

FIBRAS DE ARAMIDA COMO AGENTES DE REFORÇO FÍSICO EM UM SOLO EXPANSIVO

**GUSTAVO LUÍS CALEGARO¹; JOÃO PAULO DOS SANTOS SIMÃO²; LUIZA BEATRIZ GAMBOA ARAÚJO MORSELLI³; MAURIZIO SILVEIRA QUADRO³
RAFAEL DE AVILA DELUCIS⁴**

¹Universidade Federal de Pelotas – gustavoccalegaro@gmail.com

²Nome da Instituição do(s) Co-Autor(es) – joaopaulosimao@outlook.com

³Universidade Federal de Pelotas - luisa_morselli@hotmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – mausq@hotmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas – rafael.delucis@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Solos expansivos, predominantemente constituídos por argilominerais do grupo das esmectitas (especialmente montmorilonita), apresentam comportamento geotécnico crítico devido à sua estrutura cristalina 2:1. Esta configuração permite significativa absorção de água nas lamelas intercamadas, resultando em deformações volumétricas, baixa capacidade de suporte ($CBR < 3\%$) e alta susceptibilidade à erosão retrógrada (Reddy et al., 2024). Tais características inviabilizam sua utilização direta em obras de infraestrutura, causando danos a pavimentos, fundações e obras de contenção (Ali et al., 2020).

A estabilização desses solos é essencial para mitigar riscos geotécnicos. Métodos tradicionais (como cal e cimento) enfrentam desafios ambientais e de durabilidade em condições tropicais (Díaz-López et al., 2023). Alternativas sustentáveis, como reforço com polímeros sintéticos, destacam-se por combinar eficiência técnica e menor impacto ecológico (Almajed; Lemboye; Moghal, 2022). Para além das opções já estudadas, a aramida (poli(para-fenileno tereftalamida)) apresenta propriedades excepcionais: alta resistência à tração (>3 GPa), estabilidade térmica (degradação acima de 400°C) e resistência à hidrólise em pH alcalino, mantendo 80% da resistência original após 18 meses em pH 9 (Derombise et al., 2011). Seu mecanismo de interação com partículas de argila envolve ligações de hidrogênio e forças eletrostáticas, melhorando a coesão da matriz do solo (Zhang et al., 2023).

Embora aplicações de aramida sejam consolidados em geotêxteis e materiais compósitos (Tanasă et al., 2022), estudos diretos sobre seu uso na estabilização de solos expansivos são escassos na literatura atual. Pesquisas com fibras sintéticas análogas (como polipropileno) demonstram reduções de 35–40% na pressão de expansão e incrementos de até 65% na resistência à compressão não confinada (UCS) em solos tratado (Syed et al., 2020), sugerindo que a aramida pode oferecer desempenho superior.

Este estudo investiga a incorporação de fibras de aramida em um solo expansivo de Pelotas/RS, visando avaliar sua eficiência na estabilização e melhoria de propriedades físico-mecânicas através dos ensaios de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Método Expedito das Pastilhas (MCT) para aplicações relacionadas à engenharia geotécnica.

2. METODOLOGIA

O solo utilizado, denominado "solódico do Quartier", foi coletado no bairro Quartier em Pelotas/RS. Trata-se de uma areia argilosa com frações finas

compostas por argilominerais do grupo das esmectitas, apresentando comportamento expansivo, alta erosividade e baixa resistência em condições úmidas (D'Ávila et al., 2008). As fibras de Aramida (Kevlar®) em forma de polpa foram gentilmente doadas pela Dupont Brasil, com diâmetro médio de 12 µm e comprimento de corte de 6 mm.

Inicialmente, o solo foi destorrado manualmente, seco a 60 °C e penetrado nas malhas #40 (para ensaios de limites de consistência) e #200 (para o método expedido das pastilhas). As misturas com aramida (0,5%, 1,0% e 1,5% em massa de solo seco) foram homogeneizadas a seco antes do início do processo de saturação.

Os Limites de Atterberg foram determinados conforme normas técnicas: o Limite de Liquidez (LL), avaliado usando aparelho de Casagrande, seguiu a ABNT NBR 6459/2016 e o Limite de Plasticidade (LP), pelo método do rolinho, obedeceu à ABNT NBR 7180/2016. O Índice de Plasticidade (IP) foi calculado como $IP = LL - LP$. Para o ensaio expedido das pastilhas, adotou-se o protocolo de (Fortes et al., 2002) em conjunto com a quinta aproximação do método proposto por D'Ávila et al., (2008). O material passante na malha #200 foi saturado e preparado com espátulação até que a penetração de uma agulha padrão atingisse 1 mm. As pastilhas foram moldadas em anéis de PVC ($\varnothing 21\text{ mm} \times H 5\text{ mm}$) e submetidas a dois períodos de cura ao ar livre: 7 e 21 dias. Após cada período de cura, as pastilhas foram secas a 60 °C por 4 h. Avaliou-se então a contração diametral, e triplicatas de pastilhas foram submetidas à reabsorção hídrica, monitorando-se penetração, formação de trincas e expansão em ambos os tempos de cura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos limites de consistência (Figura 1A) revelou uma tendência consistente: todos os teores de aramida (0,5%, 1,0% e 1,5%) promoveram aumento simultâneo do limite de liquidez (valores entre 29-31% versus 28% da referência) e do limite de plasticidade (16-19% versus 14%), resultando em redução do índice de plasticidade (10-13% versus 14%). Este fenômeno, particularmente acentuado no teor de 1,0% ($IP=10\%$), sugere um efeito antiplástico decorrente da interação fibra-argila, onde as fibras atuam como elementos restritivos à mobilidade das partículas durante processos de saturação, possivelmente através da formação de redes capilares modificadas.

