XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/120

Uso de Biopolímeros em Camadas de Solos para Impermeabilização de Base de Aterros Sanitários

Kellyane Miranda de Sousa
Graduanda, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, kellyanemsousa@alu.ufc.br

Luiz Gustavo Ribeiro Alves
Graduando, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, luiz.gustavo.ribeiro.alves@gmail.com

Maressa Oliveira Martins
Graduanda, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, maressamartins@alu.ufc.br

Amanda Torres Martins
Graduanda, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, amandatorresm@alu.ufc.br

Thiago Fernandes da Silva
Professor, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, thiagofernandes@crateus.ufc.br

RESUMO: O uso de biopolímeros em camadas de solos compactados tem emergido como alternativa sustentável para impermeabilização de base de aterros sanitários. Este estudo discute criticamente o desempenho geotécnico de solos tratados com biopolímeros, com ênfase em consistência, compactação, resistência ao cisalhamento, permeabilidade e retenção de água. Evidências experimentais indicam que a formação de uma matriz gelificada ao redor das partículas promove agregação estrutural, redução do índice de vazios e diminuição da condutividade hidráulica. Observam-se ganhos significativos de coesão, além de aumento da capacidade de retenção de água, contribuindo para maior estabilidade frente a ciclos de umedecimento e secagem. A incorporação de biopolímeros também pode alterar parâmetros de compactação, influenciando a umidade ótima e a massa específica seca máxima. Apesar dos resultados promissores, aspectos relacionados à durabilidade, biodegradação, interação com contaminantes e desempenho sob variações térmicas ainda demandam investigação. No contexto das mudanças climáticas, tais materiais apresentam potencial para aumentar a resiliência de barreiras hidráulicas. Conclui-se que os biopolímeros constituem alternativa tecnicamente viável e ambientalmente estratégica, desde que incorporados a práticas de projeto fundamentadas em avaliação de desempenho a longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE: Camada de Base, Biopolímeros, Liners, Permeabilidade.

ABSTRACT: The use of biopolymers in compacted soil layers has emerged as a sustainable alternative for waterproofing the base of landfills. This study critically discusses the geotechnical performance of soils treated with biopolymers, with emphasis on consistency, compaction, shear strength, permeability, and water retention. Experimental evidence indicates that the formation of a gelled matrix around the particles promotes structural aggregation, reduces the void ratio, and decreases hydraulic conductivity. Significant gains in cohesion are observed, as well as an increase in water retention capacity, contributing to greater stability against wetting and drying cycles. The incorporation of biopolymers can also alter compaction parameters, influencing the optimum moisture content and maximum dry specific gravity. Despite the promising results, aspects related to durability, biodegradation, interaction with contaminants, and performance under thermal variations still require investigation. In the context of climate change, such materials show potential to increase the resilience of hydraulic barriers. It is concluded that biopolymers constitute a technically viable and environmentally strategic alternative, provided they are incorporated into design practices based on long-term performance evaluation.

KEYWORDS: Base layer, Biopolymers, Liners, Permeability.

1 INTRODUÇÃO

A impermeabilização de base constitui um dos principais elementos em obras de aterros sanitários. A infiltração de lixiviado através dessa camada pode provocar a contaminação do subsolo e dos recursos hídricos adjacentes, resultando em impactos ambientais significativos e elevados custos de remediação. Entre as soluções técnicas mais adotadas destaca-se a execução de uma camada de solo de baixa permeabilidade, geralmente associada a uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD). Esse solo deve ser devidamente compactado, de modo a atingir coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-7} cm.s^{-1}, além de apresentar compatibilidade química com o lixiviado (Boscov, 2008).

Em diversas regiões, entretanto, a disponibilidade de jazidas com solos naturalmente adequados é limitada. Diante desse cenário, têm sido empregadas técnicas de melhoria de solos locais com o objetivo de reduzir a permeabilidade da camada de base. O uso de bentonita é uma solução amplamente consolidada (Middelhoff *et al.,* 2020), devido à sua elevada capacidade de expansão e baixa condutividade hidráulica. Contudo, a ocorrência restrita dessa argila expansiva, concentrada em regiões específicas, pode elevar significativamente os custos de aquisição e transporte.

