

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS UM SOLO EXPANSIVO ADITIVADO COM LIGNINA KRAFT



<https://doi.org/10.22533/at.ed.152152503027>

Data de aceite: 20/02/2025

Gustavo Luís Calegaro

Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/5052053708370102>

Talisson Natan Tochtenhagen

Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/7262725949339659>

Estevan Alcântara Huckembeck

Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/5468433101958928>

Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli

Universidade Federal de Pelotas, UFPEL
Pelotas - Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/2217724221930510>

Rafael De Lima Rodrigues Chiquine

Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/0791895632652834>

Bruno Nunes Hubner

Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/0029086384453033>

Cristian da Conceição Gomes

Universidade Federal de Pelotas, UFPEL
Pelotas- Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/1048436005697674>

Marcos Antonio da Silva

Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/8534572990651848>

Jessica Torres dos Santos

Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/8535897129145784>

Lara Alves Gullo Do Carmo

Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/7834385871356318>

Ingrid Milena Reyes Martinez Belchior

Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/9495047312562427>

Rafael de Ávila Delucis

Universidade Federal de Pelotas, UFPEL
Pelotas- Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/0457288721496478>

RESUMO: O comportamento expansivo de solos com argilominerais de estrutura 2:1 dificulta obras de engenharia, pois essa estrutura causa alta capacidade de absorção de água, resultando em deformações volumétricas e instabilidade com suscetibilidade à erosão, principalmente em áreas de retroerosão. A estabilização de solos é uma técnica amplamente empregada que visa melhorar propriedades mecânicas e a durabilidade de solos naturais para aplicação em geotecnia. Os estabilizantes proporcionam um aumento da resistência mecânica e coesão do solo, tornando-o adequado ao recebimento de cargas e à resistência à degradação natural. Há uma busca por alternativas mais sustentáveis aos aditivos tradicionais, reduzindo os impactos ambientais. A lignina é um subproduto da celulose que vem sendo investigada para uso como estabilizante de solos, especialmente em solos granulares, criando uma película adesiva que une as partículas do solo. Esse trabalho visou avaliar a estabilização de um solo expansivo localizado na cidade de Pelotas/RS, utilizando lignina Kraft em pó. Para isso, realizaram-se ensaios de classificação Miniatura Compactada Tropical (MCT), método expedito das pastilhas, ensaio de medição da contração diametral das pastilhas e a reabsorção de água em um intervalo de 24h, além de avaliação de resistência à seco do solo em corpos de prova esféricos. Pode-se verificar que a adição de lignina (3% e 6%) à fração fina do solo expansivo demonstrou potencial para estabilização. A concentração de 3% apresentou melhor desempenho, com penetração nula da agulha após reabsorção de água, indicando melhoria nas propriedades mecânicas e resistência à umidade. Os resultados demonstram o potencial da lignina para uso como estabilizante sustentável, melhorando propriedades físico-químicas do solo e reduzindo a suscetibilidade à expansão.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnia, Estabilização sustentável, Propriedades mecânicas, MCT, Ensaio expedito das pastilhas

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF AN EXPANSIVE SOIL ADDITIVATED WITH KRAFT LIGNIN

ABSTRACT: The expansive behavior of soils containing 2:1 clay minerals poses significant challenges for engineering projects, as this structure leads to a high water absorption capacity, resulting in volumetric deformations, instability, and susceptibility to erosion, especially in retrogressive erosion areas. Soil stabilization is a widely applied technique aimed at improving the mechanical properties and durability of natural soils for geotechnical applications. Stabilizers enhance soil cohesion and mechanical resistance, making it more suitable for load-bearing applications and more resistant to natural degradation. There is a growing demand for more sustainable alternatives to conventional additives, aiming to reduce environmental impacts. Lignin, a byproduct of cellulose production, has been investigated as a soil stabilizer, particularly in granular soils, where it forms an adhesive film that binds soil particles together. This study aimed to evaluate the stabilization of an expansive soil located in Pelotas, Brazil, using powdered Kraft lignin. To achieve this, classification tests using the Miniatura Compactada Tropical (MCT) method, the quick test with small MCT specimens, measurement of diametral contraction, and water absorption tests over a 24-hour period were conducted, in addition to dry resistance testing of spherical soil specimens. The results indicate that the addition of lignin (3% and 6%) to the fine fraction of the expansive soil has potential for stabilization. The 3% concentration exhibited the best performance, with no needle penetration after water absorption, indicating improved mechanical properties and greater moisture resistance. These findings highlight the potential of lignin as a sustainable stabilizer, improving the soil's physicochemical properties and reducing its susceptibility to expansion.

