

# PRECIPITAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO INDUZIDO POR UREASE NA ENGENHARIA CIVIL: UMA REVISÃO INTRODUTÓRIA

*Data de submissão: 09/02/2024*

*Data de aceite: 01/04/2024*

### **Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli**

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

### **Jessica Torres dos Santos**

Universidade de Lisboa - Lisboa - Portugal  
<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>

### **Julia Kaiane Prates Da Silva**

Universidade Federal de Pelotas, UFPel  
Pelotas - Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/8043172936883765>

### **Caroline Menezes Pinheiro**

Universidade Federal de Pelotas, UFPel  
Pelotas - Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/5984557031030431>

### **Guilherme Pereira Schoeler**

Universidade Federal de Pelotas - UFPel  
Pelotas – Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/6241607536410111>

### **Gustavo Luís Calegario**

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

### **Rafael Miritz Bartz**

Universidade Federal de Pelotas - UFPel  
Pelotas – Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/3237020633105128>

### **Alessandra Magnus Lazuta**

Universidade Federal de Pelotas - UFPel  
Pelotas – Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/6787125295859936>

### **Daniele Martin Sampaio**

Universidade Federal de Pelotas - UFPel  
Pelotas – Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/7326936381804224>

### **Pierre-Yves Mahieux**

La Rochelle Université  
La Rochelle, França

### **Robson Andreazza**

Universidade Federal de Pelotas, UFPel  
Pelotas - Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/5706766977817721>

**RESUMO:** Com a intensificação pela busca de novas técnicas sustentáveis para a construção civil, a técnica de biocimentação através de processos biológicos da precipitação de carbonato de cálcio por reações químicas de urease (*Ureolytic-Induced Carbonate Precipitation* - UICP),

que pode ser induzida microbiologicamente pela ação de bactérias (*Microbially induced calcium carbonate precipitation* – MICP) ou pela ação de enzimas urease derivadas de uma fonte vegetal (*Enzyme induced calcium carbonate precipitation* - EICP), tem se mostrado promissora nesse setor. O objetivo deste trabalho foi descrever as pesquisas científicas atuais sobre a técnica de UICP, além de identificar principais parâmetros, fatores e aplicações dos processos de biocimentação induzidos por ação de bactérias e de enzimas na área de engenharia civil. São apresentadas aplicações desses métodos em geotecnia e materiais cimentícios, destacando melhorias na resistência mecânica, estabilidade geotécnica e durabilidade dos materiais tratados. As pesquisas têm demonstrado que a EICP oferece benefícios significativos se comparados à MICP, desde a sua simplicidade de aplicação até a sua independência de oxigênio e capacidade de preenchimento de poros menores. No entanto, a ausência de microrganismos pode afetar a morfologia e a resistência do carbonato precipitado na EICP. Essa análise crítica é fundamental para direcionar pesquisas futuras e aplicações práticas, visto que os processos de EICP e MICP representam formas sustentáveis e promissoras para a construção civil e contribuem para o avanço no campo da biocimentação.

**PALAVRAS-CHAVE:** biocimentação; técnicas sustentáveis; UICP; EICP; MICP.

## UREASE-INDUCED CALCIUM CARBONATE PRECIPITATION IN CIVIL ENGINEERING: AN INTRODUCTORY REVIEW

**ABSTRACT:** From the intensification of the search for new sustainable techniques for civil construction, the technique of biocementation through biological processes of calcium carbonate precipitation by chemical reactions of urease (Ureolytic-Induced Carbonate Precipitation - UICP), which can be induced microbiologically by the action of bacteria (Microbially induced calcium carbonate - MICP) or by the action of urease enzymes derived from a plant source (Enzyme induced calcium carbonate precipitation (EICP) have shown promise in this sector. The aim of this work was to describe current scientific research on the UICP technique, as well as to identify the main parameters, influencing factors and applications of biocementation processes induced by the action of bacteria and enzymes in the area of civil engineering. Applications of these methods in geotechnics and cementitious materials are presented, highlighting improvements in mechanical strength, geotechnical stability and durability of treated materials. Research has shown that EICP offers significant benefits compared to MICP, from its simplicity of application to its oxygen independence and ability to fill smaller pores. However, the absence of microorganisms may affect the morphology and strength of precipitated carbonate in EICP. This critical analysis is critical to direct future research and practical applications, as EICP and MICP processes represent sustainable and promising forms for civil construction and contribute to the advancement in the field of biocementation.