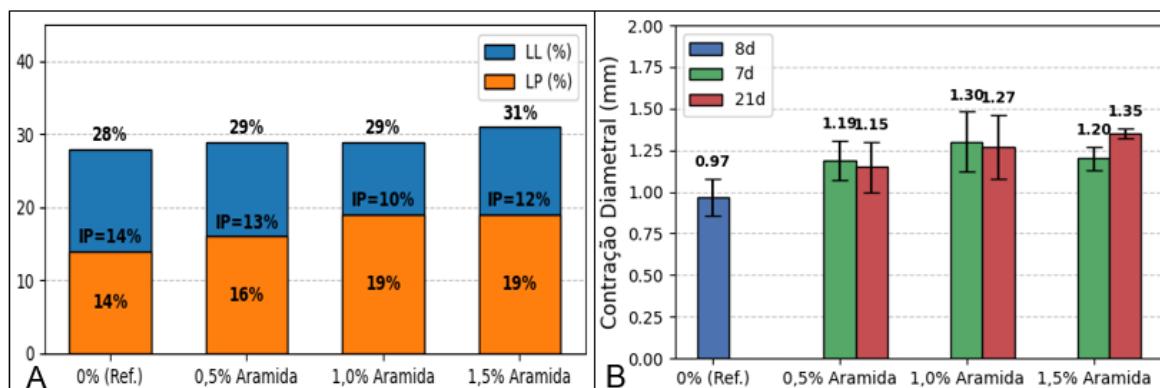


Figura 1 – Limites de Atterberg (LL e LP) e o índice de plasticidade (IP) do solo natural e misturas com aramida (A); Contração diametral das pastilhas de acordo com os períodos de cura (B).

No que se refere ao comportamento dimensional, a Figura 1 (B) ilustra um padrão temporal significativo. Após 7 dias de cura, todas as misturas apresentaram contrações diametrais superiores à amostra de referência (1,19-1,35 mm contra 0,97 mm). Entretanto, após 21 dias, observou-se redução média de 8% nesses valores, com destaque para o teor de 1,5% de aramida, que registrou queda de 1,35 mm para 1,20 mm.

Quanto à penetração da agulha padrão pós reabsorção em água, os resultados exigem correção crítica: na Figura 2A (7 dias de cura), a referência atingiu penetração total (5 mm) aos 30 min, enquanto a mistura com 0,5% de Aramida alcançou 1,7 mm em 24 h - valor 66% inferior à referência no mesmo intervalo. O teor de 1,5% manteve penetração insignificante em 24h . Na Figura 2B (21 dias de cura), o teor de 0,5% atingiu 2,0 mm, ainda 60% abaixo da referência (5 mm aos 30 min), enquanto 1,5% registrou 0,7 mm.

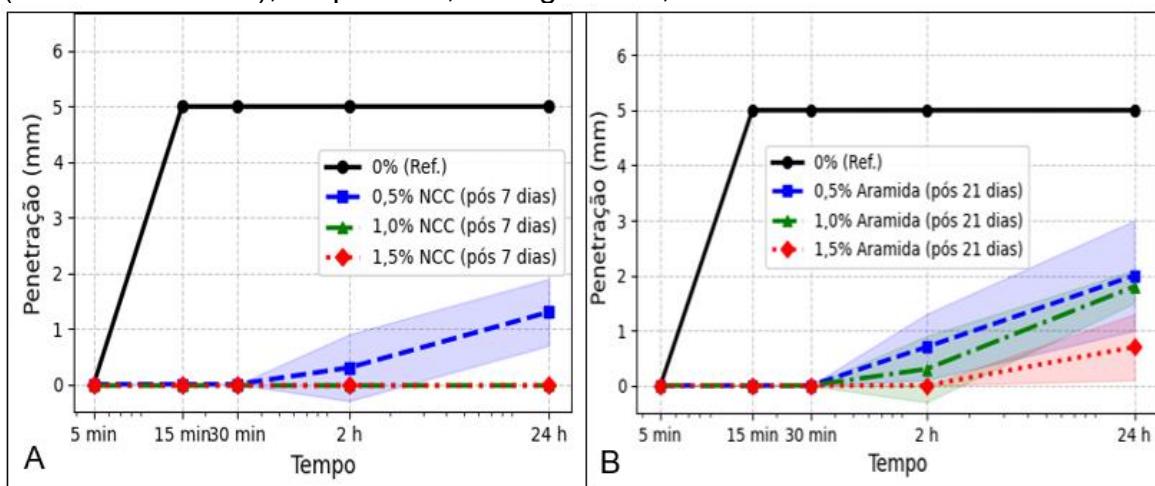


Figura 2 – Penetração da agulha em função do tempo de reabsorção de água nas pastilhas pós cura de 7 dias (A) e pós cura de 21 dias (B).

