

**ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS: MATERIAIS
NATURAIS VS. INDUSTRIALIZADOS E RESÍDUOS RECICLADOS NO MÉTODO MCT**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.059-002>

Ezequiel da Silva Tins

Graduando em Engenharia Civil

Universidade Federal de Pelotas

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

Kelian Ramire Waskow Grellert

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária

Universidade Federal de Pelotas

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

Gustavo Luís Calegari

Mestrando em Ciências Ambientais

Universidade Federal de Pelotas

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

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>

Maria Carolina Gomes Silva e Silva

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária
Universidade Federal de Pelotas
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4976-2869>

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

Doutora 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>

Maurizio Silveira Quadro

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

Robson Andreazza

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

Resumo

Solos expansivos representam desafios geotécnicos devido à variação volumétrica na presença de água, sendo comuns na região de Pelotas/RS. Este estudo avalia a eficiência de diferentes agentes estabilizantes — cal, Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e fibras naturais de Butiá — na mitigação da expansividade de um solo argiloso. A metodologia fundamenta-se no método MCT (Miniatura Compactada Tropical), analisando a penetração hídrica e a contração diametral de pastilhas moldadas com diferentes teores de aditivos. Resultados prévios indicam que a cal apresenta desempenho superior no retardamento

da frente úmida, enquanto o RCD atua como material de preenchimento com limitações como estabilizador primário. A inclusão das fibras de Butiá propõe um mecanismo de reforço mecânico sustentável, visando reduzir a fissuração e melhorar a estabilidade dimensional. O trabalho contribui para o desenvolvimento de soluções de baixo impacto ambiental, comparando métodos tradicionais e inovações baseadas na biodiversidade regional.

Palavras-chave: Cal; Estabilização de solos; Fibra de Butiá; Resíduos de construção; Solos expansivos.

1 INTRODUÇÃO

Solos expansivos representam um dos maiores desafios para a engenharia geotécnica mundial, sendo caracterizados por elevada instabilidade volumétrica em resposta a variações no teor de umidade. Segundo Calegaro et al. (2024), esse comportamento expansivo decorre da constituição mineralógica do solo, na qual a presença de argilominerais do grupo das esmectitas — que possuem estrutura cristalina 2:1 — permite a intercalação de moléculas de água entre suas camadas, ocasionando processos pronunciados de expansão e retração durante ciclos de umedecimento e secagem. Na região de Pelotas/RS, a ocorrência desses solos é significativa, demandando métodos de estabilização que assegurem a integridade estrutural de pavimentos e fundações.

Historicamente, a estabilização química com cal tem sido a solução técnica predominante, especialmente em solos tropicais e subtropicais. De acordo com Nogami e Villibor (2024), a aplicação de cal promove modificações microestruturais imediatas, como floculação e troca catiônica, seguidas por reações pozolânicas de longo prazo que aumentam a coesão e reduzem a plasticidade do sistema solo-aditivo. Contudo, embora a eficácia da cal no controle de solos expansivos seja amplamente documentada na literatura (Al-Rawas et al., 2023), o impacto ambiental associado à sua produção industrial e a crescente demanda por práticas de economia circular têm impulsionado a investigação de materiais alternativos.

Nesse contexto, a utilização de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) surge como alternativa para o gerenciamento de passivos ambientais urbanos, com estudos indicando sua viabilidade em aplicações geotécnicas (Farias et al., 2023). Entretanto, sua efetividade como agente estabilizante primário em solos de granulometria fina ainda apresenta limitações devido à sua natureza predominantemente inerte e à forte dependência granulométrica (Kianimehr et al., 2019).

Concomitantemente, o reforço de solos com fibras naturais apresenta uma fronteira inovadora e sustentável. Estudos como os de Hejazi et al. (2012) e Gowthaman et al. (2018) sugerem que a inclusão de fibras melhora significativamente a resistência ao cisalhamento e controla a propagação de fissuras por dessecação, atuando como uma rede de ancoragem mecânica que restringe o movimento das partículas

argilosas. No cenário local, o uso de fibra de Butiá surge como proposta para valorizar a biodiversidade regional, buscando alinhar desempenho técnico à disponibilidade de biopolímeros naturais, conforme explorado preliminarmente por Tins et al. (2025).

