

## ESTABILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE SOLOS POR EICP A PARTIR DA UREASE DE SOJA (*GLYCINE MAX L.*): UMA REVISÃO

ANA CAROLINA BERNARDO DA SILVA<sup>1</sup>; LUIZA BEATRIZ GAMBOA ARAÚJO MORSELLI<sup>2</sup>; ROBSON ANDREAZZA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [anacarolinab16@gmail.com](mailto:anacarolinab16@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – [luiza\\_morselli@hotmail.com](mailto:luiza_morselli@hotmail.com)

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas – [robsonandreazza@yahoo.com.br](mailto:robsonandreazza@yahoo.com.br)

### 1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais contribuem para impactos ambientais, sobretudo pelo uso de estabilizantes cimentícios, cuja produção emite grandes quantidades de (CO<sub>2</sub>) e consome intensamente recursos naturais (XUE et al., 2024). Nesse contexto, torna-se essencial buscar alternativas sustentáveis que reduzam a dependência de métodos convencionais e promovam práticas mais ecológicas.

A precipitação de carbonato induzida por enzimas (EICP - *Enzyme Induced Carbonate Precipitation*) surge como uma solução promissora, utilizando urease — frequentemente extraída da soja — para catalisar a formação de carbonato de cálcio (Ca(CO<sub>3</sub>)), atuando como agente cimentante natural (ZHANG et al., 2023; MENG et al., 2021). Estudos recentes demonstram sua eficácia na melhoria das propriedades mecânicas de solos, no aproveitamento de resíduos da construção e demolição e na redução de riscos ambientais, como a lixiviação de metais pesados (XU et al., 2024; SHU et al., 2021; YUAN et al., 2025).

Considerando esse fato, objetivou-se realizar uma revisão de literatura a respeito dos artigos científicos mais atuais com o uso de soja e a EICP para estabilização de solos.

### 2. METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho foi feita uma breve revisão de literatura acerca do uso de soja como fonte de enzima urease para precipitação de carbonato de cálcio por enzimas (EICP) para estabilização de solos, através da pesquisa de artigos científicos atuais publicados nos últimos cinco anos. Utilizou-se a base de buscas *Science Direct* (ELSEVIER) com as seguintes palavras-chave: “EICP”; “soybean”; “stabilizer”, utilizou o operador booleano *AND*. Selecionaram-se artigos com data de publicação para os últimos cinco anos. Os artigos mais relevantes foram analisados conforme tipo de solo utilizado, método de aplicação e extração, a concentração de soja e os seus resultados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram encontrados 30 trabalhos no total a partir da pesquisa bibliográfica, no entanto, nem todos utilizaram a soja como enzima principal, portanto a pesquisa foi refinada com a leitura dos resumos sendo selecionados 6 trabalhos para essa revisão. Um resumo dos resultados se encontra na Tabela 1.

Tabela 1 – Extração de urease de soja: métodos, concentrações e tipos de solo.