KEYWORDS: Geotechnics, Sustainable stabilization, Mechanical properties, MCT, Quick tablet test.

INTRODUÇÃO

Solos que contêm argilominerais do grupo das esmectitas apresentam comportamento expansivo significativo, dificultando sua aplicação em obras de engenharia. Esses argilominerais, de estrutura atômica 2:1, possuem alta capacidade de absorção de água, resultando em deformações volumétricas, instabilidade e aumento da suscetibilidade à erosão, especialmente em áreas de retroerosão (D'Ávila et al., 2008, Meurer et al., 2017).

A estabilização de solos é uma técnica essencial na construção civil, amplamente empregada para melhorar propriedades mecânicas e a durabilidade de solos naturais, com aplicações em projetos de infraestrutura, como estradas, barragens e subleitos rodoviários. Os estabilizantes de solo desempenham um papel importante na melhoria do desempenho mecânico e na mitigação dos desafios ambientais associados a esses projetos. Ao serem incorporados, os estabilizantes promovem um aumento significativo na resistência e coesão dos solos, tornando-os mais adequados para suportar cargas e resistir à degradação natural, como a erosão e o impacto ambiental associado a atividades de escavação e transporte de materiais novos (Huang et al., 2021, Coudert et al., 2022).

Nesse sentido, existe uma busca por alternativas sustentáveis aos aditivos tradicionais, como cimento e cal, a fim de reduzir seus impactos ambientais (Zhang et al., 2017). A lignina, subproduto da produção de celulose, surge como uma alternativa sustentável para a estabilização de solos, com alguns resultados promissores já publicados na literatura. A lignina é amplamente estudada por seu potencial em adesivos, polímeros e compósitos, devido à sua estrutura complexa e propriedades químicas. Seu uso como substituto do fenol em resinas fenólicas reduz a dependência de derivados do petróleo (Hatakeyama & Hatakeyama, 2009). A lignina Kraft contém um elevado teor de grupos hidroxila fenólicos, resultado da extensa clivagem das ligações β -aril durante o processo de cozimento. Essa característica aumenta significativamente sua reatividade para modificações poliméricas, possibilitando sua utilização como precursor na síntese de novos materiais sustentáveis (Baumberger et al., 2007; Marton; Marton, 1964; Brunow, 2004)

No que diz respeito do seu uso para estabilização de solos, Zhou et al., (2023), em seu estudo provou que a adição de lignina à areia siltosa não resulta na formação de novos minerais, indicando que a adição do produto ao solo é ecologicamente amigável. Nos estudos conduzidos por Tingle et al. (2007) indicaram que lignosulfonatos são eficazes para a estabilização de solos granulares, onde eles criam uma película adesiva que une as partículas do solo.

METODOLOGIA

Para avaliação do comportamento expansivo e da resistência a seco do solo estudado, foram seguidas as seguintes atividades laboratoriais apresentadas na Figura 1.

