


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

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.031-013>

Gustavo Luís Calegari

Mestrando em Ciências Ambientais
Universidade Federal de Pelotas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7050-3129>

Kelian Ramire Waskow Grellert

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária
Universidade Federal de Pelotas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7930-3281>

João Paulo dos Santos Simão

Graduando em Eng. de Controle e Automação
Universidade Federal de Pelotas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1427-3215>

Ezequiel da Silva Tins

Graduando em Eng. Civil
Universidade Federal de Pelotas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4850-6377>

Rubiane Buchweitz Fick

Graduanda em Eng. Ambiental e Sanitária
Universidade Federal de Pelotas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2131-4952>

Luís Eduardo Tavares Martins

Mestrando Ciências Ambientais
Universidade Federal de Pelotas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6288-2412>

Jessica Torres dos Santos

Mestre em Ciências Ambientais
Universidade Federal de Pelotas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6544-2286>

Jéssica Etcheverria do Prado Hartwig

Doutoranda em Ciências Ambientais
Universidade Federal de Pelotas

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9296-0904>

Josiane Pinheiro Farias

Doutoranda em Ciências e Eng. dos Materiais
Universidade Federal de Pelotas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8933-4984>

Marcos Antonio da Silva

Mestrando em Ciência e Engenharia dos Materiais
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5372-1168>

Rafael Miritz Bartz

Mestrando em Recursos Hídricos
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8732-6574>

Ana Clara Marins Mendes

Graduanda em Eng. Ambiental e Sanitária
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9580-7111>

Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli

Dra. em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1703-7710>

Thays França Afonso

Dra. em Ciência e Engenharia dos Materiais
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7803-7319>

Klaus Machado Theisen

Doutor em Eng. Civil
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3689-7920>

Robson Andreazza

Doutor em Solos
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9211-9903>

Maurício Silveira Quadro

Doutor em Solos
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8236-7479>

Rafael de Ávila Delucis

Dr. em Eng. de Minas, Metalúrgica e de Materiais
Universidade Federal de Pelotas
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0457288721496478>

RESUMO

A estabilização de solos expansivos, predominantemente constituídos por argilominerais esmectíticos, é crucial na Engenharia Geotécnica devido ao comportamento crítico que envolve significativa absorção de água, deformações volumétricas e baixa capacidade de suporte. Este estudo de pesquisa aplicada investigou

a eficácia da incorporação de fibras de aramida em um solo expansivo da cidade de Pelotas/RS, aproveitando as propriedades da aramida de alta resistência à tração e estabilidade química. A metodologia, baseada nos ensaios de limites de Atterberg e o Método Expedito das Pastilhas, demonstrou que as fibras atuam como um eficiente agente de reforço. A adição de aramida promoveu uma redução do Índice de Plasticidade (IP) para até 10% (comparado a 14% da referência), o que sugere um efeito antiplástico de restrição à mobilidade das partículas. Mais significativamente, o reforço retardou drasticamente a penetração hídrica pós-cura em até 300%, com o teor de 1,5% de fibras, e registrou apenas 0,7 mm de penetração após 24 horas. Este desempenho é atribuído à formação de uma rede tridimensional que funciona como barreira hidráulica, aumentando a tortuosidade dos poros e mitigando contrações diametrais. Em conclusão, o uso da aramida apresenta efeitos técnicos promissores no controle de expansão e da plasticidade do solo, embora sua viabilidade financeira e o comportamento tempo-dependente observado exijam cautela e estudos futuros.

Palavras-chave: Fibras sintéticas; Solo problemático; Estabilização de solos; MCT; Geotécnica.

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Geotécnica contemporânea enfrenta o desafio persistente de manejar solos expansivos, cuja aplicabilidade em projetos de infraestrutura é severamente limitada. Essa limitação está associada principalmente à sua composição mineralógica, dominada por argilominerais do grupo das esmectitas, particularmente a montmorilonita. A estrutura cristalina 2:1 desses minerais possibilita significativa absorção de água nos espaços interlamelares, resultando em acentuado comportamento de expansão, instabilidade volumétrica e redução da capacidade de suporte ($CBR < 3\%$). Além disso, variações no teor de umidade influenciam diretamente os mecanismos de desagregação do solo e a degradação estrutural, aumentando a suscetibilidade a processos erosivos (Han; Wang, 2023). Conseqüentemente, o uso de tais materiais em pavimentos, fundações rasas e sistemas de contenção torna-se tecnicamente inviável sem estabilização prévia.

A estabilização desses solos constitui um imperativo técnico, e métodos tradicionais, como a incorporação de cal e cimento, têm sido historicamente empregados. Entretanto, a durabilidade e o impacto ambiental dessas soluções, particularmente em regimes tropicais, têm suscitado desafios significativos (Díaz-López et al., 2023). Nesse contexto, a pesquisa geotécnica tem se concentrado em alternativas sustentáveis, com ênfase no reforço com polímeros sintéticos, que combinam eficiência técnica com menor impacto ecológico (Almajed et al., 2022).

