos preferenciais na interface solo-parede de equipamentos de campo e laboratório é uma preocupação constante nos estudos de percolação de água em solos. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi testar a aplicabilidade de uma borracha de silicone como material de vedação alternativo em ensaios de permeabilidade. O trabalho justifica-se ao investigar novos materiais para melhorar o tempo de preparo de ensaio e com menor perturbação na amostra, especialmente para corpo de prova indeformado ou de estrutura frágil.

Esse artigo é parte integrante do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado “Modelo de previsibilidade de evolução de canalículos e desenvolvimento de metodologia e software para mitigação dos impactos nas fundações de barragens”, sendo identificado pelo código PD-07427-0322/2022, financiado pela Norte Energia S.A. por meio do Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

2. TÉCNICAS DE VEDAÇÃO EM ENSAIOS DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS

O coeficiente de permeabilidade de um solo “ k ” é uma unidade de velocidade (cm/s) que expressa à facilidade de passagem do fluxo de água pelo meio poroso. Os métodos de cálculo são norteados pela Lei de Darcy, em regime de escoamento laminar. Quando analisado em laboratório, os ensaios podem ser realizados em corpo de prova moldado (compactação do solo deformado) ou talhado (amostra indeformada com preservação da estrutura original do solo). Em solos argilosos, com coeficientes de permeabilidade menores que 10^{-5} cm/s, os ensaios de permeabilidade são conduzidos à carga hidráulica variável (ABNT, 2021).

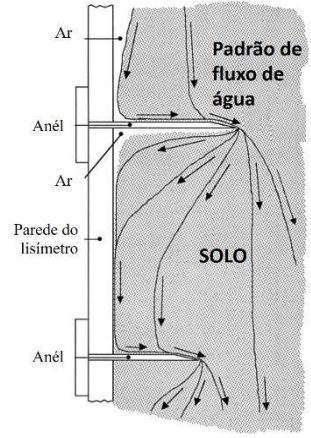
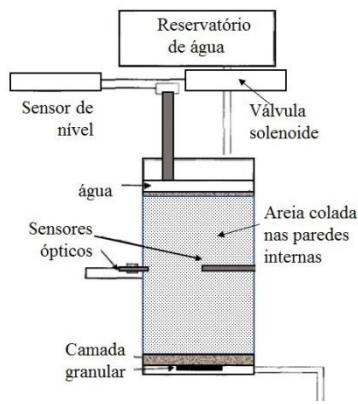

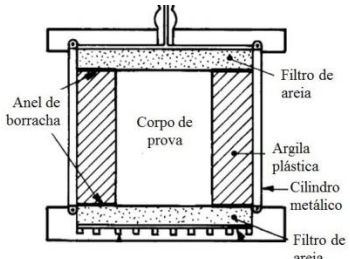


Especialmente em amostras indeformadas e em equipamento de parede rígida, um problema difícil de contornar é o fluxo de água preferencial entre o solo e a parede do equipamento, referido no meio científico como fluxo de parede lateral. Destaca-se que algumas técnicas e materiais têm sido avaliadas para eliminação deste efeito, como é o caso do uso de dispositivos físicos para redirecionamento do fluxo de água para dentro do solo, o aumento da rugosidade da parede interna do tubo porta amostra, o uso de argila plástica e o uso de espuma expansiva de poliuretano. Essas informações são apresentadas de forma esquemática no Quadro 1.

Com relação ao uso de espuma de poliuretano, os autores não encontraram informações na bibliografia sobre os efeitos da ação expansiva na estrutura do solo para ensaios de permeabilidade. No entanto, o poliuretano tem sido utilizado também como remediação de fundação em solos expansíveis, reforçando seu potencial como preenchimento de discontinuidades. Nesses casos, os pesquisadores observaram que ao injetar a espuma no solo, além dela se propagar através das fissuras existentes, constatou-se a formação de novas fraturas na interface solo/espuma, a uma profundidade de cerca de 3 mm. Em geral, quanto mais largas forem as fissuras, maior será a capacidade de propagação da espuma, podendo preencher fissuras de até 0,5 mm (Buzzi et al. 2008; Sabri, Vatin, and Alsaffar 2021).