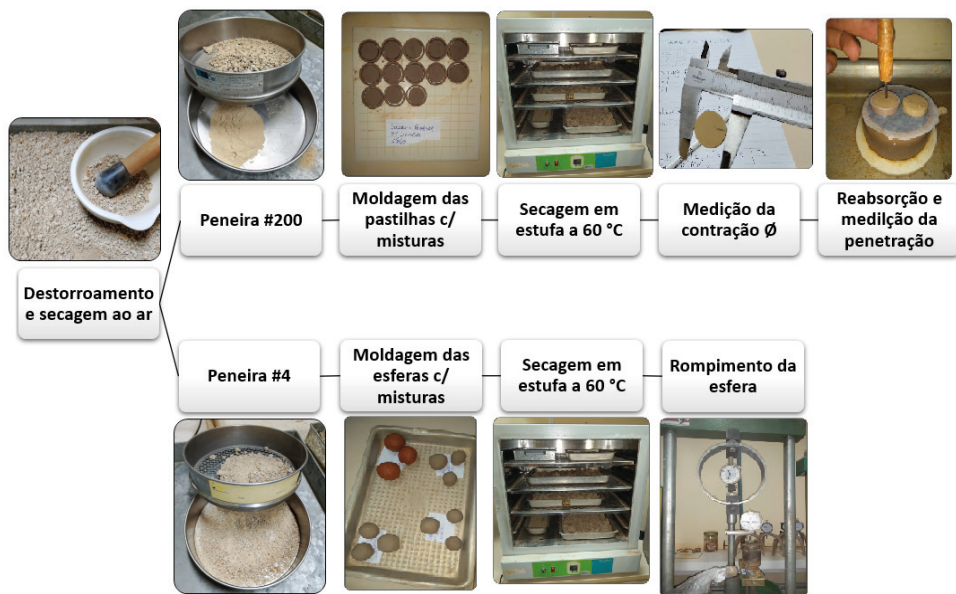


Figura 1: Fluxograma das atividades laboratoriais para obtenção de dados do comportamento dos finos e resistência a seco do solo.

O solo utilizado neste estudo foi coletado no bairro Quartier, em Pelotas/RS. Trata-se de uma argila arenosa com frações finas compostas por argilominerais do grupo das esmectitas, com argilominerais de estrutura atômica 2:1. O pó de lignina Kraft foi gentilmente doado pela Suzano Papel e Celulose (Brasil), que o obteve por um processo semelhante ao método Lignoboost® a partir de um licor negro à base de eucalipto.

Primeiramente, para a avaliação do comportamento de contração e amolecimento após da reabsorção de água uma massa do fino do solo, passante em malha # 200 e seca a 60 °C, foi homogeneizada com a lignina nas concentrações de 3% e 6%, ambos em seu estado seco. O primeiro passo da caracterização foi a classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical), que utiliza corpos de prova moldados em formato de pastilhas circulares.

No método expedito das pastilhas, o solo que passou por peneiras de malha #200, sendo preparado com água destilada e espatulação até que a penetração de uma agulha padrão de peso de 11 g indicasse 1 mm. As pastilhas foram moldadas em triplicatas usando anéis de PVC rígido com diâmetro de 21 mm e altura de 5 mm como molde, então foram secas em estufa a 60 °C por 24 horas. Após a secagem, foi medida a contração diametral das pastilhas, para então ser submetida a reabsorção de água em papel filtro sobre pedra porosa, sendo avaliada o amolecimento a partir da penetração com a agulha padrão, trincas

e expansão de forma visual no decorrer de duas horas. Onde para este experimento, foi feita uma avaliação da evolução do comportamento das pastilhas no decorrer de períodos preestabelecidos, em um intervalo de 24h.

Para a resistência a seco do solo foram moldados em corpos de prova esféricos com diâmetro de 30 e 35 mm, utilizando material passante em peneira #4, também sendo moldadas com água destilada e passando pelo mesmo processo de secagem em estufa a 60 °C. Esses corpos de prova foram rompidos em prensa manual com anel dinamométrico de 500 Kgf, conforme os métodos propostos por D'Ávila et al. (2008). As leituras foram convertidas para Kgf a partir da curva de correção de Pacheco (2010) dada pela equação a seguir.

$$F_{(Kgf)} = 2,0576 * L - 0,033 \quad (1)$$

Onde L é a leitura dada em 0,01 mm pelo relógio que mede a deflexão do anel dinamométrico de 500 Kgf.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise visual e contração diametral

Após o processo de secagem, foi constatado um ligeiro aumento da contração diametral de aproximadamente 1,3 mm, referente às pastilhas controle que apresentaram valores de cerca de 1,2 mm, ou seja, um aumento de cerca de 8% a contração média, conforme é possível verificar na Figura 2, a seguir. Na análise visual do comportamento após a reabsorção de água, as pastilhas com as duas concentrações de lignina apresentaram menor expansão em comparação às amostras de controle, porém podendo ser notado a manifestação de pequenas trincas sobre as superfícies de todas as pastilhas que o experimento abrangeu, conforme pode ser verificado nas Figuras 3(A), 3(B) e 3(C).