Este capítulo propõe uma análise comparativa inédita, utilizando o método MCT (Miniatura Compactada Tropical) para avaliar a eficiência de três abordagens distintas: o método industrial consolidado (cal), o reaproveitamento de RCD e a aplicação de biopolímeros naturais (fibra de Butiá). O objetivo é quantificar parâmetros de penetração hídrica e contração diametral, discutindo o potencial de substituição ou complementação de materiais convencionais por alternativas de baixo impacto ambiental.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 NATUREZA E COMPORTAMENTO DOS SOLOS EXPANSIVOS

A natureza problemática dos solos expansivos está intrinsecamente associada à sua composição mineralógica, especificamente à presença de argilominerais do grupo das esmectitas. Esses minerais são caracterizados por uma estrutura cristalina 2:1, composta por duas lâminas tetraédricas de sílica envolvendo uma lâmina octaédrica de alumínio. Segundo Grim (1968) e Mitchell & Soga (2005), essa configuração resulta em ligações interlaminares fracas, mantidas por forças de Van der Waals, e em um balanço de cargas deficiente. Isso permite que moléculas de água penetrem facilmente nos espaços interlaminares, causando expansão volumétrica significativa.

Do ponto de vista geotécnico, esse comportamento traduz-se em elevada suscetibilidade à variação volumétrica em resposta a oscilações no teor de umidade. Quando saturados, esses solos apresentam redução drástica da resistência ao cisalhamento e aumento significativo da erodibilidade (Das, 2014). Por outro lado, o processo de dessecação leva à intensa retração do material, resultando em macrofissuras que propagam falhas estruturais e comprometem a estabilidade de obras civis, como fundações rasas e pavimentos (Al-Rawas & Goosen, 2006).

Na região de Pelotas/RS, particularmente em áreas como o bairro Quartier, esses solos são classificados como solódicos e apresentam textura argilosa predominantemente não laterítica. A análise desses materiais por meio do método MCT e de ensaios em pastilhas confirma um comportamento altamente expansivo, tornando a estabilização uma etapa obrigatória para viabilizar sua aplicação em engenharia. Segundo Calegari et al. (2024), o uso de agentes de reforço associados a estabilizantes químicos ou físicos tem sido explorado na região como solução viável para mitigar danos estruturais causados por essas formações geológicas locais.

2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA (CAL) E FÍSICA (RCD)

A utilização de aditivos para a melhoria de solos expansivos tem como principal objetivo alterar a afinidade dos argilominerais pela água ou modificar a estrutura da matriz porosa, a fim de aumentar sua resistência mecânica.

A estabilização por métodos químicos é historicamente consolidada, sendo a cal reconhecida como um dos agentes químicos mais eficazes para solos ricos em esmectitas. Conforme detalhado por Sherwood (1993), o processo ocorre em duas etapas consecutivas: inicialmente, a rápida troca catiônica e a floculação reduzem a espessura da dupla camada difusa, diminuindo imediatamente a plasticidade do solo e melhorando sua funcionabilidade. Posteriormente, ocorrem reações pozolânicas de longo prazo, nas quais o pH elevado induz a dissolução da sílica e da alumina amorfas presentes no solo, que reagem com o cálcio livre para formar silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H e C-A-H). Esses compostos cimentantes unem as partículas argilosas, garantindo estabilidade dimensional em longo prazo (Nogami & Villibor, 2024).

Diferentemente da cal, os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) atuam predominantemente por mecanismos físicos de estabilização granulométrica. Quando incorporado ao solo, o RCD funciona como um esqueleto granular rígido que auxilia no preenchimento de vazios e reduz proporcionalmente o teor de finos ativos (expansivos) na mistura total (Arulrajah et al., 2014). Entretanto, sua efetividade técnica isolada é altamente dependente da distribuição granulométrica e da composição mineralógica do resíduo, apresentando severas limitações como estabilizante primário quando não acompanhado por reações químicas complementares ou por esforço de compactação que sele efetivamente os caminhos preferenciais de percolação da água (Mohammadinia et al., 2016). A análise comparativa desses métodos permite compreender o equilíbrio entre o desempenho técnico superior da cal e o potencial ecológico do RCD no âmbito da economia circular.