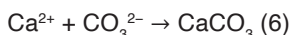
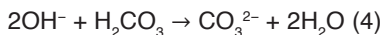
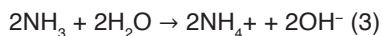
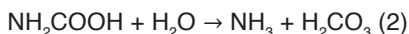
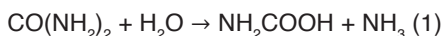
**KEYWORDS:** biocementation; sustainable techniques; UICP; EICP; MICP.

## INTRODUÇÃO

A busca de novas técnicas para a fabricação de materiais sustentáveis de construção civil tem sido intensificada nas últimas décadas. Além da necessidade da redução do impacto ambiental causado pela construção, o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis e econômicos precisam suprir a demanda do crescimento populacional e crescimento da infraestrutura urbana.

Uma dessas técnicas é a biocimentação através de processos biológicos da precipitação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que pode ser induzida microbiologicamente pela ação de bactérias como *Bacillus pasteurii*, *Sporosarcina pasteurii* (*Microbially induced calcium carbonate precipitation* – MICP) ou pela ação de enzimas urease derivadas de uma fonte vegetal (*Enzyme induced calcium carbonate precipitation* - EICP). A MICP e a EICP são dois caminhos para a mesma finalidade. No entanto, esses são métodos diferentes no que se trata de cristalização do  $\text{CaCO}_3$  e do mecanismo de precipitação (ARAB et al., 2021).

As reações químicas de urease ou *Ureolytic-Induced Carbonate Precipitation* (UICP) que levam à precipitação de carbonato de cálcio em ambos os processos (MICP e EICP) são as seguintes: a enzima urease hidrolisa um mol de ureia ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) em um mol de amônia ( $\text{NH}_3$ ) e um mol de ácido carbâmico ( $\text{NH}_2\text{COOH}$ ) (Eq. 1), que é então hidrolisado em outro mol de amônia mais um mol de ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) (Eq. 2). Íons carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), íons amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e íons hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) se equilibram em água, como resultado das reações anteriores (Eq. 3 e 4), e aumentam a alcalinidade da solução. A equação 5 resume as quatro equações anteriores e indica que a hidrólise de um mol de ureia produz dois mols de amônio e um mol de íons carbonato. Na presença saturada de íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), um mol de íon carbonato se precipita em um mol de carbonato de cálcio (Eq. 6) (IAMCHATURAPATR et al. 2022; SAIF et al., 2022).



O  $\text{CaCO}_3$  produzido por hidrólise da ureia age como ligante das partículas do solo ou areia para estabilização geotécnica (AHENKORAH et al., 2021) ou, ainda, influenciando algumas propriedades dos materiais como resistência à água e resistência mecânica de tijolos (ARAB et al., 2021; CUCCURULLO et al., 2020). No uso em materiais da construção civil, tanto o processo microbiológico como o processo enzimático podem ainda ser utilizados como estratégias para a autocura de fissuras em materiais cimentícios. Conforme Baffoe e Ghahremaninezhad (2022), essa é uma área emergente neste campo de pesquisa.

A biocimentação pode ser utilizada isoladamente de forma eficiente, sem mistura de cimento, reduzindo os efeitos nocivos associados à produção do cimento (ALMAJED et al., 2020). O processo da UICP é um método verde, sustentável e ecológico, que contribui na redução da toxicidade do solo (KULANTHAIVEL et al., 2022), no caso de aterros sanitários e áreas degradadas.

Considerando as diversas possibilidades de aplicação da UICP na engenharia civil, esse trabalho teve como objetivo descrever as pesquisas científicas mais atuais sobre o tema e os principais parâmetros dos processos de MICP e EICP.