| Autores             | Método de Extração   | Concentração (soja/líquido)   | Tipo de Solo  |
|---------------------|--|---|---|
| Xu et al. (2024)    | Urease bruta de soja foi extraída misturando 100g de pó de soja com 1L de água deionizada contendo 30% de etanol, agitando para formar uma suspensão homogênea e depois centrifugando a 10.000 rpm a 4 °C por 10 min.  | 100 g/L. A atividade da solução de urease bruta de soja utilizada foi de 5.5–6.4 U/mL.  | Não especificado. Testes realizados com precipitação em lâminas de vidro.                                       |
| Xue et al. (2024)   | Pó de soja (moído e peneirado em 300 µm) foi misturado em diversas concentrações em água desmineralizada. O sobrenadante foi coletado após agitação e centrifugação a 6000 rpm a 4 °C por 15 min.  | Concentrações de 20 g/L, 40 g/L, 60 g/L e 80 g/L. A urease mais ativa foi obtida com 60 g/L de pó de soja.  | Areia reciclada de resíduos de construção e demolição, incluindo areia reciclada fina e areia reciclada grossa. |
| Shu et al. (2022)   | Urease bruta de soja foi preparada moendo a soja, misturando o pó em água e adicionando $(\text{Ca}(\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}))$ para remover proteínas extras, depois centrifugando e filtrando a mistura.  | A urease foi quantificada por concentrações de pó de soja de 30 g/L e 60 g/L. Concentração de ureia- $\text{CaCl}_2$ : 0,5 M.                               | Areia Ottawa de granulação pobre.   |
| Meng et al. (2021)  | Urease bruta de soja foi extraída triturando a soja e misturando o pó com água. Em seguida, foi adicionado $(\text{Ca}(\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}))$ para salgar o excesso de proteína. A mistura foi centrifugada a 4000 rpm e o sobrenadante filtrado foi coletado. | As concentrações de pó de soja foram de 20 g/L, 40 g/L, 60 g/L e 80 g/L.  | Areia de granulação pobre ASTM C778.  |
| Zhang et al. (2023) | A urease bruta de soja foi extraída moendo, peneirando o pó de soja e misturando-o com água deionizada. A mistura foi mantida a 4 °C por 24 h e depois centrifugada a 3500 rpm por 15 min.   | As concentrações de pó de soja de 20 g/L, 60 g/L e 100 g/L resultaram em atividades de urease de 7.45 mM/min, 13.95 mM/min e 22.23 mM/min, respectivamente. | Areia de quartzo (padrão chinês).   |
| Yuan et al. (2025)  | Urease bruta de soja foi extraída secando 250 g de soja no forno, moendo-a em pó, misturando com água deionizada, agitando, deixando repousar e centrifugando a 4000 r/min por 20 min.   | Concentração de 90 g/L de pó de soja.   | Cinzas de fundo de incineração de resíduos sólidos urbanos.   |

Na pesquisa de Xu et al. (2024) a cimentabilidade e as propriedades micromecânicas do carbonato de cálcio ( $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ) precipitado pelo processo EICP mostraram-se dependentes da composição cristalina. Os autores verificaram que um alto teor de calcita favoreceu a adesão, apresentando melhores propriedades mecânicas — como módulo de elasticidade, dureza e ductilidade — em comparação à vaterita. Além disso, o  $\text{Ca}(\text{CO}_3)$  induzido pela urease bruta de soja apresentou ductilidade superior em relação ao produzido por urease pura comercial, sugerindo que a urease de soja pode ser uma alternativa economicamente viável para aplicações em campo.

Em relação à aplicação da técnica em materiais reciclados, o tratamento com EICP à base de urease de soja demonstrou eficácia na estabilização de areias provenientes de resíduos de demolição no trabalho de Xue et al. (2024). O processo de cura a 4 °C reduziu o entupimento superficial (bio-clogging) quando comparado à cura em temperatura ambiente. Apesar de a areia grossa ter apresentado uma ligeira redução na resistência à compressão não confinada (UCS) em baixas temperaturas, a areia fina obteve maiores valores de UCS e maior teor de Ca(CO<sub>3</sub>) precipitado, evidenciando a viabilidade do método em condições ambientais diferenciadas.

No que diz respeito às metodologias de tratamento, o método de múltiplas fases, caracterizado por uma percolação inicial de urease e solução de cimentação seguida de várias percolações somente da solução cimentante, mostrou desempenho superior aos métodos de uma fase, duas fases e pré-mistura na pesquisa de Shu et al. (2022). Esse procedimento resultou em maior eficiência de conversão química, distribuição mais uniforme do Ca(CO<sub>3</sub>) e melhor retenção da permeabilidade, além de reduzir significativamente o consumo de urease, tornando-se mais econômico.