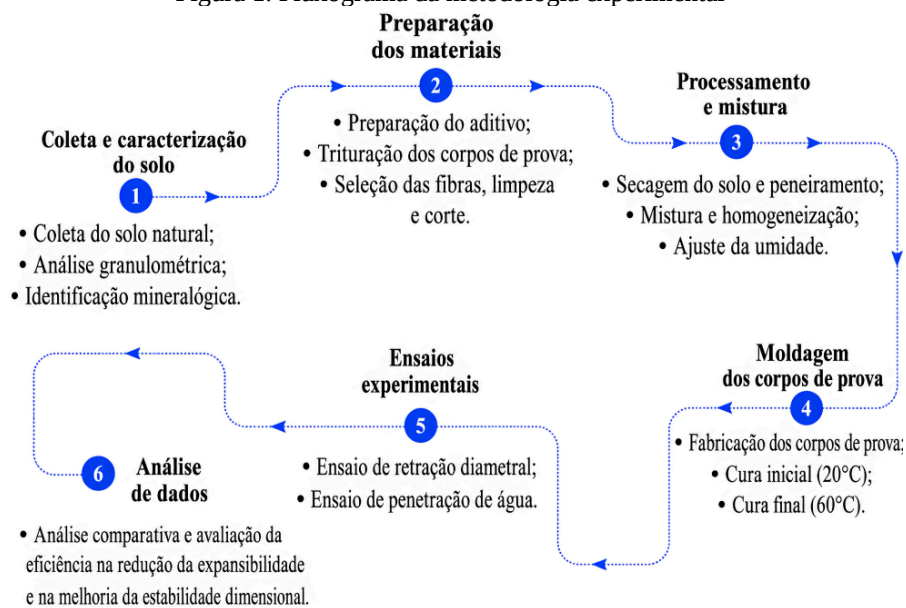
2.3 REFORÇO MECÂNICO COM FIBRAS NATURAIS

A inclusão de fibras naturais em solos expansivos introduz um mecanismo de estabilização essencialmente físico-mecânico, frequentemente descrito na literatura como uma ponte de transferência de tensões (Tang et al., 2007). Quando distribuídas aleatoriamente pela massa de solo, as fibras atuam como elementos tridimensionais de reforço que interceptam planos de ruptura e frentes de expansão volumétrica. A eficiência desse sistema depende fortemente da qualidade da interface solo-fibra, na qual o atrito superficial, a rugosidade dos filamentos e a adesão mecânica entre os componentes governam a transferência de tensões da matriz argilosa para o elemento de reforço (Gowthaman et al., 2018).

Consequentemente, quando o solo inicia o processo de expansão devido à absorção de água, as fibras são submetidas a tensões de tração, gerando uma pressão confinante local que restringe o movimento das partículas de esmectita e reduz a magnitude global da expansão. Complementarmente, durante a perda de umidade, essas fibras atuam como grampos ou pontes que costuram as bordas das microfissuras em formação. Esse mecanismo impede que as tensões de tração geradas pela dessecação evoluam para fissuras macroscópicas, preservando, assim, a continuidade e a integridade estrutural da massa de solo. Conforme destacado por Hejazi et al. (2012), a principal vantagem desse método reside na capacidade das fibras de converter o comportamento frágil e instável do solo argiloso em um comportamento marcadamente dúctil, aumentando consideravelmente a resistência ao cisalhamento e a estabilidade dimensional sem depender exclusivamente de reações químicas.

3 METODOLOGIA

Figura 1. Fluxograma da metodologia experimental



Fonte: Autor (2026)

O delineamento experimental deste estudo foi estruturado para permitir uma comparação direta entre diferentes métodos de estabilização, com base no método MCT para avaliação de solos tropicais e subtropicais. A pesquisa seguiu uma sequência lógica que incluiu desde a caracterização granulométrica e mineralógica do solo natural até os ensaios de desempenho das misturas com aditivos industriais, reciclados e naturais, conforme previamente apresentado na Figura 1.

3.1 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO

O solo utilizado foi coletado no bairro Quartier, em Pelotas/RS, e identificado como solo solódico, com textura argilosa e comportamento altamente expansivo devido à presença de esmectitas. Para modificar seu comportamento geotécnico, foram selecionados três agentes de naturezas distintas:

- a) Cal hidratada: representando o método industrial consolidado, aplicada nos teores de 3% e 6%.
- b) Resíduos de Construção e Demolição (RCD): material proveniente da britagem de concreto e argamassa, também testado nas proporções de 3% e 6%.
- c) Fibras de Butiá (FB): representando a alternativa natural e sustentável. As fibras, passantes na peneira de 1,19 mm, foram processadas e incorporadas à matriz do solo nos teores de 1,0%, 2,5% e 5,0% em relação à massa seca do solo.

Para as misturas contendo fibras, o cronograma experimental previu períodos de cura de 7 e 28 dias, permitindo observar a influência do tempo na interação entre os filamentos naturais e a matriz argilosa, especialmente no que se refere à estabilidade dimensional e à resistência à penetração de água.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O rigor experimental seguiu uma sequência cronológica dividida em seis etapas fundamentais, com base em adaptações do método MCT (Miniatura Compactada Tropical) para ensaios expeditos em pastilhas. Inicialmente, o solo natural foi coletado na camada superficial (0,00 a 0,50 m) no bairro Quartier, em Pelotas/RS. O solo foi submetido à caracterização geotécnica inicial, incluindo análise granulométrica por sedimentação e peneiramento (conforme normas técnicas vigentes) e identificação mineralógica qualitativa, confirmando a predominância de argilominerais ativos do tipo esmectita.