## **METODOLOGIA**

Para a realização desta pesquisa, foi feita uma revisão de literatura acerca das perspectivas do uso dos métodos de EICP e MICP na engenharia civil. Utilizou-se, para isso, o portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Portal *Science Direct* da Elsevier, com as seguintes palavras-chave: “*induced calcium carbonate precipitation*”; “*EICP*”; “*MICP*”; “*cement*”; “*concrete*”. Foram selecionados os artigos científicos mais relevantes com data de publicação nos últimos cinco anos referente ao mês de setembro de 2023, quando a pesquisa foi realizada.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Fatores que influenciam as reações de UICP**

Se tratando do processo microbiológico MICP, Kulanthaivel et al. (2022) constataram a influência das diferentes espécies e concentrações de bactérias e do meio de cimentação utilizado, sendo os meios mais confiáveis e adequados: fibras, pó de casca de ovo e calcário.

Apesar disso, Schwantes-Cezario et al. (2022) mostram que ainda não está clara, na literatura, a influência de fatores como a concentração ideal de bactérias, as fontes de cálcio, a temperatura, a umidade e a presença de água para a aplicação de bactérias visando a reparação de fissuras em materiais cimentícios.

Já se tratando do processo enzimático, de acordo com Saif et al. (2022), a eficiência das reações de urease dependem de diversos fatores, tais como o modo de aplicação da enzima urease, da concentração de ureia, da fonte e da concentração dos íons de cálcio, da temperatura, do pH, do tempo de cura e da composição química da água. Corroborando, Ahenkorah et al. (2021) indicam que são fatores que afetam em específico a eficácia do processo EICP: a fonte e a atividade da enzima urease, a concentração dos constituintes químicos como ureia, cloreto de cálcio e enzima urease na solução, além do pH, da temperatura e a química do ambiente hospedeiro.

Além disso, de maneira geral, as características do hospedeiro, como características geotécnicas, mineralógicas da areia ou do solo interferem no tratamento com EICP e MICP (ALWALAN et al., 2023; ARPAJURAKUL et al., 2021), além do número de ciclos de aplicação do tratamento e do método de aplicação da solução enzimática, os quais influenciam nas propriedades mecânicas do solo (ALWALAN et al., 2023). Solos com alta plasticidade dificultam a passagem da solução bacteriana aquosa no uso da MICP, prejudicando a atividade e a formação de carbonato de cálcio (ARPAJURAKUL et al., 2021).

O aumento da temperatura em altos níveis pode levar a uma desnaturação progressiva da enzima urease na aplicação da EICP (CUCCURULLO et al., 2022). Na pesquisa de Cuccurullo et al. (2022), os reagentes utilizados foram cloreto de cálcio e ureia, e a forma de extração de proteínas das enzimas urease demonstrou influenciar nos resultados finais, onde a mistura entre o extrato e o pó dos grãos de soja promoveram um resultado mais apurado em comparação ao uso isoladamente.

Conforme Fan et al. (2022), a EICP por soja é significativamente afetada pelo pH e pela concentração de ureia. Os autores realizaram um estudo experimental sobre a EICP com grãos de soja, e os seguintes componentes químicos: ureia ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), ácido hidrocloreídrico ( $\text{HCl}$ ) e cloreto de níquel (II) hexahidratado ( $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Ao submergir por 6 a 24h os corpos de prova de concreto no compósito a altas temperaturas (entre 300 e 500°C), camadas de precipitações brancas de cristais de calcita apareceram rapidamente na superfície do material, com espessura de 2mm, e proporcionaram uma redução de taxa de absorção de água de 70%. A atividade de urease foi analisada com o pH entre 5 e 11, sendo os melhores resultados com o pH entre 6 e 9. Porém, ao exceder esse patamar de pH, a atividade de urease baixou significativamente.

Baffoe e Ghahremaninezhad (2022) pesquisaram a influência de cinco proteínas com características diferentes nos processos da EICP no ambiente cimentício: concentrado protéico de soro de leite, lisozima (proteína extraída de ovo branco), leite em pó desnatado, imunoglobulina bovina derivada do soro isolado proteico e albumina. Os resultados mostraram que as amostras contendo albumina e *whey protein* obtiveram menor índice de permeabilidade de água, comparado ao controle, o que foi atribuído à baixa porosidade e à propriedade hidrofóbica da superfície interna das amostras com essas proteínas.