Outra técnica empregada é o uso da parafina, bastante comum nas etapas de campo e laboratório durante o preparo de amostras indeformadas. No entanto, a parafina é um derivado do petróleo e a sua exposição pode

acarretar em consequências toxicológicas que são subnotificadas e com consequências pouco difundidas. Silveira et al. (2015) apresentam os principais aspectos toxicológicos da exposição ocupacional à parafina, as principais manifestações clínicas (efeitos nos sistemas nervoso, digestivo, respiratório e tegumentar), bem como recomendações de primeiros socorros em caso de exposição a este produto químico. Os autores destacam a necessidade de elaboração de campanhas preventivas para minimizar a exposição dos trabalhadores a esse produto.

Quadro 1. Exemplos de soluções para controle do efeito de fluxo de parede lateral em ensaios de colunas.

<p style="text-align: center;">Lisímetro</p> <p>-Equipamento: Lisímetros - estudo das relações entre água, solo e plantas. -Solução: Inserção de anéis no interior do equipamento para redirecionar o fluxo de água para o interior do solo. -Desenho esquemático</p>  <p>Fonte: (Corwin 2000)</p>	<p style="text-align: center;">Permeâmetro</p> <p>-Ensaio de coluna de solo para análise do coeficiente de permeabilidade, monitorado com sensor de fibra óptica. -Solução: colocação de fita adesiva e areia na parede do tubo porta amostra. -Desenho esquemático</p>  <p>Fonte: (Sentenac, Lynch, and Bolton 2021)</p>	<p style="text-align: center;">Permeâmetro</p> <p>-Permeâmetro para determinação do fluxo de contaminantes no solo. -Espaço entre a pedra porosa e a parede do cilindro foi preenchido com cola 3M para evitar o possível fluxo preferencial pela parede e garantir que o contaminante só passasse pela pedra porosa. -Registro fotográfico</p>  <p>Fonte: (Farias 2003)</p>
<p style="text-align: center;">Permeâmetro</p> <p>-Ensaio de permeabilidade a carga variável, normativa brasileira. -Recomenda aplicação de camada de parafina na face lateral do corpo de prova e preenchimento do espaço entre o cilindro e a amostra com argila plástica. -Desenho esquemático</p>  <p>Fonte: (ABNT, 2021)</p>	<p style="text-align: center;">Permeâmetro</p> <p>-Transporte de solutos em colunas de solo -Solução: preenchimento do espaço entre a amostra de solo e a parede interna do tubo de PVC com espuma de poliuretano expansiva. -Registro fotográfico</p>  <p>Fonte: (Silva et al. 2015)</p>	<p style="text-align: center;">Permeâmetro</p> <p>-Ensaio de coluna de solo para análise do coeficiente de permeabilidade. -Solução: colocação de membrana termo retrátil. -Registro fotográfico</p>  <p>Fonte: (Velásquez, Osterreicher-Cunha, and Vagar-Jr 2018)</p>

Fonte: Organizado pelos autores (2024).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O solo residual maduro de basalto utilizado neste trabalho foi coletado em bloco prismático a partir de um talude exposto em uma área de empréstimo na região de Toledo-PR. A caracterização físico-química do solo não será apresentada, pois o enfoque do artigo é a técnica de eliminação do fluxo de parede lateral em ensaio de permeabilidade de parede rígida com o uso de borracha líquida de silicone.

Duas amostras indeformadas de solo foram talhadas para ensaios de permeabilidade com dimensões próximas, diâmetro de 95 mm e altura de 130 mm. O primeiro corpo de prova (CP1) foi preparado conforme procedimentos da NBR 14545: Solo - Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos à Carga Variável (ABNT, 2021). Nesse caso, a lateral da amostra de solo foi revestida com uma camada fina de parafina líquida. Após secagem da parafina, o corpo de prova foi posicionado no interior do cilindro e envolto com camadas de argila plástica. Este procedimento foi repetido, pois apresentou caminho preferencial de água na primeira montagem, observado durante a fase de saturação do solo. Na segunda tentativa, optou-se por utilizar a argila plástica em uma consistência mais mole, a ponto de possibilitar sua aplicação com uma embalagem de silicone (bisnaga reutilizada e aplicador), em camadas de aproximadamente 20 mm, compactada com auxílio de bastão. Na ponta da bisnaga foi inserida uma mangueira para auxiliar a disposição das primeiras camadas (Figura 1).