Na etapa de preparação dos materiais, corpos de prova residuais de laboratório (concreto e argamassa) foram britados em britador de mandíbulas e quarteados para obtenção de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em frações finas. Paralelamente, as fibras de Butiá (FB) foram lavadas em água destilada para remoção de impurezas orgânicas superficiais, secas ao ar e cortadas uniformemente com auxílio de lâminas, sendo posteriormente selecionadas por passagem integral na peneira de 1,19 mm (malha nº 16).

O processamento subsequente consistiu na pré-secagem do solo natural em estufa termostaticamente controlada a 60°C até massa constante, seguida de destorroamento e peneiramento completo na malha nº 200 (0,075 mm). Em seguida, os aditivos foram pesados e dosados manualmente em relação à massa seca do solo, homogeneizando-se as misturas a seco. O ajuste da umidade ótima foi realizado gradualmente com água destilada até que a matriz atingisse uma consistência plástica padronizada, cuja homogeneidade foi

controlada por meio de ensaio de penetração adaptado, utilizando a queda livre de uma agulha padrão de 1 mm sob peso constante.

A moldagem das amostras foi executada por compactação estática da massa úmida no interior de anéis rígidos de PVC com dimensões nominais de 21 mm de diâmetro e 5 mm de espessura, garantindo a repetibilidade da massa específica aparente seca dos corpos de prova. O processo de cura estruturado ocorreu em duas frentes: todas as amostras foram submetidas a uma cura inicial em câmara úmida por 24 horas, a temperatura controlada de 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$), seguida de dessecação induzida em estufa a 60°C por um período de 4 horas para promover a estabilização inicial da água. Para as séries aditivadas com fibras de Butiá, os períodos de cura em ambiente protegido foram estendidos para 7 e 28 dias antes do processo de dessecação terminal, permitindo o monitoramento temporal da adesão na interface solo-fibra.

Os ensaios experimentais definitivos avaliaram dois parâmetros macroscópicos de degradação: contração diametral e resistência à penetração de água. A contração diametral foi quantificada imediatamente após a retirada da estufa, utilizando um paquímetro mecânico manual (precisão de 0,05 mm) ajustado para realizar leituras em três eixos ortogonais previamente marcados nas pastilhas, obtendo-se a média aritmética das deformações. Por fim, o ensaio de penetração de água consistiu na imersão parcial das pastilhas secas em cubetas preenchidas com água destilada. A resistência à penetração e a evolução do amolecimento do material foram quantificadas por meio de um penetrômetro manual equipado com relógio comparador. O equipamento foi posicionado perpendicularmente à superfície superior de cada pastilha, aplicando-se o curso da agulha padrão para registrar a profundidade de penetração (em milímetros) em intervalos rigorosos de 5, 15 e 30 minutos, seguidos de leituras de controle em 2 e 24 horas. Os dados coletados foram tabulados para a consolidação de uma análise estatística comparativa voltada à eficiência de cada agente estabilizante.

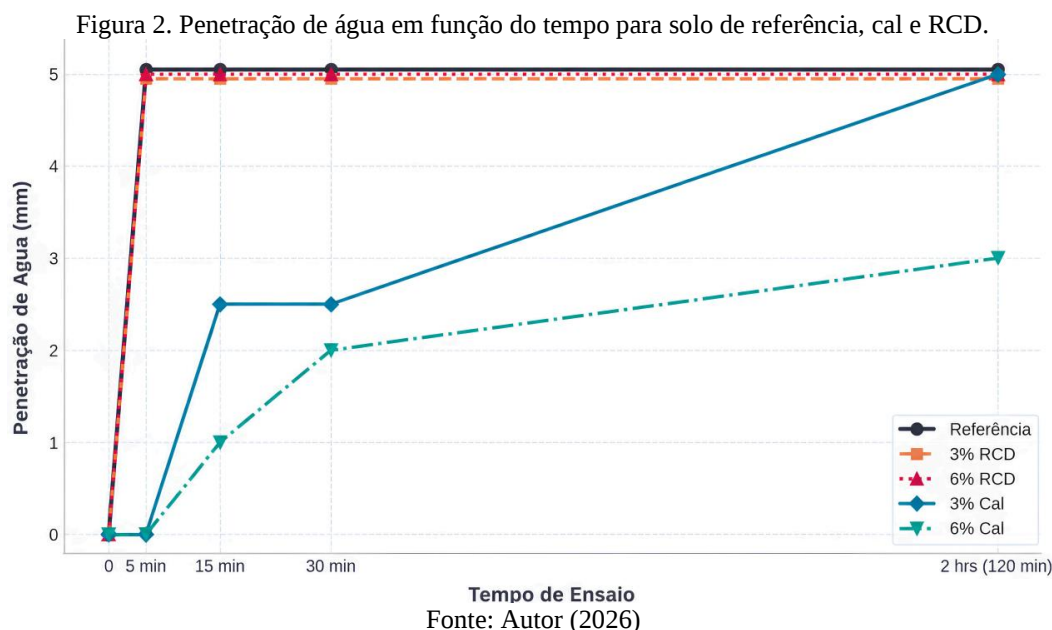
4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