Os resultados desta análise indicaram que a adição de lignina reduziu a expansividade do solo e melhorou sua estabilidade volumétrica, como observado na menor penetração da agulha e na redução da expansão das pastilhas. Esse comportamento pode ser atribuído à formação de uma matriz coesa ao redor das partículas do solo, conforme relatado por B et al. (2021), que identificaram uma diminuição no índice de plasticidade de 36% para 28% e um efeito estabilizante decorrente da interação da lignina com a estrutura do solo.

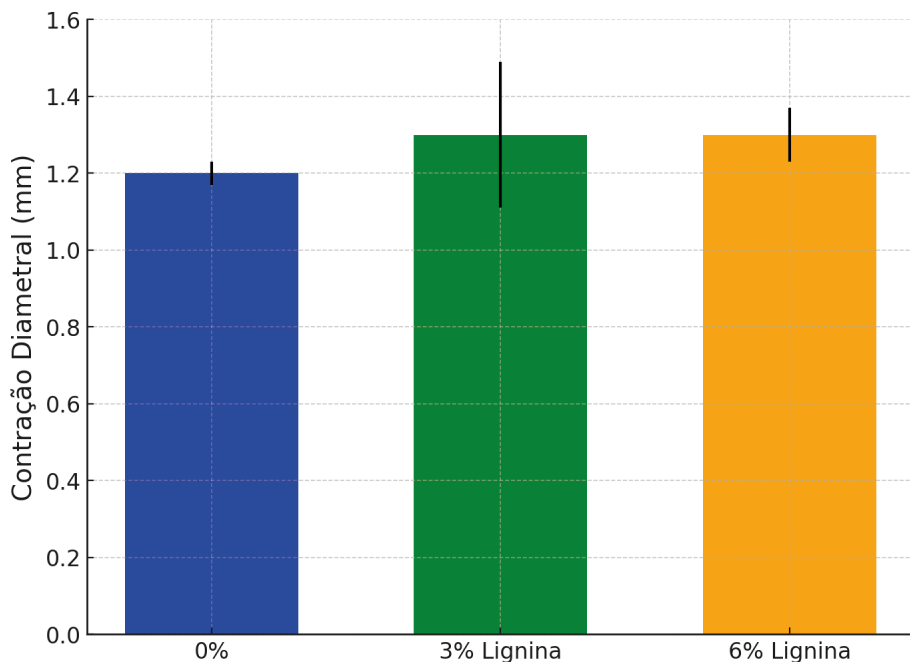


Figura 2 - Contração diametral das pastilhas após secagem.

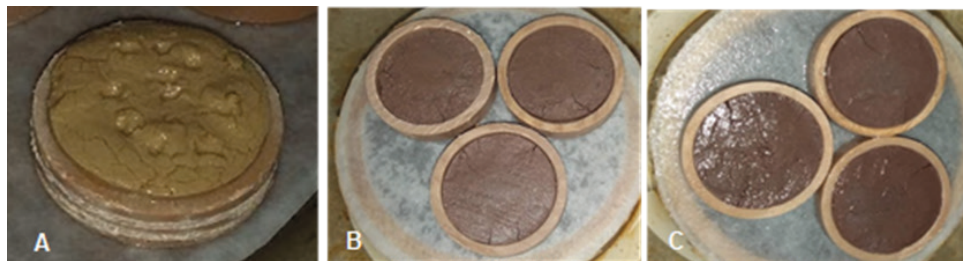


Figura 3. Pastilha controle (A) e pastilhas com concentrações 3% lignina (B) e 6% de lignina (C), todas capturadas após um período de 2 horas.

Amolecimento e penetração da agulha padrão

A partir das leituras de contração diametral e penetração da agulha padrão após 2 horas de reabsorção em água das pastilhas, o solo natural foi classificado como “solo siltoso não laterítico” de acordo com a classificação de Fortes et al., (2002). A evolução do comportamento de amolecimento no decorrer do intervalo de 24 horas após o início da reabsorção em água das amostras com 3% e 6% de lignina apresentou uma maior integridade física. Como pode ser observado na Figura 4, as amostras com 6% de lignina apresentaram um ligeiro maior grau de amolecimento a partir das penetrações da agulha de, em média, 1 mm, observadas passado o período de 2 horas e penetração nula para as amostras com 3% de lignina em todo intervalo de tempo definido.