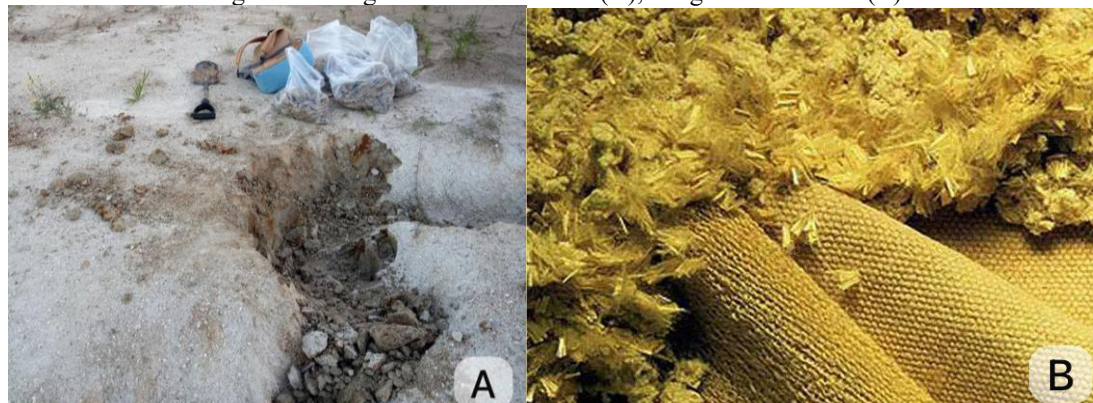
Um material que se destaca nesse cenário é a aramida (poli(para-fenileno tereftalamida)). Embora seu uso esteja mais consolidado em geotêxteis para aplicações ambientais e em materiais compósitos (Tanasă et al., 2022), suas propriedades físico-químicas a tornam uma candidata ideal para o reforço direto da matriz do solo. A aramida apresenta elevada resistência à tração (superior a 3 GPa), estabilidade térmica acima de 400°C e demonstra notável resistência à hidrólise em ambientes alcalinos, mantendo aproximadamente 80% de sua resistência original após 18 meses em pH 9 (Derombise et al., 2011). As fibras de aramida exibem alta resistência mecânica, e suas interações superficiais podem ser aprimoradas por óxido de grafeno, aumentando a adesão em compósitos poliméricos (Zhang et al., 2023). O desempenho de fibras sintéticas análogas, como o polipropileno, já indicou o potencial desse reforço, com reduções de 35–40% na pressão de expansão e aumentos de até 65% na resistência à compressão simples (UCS) em solos tratados (Syed et al., 2020). Esses resultados sugerem que a aramida, dadas suas propriedades superiores, pode oferecer desempenho ainda mais eficaz.

Diante da escassez de estudos diretos sobre a aplicação da aramida na estabilização de solos expansivos, este estudo investiga a incorporação de fibras de aramida em um solo expansivo coletado em Pelotas/RS. O objetivo é avaliar a eficiência do material na estabilização e melhoria de propriedades físico-mecânicas críticas, por meio de ensaios padronizados de Limites de Atterberg (Limite de Liquidez - LL, conforme a ABNT NBR 6459/2016; e Limite de Plasticidade - LP, conforme a ABNT NBR 7180/2016) e do Método Expedito das Pastilhas (MCT) (Fortes et al., 2002; D'ávila et al., 2008).

2 METODOLOGIA

O experimento utilizou o solo denominado “Solo Quartier (QS)”, uma areia argilosa coletada em Pelotas/RS (Figura 1A), cujas frações finas são reconhecidamente ricas em argilominerais esmectíticos. O comportamento expansivo e a baixa resistência sob condições úmidas desse material já foram relatados anteriormente na literatura relacionada ao método expedito (D'ávila et al., 2008). O agente de reforço utilizado foi a aramida (Kevlar®), fornecida na forma de polpa (Figura 1B), com diâmetro médio de 12 µm e comprimento de corte de 6 mm.

Figura 1 - Imagem do solo utilizado (A), imagem da aramida (B)



Fonte: Autores; polpa de fibra de aramida Kevlar®. Fonte: DuPont (2026).

Na fase de preparação, os torrões de solo foram inicialmente destorroados em pedaços menores e secos em estufa a 60°C. Para padronizar as amostras, o solo foi separado em frações passantes na malha #40 (para os ensaios de limites de consistência) e na malha #200 (para o Método Expedito das Pastilhas).