Nesse contexto, alternativas sustentáveis vêm sendo investigadas, entre elas o uso de biopolímeros. Esses materiais são constituídos por cadeias monoméricas obtidas a partir de fontes naturais, como microrganismos, resíduos vegetais e animais (Kumar *et al*., 2025). Tratam-se de materiais renováveis, com potencial de neutralidade de carbono e menor impacto ambiental (Dagliya *et al*., 2023). Recentemente, os biopolímeros têm sido aplicados na engenharia geotécnica em função de sua capacidade de formação de gel e da modificação das propriedades hidromecânicas dos solos (Chang *et al.*, 2020; Shalchian *et al.*, 2025).

Em aterros sanitários, a incorporação de biopolímeros pode contribuir para a melhoria das propriedades geotécnicas de solos locais, viabilizando sua aplicação em camadas de base e cobertura, além de auxiliar no controle da erosão superficial. Tal abordagem pode reduzir custos associados à aquisição e transporte de materiais e ampliar a viabilidade técnica e ambiental desses empreendimentos.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar o uso de biopolímeros em camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários, identificando os principais materiais empregados, analisando seus efeitos nas propriedades geotécnicas dos solos e discutindo desafios e limitações associados à sua aplicação.

2 CONTEXTO TÉCNICO E NORMATIVO DE CAMADAS DE BASE

A camada de base configura-se como um dos principais componentes dos aterros sanitários, cuja finalidade principal é impedir a migração de contaminantes para a zona não saturada e para os aquíferos subjacentes (Boscov, 2008). Sendo assim, em aterros sanitários, a camada de base - também denominada *liner* - utilizada como barreira de impermeabilização, tem a função de evitar a movimentação de contaminantes para o meio ambiente.

Estes revestimentos de base podem ser compostos de diversas maneiras, a depender do tipo de resíduo aterrado e da segurança ambiental requerida. Os sistemas simples consistem em uma barreira única, sendo mineral ou sintética. Os sistemas compostos associam dois tipos de proteção de natureza diferentes, podendo ser uma camada de argila compactada sobreposta por uma geomembrana, por exemplo. Já os sistemas duplos são compostos de duas barreiras independentes com mecanismos de drenagem intermediários para detecção de vazamentos (Sarsby, 2013).

Segundo Boscov (2008), a maioria dos países utiliza sistemas compostos na base. A barreira primária trata-se de uma geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) seguida por uma camadas de argila compactada (*Compacted Clay Liners – CCL*) de espessura variável. O uso da *CCL* se justifica devido à sua baixa permeabilidade ($k \leq 10^{-7}$ cm.s^{-1}) e elevada capacidade de atenuação de metais pesados, caso haja qualquer acidente na camada primária.

Tradicionalmente, a construção de barreiras minerais fundamenta-se no emprego de solos argilosos compactados ou misturas de solo-bentonita, visando o preenchimento de vazios e a redução da porosidade da matriz. Contudo, a escassez de materiais naturais adequados e a necessidade de soluções sustentáveis têm impulsionado a investigação de biopolímeros, como a goma xantana e a goma guar, que atuam na estabilização

da estrutura do solo e no selamento de poros por meio da formação de hidrogéis, viabilizando o uso de solos locais para o atendimento das exigências normativas e bom desempenho.

3 BIOPOLÍMEROS APLICADOS EM CAMADAS DE SOLOS

Os biopolímeros são grandes moléculas formadas por longas cadeias de polissacarídeos por meio da reação química de polimerização (Shalchian *et al*., 2025), podendo ser encontrados em espécies vivas, como plantas, árvores, animais e outros organismos vivos (Das *et al.*, 2023). De acordo com a forma de obtenção dos biopolímeros, eles podem ser classificados em dois grandes grupos: biopolímeros naturais e sintéticos (Das *et al*., 2023). Os biopolímeros mais conhecidos e utilizados em diversas aplicações são: goma xantana, goma guar, quitosana, caseína, goma gelana e carragenina (Liu *et al*., 2024).