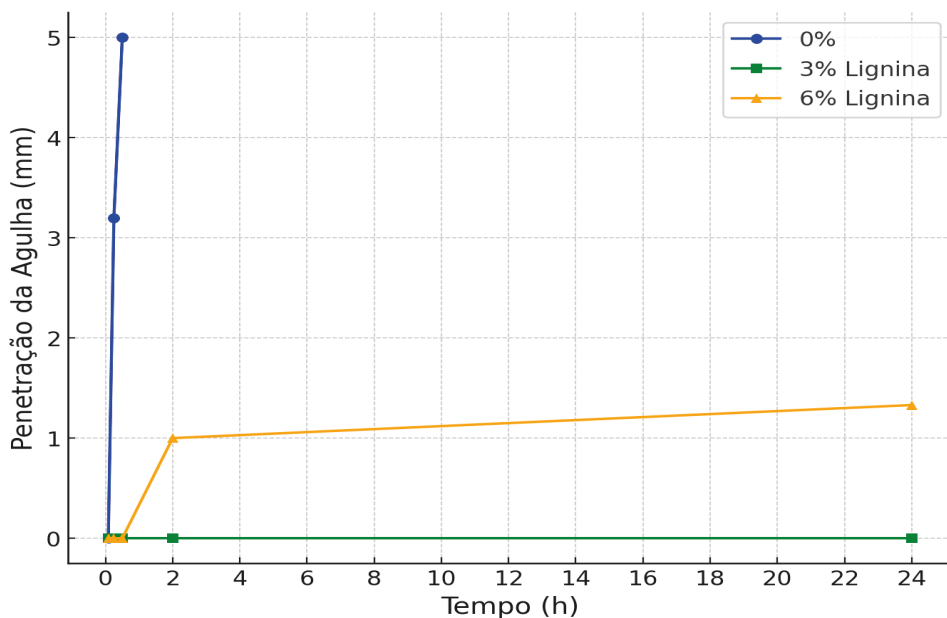


Figura 4. Penetração da agulha em função do tempo de reabsorção de água nas pastilhas.

A adição de lignina reduziu a expansividade do solo, evidenciada pela menor penetração da agulha e pela redução da expansão das pastilhas. Esse efeito pode ser atribuído à modificação da microestrutura do solo promovida pela lignina, conforme demonstrado por Orlandi et al. (2024), que identificaram redução no volume de poros e mudanças na distribuição da porosidade em solos expansivos estabilizados, resultando em menor inchamento e maior estabilidade volumétrica.

Além disso, a natureza hidrofóbica da lignina desempenha um papel fundamental nesse comportamento. B et al. (2021) observaram que o uso de lignosulfonato reduziu o índice de inchamento livre do solo em até 40%, mantendo a estabilidade estrutural do material ao longo do tempo. Essa característica reforça o potencial da lignina na melhoria da resistência mecânica do solo mesmo sob exposição prolongada à umidade.

Por fim, o comportamento térmico e higroscópico da lignina Kraft também influencia esses resultados. Segundo Sevastyanova et al. (2014), a lignina é composta por grupos funcionais hidroxila, fenólicos e alifáticos, que afetam tanto a contração das pastilhas após a secagem quanto seu comportamento expansivo, devido à interação das hidroxilas com moléculas de água. Esses fatores podem explicar a melhor estabilidade estrutural das amostras tratadas com lignina observada neste estudo.

Resistência seco

Os ensaios de resistência a seco indicaram que a incorporação de lignina reduziu a resistência à compressão dos corpos de prova, com quedas de aproximadamente 29% para 3% de lignina e 22% para 6% de lignina, conforme ilustrado na Figura 5.

Essa redução pode estar associada à reatividade e distribuição desigual da lignina na matriz do solo, interferindo na formação de uma estrutura coesa e densa após a secagem. Segundo Sevastyanova et al. (2014), a lignina pode limitar a criação de ligações fortes entre as partículas do solo, resultando em uma rede molecular menos resistente. Esse efeito é potencializado pela secagem a 60 °C, favorecendo uma menor coesão entre os componentes e impactando negativamente a resistência mecânica.