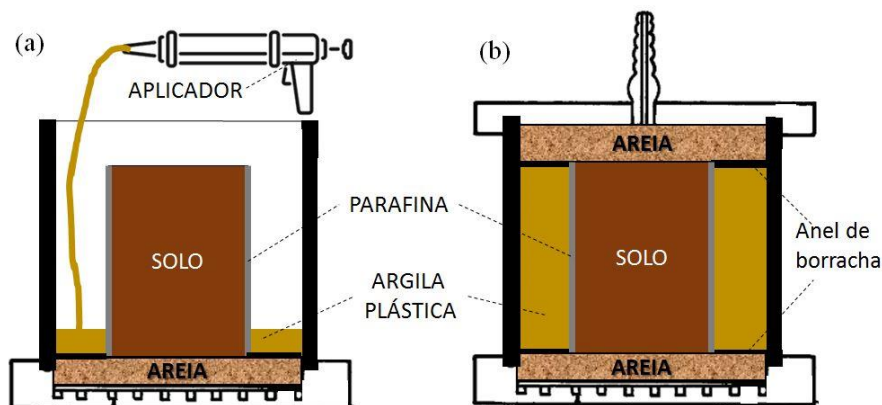


Figura 1. Esquema de preenchimento de espaço entre solo e cilindro com argila plástica. (a) Uso de aplicador, mangueira e embalagem de silicone. (b) Montagem de permeâmetro concluída.

O segundo corpo de prova (CP2) foi preparado sem a película de parafina. Foi utilizada borracha líquida de silicone para moldes, referência 6014. A quantidade de catalisador foi de 3%, conforme instrução do fabricante, com tempo de trabalho de 25 a 35 minutos e cura total de 24 horas. Após a talhagem do corpo de prova, a amostra foi posicionada no interior do cilindro, sobre disco de madeira que viabilizou a reserva de espaço da camada de areia (Figura 2.a). O ensaio foi realizado conforme metodologia para carga variável, mas optou-se por inserir manômetros na lateral do corpo de prova, como um teste adicional de análise de possíveis caminhos preferenciais de água (Figura 2.b). Como o tempo de cura da borracha líquida é relativamente curto, adaptou-se um misturador como uma broca de furadeira (Figura 2.c). A mistura borracha+catalisador foi preparada na própria embalagem do fabricante, mantida em vácuo por aproximadamente 2 minutos, até não se observar visualmente bolhas de ar (Figura 2.d). O topo da amostra foi protegido e a borracha líquida disposta lentamente em movimentos circundantes ao corpo de prova (Figura 2.e). A consistência do produto permitiu seu auto-adensamento, preenchendo todo o espaço entre o solo e o cilindro do permeâmetro e com mínima perturbação na amostra, pois não necessitou compactação ou vibração.

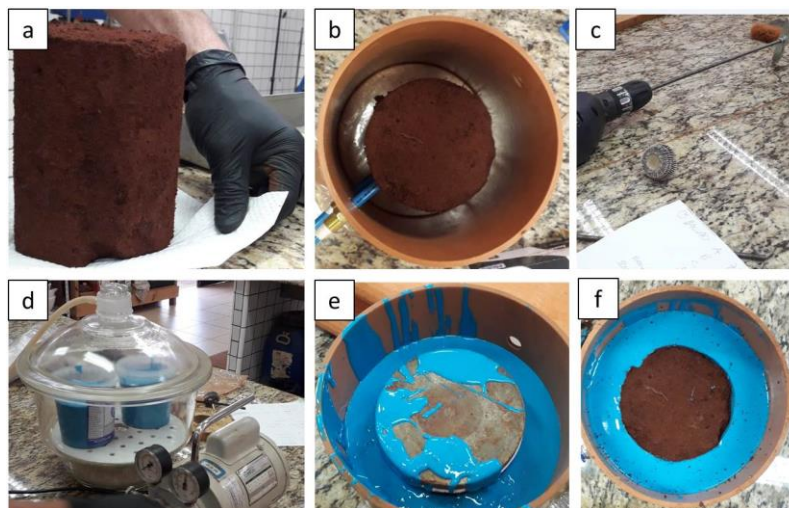


Figura 2. Etapas de montagem de corpo de prova com borracha de silicone. (a) Corpo de prova após talhagem. (b) Posicionamento de mangueiras laterais (manômetros). (c) misturador adaptado em furadeira. (d) Remoção de bolhas em vácuo. (e) Disposição da borracha líquida. (f) Aspecto final do topo da amostra após tempo de secagem.

