

AVALIAÇÃO DE ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO COM NANOCRISTAIOS DE CELULOSE

JOÃO PAULO DOS SANTOS SIMÃO¹; GUSTAVO LUÍS CALEGARO²; RAFAEL DE AVILA DELUCIS³

¹*Universidade Federal de Pelotas – joaopaulosimao@outlook.com*

²*Universidade Federal de Pelotas – gustavoccalegaro@gmail.com*

³*Universidade Federal de Pelotas – rafael.delucis@ufpel.edu.br*

1. INTRODUÇÃO

Solos expansivos, caracterizados pela predominância de argilominerais do grupo das esmectitas, como a montmorilonita, apresentam sérios desafios para a engenharia geotécnica. Sua estrutura cristalina 2:1 permite a absorção de água no espaço interlaminar, resultando em significativas variações volumétricas de expansão e contração (Katti et al., 2013). Este comportamento, impulsionado pela hidratação dos cátions trocáveis e pela expansão da dupla camada difusa (Santamarina et al., 2002), gera pressões de inchamento que podem exceder centenas de kPa (Zamin et al., 2021), comprometendo a capacidade de suporte e a danos a pavimentos, fundações e obras de contenção e outras estruturas de infraestrutura (Ali et al., 2020).

A mineralogia é um fator determinante para a periculosidade desses materiais. Estudos demonstram uma correlação direta entre o teor de montmorilonita e os índices de plasticidade e de expansão livre (Reddy; et, 2020). Solos com maior fração desse mineral, como os bentoníticos, podem exibir Limites de Liquidez superiores a 900% e pressões de inchamento da ordem de centenas de kPa, enquanto solos naturais com teores moderados ainda apresentam riscos consideráveis, com potenciais de expansão que podem variar de 5% a 12,5% (Elbadry, 2017; Zamin et al., 2021). Esse fenômeno é frequentemente anisotrópico, com deformações verticais podendo ser significativamente maiores que as horizontais (Liu et al., 2011), agravando os danos por recalques diferenciais.

Diante dos destas situações desafiadoras para a engenharia geotécnica, a estabilização desses solos torna-se imperativa. Métodos tradicionais, como a adição de cal ou cimento, embora eficazes, carregam uma pesada pegada ambiental. Neste contexto, a investigação de estabilizantes alternativos e sustentáveis, como os Nanocristais de Celulose (NCC), podem surgir como uma frente promissora. Este estudo visa, portanto, avaliar a eficiência da adição de NCC nas propriedades físico-hídricas de um solo expansivo de Pelotas/RS, por meio da análise dos Limites de Atterberg e do Ensaio Expedito de Pastilhas, contribuindo para o desenvolvimento de técnicas de estabilização inovadoras e de menor impacto ambiental.

2. METODOLOGIA

O solo empregado, classificado como “solódico do Quartier”, foi coletado no bairro homônimo em Pelotas/RS. Trata-se de uma areia argilosa cuja fração fina é composta por argilominerais do grupo das esmectitas, conferindo-lhe caráter expansivo, alta erosividade e baixa resistência quando saturado (D’Ávila et al., 2008). Os Nanocristais de Celulose (NCC), em suspensão aquosa, foram utilizados como material de reforço, com os mesmos teores em massa de solo seco (0,5%, 1,0% e 1,5%).

Inicialmente, o solo foi destorrado manualmente, secado a 60 °C e posteriormente peneirado, utilizando-se as malhas #40 (para os ensaios de limites de consistência) e #200 (para o ensaio expedito das pastilhas). As dosagens de NCC foram homogeneizadas com o solo na forma seca antes do início do processo de saturação.

A determinação dos Limites de Atterberg seguiu as normas técnicas vigentes: o Limite de Liquidez (LL) foi obtido pelo aparelho de Casagrande, conforme a ABNT NBR 6459/2016, e o Limite de Plasticidade (LP), pelo método de rolamento, de acordo com a ABNT NBR 7180/2016. O Índice de Plasticidade (IP) foi calculado pela diferença $IP = LL - LP$. Para o ensaio expedito das pastilhas, adotou-se a metodologia de Fortes et al. (2002) em conjunto com a quinta aproximação do método de D'Ávila et al. (2008). O material passante na malha #200 foi saturado e espatulado até que a penetração de uma agulha padrão atingisse 1 mm. As pastilhas foram confeccionadas em anéis de PVC ($\varnothing 21\text{ mm} \times H 5\text{ mm}$) e curadas ao ar livre por dois períodos: 7 e 21 dias. Após cada cura, as amostras foram secas a 60 °C por 4 h. Avaliou-se a contração diametral e, em seguida, triplicatas de pastilhas foram submetidas à reabsorção hídrica, com monitoramento da penetração, formação de trincas e expansão para ambos os tempos de cura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a incorporação de Nanocristais de Celulose (NCC) promoveu alterações significativas nas propriedades físico-hídricas do solo expansivo. Conforme ilustrado na Figura 1A, observou-se um aumento progressivo no Limite de Liquidez (LL) com a adição de NCC, passando de 28% (referência) para 35% (1,5% NCC), enquanto o Limite de Plasticidade (LP) apresentou comportamento não linear, resultando em Índices de Plasticidade (IP) entre 14-16%. Este aumento do IP, é também corroborado por Gidebo et al., (2024), que observaram melhorias de até 85% no IP com aditivos celulósicos, atribuindo-se à formação de redes fibrilares que restringem a mobilidade das partículas.