Resultados semelhantes foram observados por Orlandi et al. (2024), que, por meio de análises de microscopia eletrônica de varredura (SEM) e porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), demonstraram que a lignina modifica a estrutura do solo ao longo do tempo, alterando a distribuição da porosidade e o armazenamento de água. Esses fatores podem influenciar diretamente o comportamento mecânico das amostras estabilizadas, justificando a redução da resistência à

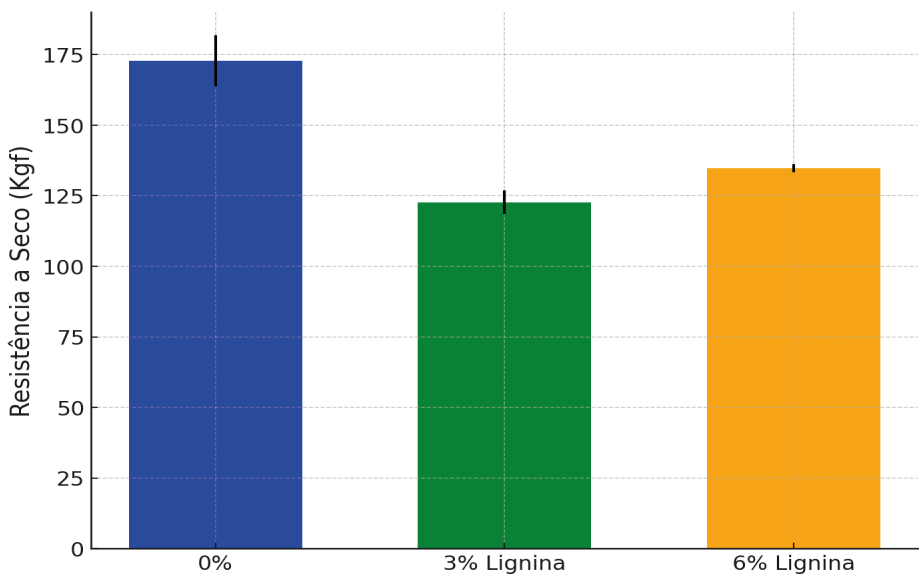


Figura 5: Resistência à compressão a seco dos corpos de prova esféricos.

Os resultados deste estudo mostraram que a incorporação de lignina influenciou negativamente a resistência à compressão dos corpos de prova secos, possivelmente devido à distribuição desigual da lignina na matriz do solo e à formação de uma rede molecular menos densa. Esse efeito pode estar relacionado ao tempo de cura insuficiente, conforme demonstrado por B et al. (2021), que observaram um aumento significativo na resistência do solo estabilizado com lignosulfonato ao longo do tempo. Isso sugere que um período maior de cura poderia favorecer a interação entre a lignina e as partículas do solo, promovendo uma estrutura mais coesa e resistente.

CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo indicam que a incorporação de lignina à fração fina do solo apresenta um grande potencial para a estabilização de solos expansivos, a partir da observação do comportamento de seus finos em contato com a água. A adição de lignina nas concentrações de 3% e 6% reduziu significativamente a expansividade do solo. Os dados obtidos ainda sugerem que há uma “concentração ótima” para maximizar os resultados. A concentração de 3% demonstrou o melhor desempenho, com penetração nula da agulha após a reabsorção de água, evidenciando melhores propriedades mecânicas e maior resistência à umidade. Esses resultados confirmam o potencial da lignina como um aditivo sustentável para melhorar propriedades físico-químicas do solo, reduzindo sua suscetibilidade à expansão.

Futuras pesquisas podem ser continuadas com aplicação de Lignina Kraft em métodos de ensaios e testes capazes de avaliar, por exemplo, o grau de dispersão, erosão, perda e carregamento de sedimentos de solos tipicamente expansivos e erodíveis como o estudado.

DECLARAÇÕES

Todos os autores contribuíram para a realização e escrita do trabalho, e estão de acordo com o conteúdo e a publicação do mesmo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Suzano Papel e Celulose, à Universidade Federal de Pelotas (UFPeL) pelo apoio e incentivo, ao PET do curso de Engenharia Agrícola da UFPeL e ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação do Centro de Engenharias de UFPeL.