As fibras de aramida foram incorporadas ao solo seco nas dosagens de 0,5%, 1,0% e 1,5% (em massa de solo seco). As misturas foram cuidadosamente homogeneizadas a seco para assegurar a dispersão do polímero antes da saturação. A realização dos limites de Atterberg das misturas foi essencial para avaliar seu comportamento plástico. Para isso, os limites de consistência foram determinados em amostras passantes na peneira de malha #40; o limite de liquidez (LL) do solo foi determinado utilizando o aparelho de Casagrande, e o limite de plasticidade (LP) foi determinado pelo método de rolamento, seguindo os procedimentos estabelecidos na ASTM D4318 (2020). Os resultados permitiram o cálculo do Índice de Plasticidade (IP).

O comportamento de retração dimensional e amolecimento por saturação hídrica das misturas foi investigado por meio do MEP, um procedimento particularmente relevante para solos tropicais. O protocolo adotado seguiu as diretrizes de Nogami e Villibor (1994), em combinação com a quinta aproximação do método proposto por D'Ávila et al. (2008). O material passante na malha #200 (0,075 mm) foi selecionado para a moldagem das pastilhas, uma vez que essa fração concentra os argilominerais responsáveis pelo comportamento expansivo e maximiza a área superficial específica e a porosidade das amostras. Segundo Abd Malik et al. (2023), partículas mais finas criam espaços porosos mais interconectados e apresentam maior retenção de água, fatores críticos para a avaliação de variações dimensionais e amolecimento sob saturação. O uso dessa fração controlada garante que os resultados do ensaio reflitam o comportamento da matriz fina ativa, eliminando a interferência de partículas mais grossas. Em seguida, o solo foi saturado e espatulado até atingir o ponto ideal de moldagem, definido por uma penetração de agulha de 1 mm. As pastilhas, com diâmetro de 21,3 mm × H 5 mm em anéis de PVC, foram então preparadas e submetidas a

dois períodos distintos de cura ao ar livre: 7 dias e 21 dias (Figura 2). A variação no tempo de cura foi estabelecida para monitorar o desenvolvimento das interações e a maturação do compósito solo-fibra, considerando o comportamento dependente do tempo inerente a muitos materiais estabilizados.

Figura 2 - Método das Pastilhas (MCT)



Fonte: Autores

Após cada período de cura, as pastilhas foram submetidas a secagem controlada em estufa a 60°C por 4 horas. O controle dimensional foi realizado por meio da medição da retração diametral, fornecendo um indicador do potencial de retração da fração fina reforçada do solo. O ensaio final e mais crítico foi o ensaio de reabsorção de água, no qual pastilhas em triplicata foram monitoradas. Esse ensaio avaliou a resistência do material estabilizado à intrusão de água, medindo a penetração da agulha em razão do amolecimento, da formação de fissuras e do comportamento expansivo. Os resultados dessa etapa são fundamentais para determinar a eficácia da rede de aramida na criação de uma barreira hidráulica e na mitigação da reatividade dos argilominerais expansivos.

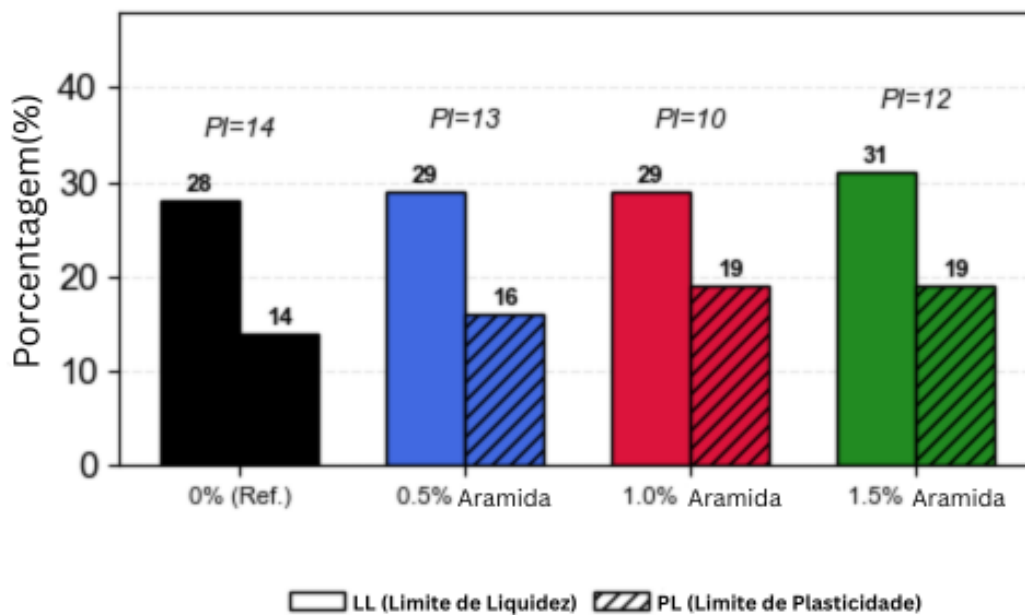
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos limites de consistência (Limites de Atterberg), detalhada na Figura 3, revelou uma tendência consistente de modificação das propriedades de plasticidade do solo com a incorporação de fibras de aramida. Os resultados demonstraram que todos os teores de aramida (0,5%, 1,0%, 1,5%) promoveram um aumento simultâneo tanto do Limite de Liquidez (LL) quanto do Limite de Plasticidade (LP), em comparação à amostra de referência (0% de aramida).