A versatilidade dos polímeros naturais na engenharia permite que a sua aplicação abranja desde o reforço de fundações e estabilização de encostas até a implementação de sistemas de contenção ambiental. Tal desempenho fundamenta-se na capacidade destas macromoléculas em atuar como agentes aglutinantes sustentáveis, demonstrando eficácia superior em solos arenosos ou afetados por sais, onde biopolímeros à base de proteína elevam a resistência ao cisalhamento e mitigam os efeitos da salinidade que comprometem o cimento convencional (Babatunde *et al*., 2024). Sob a ótica geotécnica, a elevada viscosidade de polímeros como a goma xantana viabiliza a modificação de solos *in situ* pelo preenchimento do espaço poroso, o que reduz a permeabilidade para valores normativos e qualifica o material para uso como revestimento de base em aterros sanitários (Kumar *et al.,* 2022). Assim, a utilização destes materiais pode ser considerada como uma solução técnica e econômica para obras de infraestrutura que exigem vedação hidráulica e suporte mecânico sob condições químicas adversas (Babatunde et al., 2024).

Os mecanismos de interação dos biopolímeros nos solos encontrados na literatura se resumem em ligação iônica/hidrogênio e preenchimento de poros, apresentando a capacidade de formar uma matriz de gel estável dentro do solo (Pydi *et al*., 2024). Esse fenômeno é conhecido como biocimentação, quando a superfície das partículas do solo entram em contato com o biopolímero e um biogel é formado aderido às partículas, preenchendo os vazios do solo (Shalchian *et al*., 2025). Além disso, quanto maior for o grau de compactação, maior a redução dos poros disponíveis, visto que as cadeias do biopolímero podem interagir mais facilmente com as partículas (Ng *et al.,* 2020). Nesse sentido, pesquisas devem ser aplicadas para verificar a compatibilidade do biopolimero com o solo local e o líquido a ser contido.

4 EFEITO DOS BIOPOLÍMEROS EM ALGUMAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

4.1 Consistência

Com base em estudos dos efeitos dos biopolímeros incorporados no solo, existem alterações significativas nas propriedades fundamentais dos limites de consistência. Segundo Chang *et al.* (2020), a interação entre o biopolímero e a água intersticial, somada à ligação com a superfície das partículas de argila, aumenta a espessura da camada difusa dupla. Isso requer um teor de umidade maior para que a mistura vá do estado plástico para o líquido, elevando assim, o limite de liquidez (LL).

A magnitude desse aumento depende do biopolímero. Pydi *et al.* (2024) verificou que o incremento de 1,5% de goma xantana elevou o LL de um solo em mais de 50%, quando comparado ao solo não tratado. De acordo com Kumar *et al.* (2023) a aplicação de goma guar em teores de 0,5% a 2% sobre uma mistura areno-argilosa mal graduada resultou em um incremento de 1,4 a 2,5 vezes do LL em relação ao solo não tratado.

Diferente do LL, o limite de plasticidade (LP) exibiu um aumento gradual, variando de 20% para 27%, na dosagem máxima de 2% no mesmo estudo de Kumar *et al.* (2023). O índice de plasticidade demonstrou um acréscimo expressivo, sendo bastante influenciado pela variação do LL em função da dosagem.

Os resultados experimentais obtidos por Shaji *et al.* (2024) em um silte arenoso, demonstram que a incorporação da goma xantana promoveu um aumento progressivo no LL e no LP. O solo sem tratamento apresentou um LL de 48%, enquanto que para incrementos de goma xantana de 0,5 e 2%, foram obtidos os valores de LL de 65 e 86%, respectivamente. Adicionalmente, o valor do LP para dosagem de 2% foi de 41%, enquanto que o solo sem tratamento apresentou o valor de LP de 24%.

Os incrementos nos limites de consistência ocorrem devido à natureza hidrofílica dos biopolímeros e à sua capacidade de formar uma rede de hidrogel estável que preenche os vazios do solo. Conforme Kumar *et al.* (2023), a abundância de grupos hidroxila (OH) na goma guar facilita a formação de ligações de hidrogênio e a adsorção de cátions, aumentando a retenção de água na superfície das partículas.