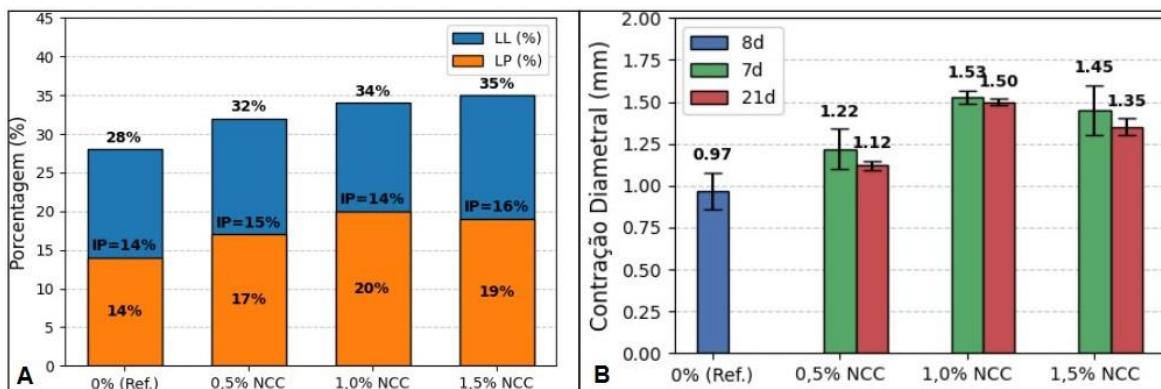


Figura 1 - Limites de Atterberg (LL e LP) e o índice de plasticidade (IP) do solo e das misturas com NCC (A); Contração diametral das pastilhas em função dos períodos de cura (B).

A Figura 1B evidencia o comportamento tempo-dependente da contração diametral, com redução média de 8% nos valores entre 7 e 21 dias de cura. Especificamente, a mistura com 1,0% NCC registrou 1,53 mm (7 dias) e 1,50 mm (21 dias), indicando uma estabilização progressiva da estrutura do solo. Este fenômeno pode ser explicado pelas transições de fase reológicas descritas por Xu

et al., (2020) onde suspensões de NCC formam estruturas anisotrópicas que conferem resposta mecânica sólida mesmo em baixas frações sólidas.

Os gráficos de penetração hídrica (Figura 2A e 2B) revelaram desempenho excepcional das misturas com NCC. Após 7 dias de cura, as amostras mantiveram penetração insignificante (0-0,3 mm) nas primeiras 2 horas, enquanto a referência atingiu 5 mm em 30 minutos. Este comportamento está alinhado com Nadeem et al., (2024) que reportaram reduções de até 57% no inchamento de argilas com nanocompósitos de celulose, funcionando como barreira hidráulica através do preenchimento de poros e aumento da tortuosidade.

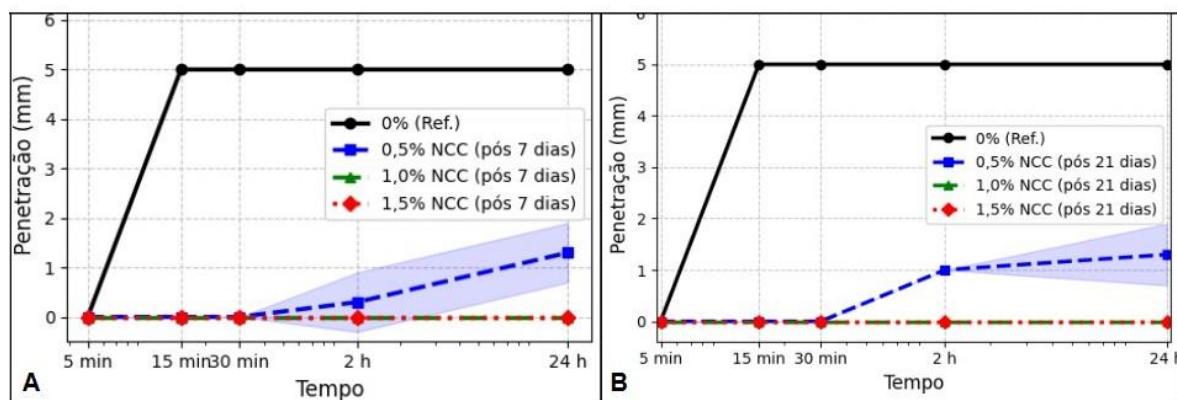


Figura 2 - Penetração da agulha em função do tempo de reabsorção de água para pastilhas com cura de 7 dias (A) e 21 dias (B).