4.1 EFICIÊNCIA NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE ÁGUA

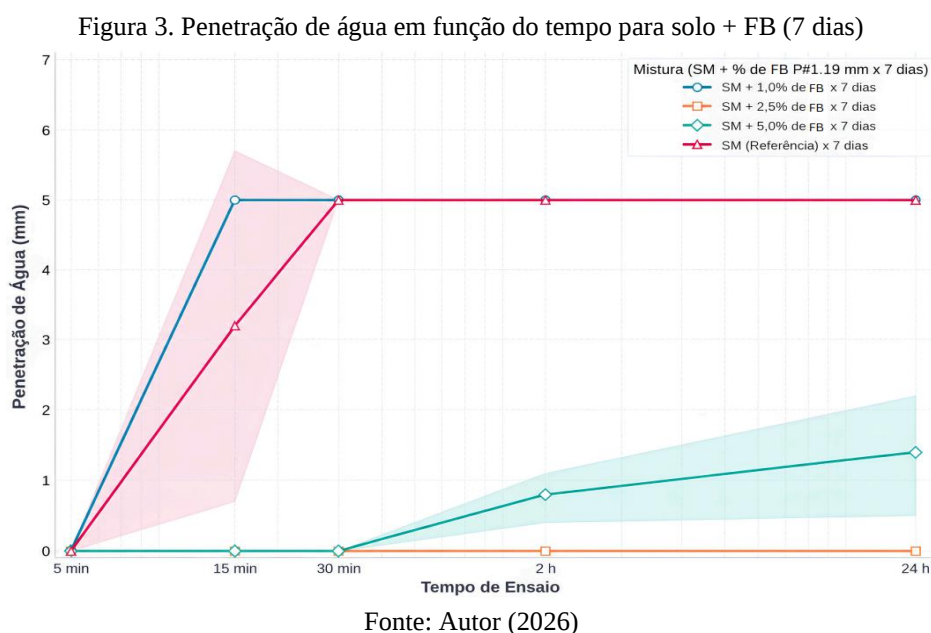
A análise da penetração de água permite avaliar a capacidade dos agentes estabilizantes de modificar a rede de poros do solo e reduzir sua afinidade pela água, fator crítico para o controle da expansividade. Os resultados obtidos revelam contrastes significativos entre as abordagens química, física e mecânica.

No que se refere aos métodos convencionais e de reciclagem, os corpos de prova tratados com Resíduos de Construção e Demolição (RCD) apresentaram baixa capacidade de retardar o avanço da frente de umedecimento, atingindo a penetração máxima de 5 mm nos primeiros 5 minutos de ensaio. Esse comportamento evidencia que o RCD, em sua forma inerte, não promoveu selamento efetivo dos poros. Em contrapartida, conforme observado na Figura 2, a eficiência consolidada da cal é evidente no retardamento da saturação completa até o intervalo de 2 horas, especialmente no teor de 6%, no qual o

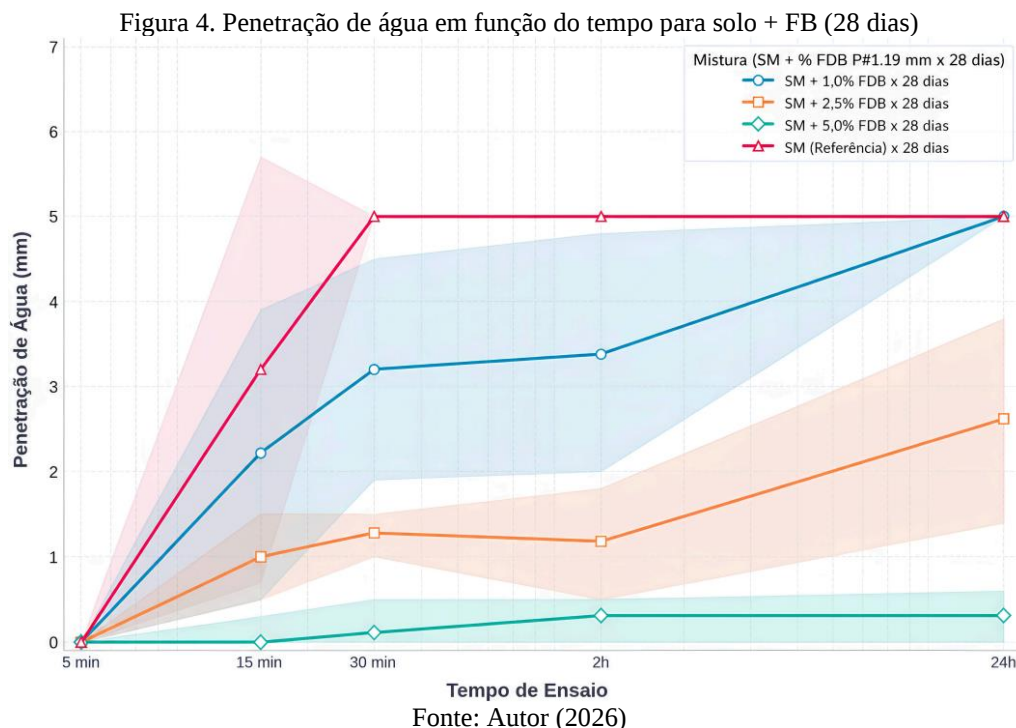
amolecimento e a profundidade de penetração progrediram gradualmente em função das reações pozolânicas e da modificação estrutural da matriz argilosa.