O limite de liquidez (LL) nas misturas variou entre 29% e 31%, superando o valor de referência de 28%, enquanto o limite de plasticidade (LP) apresentou aumentos notáveis, variando entre 16% e 19%, em comparação com 14% no solo de referência. Esse aumento diferencial dos limites culminou em uma redução do Índice de Plasticidade (IP), que passou de 14% na referência para valores entre 10% e 13% nos solos (solo + aramida). Essa tendência caracteriza um comportamento plástico não linear à medida que os teores de aramida aumentam, evidenciado pela diminuição gradual, porém desproporcional, do Índice de Plasticidade (IP) com a incorporação de fibras (de 0,5% a 1,5%).

Esse comportamento, que atingiu sua máxima expressão com teor de 1,0% de aramida, com IP = 10%, sugere um efeito antiplástico resultante da interação fibra-argila. As fibras de aramida parecem atuar como elementos restritivos à mobilidade das partículas durante os processos de saturação, possivelmente por meio da formação de redes capilares modificadas que limitam a absorção e a mobilidade da água, um resultado promissor para a estabilização geotécnica de solo expansivo.

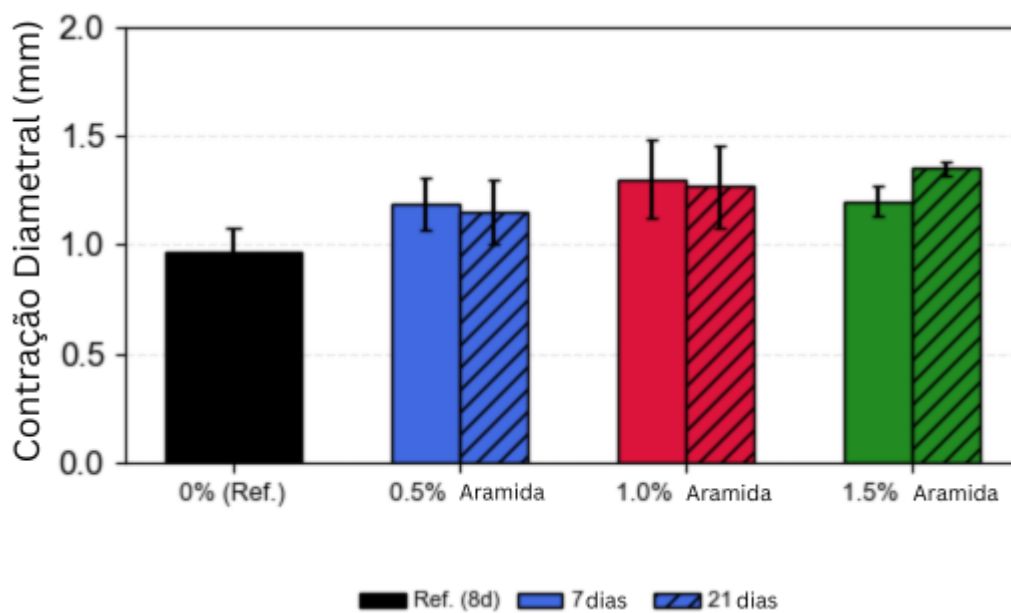
Figura 3 - Limites de Atterberg (LL e LP) e índice de plasticidade (IP) do solo natural e das misturas com aramida.



No que se refere ao comportamento dimensional, a Figura 4 ilustra o padrão temporal de retração diametral dos corpos de prova, indicador da suscetibilidade do solo a variações volumétricas. Inicialmente, após 7 dias de cura, todas as misturas solo-aramida apresentaram valores de retração diametral superiores ao da amostra de referência (0,97 mm), variando entre 1,19 mm e 1,35 mm.

Após 21 dias de cura, a evolução da retração variou de acordo com o teor de fibras. Para os dois menores teores (0,5% e 1,0%), a contração diametral permaneceu praticamente idêntica aos valores observados aos 7 dias, indicando ausência de evolução significativa ao longo do tempo (1,15 mm e 1,27 mm, respectivamente). Em contraste, a mistura com 1,5% de fibra de aramida apresentou aumento na retração, elevando-se de 1,20 mm aos 7 dias para 1,35 mm aos 21 dias.

Figura 4 - Contração diametral das pastilhas em função dos períodos de cura.