## Aplicação de UICP em geotecnia

Em solos, a MICP é utilizada para melhorar propriedades como resistência ao cisalhamento, ductilidade e redução de permeabilidade, inchamento, viscosidade e fragilidade. Seu uso é mais indicado para solos não coesos, devido à maior capacidade de permeação de bactérias através dos poros do solo (KULANTHAIVEL et al., 2022).

As melhores condições químicas para a indução da atividade de MICP pela bactéria *Sporosarcina Pasteurii* em três tipos de solos naturais de grãos finos foi estudado por Arpajirakul et al. (2021). Os resultados demonstraram que houve aumento da rigidez e da resistência ao cisalhamento das amostras tratadas com as bactérias, o que coincidiu com o aumento da quantidade de calcita precipitada. O aumento da resistência teve influência das características naturais de cada solo, como por exemplo no caso da argila com alta plasticidade não ter permitido a permeabilidade eficiente da solução bacteriana, resultando em um menor grau de atividade por MICP.

Iamchaturapatr et al. (2022) analisaram as características de um solo arenoso tratado com EICP com reação acelerada e fibras naturais de linho. Os resultados demonstraram que a reação de biocimentação demorou dois dias para iniciar e terminou em seis. Os autores verificaram a relação da reação de biocimentação ao aumento do pH (superior a 7) e a redução da reação quando o mesmo retorna a pH 7, atingindo seu máximo no terceiro dia de reação.

Por meio da EICP para estabilização de solos, Cuccurullo et al. (2022), utilizaram proteína hexamérica encontrada em tecidos de plantas, como a soja (*soybeans*), para desenvolver um estabilizante simples e de baixo custo aplicável em solos compactados. Os autores fizeram uso da soja de duas formas: em extrato e em pó, sendo que os dois se mostraram boas fontes de enzimas urease como catalisadores de hidrólise de ureia, porém quando as duas formas foram aplicadas juntas, elas demonstraram melhores resultados do que quando aplicadas em separado. Os pesquisadores relataram que o tratamento com EICP melhorou a resistência à imersão em água, resistência à compressão não confinada e aumentou a durabilidade dos produtos. Através de análises de difração de raios-X, o tratamento de EICP apresentou os minerais caulinita, microlina intermediária, muscovita, quartzo e calcita.

O esforço por cisalhamento de “bio areia cimentada” a partir de EICP foi analisado por Alwalan et al. (2023), em que quatro diferentes métodos de solução de EICP foram aplicados: por spray, mistura e compactação, percolação e injeção. Os resultados mostraram que o método influencia a biocimentação do solo e a distribuição da precipitação de  $\text{CaCO}_3$ . Com isso, o método de injeção proporcionou os melhores resultados para cisalhamento e maior rugosidade aos grãos do solo.

## Aplicação de UICP em materiais cimentícios

No concreto, a MICP pode ser utilizada para curar futuras fissuras, melhorar a resistência à compressão, absorção de água e durabilidade (KULANTHAIVEL et al., 2022).

Schwantes-Cezario et al. (2022) analisaram o potencial de onze bactérias isoladas de cavernas da Amazônia, localizadas no Brasil, para autocura de fissuras em materiais cimentícios, como concreto, a partir de precipitação de carbonato de cálcio. A bactéria com melhor resultado para precipitação foi a *Bacillus subtilis*, a qual gerou cristais de calcita e vaterita no material hospedeiro. A aplicação de MICP aumentou a resistência dos espécimes após 63 dias de tratamento e cura do concreto sem o uso de ureia ou fonte de cálcio.

Na pesquisa desenvolvida por Mi et al. (2023) através dos processos de MICP com a bactéria *Sporosarcina pasteurii* DSM 33 e EICP na performance de concretos com agregados reciclados, e os resultados com uso de microrganismos demonstraram a formação principalmente de cristais de vaterita esféricos, enquanto que o processo com enzimas apresentou vaterita, calcita e aragonita. Os autores viabilizaram um meio de cultivo livre de cloretos – que podem danificar a armadura em concretos - através da substituição do cloreto de sódio pelo acetato de sódio, resultando em um crescimento bacteriano ainda maior.