Os mecanismos de atuação identificados incluem: (1) preenchimento de poros pela fração nanocristalina, reduzindo a permeabilidade; (2) formação de pontes de hidrogênio entre as partículas de NCC e os argilominerais; e (3) criação de uma rede microestrutural coesa, conforme demonstrado por Yang et al., (2025) em solos modificados com polímeros hidrossolúveis. A dosagem de 1,0% NCC mostrou-se particularmente eficaz, equilibrando ganhos de estabilização hídrica com características plásticas adequadas para aplicações geotécnicas.

4. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que os Nanocristais de Celulose (NCC) apresentam desempenho excepcional na estabilização de solos expansivos, reduzindo significativamente a penetração hídrica e modificando favoravelmente os Limites de Atterberg. No entanto, apesar do comprovado potencial técnico-ambiental, sua aplicação em escala geotécnica tende à inviabilidade econômica face ao elevado custo de produção e à ausência de fabricação nacional. A dependência de importação inviabiliza economicamente grandes volumes de tratamento, requerendo alternativas locais ou desenvolvimento tecnológico autóctone para futura aplicabilidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459: Solo — Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 5 p.
 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 3 p.

- ALI, Muhammad *et al.* Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers. **Geomechanics and Engineering**, v. 22, n. 3, p. 227–236, 2020.
- D'ÁVILA, A. M., HAX, S. E FREITAS, P.C. Especificação Expedita de Materiais para Vias Não Pavimentadas - 4^a Aproximação. In: **XI CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA E IV CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA**, 2008, Coimbra, Portugal.
- ELBADRY, Hossam. Simplified reliable prediction method for determining the volume change of expansive soils based on simply physical tests. **HBRC Journal**, v. 13, n. 3, p. 353–360, dez. 2017.
- FORTES, Rita Moura; MERIGHI, João Virgilio; NETO, Alexandre Zuppolini. **MÉTODO DAS PASTILHAS PARA IDENTIFICAÇÃO EXPEDITA DE SOLOS TROPICais**. Congresso apresentado em 2º Congresso Rodoviário **Anais...** Lisboa, Portugal, 18 nov. 2002.
- GIDEBO, Frehaileab Admasu; KINOSHITA, Naoki; YASUHARA, Hideaki. Optimization of physical and strength performance of cellulose-based fiber additives stabilized expansive soil. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e02851, jul. 2024.
- KATTI, Dinesh R.; SRINIVASAMURTHY, Lakshmikanth; KATTI, Kalpana S. Molecular Modeling of Early Stage of Swelling in Na-Montmorillonite Clay. In: **FIFTH BIOT CONFERENCE ON POROMECHANICS. Poromechanics V**. Vienna, Austria: American Society of Civil Engineers, 18 jun. 2013. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784412992.198>>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- LIU, Jin *et al.* Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. **Engineering Geology**, v. 117, n. 1–2, p. 114–120, jan. 2011.
- NADEEM, Sohail *et al.* Synthesis and Application of an Eco-Friendly Cellulose Diacrylate-Carbon Nanocomposite: A Highly Effective Inhibitor for Clay Swelling in Water-Based Drilling Fluids. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 49, n. 6, p. 8775–8786, jun. 2024.
- REDDY, Peddireddy Sreekanth; MOHANTY, Bijayananda; RAO, Bendadi Hanumantha. Influence of Clay Content and Montmorillonite Content on Swelling Behavior of Expansive Soils. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1, mar. 2020.
- SANTAMARINA, J. C. *et al.* Specific surface: determination and relevance. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 39, n. 1, p. 233–241, 1 fev. 2002.
- XU, Yuan; ATRENS, Aleks; STOKES, Jason R. A review of nanocrystalline cellulose suspensions: Rheology, liquid crystal ordering and colloidal phase behaviour. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 275, p. 102076, jan. 2020.
- YANG, Fan *et al.* Mechanical and microscopic characterization of expansive soils modified by water-soluble polymers. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 2315, 17 jan. 2025.
- ZAMIN, Bakht *et al.* An Experimental Study on the Geotechnical, Mineralogical, and Swelling Behavior of KPK Expansive Soils. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, n. 1, p. 8493091, jan. 2021.