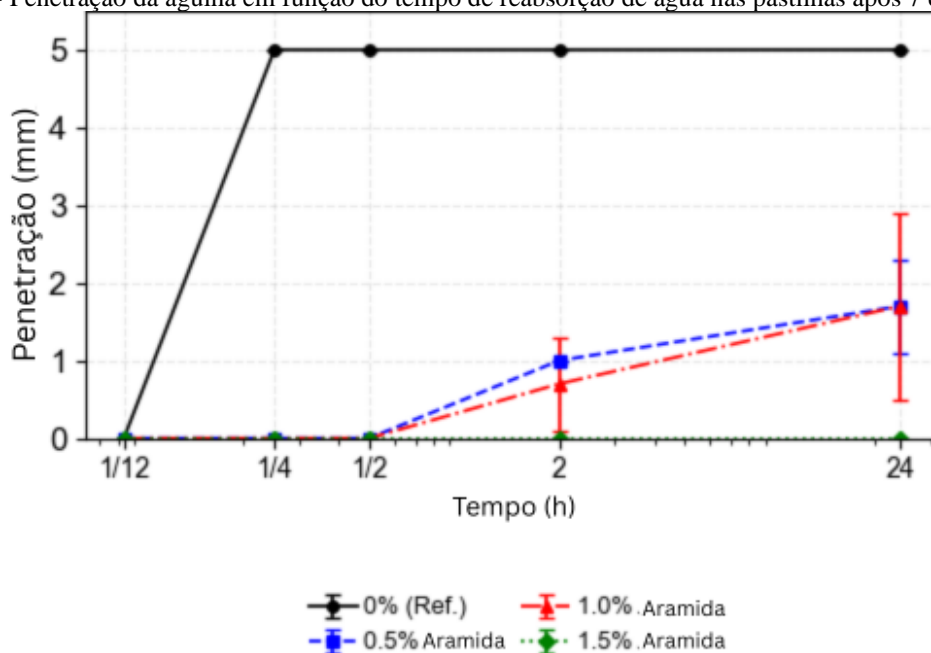
A retração diametral observada nas pastilhas pode ser interpretada à luz do processo de hornificação descrito por Mo et al. (2022) para fibras celulósicas. Embora as fibras de aramida não sejam celulósicas, o conceito de cocristalização e cristalização nos poros oferece uma analogia útil. Segundo Mo et al. (2022), durante a secagem de fibras celulósicas, a remoção da água leva a duas etapas distintas de mudanças estruturais irreversíveis: cocristalização entre microfibrilas adjacentes (em teores de umidade entre 70% e 31%) e cristalização da celulose amorfa nas superfícies dos poros (abaixo de 11% de umidade). No presente estudo, a redução da retração diametral observada após 21 dias de cura – particularmente para o teor de 1,5% de aramida, que diminuiu de 1,35 mm para 1,20 mm – sugere que as fibras atuam como restrições físicas, limitando o colapso da estrutura porosa durante a secagem. Esse efeito é análogo ao segundo período de hornificação descrito por Mo et al. (2022), no qual a cristalização nos poros conduz ao fechamento irreversível dos poros e ao aumento da rigidez estrutural.

A redução da retração diametral com o aumento do tempo de cura também é coerente com os achados de Reis et al. (2024) para solos reforçados com fibra de coco. Os autores demonstraram que a hornificação – um tratamento baseado em ciclos de umedecimento-secagem – reduz o diâmetro da fibra,

aumenta a razão de aspecto e melhora a ancoragem fibra-matriz. No presente estudo, embora as fibras de aramida sejam sintéticas, seu fino diâmetro (12 μm) e elevada razão de aspecto ($L/D = 500$) promovem intertravamento eficaz com a matriz argilosa, restringindo a mobilidade das partículas durante a secagem. Reis et al. (2024) também observaram que compósitos reforçados com fibras exibiram redução de fissuração e melhoria da estabilidade dimensional após exposição prolongada, o que está alinhado com o desempenho aprimorado das misturas com 1,5% de aramida após 21 dias de cura.

A avaliação da penetração da agulha padrão após a reabsorção de água, detalhada na Figura 5, demonstrou a capacidade das fibras de aramida de atuar como barreira hidráulica e controlar a reatividade à água.

Figura 5 - Penetração da agulha em função do tempo de reabsorção de água nas pastilhas após 7 dias de cura.