A saturação das amostras e os procedimentos de ensaio foram realizados de acordo com as recomendações da NBR 14545 (ABNT, 2021). O cálculo do coeficiente de permeabilidade foi obtido pela Equação 1. Foram realizadas determinações de k_{20} para um gradiente hidráulico próximo de 2 e carga hidráulica máxima de 0,5 m, para cada amostra.

$$k_{20} = \frac{a \cdot H}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \cdot R_T \quad (1)$$

Sendo,

k_{20} : coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20° C (m/s);

Δt : diferença entre os instantes t_2 e t_1 (s);

h_2 e h_1 : carga hidráulica nos instantes t_2 e t_1 (m);

H: altura inicial do corpo-de-prova (m);

a: área interna da bureta de vidro (m²);

A: área inicial do corpo-de-prova (m²);

R_T : relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20°C.

Finalizado o ensaio aplicou-se corante azul na água para avaliação visual de possíveis caminhos preferenciais de fluxo de água após desmontagem do ensaio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No total foram realizadas 15 medições de coeficiente de permeabilidade para cada corpo de prova, que se diferenciam pelo tipo de vedação lateral, argila plástica (CP1) e borracha de silicone (CP2). Os valores foram plotados em gráfico de barras flutuantes verticais que exibe a diferença entre dois conjuntos de valores no eixo y. Também foi adicionado um gráfico linear para cada amostra, com impressão da média dos valores de k (Figura 3.a). Observou-se que a média é representativa de seus valores para ambos os casos, sendo o valor de k igual a $2,86 \times 10^{-5}$ (desvio padrão de $9,4 \times 10^{-7}$) para vedação com argila plástica e de $6,84 \times 10^{-5}$ (desvio padrão de $1,96 \times 10^{-6}$) para vedação com borracha de silicone. Destaca-se que os valores obtidos são muito próximos, sendo o valor de k levemente maior para CP2. Apesar das pequenas diferenças obtidas, consideram-se válidos os resultados. A potencial motivação para a distinção entre os valores obtidos é atribuída às perturbações durante a colocação dos manômetros laterais, conforme será detalhado a seguir.