REFERÊNCIAS

B, Sharmila; S, Bhuvaneshwari; G, Landlin. Application of lignosulphonate—a sustainable approach towards strength improvement and swell management of expansive soils. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 80, n. 8, p. 6395–6413, ago. 2021. DOI: 10.1007/s10064-021-02323-1

BAUMBERGER, Stéphanie; ABAECHERLI, Alfred; FASCHING, Mario; GELLERSTEDT, Gäoran; GOSSELINK, Richard; HORTLING, Bo; LI, Jiebing; SAAKE, Bodo; DE JONG, Ed. Molar mass determination of lignins by size-exclusion chromatography: towards standardisation of the method. **Holzforschung**, v. 61, n. 4, p. 459–468, 2007. DOI: 10.1515/HF.2007.074.

BRUNOW, Gösta. Methods to reveal the structure of lignin. In: HOFRICHTER, M.; STEINBÜCHEL, A. (eds.). **Lignin, humic substances and coal**. Biopolymers Online, 2004. p. 89–99 DOI: /10.1002/3527600035.bpol1003

COUDERT, Élodie; DELAGE, Pierre; FROSSARD, Emmanuel; PÉRON, Hélène; SANTOMARTINO, Stephania. Mechanical behaviour of compacted kaolin clay stabilised via alkali activated calcium-rich fly ash binder. **Geomechanics for Energy and the Environment**, v. 32, p. 100404, dez. 2022. DOI: 10.1016/j.gete.2022.100404.

D'ÁVILA, A. M., HAX, S. E FREITAS, P.C. Especificação Expedita de Materiais para Vias Não Pavimentadas - 4ª Aproximação. In: **XI CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA E IV CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA**, 2008, Coimbra, Portugal.

FORTES, M. R., MERIGHI, J.V. e ZUPPOLINI Neto, A. Método das Pastilhas para Identificação Expedita de Solos Tropicais. In: **2º Congresso Rodoviário Português. Lisboa, Portugal**, 18 a 22/novembro,2002.

HATEKEYAMA, Hyoe; HATEKEYAMA, Tatsuko. Lignin structure, properties, and applications. In: ABE, Akihiro; DUSEK, Karel; KOBAYASHI, Shiro (eds.). **Biopolymers**. Advances in Polymer Science, v. 232. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. DOI: 10.1007/12_2009_12.

HUANG, Jianxin; KOGBARA, Reginald B.; HARIHARAN, Narain; MASAD, Eyad A.; LITTLE, Dallas N. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 305, p. 124685, out. 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124685.

MARTON, Joseph.; MARTON, Terezia. Solvent extraction of lignin from alkaline pulping liquors. *Tappi Journal*, v. 47, p. 713–719, 1964.

MEURER, Egon José. et al. **Fundamentos de Química do Solo**. 6. ed. Porto Alegre: Egon José Meurer, 2017. ISBN: 978-85-7727-225-9

ORLANDI, S. et al. Lignin used as stabilizer in an expansive unsaturated soil. Em: GUERRA, N. et al. (Eds.). **Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society**. 1. ed. London: CRC Press, 2024. p. 3198–3201. DOI: 10.1201/9781003431749-629

PACHECO, Edson Patto. Uso de prensa manual como alternativa para determinação da compressibilidade de solos agrícolas. Aracaju: **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, 2010. 6 p. (Comunicado Técnico, 111).

SEVASTYANOVA, Olena; HELANDER, Mikaela; CHOWDHURY, Sudip; LANGE, Heiko; WEDIN, Helena; ZHANG, Liming; EK, Monica; KADLA, John F.; CRESTINI, Claudia; LINDSTRÖM, Mikael E. Tailoring the molecular and thermo–mechanical properties of kraft lignin by ultrafiltration. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 131, n. 18, p. app.40799, 15 set. 2014. DOI: 10.1002/app.40799.

TINGLE, Jeb S.; NEWMAN, J. Kent; LARSON, Steve L.; WEISS, Charles A.; RUSHING, John F. Stabilization mechanisms of nontraditional additives. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1989–2, n. 1, p. 59–67, jan. 2007. DOI: 10.3141/1989-49.

ZHANG, Tao; CAI, Guojun; LIU, Songyu. Application of lignin-based by-product stabilized silty soil in highway subgrade: a field investigation. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 4243–4257, jan. 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.002.

ZHOU, Enquan; WANG, Meng; LIU, Ping; ZUO, Xi; WANG, Long; JU, Dongyu. Application of recycled lignin powder as a sustainable additive for soil improvement against water resistance. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1–15, 12 ago. 2024. DOI: 10.1080/14680629.2024.2390147.