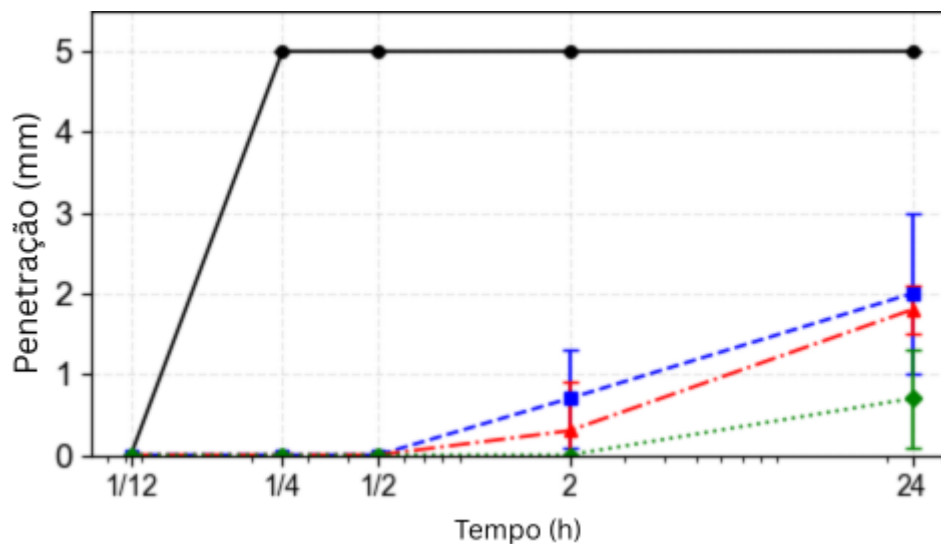
Fonte: Autores

Na análise realizada após 7 dias de cura (Figura 5), o solo de referência (0%) atingiu penetração total de 5 mm em apenas 30 minutos de ensaio. Em contraste, as misturas solo-fibra apresentaram resultados significativamente superiores. A mistura com 0,5% de aramida atingiu apenas 1,7 mm de penetração após 24 horas, desempenho 66% inferior ao da referência no mesmo intervalo de tempo. O desempenho mais notável nesse período foi o do teor de 1,5%, que manteve penetração insignificante (próxima de zero) após 24 horas.

Com o aumento do tempo de cura para 21 dias (Figura 6), a tendência de restrição à água foi mantida e, em alguns casos, aprimorada. O teor de 0,5% atingiu 2,0 mm de penetração em 24 horas, mas ainda

permaneceu 60% abaixo da penetração total da referência. O teor de 1,5% de aramida manteve o melhor desempenho, registrando apenas 0,7 mm de penetração.

Figura 6 - Penetração da agulha em função do tempo de reabsorção de água nas pastilhas após 21 dias de cura.



Fonte: Autores

A evolução observada nos valores de penetração da agulha pode indicar uma maturação parcial das interações solo-fibra, em que as fibras atuam como elementos de restrição física contra tensões de penetração. Contudo, o resultado também sugere o efeito da orientação das fibras nas pastilhas, princípio sustentado por evidências físico-mecânicas na literatura.

O mecanismo de redução da penetração de água encontra forte respaldo na literatura. Al-Hosainat et al. (2023) demonstraram, em estudos com compósitos cimentícios, que fibras orientadas perpendicularmente ao fluxo de água reduzem a sorptividade em até 35%. Isso ocorre porque as fibras criam trajetórias mais tortuosas, dificultando a migração da água. Esse princípio físico-mecânico é fundamental para explicar os resultados obtidos com a aramida. As fibras formam uma rede tridimensional na pastilha que atua como barreira hidráulica, aumentando a tortuosidade dos poros e reforçando interfaces críticas. Consequentemente, o efeito de restrição à água é análogo à redução de 20,8% na penetração de cloretos observada em matrizes cimentícias com fibras orientadas perpendicularmente.

A penetração tardia de água observada nas pastilhas reforçadas com aramida após 7 dias de cura pode ser parcialmente explicada pelas modificações na estrutura de poros associadas a mecanismos semelhantes à hornificação. Mo et al. (2022) relataram que, durante o segundo período de cristalização (teor de umidade abaixo de 11%), a cristalização da celulose amorfa nas superfícies dos poros leva à retração irreversível dos poros e à redução da absorção de água. Nos compósitos solo-aramida, as fibras parecem criar uma rede de poros mais tortuosa, dificultando a migração da água. Isso fica evidente no teor de 1,5% de aramida, que manteve penetração próxima de zero após 24 horas, ao passo que o solo de referência

atingiu penetração total (5 mm) em 30 minutos. O efeito é consistente com a formação de uma barreira hidráulica devido ao aumento da tortuosidade dos poros, conforme sugerido por Mo et al. (2022).

A superior resistência à água das pastilhas reforçadas com aramida após 7 dias de cura está em consonância com os achados de Reis et al. (2024) acerca do desempenho aprimorado de fibras hornificadas. Os autores observaram que fibras com diâmetro reduzido e adesão superficial aprimorada contribuíram para melhor interação fibra-matriz e menor absorção de água. Embora as fibras de aramida não absorvam água, sua elevada razão de aspecto e dispersão uniforme na matriz do solo criam uma rede densa que bloqueia fisicamente os caminhos da água. Reis et al. (2024) também observaram que o tratamento das fibras reduziu significativamente a capacidade de absorção de água das fibras de coco, efeito análogo à natureza hidrofóbica da aramida, que impede a penetração de água no compósito.