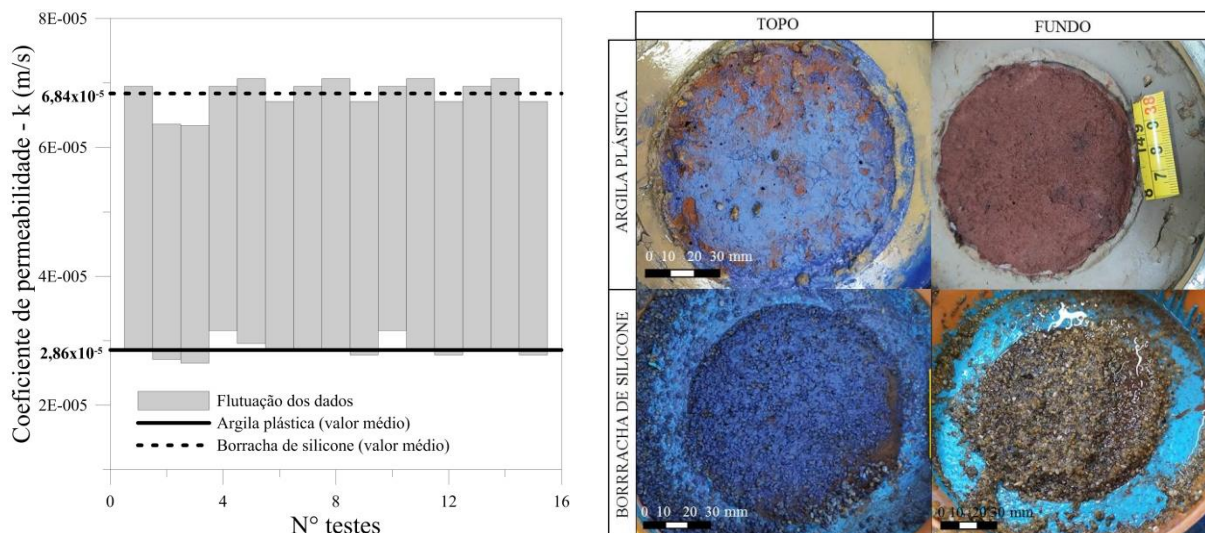


Figura 3. Ensaio de permeabilidade, teste para diferentes materiais de vedação. (a) Resultados dos coeficientes de permeabilidade. (b) Aspecto das amostras após percolação de corante azul.

Com relação aos resultados da aplicação do corante azul na água de percolação, foram registrados os tempos de manifestação da coloração na saída do permeâmetro. Para o CP1, o tempo foi de aproximadamente 60 segundos e para o CP2, 240 segundos. Durante a desmontagem dos ensaios, também foi observado e registrado os pontos de concentração de corante. Não foram observadas concentrações de corante azul entre a parede do cilindro e o material de vedação, nem para a argila plástica, nem para a borracha de silicone. Também não se observou concentração de corante entre o corpo de prova e o material de vedação. Adicionalmente, em ambas as amostras percebeu-se a formação de canalículos, da ordem de 1 mm ou menores, evidenciados pela concentração de corante. Um canalículo bastante evidente foi registrado, com diâmetro de 1 mm, de geometria circular bem definida, conforme Figura 4.b. A presença de raízes também ficou evidenciada pelo corante, indicando um fluxo preferencial da água nessa região, Figura 4.c. Apenas o corpo de prova montado com borracha de silicone (CP2) foi desmontado para avaliar a região que foram inseridos os tubos manométricos. O CP1 foi mantido para outros estudos. Com isso, observou-se que a inserção dos tubos manométricos promoveu uma desestruturação local no solo, onde o corante ficou bastante marcado, criando um fluxo zoneado (o lado oposto do CP2 não ficou marcado com o corante), Figura 4.a.

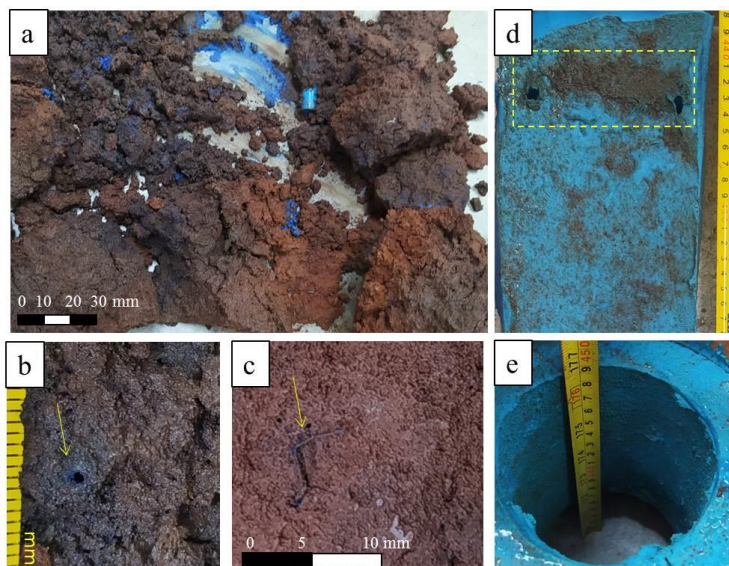


Figura 4. Análise qualitativa pela percolação de corante nas amostras de solo. (a) Solo desestruturado após desmoldagem; (b) Presença de canalículo. (c) Presença de raízes. (d) Superfície de moldagem do CP2, com destaque para região de locação dos manômetros. (e) Molde de borracha de silicone após remoção do solo.

A borracha de silicone possibilitou a moldagem do corpo de prova, ficando registrada toda a rugosidade lateral do corpo de prova. Não foi possível remover o CP2 sem sua desestruturação. A borracha precisou ser raspada, pois ficou fortemente aderida nas paredes do cilindro. Nesse momento também foi possível comprovar que não houve nenhum fluxo lateral de parede. Fez-se um corte para avaliar melhor a superfície de moldagem do solo e observou-se maior rugosidade na região dos manômetros, reforçando a hipótese de destruição local do solo.