Esta evolução pode indicar uma falta de maturação das interações solo-fibra, onde a atuação das fibras como elementos de restrição às tensões da penetração da agulha. No entanto, não está descartado o efeito no efeito da orientação da fibras nas pastilhas, o que encontra suporte em princípios físico-mecânicos documentados por Al-Hosainat et al., (2023). Segundo seu estudo em compósitos cimentícios, fibras orientadas perpendicularmente ao fluxo hídrico reduzem a sortividade em até 35% ao criarem caminhos tortuosos que dificultam a migração da água. Este mecanismo pode explicar os resultados encontrados: as fibras de Aramida provavelmente formam uma rede tridimensional que atua como barreira hidráulica, aumentando a tortuosidade dos poros e reforçando interfaces críticas, podendo ser similar à redução de 20,8% na penetração de cloretos observada em matrizes cimentícias com fibras perpendicularmente alinhadas.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo indicam que a incorporação de fibras de Aramida na fração fina de solos expansivos apresenta efeitos técnicos promissores, porém com limitações práticas significativas. As fibras reduziram a plasticidade do solo ($IP \leq 13\%$) e retardaram a penetração hídrica em até 300% comparado à referência, além de mitigar contrações diametrais em 11% com 1,5% de fibras após 21 dias. Contudo, observou-se comportamento tempo-dependente que exige

monitoramento prolongado. Ressalta-se a escassez de estudos sobre aplicação de aramida em solos, agravada pela inviabilidade financeira.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459: Solo — Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 5 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 3 p.
- AL-HOSAINAT, Ahmad *et al.* Evaluation of the Factors Affecting the Performance of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 2, p. 04022435, fev. 2023.
- ALI, Muhammad *et al.* Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers. **Geomechanics and Engineering**, v. 22, n. 3, p. 227–236, 2020.
- ALMAJED, Abdullah; LEMBOYE, Kehinde; MOGHAL, Arif Ali Baig. A Critical Review on the Feasibility of Synthetic Polymers Inclusion in Enhancing the Geotechnical Behavior of Soils. **Polymers**, v. 14, n. 22, p. 5004, 18 nov. 2022.
- D'ÁVILA, A. M., HAX, S. E FREITAS, P.C. Especificação Expedita de Materiais para Vias Não Pavimentadas - 4^a Aproximação. In: **XI CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA E IV CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA**, 2008, Coimbra, Portugal.
- DEROMBISE, G. *et al.* Morphological and physical evolutions of aramid fibers aged in a moderately alkaline environment. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 123, n. 5, p. 3098–3105, 2 set. 2011.
- DÍAZ-LÓPEZ, J. L. *et al.* Geotechnical and engineering properties of expansive clayey soil stabilized with biomass ash and nanomaterials for its application in structural road layers. **Geomechanics for Energy and the Environment**, v. 36, p. 100496, dez. 2023.
- FORTES, Rita Moura; MERIGHI, João Virgilio; NETO, Alexandre Zuppolini. **MÉTODO DAS PASTILHAS PARA IDENTIFICAÇÃO EXPEDITA DE SOLOS TROPICAIOS**. . Congresso apresentado em 2º Congresso RodoviárioAnais.... . Lisboa, Portugal, 18 nov. 2002.
- REDDY, Peddireddy Sreekanth *et al.* Simultaneous Evaluation of Montmorillonite and Na/Ca Content for Assessing Unstabilized and Stabilized Natural Expansive Soils for Geoengineering Applications. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 10, n. 6, p. 95, dez. 2024.
- SYED, Mazhar *et al.* Stabilization of Expansive Clays by Combined Effects of Geopolymerization and Fiber Reinforcement. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, v. 101, n. 1, p. 163–178, mar. 2020.
- TANASĂ, Fulga *et al.* Geotextiles—A Versatile Tool for Environmental Sensitive Applications in Geotechnical Engineering. **Textiles**, v. 2, n. 2, p. 189–208, 8 abr. 2022.
- ZHANG, Ziyi *et al.* Simultaneously enhanced interfacial shear strength and tensile strength of heterocyclic aramid fiber by graphene oxide. **Nano Research**, v. 16, n. 10, p. 12286–12293, out. 2023.