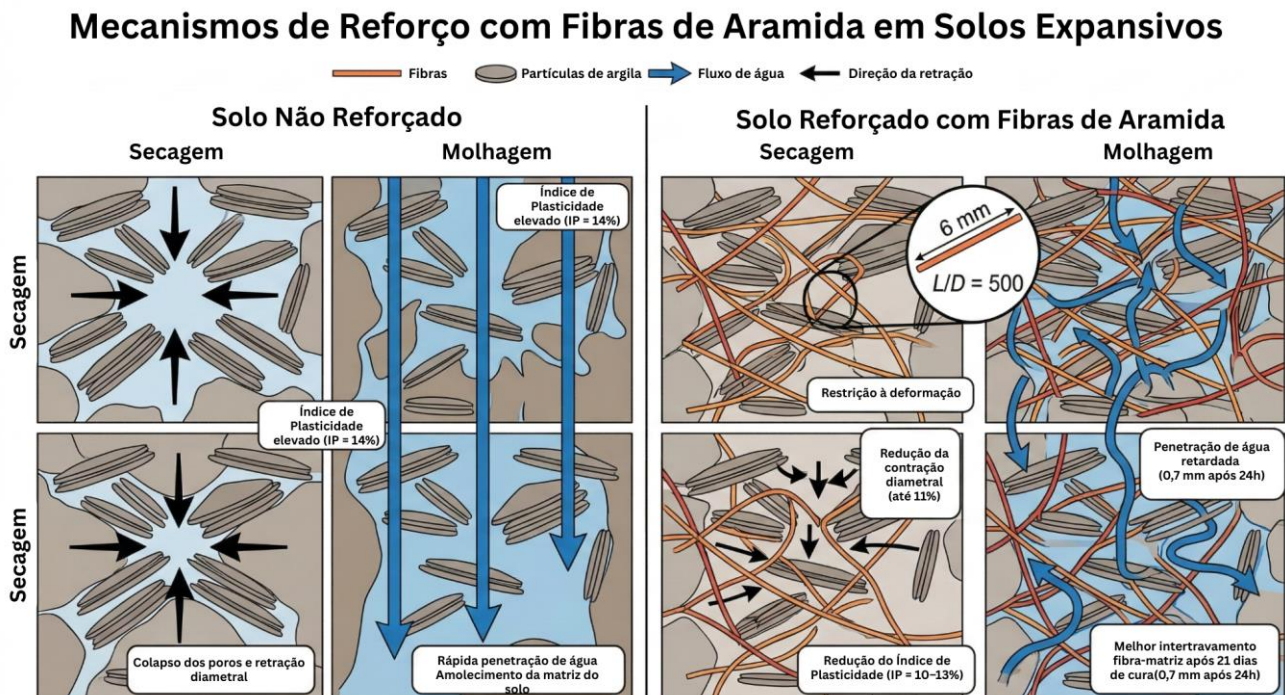
A melhoria adicional na resistência à penetração de água após 21 dias de cura sugere uma maturação dependente do tempo das interações solo-fibra, a qual pode ser associada ao desenvolvimento progressivo de mudanças estruturais irreversíveis, conforme descrito por Mo et al. (2022). Em seu estudo, a secagem prolongada levou ao aumento da cristalinidade e ao fechamento dos poros, elevando a resistência do material à reidratação. No presente caso, o período de cura estendido pode ter permitido a formação gradual de uma interface fibra-matriz mais estável e menos permeável. O teor de 1,5% de aramida, que apresentou apenas 0,7 mm de penetração após 24 horas, exemplifica esse efeito, indicando que a rede de fibras se torna progressivamente mais eficaz como barreira hidráulica ao longo do tempo.

O desempenho aprimorado dos compósitos reforçados com aramida após 21 dias de cura é coerente com o comportamento de longo prazo relatado por Reis et al. (2024) para solos reforçados com fibra de coco. Os autores verificaram que compósitos com fibras hornificadas mantiveram sua resistência ao cisalhamento após cinco meses de intemperismo, enquanto fibras não tratadas apresentaram degradação significativa. No presente estudo, o período prolongado de cura provavelmente permitiu a maturação das ligações interfaciais entre as fibras de aramida e as partículas de argila, resultando em maior resistência à penetração de água. Reis et al. (2024) também enfatizaram o papel da razão de aspecto e da adesão superficial das fibras na manutenção da integridade do compósito ao longo do tempo, o que está de acordo com o desempenho superior do teor de 1,5% de aramida após 21 dias.