A introdução de fibras de Butiá (FB) apresentou resultados que variam substancialmente de acordo com o teor e o tempo de cura, conforme mostrado na Figura 3. Aos 7 dias de cura, as misturas com 1,0% e 2,5% de FB apresentaram rápida saturação, atingindo 5 mm entre 15 e 30 minutos, desempenho semelhante ao do solo de referência. Entretanto, o teor de 5,0% de FB aos 7 dias já demonstrou melhora notável, mantendo a penetração abaixo de 2 mm mesmo após 24 horas de imersão.



O desenvolvimento mais significativo ocorreu aos 28 dias de cura. Nessa etapa, observou-se que a rede com 5,0% de FB praticamente impediu a infiltração hídrica severa, mantendo a penetração próxima de zero durante todo o ensaio (Figura 4).



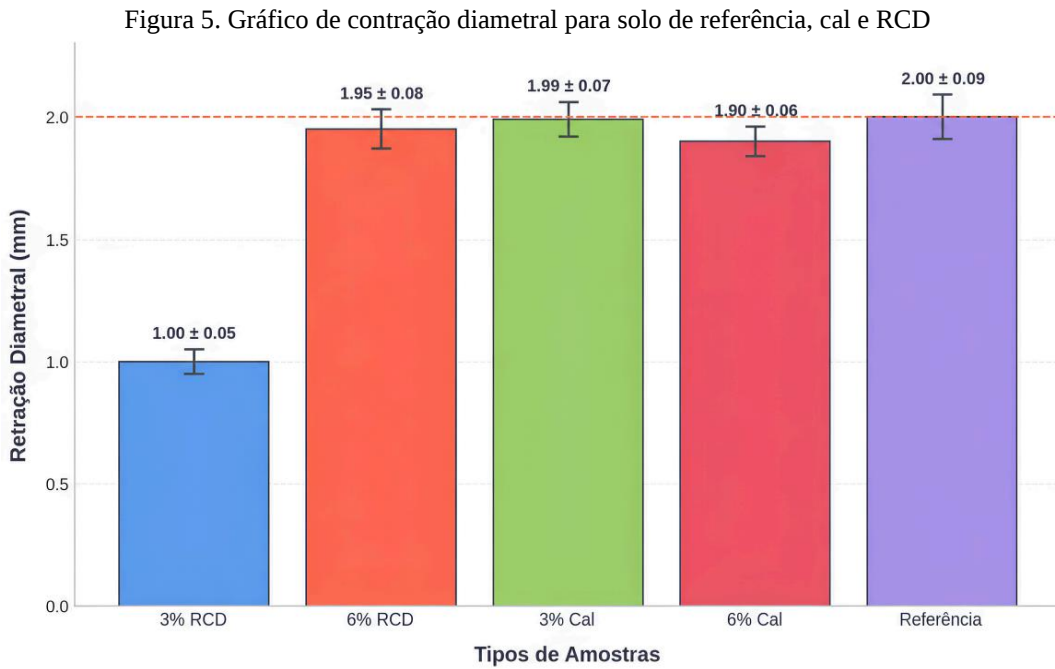
Mesmo os teores mais baixos (1,0% e 2,5%) apresentaram maior retardamento em comparação ao observado aos 7 dias, sugerindo que o tempo de interação entre as fibras e a matriz do solo favorece a estabilidade do sistema. Isso indica que o mecanismo de ponte de transferência de tensões das fibras não apenas proporciona reforço mecânico, mas também auxilia na manutenção da integridade dos corpos de prova, dificultando caminhos preferenciais de fluxo de água.