5 CONCLUSÕES

A borracha de silicone foi preparada em estado líquido e atingiu a cura parcial após alguns minutos da aplicação do catalisador, o que exigiu bastante agilidade durante seu manuseio. Devido ao material isolante estar inicialmente em estado viscoso, apresentou excelente propriedade de auto-adensamento e, com isso, preencheu adequadamente todo o espaço entre o cilindro do permeâmetro e o corpo de prova, possibilitando até corrigir e moldar as imperfeições geométricas nas laterais do corpo de prova. O uso da borracha de silicone dispensou o uso de parafina, que é um material tóxico quando aquecido. No entanto, o catalisador da resina também requer cuidados, sua embalagem classifica o produto como pouco tóxico e levemente irritante.

Os resultados mostram que a vedação com uso de borracha líquida é eficiente, mantendo a estrutura do solo durante os ensaios, sendo auto-adensável, não possuindo ação expansiva durante a fase de cura e eliminando a possibilidade de fluxo de parede lateral, uma vez que o material ficou fortemente aderido na superfície de contato com o cilindro.

A desvantagem da borracha de silicone é o fato de ser um material descartável, não permitindo a sua reutilização. Assim, recomenda-se o uso para solos frágeis e amostras indeformadas. Por fim, sugere-se fazer testes para utilizar a borracha de silicone líquida como elemento de vedação em ensaios triaxiais, em substituição à membrana flexível.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Norte Energia S.A. e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu pelo apoio nesse trabalho. Esse estudo está vinculado ao projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado “Modelo de previsibilidade de evolução de canalículos e desenvolvimento de metodologia e software para mitigação dos impactos nas fundações de barragens”, identificado pelo código PD-07427-0322/2022, financiado pela Norte Energia S.A, por meio do Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica, e ao Acordo de Cooperação Técnica N° 81-2023, entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Fundação de Apoio à UTFPR (FUNTEF) e Fundação Parque Tecnológico de Itaipu (FPTI).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2021). *NBR 14545: Solo - Determinação Do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos à Carga Variável*. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Buzzi, O., Fityus, S., Sasaki, Y. e Sloan, S.. (2008). Structure and Properties of Expanding Polyurethane Foam in the Context of Foundation Remediation in Expansive Soil. *Mechanics of Materials* 40(12):1012–21.
- Corwin, D. L. (2000). Evaluation of a Simple Lysimeter-Design Modification to Minimize Sidewall Flow. *Journal of Contaminant Hydrology* 42(1):35–49.
- Farias, W. M. (2003). Condutividade Hidráulica de Solos Tropicais Compactados a Hidrocarbonetos Da Gasolina. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
- Sabri, M. M. S., Vatin, N. I. e Alsaffar, K. A. M. (2021). Soil Injection Technology Using an Expandable Polyurethane Resin: A Review. *Polymers* 13(21):1–32.

- Sentenac, P., Lynch, R. J. e Bolton, M. D. (2021). Measurement of Side-Wall Leakage in Soil Columns Using Fibre-Optics Sensing. Pp. 35–41 in *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*. Geotechnical and Environmental Engineering Group, Cambridge University Engineering Department.
- Silva, J. B. G., Ferreira, P. A., Matos, A. T. e Cecon, P. R. 2015. Comparison between Values of Soil Solute Transport Parameters from Soil Samples with and without Structure (B). *Irriga* 20(1):60–72.
- Silveira, H. F., Cerqueira, G. S., Ribeiro Júnior, H. L., Silva, F. F., Freitas, R. M. e Scafuri, A. G. (2015). Aspectos Toxicológicos Da Exposição Ocupacional a Parafina Em Ciências Morfológicas. *Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade* 6(3):5–16.
- Velásquez, L. G. R., Osterreicher-Cunha, P. e Vagar-Jr, E. A. (2018). Abordagem Experimental Para Ensaio Em Colunas de Solo Indeformado. P. 7 in *IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Salvador, Bahia: ABMS.