Os achados anteriores demonstram que o reforço com fibras de aramida modifica significativamente o comportamento físico e mecânico de solos expansivos, reduzindo a plasticidade, limitando a retração diametral e retardando a penetração de água. Essas melhorias são atribuídas à formação de uma rede tridimensional de fibras que aumenta a tortuosidade dos poros, intensifica o intertravamento fibra-matriz e restringe a mobilidade das partículas durante os ciclos de secagem e umedecimento. Os mecanismos

subjacentes podem ser compreendidos por meio de analogias com o processo de hornificação descrito por Mo et al. (2022), em que mudanças estruturais irreversíveis levam ao fechamento dos poros e ao aumento da rigidez, e por meio dos princípios de interação fibra-matriz discutidos por Reis et al. (2024), que enfatizam o papel da razão de aspecto das fibras e da adesão superficial. Para sintetizar visualmente esses conceitos, a Figura 7 apresenta uma ilustração conceitual comparando o comportamento microestrutural de solos expansivos sem reforço e reforçados com aramida sob condições de secagem e umedecimento, destacando os principais mecanismos de reforço discutidos ao longo desta seção.

Figura 7 - Ilustração conceitual dos mecanismos de reforço proporcionados pelas fibras de aramida em solo expansivo



Fonte: Esta figura foi produzida com o auxílio da IA generativa Gemini e posteriormente revisada pelos autores para garantir consistência técnica e adequação científica.

Painel esquerdo: solo sem reforço exibindo alta plasticidade, retração diametral pronunciada e rápida penetração de água. Painel direito: solo reforçado com aramida apresentando plasticidade reduzida, retração restrita, penetração tardia de água e melhor intertravamento fibra-matriz após cura prolongada. A elevada razão de aspecto das fibras contribui para a formação de uma rede tridimensional eficaz que atua tanto como restrição mecânica quanto como barreira hidráulica.

4 CONCLUSÃO

A incorporação de fibras de aramida em solos expansivos mostrou-se uma estratégia eficaz para aprimorar seu comportamento físico e mecânico. Os resultados demonstraram que as fibras reduziram o Índice de Plasticidade de 14% no solo de referência para valores entre 10% e 13%, com desempenho ótimo

Gustavo Luís Calegaro | Kelian Ramire Waskow Grellert | João Paulo dos Santos Simão | Ezequiel da Silva Tins | Rubiane Buchweitz Fick | Luís Eduardo Tavares Martins | Jessica Torres dos Santos | Jéssica Etcheverria do Prado Hartwig | Josiane Pinheiro Farias | Marcos Antonio da Silva | Rafael Miritz Bartz | Ana Clara Marins Mendes | Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli | Thays França Afonso | Klaus Machado Theisen | Robson Andreazza | Maurício Silveira Quadro | Rafael de Ávila Delucis

(IP = 10%) observado no teor de 1,0% de fibras. Além disso, as fibras reduziram significativamente a retração diametral e retardaram a penetração de água, com o teor de 1,5% de fibras exibindo as melhorias mais pronunciadas após 21 dias de cura. Esses efeitos são atribuídos à formação de uma rede tridimensional de fibras que aumenta a tortuosidade dos poros, restringe a mobilidade das partículas e intensifica o intertravamento fibra-matriz. A maturação dependente do tempo das ligações interfaciais também contribuiu para a estabilidade do compósito e sua resistência à reidratação. Embora os achados sugiram que as fibras de aramida oferecem benefícios técnicos promissores para o controle da expansão do solo e a melhoria da durabilidade, a viabilidade econômica e o desempenho de longo prazo em campo permanecem aspectos críticos que requerem investigação adicional antes de uma aplicação em larga escala.

REFERÊNCIAS

- ABD MALIK, A. K. et al. Interpretation of soil grain size effect on electrical resistivity method. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 129, p. 103324, 2023.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: solo — determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 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, nov. 2022.
- D'ÁVILA, A. M.; HAX, S.; FREITAS, P. C. Expedited specification of materials for unpaved roads – 4th approximation. In: XI CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA E IV CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA, 4., 2008, Coimbra, Portugal. Anais [...]. Coimbra: [s.n.], 2008.
- 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, 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, dec. 2023.

FORTES, Rita Moura; MERIGHI, João Virgilio; NETO, Alexandre Zuppolini. Tablet method for expedited identification of tropical soils. In: *ROAD CONGRESS, 2., 2002, Lisboa, Portugal. Proceedings [...]*. Lisboa: [s.n.], 2002.

MO, Wenxuan et al. Elucidating the hornification mechanism of cellulosic fibers during the process of thermal drying. *Carbohydrate Polymers*, v. 289, p. 119434, 2022.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação expedita dos grupos da classificação mct para solos tropicais. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Anais...Abms*, 1994.

REDDY, Peddireddy Sreekanth et al. Simultaneous evaluation of montmorillonite and Na/Ca content for assessing unstabilized and stabilized natural expansive soils for geotechnical applications. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 10, n. 6, p. 95, dez. 2024.

REIS, A. F. S. M. et al. Long-term behaviour of coir-fibre-reinforced soils. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 52, n. 1, p. 1-14, 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, 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.