A resistência à tração das amostras com proteínas com o uso de EICP em material cimentício na pesquisa de Baffoe e Ghahremaninezhad (2022) foi maior que a da amostra de controle, o que pode ser explicado pela menor porosidade e distribuição do tamanho dos poros apresentados pelas amostras desenvolvidas, além de melhorias na adesão interfacial dos constituintes fornecidos pelas proteínas.

Segundo Fan et al. (2022), a EICP por soja melhora as propriedades de materiais cimentantes, como a durabilidade e resistência mecânica após 3 dias de tratamento. Porém, de acordo com Baffoe e Ghahremaninezhad (2022), os mecanismos subjacentes ao efeito das proteínas nos processos da EICP em materiais cimentícios não são totalmente compreendidos na literatura. Necessitando, assim, de pesquisas mais prolongadas no que diz respeito à durabilidade das estruturas cimentícias tratadas com EICP.

## **Desenvolvimento de produtos para a engenharia civil com uso de UICP**

Arab et al. (2021) investigaram o processo da EICP com biopolímero de alginato de sódio para a produção de tijolos para a construção civil, como alternativa ao uso de cimento e argila. Os resultados mostraram que os tijolos são comparáveis a vigas tratadas com cimento em termos mecânicos e podem ser uma alternativa ecologicamente correta comparada aos tijolos convencionais.

De acordo com Xie et al. (2023), a EICP tem um efeito benéfico na penetração interna mais profunda de precipitação de carbonato e na uniformidade da cobertura superficial dos agregados de concretos reciclados, em comparação com a MICP. Conforme os autores, após o tratamento por EICP, a massa dos agregados aumentou de 1 a 3,5% e houve uma redução de 20,9% de absorção de água saturada dos agregados. A deposição de  $\text{CaCO}_3$  aumentou com o aumento de temperatura e o pH entre 7 e 10 teve pouco efeito sobre o processo.

## Vantagens de desvantagens da EICP e MICP

Conforme Ahenkorah et al. (2021), a EICP possui algumas vantagens com relação à MICP, tais como a simplicidade de aplicação, a independência de oxigênio no processo e o menor tamanho das enzimas (aproximadamente 0,012  $\mu\text{m}$  ou 120  $\text{Å}$ ) comparado ao das bactérias (na ordem de microns) normalmente utilizadas e, por isso, a EICP é mais aplicável à vários tipos de solos. Porém, a ausência de bactérias pode resultar na falta de sítios de nucleação na EICP, afetando a morfologia e resistência do  $\text{CaCO}_3$  precipitado e do solo tratado.

Para Saif et al. (2022), ocorre uma vantagem na precipitação de carbonato de cálcio por urease em relação ao uso de ligantes hidráulicos como cimento e cal, uma vez que a dependência de diversos fatores para a estabilização da UICP facilita o controle da taxa de reação, sabendo-se que é possível o controle do pH, da temperatura e da concentração dos reagentes, por exemplo. Além disso, o uso de EICP apresenta potencial para melhorar o cisalhamento de solos pouco coesivos até 2,3 vezes do que solos não tratados (ALWALAN et al., 2023).

Sobre as vantagens da MICP, Kulanthaivel et al. (2022), na sua revisão bibliográfica acerca do uso de MICP, perceberam que essa tecnologia é a mais indicada para reforçar e cicatrizar o concreto e a argamassa, além de ser um bom método para estabilização do solo através da formação de cristais de calcita.

## CONCLUSÕES

Diversos aspectos influenciam a eficiência dos tratamentos de UICP, tais como a espécie de microrganismos ou das enzimas urease utilizadas, pH, temperatura, tipos e quantidade de componentes químicos empregados e composição física e química do material hospedeiro. Segundo as pesquisas encontradas, a EICP tem demonstrado maiores benefícios, em comparação com a MICP, desde sua simplicidade de aplicação, independência de oxigênio e capacidade de preencher menores poros. No entanto, a ausência de microrganismos pode resultar na falta de sítios de nucleação, afetando a morfologia e resistência do carbonato precipitado na EICP. Ambos os processos de biocimentação são formas sustentáveis e promissoras para a área de materiais de construção.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer às agências financiadoras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), CAPES-PRINT (UFPEI), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), e à La Rochelle Université e à Universidade Federal de Pelotas pelo apoio e incentivo.