Paralelamente, a goma xantana, por ser um polímero aniônico, interage com os cátions da superfície das argilas, criando uma matriz gelatinosa de alta viscosidade. Esse fenômeno, descrito por Shaji *et al.* (2024), promove a agregação das partículas e captura moléculas de água nos poros, elevando a plasticidade do solo tratado.

4.2 Compactação e resistência a compressão não confinada

Estudos relacionados aos efeitos de biopolímeros no estado de compactação dos solos indicam que o processo é influenciado pela formação de uma rede tridimensional de hidrogel nos vazios intergranulares. Nesse contexto, Ali *et al.* (2025) observaram que ocorreu um deslocamento significativo da curva de compactação Proctor normal ao adicionar 2% de pectina em um solo argiloso, elevando a umidade ótima de 15% para 17%, enquanto o peso específico seco máximo reduziu de 16,5 para 15,5 $kN.m^{-3}$. Apesar dessa redução na densidade, a coesão do solo aumentou de 100 para 348 kPa, com incremento de 1% de pectina e 28 dias de cura.

Cabalar *et al.* (2023) demonstraram que a inclusão de 5% de goma xantana elevou o Índice de Suporte Califórnia (CBR) de 38,2% para 73,3%, consolidando o potencial desses materiais em aplicações que demandam alta capacidade de suporte e baixa deformabilidade sob cargas cíclicas. Vale ressaltar que tal estabilização reflete em ganhos diretos de suporte para infraestrutura.

De forma análoga, Cheng e Geng (2023) verificaram que a incorporação de 1% de Alginato de Sódio (SA), um biopolímero derivado de algas marrons com alta capacidade gelificante, proporcionou um aumento de 4,11% na Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) da argila quando comparado ao solo natural em estado não tratado. Esse ganho de eficiência é atribuído à formação de uma matriz cimentante hidrofílica que estabiliza a estrutura do solo, otimizando seu desempenho mecânico. De modo similar, Kumar *et al.* (2023) encontraram ganhos de 74,78% de RCNC para amostras de areia e argila mal graduada incrementadas com 2% de goma guar (7 dias de cura).

Esse comportamento está associado, principalmente, à natureza hidrofílica das matrizes poliméricas que alteram a lubricidade entre os grãos e a retenção de água, resultando em altos incrementos de resistência sob condições ideais de hidratação (Ilman e Balkis, 2023). Vale ressaltar que o desenvolvimento dessas ligações promove modificações microestruturais que permitem mitigar os danos ambientais de aglutinantes tradicionais, uma vez que o envolvimento das partículas por ligações químicas fortes estabelece uma densificação superior à obtida apenas pelo rearranjo físico (Tasuji *et al.*, 2024).

A eficácia do tratamento é condicionada pela capacidade de gelificação do polímero na matriz do solo. Dessa forma, embora possam ocorrer alterações nos parâmetros de compactação, a consolidação de uma estrutura estável e menos deformável valida a estabilização biopolimérica e provê ganhos mecânicos, que podem superar as propriedades do solo compactado de forma convencional (Zhang *et al.,* 2024).

4.3 Permeabilidade

A permeabilidade é a principal característica geotécnica de camadas de solos compactados utilizadas como revestimento de base em aterros sanitários, que pode ser afetada com o incremento de biopolímeros. A maioria dos estudos experimentais têm mostrado que pequenas porcentagens de biopolímeros incrementadas em solos são capazes de reduzirem o coeficiente de permeabilidade (k) substancialmente, mantendo essa eficiência por, pelo menos, um ano com variações mínimas. Dehghan *et al.* (2018) verificaram que a aplicação de biopolímeros reduz tanto a densidade máxima seca quanto a permeabilidade do solo colapsável.

Shaji *et al.* (2024) observaram que a adição de 1,5% de goma xantana em um solo silte arenoso provocou uma redução no valor de k de $4{,}5.10^{-5}$ para $1{,}5.10^{-8}$ $cm.s^{-1}$. De forma similar, Tasuji *et.al.* (2024) identificou que o acréscimo de 0,32% de quitosana em um solo arenoso resultou na redução do coeficiente de condutividade hidráulica de $1{,}6 \times 10^{-6}$ para $5{,}7 \times 10^{-7}$ $m.s^{-1}$. Os autores sugerem que a adição deste biopolímero

tem a capacidade de aumentar a ligação entre as partículas e melhorar significativamente as propriedades mecânicas e hidráulicas de solos arenosos.