4.2 ESTABILIDADE DIMENSIONAL E CONTRAÇÃO DIAMETRAL

A contração diametral é um indicador direto da sensibilidade do solo à dessecação. Enquanto a penetração de água mede a resistência à entrada de água, a contração avalia a integridade estrutural quando o solo perde umidade, permitindo diferenciar de forma expedita a efetividade de cada agente estabilizante.

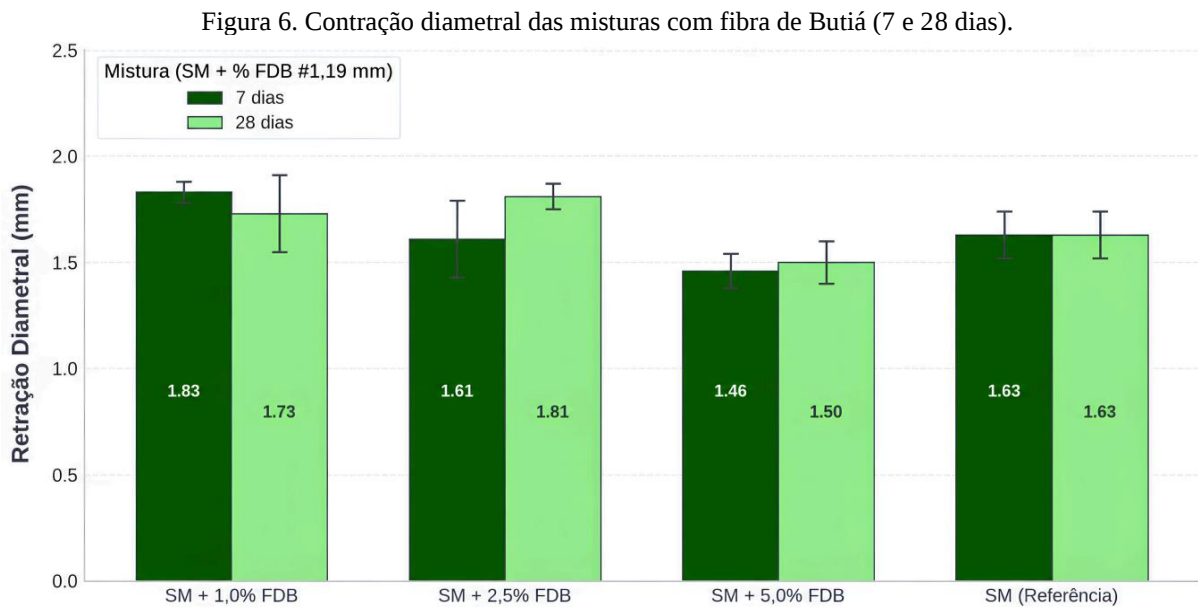
Ao analisar os métodos convencionais e reciclados, observa-se que o solo de referência apresenta contração média de 2,00 mm. A adição de 6% de cal resultou em uma redução discreta para 1,90 mm, valor que, embora indique melhoria, demonstra que a estabilização química isolada ainda permite movimento volumétrico significativo sob condições severas de secagem. Curiosamente, o uso de 3% de RCD apresentou o menor valor de contração entre os métodos minerais (Figura 5), o que sugere que a presença

de agregados reciclados mais grossos pode atuar como um esqueleto físico que restringe a retração da massa argilosa, embora, como visto anteriormente, não impeça a infiltração de água.



Fonte: Autor (2026)

A introdução da fibra de Butiá conferiu uma nova dinâmica à estabilidade dimensional do sistema. Diferentemente da cal, que atua sobre a química mineral, as fibras atuam por meio de ancoragem mecânica. Para as amostras com FB, os resultados de contração variaram entre 1,46 mm e 1,83 mm (Figura 6).



Fonte: Autor (2026)

O melhor desempenho foi observado no teor de 5,0% aos 7 dias de cura (1,46 mm), indicando que uma maior densidade de fibras na matriz é capaz de “costurar” o solo de maneira mais eficiente, reduzindo a contração global em comparação ao solo natural.

Destaca-se a manutenção dessa estabilidade aos 28 dias. Mesmo com a variação natural esperada em materiais orgânicos, os valores permaneceram consistentes (em torno de 1,50 mm para o teor de 5,0%), confirmando que a rede de fibras de Butiá oferece restrição física permanente contra as tensões de tração geradas pela perda de água. Essa capacidade de manter a pastilha íntegra, com menor redução de diâmetro, complementa o excelente desempenho hidráulico observado anteriormente, posicionando a fibra natural como um agente de reforço multidimensional.

Para sintetizar os achados deste estudo, a Figura 7 apresenta uma análise comparativa da eficiência relativa de cada aditivo.