## REFERÊNCIAS

- AHENKORAH, Isaac; RAHMAN, Md Mizanur; KARIM, Md Rajibul; BEECHAM, Simon. Enzyme induced calcium carbonate precipitation and its engineering application: A systematic review and meta-analysis. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 308, n. December 2020, p. 125000, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125000.
- ALMAJED, Abdullah; ABBAS, Husain; ARAB, Mohamed; ALSABHAN, Abdullah; HAMID, Wagdi; AL-SALLOUM, Yousef. Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP)-Based methods for ecofriendly stabilization of different types of natural sands. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 274, p. 122627, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122627.
- ALWALAN, Mohammed; ALMAJED, Abdullah; LEMBOYE, Kehinde; ALNUAIM, Ahmed. Direct Shear Characteristics of Enzymatically Cemented Sands. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 1512–1525, 2023.
- ARAB, Mohamed G.; OMAR, Maher; ALMAJED, Abdullah; ELBAZ, Yousef; AHMED, Amira H. Hybrid technique to produce bio-bricks using enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) and sodium alginate biopolymer. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 284, p. 122846, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122846.
- ARPAJIRAKUL, Soyson; PUNGRASMI, Wiboonluk; LIKITLERSUANG, Suched. Efficiency of microbially-induced calcite precipitation in natural clays for ground improvement. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 282, p. 122722, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122722.
- BAFFOE, Elvis; GHAHREMANINEZHAD, Ali. The effect of biomolecules on enzyme-induced calcium carbonate precipitation in cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 345, n. June, p. 128323, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128323.
- CUCCURULLO, A.; GALLIPOLI, D.; BRUNO, A. W.; AUGARDE, C.; HUGHES, P.; LA BORDERIE, C. Earth stabilisation via carbonate precipitation by plant-derived urease for building applications. **Geomechanics for Energy and the Environment**, [S. l.], v. 30, p. 100230, 2022. DOI: 10.1016/j.gete.2020.100230.
- FAN, Yanan; DU, Hongxiu; WEI, Hong; ZHAO, Teng. Experimental Study on Urease Activity and Cementation Characteristics of Soybean. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, [S. l.], v. 37, n. 4, p. 636–644, 2022. DOI: 10.1007/s11595-022-2578-z.
- IAMCHATURAPATR, Janjit; PIRIYAKUL, Keeratikan; PETCHERDCHOO, Aruz. Characteristics of sandy soil treated using EICP-based urease enzymatic acceleration method and natural hemp fibers. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 16, n. October 2021, p. e00871, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00871.
- KULANTHAIVEL, P.; ARUN KUMAR, M.; KRISHNARAJA, A. R.; KAYALVIZHI, V. S.; SARANYA, K. Applications of BCCP technology on civil engineering – A review. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 65, p. 1213–1221, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.179.
- MI, Tangwei; PENG, Ligang; YU, Keqiong; ZHAO, Yuxi. Optimizing microbial- and enzyme-induced carbonate precipitation treatment regimes to improve the performance of recycled aggregate concrete. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 19, n. June, p. e02261, 2023. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02261.

SAIF, Ahsan; CUCCURULLO, Alessia; GALLIPOLI, Domenico; PERLOT, Céline; BRUNO, Agostino Walter. Advances in Enzyme Induced Carbonate Precipitation and Application to Soil Improvement: A Review. **Materials**, [S. l.], v. 15, n. 3, 2022. DOI: 10.3390/ma15030950.

SCHWANTES-CEZARIO, N.; CREMASCO, L. V.; MEDEIROS, L. P.; TEIXEIRA, G. M.; ALBINO, U. B.; LESCANO, L. E. A. M.; MATSUMOTO, L. S.; OLIVEIRA, A. G. de; SILVA, P. R. C. da; TORALLES, B. M.. Potential of cave isolated bacteria in self-healing of cement-based materials. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 45, n. January 2021, 2022. DOI: 10.1016/j.job.2021.103551.

XIE, Dezhi; ZHANG, Rui; WANG, Jianyun. The influence of environmental factors and precipitation precursors on enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) process and its application on modification of recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 395, n. February, p. 136444, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136444.