Zhang *et al*. (2024) observaram que a alta viscosidade de biopolímeros, como a goma xantana, promoveu uma selagem eficaz da rede porosa de um solo siltoso, reduzindo o coeficiente de permeabilidade de $2{,}29 \times 10^{-5}$ para $3{,}16 \times 10^{-7}$ cm.s^{-1} para um percentual de 0,5% de incremento da goma com 28 dias de cura. Esse efeito deriva da obstrução física e redução da conectividade dos poros, o que contribui diretamente para a durabilidade e resistência à erosão hídrica do material.

Kumar *et al.* (2023) obtiveram reduções no valor de *k* ainda mais abruptas. A adição de 2% de goma guar em uma areia argilosa mal graduada reduziu esse coeficiente de 1.10^{-3} para 1.10^{-7} cm.s^{-1} para amostras com 3 dias de cura. Esse valor pode ser ainda mais reduzido para tempos de cura de 56 e 120 dias, chegando a valores menores que 1.10^{-8} cm.s^{-1}.

No entanto, um estudo experimental demonstrou efeito adverso em relação à redução de *k*. Biju e Arnepalli (2020) e misturaram areia fina e bentonita acrescida de goma guar e de goma xantana em variados percentuais com mistura úmida. Os autores verificaram que houve ligeiro aumento no valor de k para todas as amostras, no entanto, ainda se enquadrando nos parâmetros normativos de *k*. Verificou-se que a adição de biopolímeros em contato com a bentonita induziu a agregação de plaquetas de argila, o que, por sua vez, ampliou os caminhos de fluxo das camadas. Então, deve-se ter atenção especial no estudo experimental levando em consideração a fração argilosa presente no solo.

4.4 Retenção de água

Estudos recentes sobre os efeitos de biopolímeros adicionados em solos têm apontado para alterações na capacidade de retenção de água. Hamza *et al.* (2023) avaliaram o comportamento de um solo argiloso de alta plasticidade incrementado com 1% de goma xantana. Esses autores verificaram que, após 12 ciclos de congelamento/descongelamento, a perda de umidade reduziu em 51% quando comparado ao solo não tratado.

Resultados semelhantes foram observados por Shalchian *et al.* (2025), que utilizaram quitosana reforçada com biochar de casca de arroz e fibra de cânhamo em uma mistura de 60% areia e 40% caulinita. Os autores investigaram a influência direta do aumento no teor de quitosana na capacidade de absorção de água da mistura e constataram um aumento significativo do teor de umidade ótimo (OMC), devido à característica hidrofílica do biopolímero. Assim, o OMC foi de 12,9% (solo puro) para 13,9%, 14,3% e 14,7% nas proporções de 1,5%, 3% e 4,5% de quitosana, respectivamente.

Esse efeito deriva, principalmente, da estrutura química dos biopolímeros, tais como goma guar e goma xantana, cuja área superficial específica moderada permite estabelecer ligações de hidrogênio com as moléculas de H_2O (Liu *et al*., 2023). Concomitantemente, o tipo de solo pode potencializar a capacidade de retenção de água na mistura por meio do desenvolvimento das ligações solo-biopolímero, visto que os grupos hidroxila dos biopolímeros são adsorvidos pelos cátions dos minerais presentes na superfície dos grãos do solo.

Tal observação é discutida no trabalho de Kumar *et al*. (2023), no qual concluíram que os mecanismos de interação da goma xantana com a areia e argila são, respectivamente, forças de van der Waals fracas e ligações de hidrogênio. Dessa forma, o comportamento observado acerca da retenção de água pode se diferenciar entre os tipos existentes de solo.

Nota-se, ainda, que as alterações na capacidade de retenção de água no solo podem ser analisadas indiretamente por outros índices mecânicos. Kumar *et al*. (2023), por exemplo, ao testar incrementos de goma guar de 0,5% e 2% em uma mistura areno-argilosa mal graduada, obtiveram aumentos de 1,44 e 4,40 vezes, respectivamente, no índice de compressão dos solos. Tal aumento pode ser explicado pela formação de hidrogéis dos biopolímeros, que leva ao aumento dos espaços vazios e à elevação da compressibilidade, à medida que se aumenta a dosagem de goma guar.