Figura 7 – Infográfico de desempenho relativo



Fonte: Autor (2026)

Evidencia-se que, enquanto a cal e as fibras de Butiá predominam na proteção contra o avanço da frente de umedecimento, o RCD e as fibras compartilham protagonismo na restrição física da contração diametral. Essa visão integrada reforça que a fibra de Butiá atua como um agente híbrido, oferecendo benefícios que combinam o melhor da estabilização química e física.

5 DISCUSSÃO E RESULTADOS

A investigação comparativa entre diferentes agentes estabilizantes permitiu uma visão clara da eficiência técnica e do potencial sustentável de cada abordagem na mitigação da expansividade do solo na região de Pelotas/RS. Os resultados obtidos consolidam o entendimento de que a escolha do material estabilizante deve equilibrar desempenho mecânico, resistência à água e impacto ambiental do projeto.

A estabilização química com cal confirmou sua eficácia histórica, apresentando retardamento significativo da frente de umedecimento e melhoria na estabilidade dimensional, resultantes de profundas modificações microestruturais. Em contraste, o uso isolado de RCD demonstrou severas limitações como estabilizante primário, especialmente no controle da infiltração de água, embora tenha apresentado comportamento interessante na restrição da contração física devido ao seu efeito de preenchimento granular.

A principal inovação deste estudo, o uso de fibra de Butiá, posicionou os materiais naturais como uma alternativa de alto desempenho e baixo impacto. Os dados experimentais revelaram que, com teor de 5,0% e período de cura de 28 dias, a rede de fibras naturais foi capaz de superar o desempenho da cal quanto ao bloqueio da penetração de água, mantendo a integridade dos corpos de prova por períodos superiores a 24 horas. Esse comportamento demonstra que a ponte de transferência de tensões, efeito mecânico das fibras, não apenas reforça a matriz do solo contra fissuras de retração, mas também cria uma barreira física eficiente contra o avanço da frente de umedecimento.

Em síntese, este capítulo destaca que a transição de métodos industrializados para soluções baseadas na biodiversidade regional, como as fibras de Butiá, é tecnicamente viável e promissora. Para futuras aplicações em grande escala, recomenda-se estudar a durabilidade biológica dessas fibras no solo em longo prazo, consolidando o uso de materiais sustentáveis como pilar estratégico para a infraestrutura geotécnica contemporânea.

REFERÊNCIAS

AL-RAWAS, A. A.; GOOSEN, M. F. A. **Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment**. 1st ed. London: Taylor & Francis, 2006.

AL-RAWAS, A. A.; AL-SHANFARI, H. M.; AL-SALMI, S. H. Effect of lime stabilization on the properties of expansive soils. **Engineering Geology**, vol. 313, p. 106985, 2023.

ARULRAJAH, A. et al. Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. **Construction and Building Materials**, vol. 58, pp. 245-257, 2014.

CALEGARO, M. L.; FERREIRA, S. R. M.; CALEGARO, L. L. Aramid fibers as physical reinforcement agents in an expansive soil. In: **Innovations and Challenges in Engineering: Technology, Sustainability and Society**. vol. 1. Pelotas: Aurum Publicações, 2024 (Translated title).

DAS, B. M. **Fundamentals of Geotechnical Engineering**. 4th ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2014.

FARIAS, R. S. et al. Use of construction and demolition waste as a stabilizing material in clayey soils. **IBRACON Structures and Materials Journal**, vol. 16, no. 2, pp. 1–14, 2023 (Translated title).

GOWTHAMAN, S. et al. A comprehensive review on the applications of natural fibers in geotechnical engineering. **Journal of Cleaner Production**, vol. 177, pp. 1-22, 2018.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1968.

HEJAZI, S. M. et al. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials**, vol. 30, pp. 100-116, 2012.

KIANIMEHR, M. et al. Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils. **Construction and Building Materials**, vol. 227, p. 116792, 2019.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.

MOHAMMADINIA, A. et al. Stabilization of demolition materials for pavement base/subbase applications using fly ash and slag geopolymers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 28, no. 7, p. 04016033, 2016.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Low-cost paving with lateritic soils**. 3rd ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2024 (Translated title).

SANTOS, J. T. dos et al. Evaluation of mechanical properties of an expansive soil additived with Kraft lignin. In: **Engineering: productivity and technological innovation 5**. Ch. 7, pp. 77–85. Pelotas: Atena Editora, 2025 (Translated title).

SHERWOOD, P. T. **Soil stabilization with lime and cement**. London: Transport Research Laboratory, HMSO, 1993.

TANG, C. et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced clayey soil. **Geotextiles and Geomembranes**, vol. 25, no. 3, pp. 194-202, 2007.

TINS, E. S. et al. **Comparative efficiency of lime and construction waste in expansive soil stabilization using the MCT method**. Pelotas: UFPel, 2026 (Translated title).