Resultados semelhantes foram confirmados por Meng et al. (2021), que observaram que o método de múltiplas fases elevou a taxa de utilização da urease em pelo menos quatro vezes, proporcionando uma precipitação de Ca(CO<sub>3</sub>) mais uniforme do que no método de uma fase. Após quatro ciclos de tratamento, as amostras alcançaram resistência à compressão não confinada superior a 10 MPa e teor de Ca(CO<sub>3</sub>) em torno de 20%. Destaca-se que a urease extraída de soja, em concentrações de 60 g/L e 80 g/L de pó de soja, apresentou maior eficiência de conversão química, atingindo valores superiores a 85%.

No estudo de Zhang et al. (2023), o método de uma fase mostrou-se mais eficiente do que os métodos de pré-mistura e duas fases, gerando maior resistência e distribuição mais uniforme do Ca(CO<sub>3</sub>). Observou-se que a eficiência de cimentação foi superior quando utilizada urease de baixa atividade, uma vez que esta favoreceu a formação de cristais de Ca(CO<sub>3</sub>) em formato de diamante, capazes de preencher e envolver as partículas de areia. Por outro lado, a urease de alta atividade produziu cristais maiores e esféricos, que influenciaram a uniformidade do tratamento.

Por fim, a aplicação da EICP, realizada no estudo de Yuan et al. (2025), também se mostrou eficaz na modificação de cinzas de fundo de incineração de resíduos sólidos urbanos. As partículas tratadas apresentaram maior rugosidade e angularidade, o que aumentou o efeito de intertravamento e, consequentemente, a capacidade de carga do material. Ademais, verificou-se uma redução significativa na lixiviação de metais pesados, reforçando o potencial ambientalmente sustentável da técnica para uso em obras viárias e de infraestrutura.

#### 4. CONCLUSÕES

A revisão evidenciou que a técnica de precipitação de carbonato induzida por enzimas (EICP), especialmente com urease de soja (*Glycine max L.*), é uma alternativa sustentável e eficiente aos estabilizantes cimentícios, promovendo melhorias mecânicas e redução de impactos ambientais. Considerando os resultados obtidos na literatura, futuros trabalhos podem ser focados em ensaios de campo, utilizando as concentrações mais eficazes já testadas e aplicando a técnica em solos arenosos característicos da cidade de Pelotas (RS), de modo a

validar sua aplicabilidade em condições reais e reforçar seu potencial no setor da construção civil.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SHU, S.; YAN, B.; MENG, H.; BIAN, X.. Comparative study of EICP treatment methods on the mechanical properties of sandy soil. **Soils And Foundations**, v. 62, n. 6, p. 1-9, dez. 2022. DOI: 10.1016/j.sandf.2022.101246.

MENG, H.; SHU, S.; GAO, Y.; YAN, B.; HE, J.. Multiple-phase enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) method for soil improvement. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 294, p. 106374, dez. 2021. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106374.

XU, K.; HUANG, M.; CUI, M.; LI, S.. Effect of crystal morphology on cementability and micromechanical properties of calcium carbonate precipitate induced by crude soybean enzyme. **Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering**, [S.L.], v. 16, n. 12, p. 5095-5108, dez. 2024. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.08.024.

XUE, Y.; ARULRAJAH, A.; CHU, J.; HORPIBULSUK, S.. Soybean urease-based EICP stabilization of washed recycled sands derived from demolition wastes cured at low temperatures. **Construction And Building Materials**, v. 434, p. 1-12, jul. 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136735.

YUAN, Z.; WU, T.; WANG, L.; HUANG, Y.; TANG, Q.. The engineering performance of EICP-modified municipal solid waste incineration bottom ash for road construction. **Cleaner Materials**, v. 15, p. 1-12, mar. 2025. DOI: 10.1016/j.clema.2024.100285.

ZHANG, J.; YIN, Y.; SHI, W.; BIAN, H.; SHI, L.; WU, L.; HAN, Z.; ZHENG, J.; HE, X.. Strength and uniformity of EICP-treated sand under multi-factor coupling effects. **Biogeotechnics**, v. 1, n. 1, p. 100007, 2023. DOI: 10.1016/j.bgtech.2023.100007.