Portanto, a característica hidrofílica dos biopolímeros contribui para aumento na retenção de água no solo, que tem consequências práticas na coesão e na resistência do solo, tornando possível sua utilização em camada de base de estradas, taludes e aterros (Kumar *et al.,* 2025), bem como em solos de cultivo, ao melhorar a resiliência às mudanças climáticas em ambientes de clima seco (Liu *et al*., 2024).

4 DISCUSSÃO CRÍTICA

O incremento de biopolímeros em camadas de solos compactados tem se consolidado como uma alternativa promissora na geotecnia ambiental. Estudos recentes indicam melhorias significativas na consistência, na resistência ao cisalhamento, na redução da permeabilidade e no aumento da capacidade de retenção de água. Tais avanços estão associados à formação de uma matriz gelificada que envolve as partículas do solo, promovendo interações físico-químicas entre solo e biopolímero. Esse mecanismo favorece a agregação estrutural, a redução do índice de vazios e a obstrução de caminhos preferenciais de fluxo, contribuindo para o desempenho hidráulico da camada.

A durabilidade constitui um dos principais desafios técnicos. Por se tratar de materiais com elevada fração orgânica, os biopolímeros estão sujeitos à degradação biológica, especialmente em ambientes com elevada atividade microbiana, umidade e temperatura favoráveis. Esse processo pode comprometer a estabilidade estrutural do gel formado e, consequentemente, alterar as propriedades hidráulicas e mecânicas ao longo do tempo. Estratégias como a utilização de retardadores de atividade microbiana, o controle do teor de umidade, a modificação química e os processos de reticulação durante a preparação dos biopolímeros têm sido apontadas como alternativas para aumentar a resistência à biodegradação e ampliar a vida útil da camada impermeabilizante.

Outro aspecto determinante refere-se ao tempo de cura e ao método de incorporação do biopolímero (via seca ou via úmida). O processo de cura influencia diretamente a formação da rede polimérica e a interação com as partículas do solo. Resultados experimentais relatados por Ali *et al.* (2025) indicam que a coesão aumentou de aproximadamente 100 kPa, no solo natural, para até 348 kPa em amostras com 1% de pectina após 28 dias de cura, evidenciando o papel do tempo na consolidação das ligações estruturais. Esses dados reforçam que o desempenho não depende apenas da dosagem, mas também das condições de hidratação e da evolução microestrutural do material.

Adicionalmente, os efeitos da temperatura e da interação com contaminantes ainda são pouco explorados. Variações térmicas podem influenciar a viscosidade do gel e a estabilidade das ligações intermoleculares, enquanto a presença de lixiviados ricos em íons e compostos orgânicos pode alterar o comportamento físico-químico do biopolímero. Mohammadian *et al.* (2024) destacam que determinados biopolímeros apresentam elevada capacidade de adsorção de metais pesados, sugerindo que essas camadas podem desempenhar dupla função: atuar como barreira hidráulica e como meio reativo de retenção de contaminantes. Contudo, a saturação desses sítios ativos ao longo do tempo e seus efeitos na condutividade hidráulica ainda precisam ser melhor compreendidos.

Do ponto de vista econômico, Kumar *et al.* (2023) indicam que solos tratados com 2% de goma guar podem apresentar custos até 77% inferiores em comparação a revestimentos convencionais com bentonita. Essa diferença reforça o potencial competitivo dos biopolímeros, sobretudo em regiões onde não há disponibilidade de bentonita ou que apresente elevado custo de transporte.

No contexto das mudanças climáticas, o uso de biopolímeros em camadas de impermeabilização de base ganha relevância estratégica. Projeções climáticas indicam aumento na frequência de eventos extremos, como chuvas intensas e períodos prolongados de seca. Esses cenários impõem às barreiras hidráulicas maiores gradientes hidráulicos, ciclos mais severos de umedecimento e secagem e variações térmicas acentuadas.

Solos tratados com biopolímeros podem reduzir a suscetibilidade à fissuração por retração, fenômeno crítico em *liners* compactados submetidos a secas prolongadas. A mitigação de fissuras é essencial para evitar a formação de caminhos preferenciais de fluxo e o consequente aumento da percolação de lixiviados. Além disso, o aumento da resistência ao cisalhamento contribui para a estabilidade global do sistema de base, especialmente sob condições de saturação variável.

Sob a ótica da geotecnia ambiental, esses materiais se inserem em uma agenda de soluções de menor pegada de carbono, uma vez que podem reduzir a dependência de materiais industrializados de alta energia incorporada. Entretanto, práticas de projeto devem evoluir para incorporar análises de desempenho sob cenários climáticos diversos, incluindo ensaios de durabilidade acelerada, ciclos térmicos e hidráulicos, e avaliação da biodegradação ao longo do tempo.

5 CONCLUSÕES

Com base na análise do comportamento de solos tratados com biopolímeros para aplicação em camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários, podem-se estabelecer as seguintes conclusões:

- A incorporação de biopolímeros promove alterações relevantes nos limites de consistência, geralmente associadas ao aumento da plasticidade e da coesão aparente. A formação de uma matriz gelificada ao redor das partículas minerais contribui para maior estabilidade estrutural e menor dispersão das frações finas, favorecendo um comportamento mais homogêneo da camada compactada.
- A presença de biopolímeros influencia a curva de compactação, aumentando levemente a umidade ótima e reduzindo o peso específico seco máximo.
- O tratamento com biopolímeros resulta em ganhos expressivos de coesão, resultado da formação de pontes poliméricas entre partículas e ao reforço da estrutura do solo.
- Um dos principais benefícios observados é a redução da permeabilidade, fundamental para aplicação em sistemas de barreira, decorrente da obstrução dos poros e da diminuição da conectividade entre vazios.
- O aumento da capacidade de retenção de água contribui para maior estabilidade da camada frente a ciclos de umedecimento e secagem, reduzindo a suscetibilidade à retração e à formação de fissuras.

Os biopolímeros representam uma alternativa tecnicamente viável para melhoria de solos destinados à impermeabilização de base, promovendo avanços simultâneos em propriedades mecânicas e hidráulicas. Portanto, o avanço do uso de biopolímeros em camadas de impermeabilização não depende apenas da comprovação de ganhos imediatos de resistência e redução de permeabilidade, mas de considerações acerca da durabilidade, variabilidade ambiental e resiliência climática.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo incentivo para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, Z. S.; Fattah, M. Y.; Al-Gharbawi, A. S. A. (2025) Strength and Compressibility Characteristics of Clay Treated by Pectin Biopolymer. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, v. 5.

Babatunde, Q. O.; Kim, H. J.; Byun, Y. H. (2024) Shear strength improvement of sandy soils using zein biopolymer. *Results in Engineering*, v. 24, p. 102891.

Biju, M.S.; Arnepalli, D. N. (2020) Effect of biopolymers on permeability of sand-bentonite mixtures. *Journal of Rock Machanics and Geotechnical Engineering*, v. 12, p. 1093-1102.

Boscov, M. E. G. *Geotecnia ambiental*. Oficina de Textos, 2008.

Cabalar, A. F.; Akbulut, N.; Demir, S.; Yildiz, O. (2023) Use of a Biopolymer for Road Pavement Subgrade. *Sustainability*, v. 15 (10), p. 8231.

Chang, I.; Lee, M.; Tran, A. T. P.; Lee, S.; Kwon, Y. M.; Im, J.; Cho, G. C. (2020) Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. *Transportation Geotechnics*, v. 24.

Cheng, Z.; Geng, X. (2023) Investigation of unconfined compressive strength for biopolymer treated clay. *Construction and Building Materials*, v. 385, p. 131458.

Dagliya, M.; Satyam, N.; Garg, A. (2023) Desert sand stabilization using biopolymers: review. *Smart Construction and Sustainable Cities*, v. 1 (5).

Das, A.; Ringu, T.; Ghosh, S.; Pramanik, N. (2023) A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers. *Polymer Bulletin*, v. 80 (7), p. 7247–7312.

Dehghan, H.; Tabarsa, A.; Latifi, N.; Bagheri, Y. (2018) Use of xanthan and guar gums in soil strengthening. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 21, p. 155-165.

Hamza, M.; Nie, Z.; Aziz, M.; Ijaz, N.; Akram, O.; Fang, C.; Ghani, M. U.; Ijaz, Z.; Noshin, S.; Madni, M. F. (2023) Geotechnical behavior of high-plastic clays treated with biopolymer: macro–micro-study. *Environmental Earth Sciences*, v. 82 (3), p. 91.

Ilman, B.; Balkis, A. P. (2023) Sustainable biopolymer stabilized earthen: Utilization of chitosan biopolymer on mechanical, durability, and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*, v. 76, p. 107220.

Kumar, S. A.; Sujatha, E. R. (2022) Assessing the potential of xanthan gum to modify in-situ soil as baseliners for landfills. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 19, p. 10613–10624.

Kumar, S. A.; Sujatha, E. R.; Pugazhendi, A.; Jamal, M. T. (2023) Guar gum-stabilized soil: a clean, sustainable and economic alternative liner material for landfills. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 25, p. 323–341.

Kumar, M. A.; Moghal, A. A. B.; Rasheed, R. M.; Rehman, A. U. (2025) Enhancing durability and erosion resistance of soils with varying plasticity using crosslinked biopolymers. *Scientific Reports*, v. 15 (1).

Liu, J.; Che, W.; Lan, X.; Hu, M.; Qi, M.; Song, Z.; Sun, M.; Jing, M.; Qian, W.; Qi, C. (2023) Performance and mechanism of a novel biopolymer binder for clayey soil stabilization: Mechanical properties and microstructure characteristics. *Transportation Geotechnics*, v. 42, p. 101044.

Liu, Y; Ni, J.; Gu, J.; Liu, S.; Huang, Y.; Sadeghi, H. (2024) Influence of biopolymer-vegetation interaction on soil hydro-mechanical properties under climate change: A review. *Science of The Total Environment*, v. 954, p. 176535.

Middelhoff, M.; Cuisinier, O.; Masrouri, F.; Talandier, J.; Conil, N. (2020) Combined impact of selected material properties and environmental conditions on the swelling pressure of compacted claystone/bentonite mixtures. *Applied Clay Science*, v. 184.

Mohammadian, F.; Bonab, B. A.; Oliaei, M. (2024) A comprehensive review of biodegradable biopolymers' challenges and performance in improving soil mechanical characteristics. *Environmental Earth Sciences*, v. 83, n. 680.

Ng, C. W. W.; So, P. S.; Lau, S. Y.; Zhou, C.; Coo, J. L.; Ni, J. J. (2020) Influence of biopolymer on gas permeability in compacted clay at different densities and water contents. *Engineering Geology*, v. 272.

Pydi, R.; Yadu, L.; Chouksey, S. K. (2024) Evaluation of Xanthan and Guar Gum for Stabilising Soil in Terms of Strength Parameters - A Review. *Indian Geotechnical Journal*, v. 54, n. 4, p. 1621–1643.

Sarsby, R. W. *Environmental Geotechnics*. ICE Publishing, 2ª ed., 2013.

Shaji, S.; Gade, V. K.; Sundaram, B.; Bande, G. R. Evaluating the Effectiveness of Xanthan Gum Biopolymer as a Soil Stabiliser. Indian Geotech J, 2024.

Shalchian, M. M.; Arabani, M.; Farshi, M.; Ranjbar, P. Z.; Khajeh, A.; Payan, M. (2025) Sustainable construction materials: Application of chitosan biopolymer, rice husk biochar, and hemp fibers in geo-structures. *Case Studies in Construction Materials*, v. 22.

Tasuji, M. A.; Ghadir, P.; Hosseini, A.; Javadi, A. A.; Korayem, A. H.; Ranjbar, N. (2024) Experimental investigation of sandy soil stabilization using chitosan biopolymer. *Transportation Geotechnics*, v. 46.

Zhang, J.; Cheng, Y.; Liu, J.; Jiang, T.; Sun, D. (2024) Permeability of xanthan gum-improved silty soil and its prediction model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 83, p. 130.