

DESAFIOS E LIMITES ENTRE A MICROBIOLOGIA E A ENGENHARIA DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS COM RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO E CONSTRUÇÃO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.15.24.III-023>

Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli*, Marcos Antônio da Silva, Maurício Silveira Quadro, Simone Pieniz, Robson Andreazza

* Universidade Federal de Pelotas (UFPel), luiza_morselli@hotmail.com

RESUMO

A construção civil, apesar de imprescindível ao desenvolvimento socioeconômico, é geradora de resíduos que são um desafio ambiental e necessitam de novas tecnologias para reciclagem e gerenciamento. Os resíduos oriundos da demolição e construção civil (RDC) vêm sendo cada vez mais estudados para sua reciclagem, afim de reduzir o impacto ambiental causado. A técnica de biocalcificação a partir de microorganismos é promissora para a fabricação de materiais sustentáveis para construção civil. A precipitação de carbonato de cálcio por indução microbiana (*Microbially Induced Calcite Precipitation* - MICP) envolve a utilização de bactérias que são capazes de metabolizar ureia e produzir carbonato de cálcio nos resíduos. Tendo isso em vista, objetivou-se o desenvolvimento de tijolos comprimidos a partir da reciclagem de RDC e a técnica de MICP com a cepa *Sporosarcina Pasteurii* e fonte de cálcio a partir de hidróxido de cálcio. Foram produzidos 4 tratamentos de tijolos os quais foram caracterizados quanto à resistência mecânica à compressão axial, resistência à imersão em água, análises de perda de massa, teor de umidade, pH, calcimetria e carbonatação. Concluiu-se que com relação às resistências mecânicas não foi possível determinar se a MICP melhorou o material fabricado. Acredita-se que o hidróxido de cálcio tenha sido o responsável pelo aumento de resistência mecânica das amostras, e não as bactérias em si. Na imersão em água, somente os tratamentos com hidróxido de cálcio resistiram. Apesar dos testes de calcimetria demonstrarem um aumento do teor de CaCO_3 no início do ensaio, o mesmo não foi observado posteriormente ao passar do tempo. Possivelmente a MICP não tenha sido efetiva devido à alta compressão na qual as amostras foram submetidas durante sua fabricação, além de meio aquoso insuficiente para a locomoção bacteriana no material hospedeiro. Apesar da MICP não ter atingido os objetivos desejados nessa pesquisa, os resultados com 2% de hidróxido de cálcio no tratamento RSC mostram a possibilidade da fabricação de tijolos sustentáveis com apenas 2% de Ca(OH)_2 . Os tijolos RSC apresentaram resistência mecânica condizente com a literatura, e resistência à imersão em água.

PALAVRAS-CHAVE: Tijolos sustentáveis, Precipitação de CaCO_3 , MICP, *Sporosarcina Pasteurii*, RDC.

INTRODUÇÃO

A geração de resíduos provenientes de demolição e construção civil (RDC) é um dos maiores desafios ambientais enfrentados atualmente. Esses materiais, muitas vezes descartados de forma inadequada, ocupam um espaço significativo nos aterros sanitários e contribuem para a contaminação do solo e da água. Para lidar com essa problemática, torna-se cada vez mais necessário encontrar alternativas sustentáveis para a gestão desses resíduos. Uma técnica promissora nesse campo é a utilização de microorganismos biocalcificantes, que precipitam carbonato de cálcio (CaCO_3), o qual age como um biocimentante, ligando as partículas dos materiais (AHENKORAH et al., 2023).

A técnica de precipitação por indução microbiana de carbonato de cálcio (MICP) envolve a utilização de bactérias ureolíticas, como *Bacillus pasteurii*, e *Sporosarcina Pasteurii*, que são capazes de metabolizar ureia e produzir carbonato de cálcio nos resíduos. Vários estudos utilizaram biocalcificação a partir de bactérias para fabricação de materiais e melhoramento do solo na construção civil (AHENKORAH et al., 2023; ARPAJIRAKUL; PUNGRASMI; LIKITLERSUANG, 2021; MI et al., 2023; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2022).

Diversos fatores influenciam na precipitação de CaCO_3 por MICP, como temperatura, pH, químicos e meios de cultura. Um meio de cultivo bacteriano livre de cloretos é importante para a preservação da armadura dos concretos (MI et al., 2023), ou seja, a substituição de cloreto de cálcio por acetato ou hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) pode ser mais benéfico aos produtos. A biocimentação pode ser utilizada isoladamente de forma eficiente, sem mistura de cimento, reduzindo os efeitos nocivos associados à produção do cimento. O pH mais alcalino parece favorecer a atividade de urease bacteriana e a *S. Pasteurii* vem sendo muito eficiente na precipitação (ZHANG et al., 2023).

Mesmo a MICP sendo uma tecnologia de engenharia para o futuro, com vantagens de pegada de carbono, suas oportunidades e desafios coexistem para o equilíbrio e aplicabilidade industrial desse método (ZHANG et al., 2023). A precipitação de CaCO_3 por urease é um método verde, sustentável e ecológico (KULANTHAIVEL et al., 2022), que

desperta interesse para a produção de materiais ecológicos de construção a partir de resíduos de demolição e construção civil.

OBJETIVOS

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de tijolos comprimidos sustentáveis para a construção civil a partir da reciclagem de resíduos de demolição e construção civil (RDC) e a técnica de MICP (*Microbially Induced Calcite Precipitation*) com a cepa *Sporosarcina Pasteurii* e fonte de cálcio a partir de hidróxido de cálcio.

METODOLOGIA

O RDC, produzido na plataforma de reciclagem em La Rochelle, França, se constitui de materiais de demolição de concreto, agregados naturais, vidro, cerâmica, madeira, solo, plásticos, isopor, entre outros (HOONG et al., 2020). O RDC foi seco a 105°C por 24h e peneirado (0/6.3 mm). O Ca(OH)₂ utilizado é extra puro (98%), 74,09 g/mol da Acros Organic®.

Foram semeados a 1% (v/v) de bactérias *S. Pasteurii* DSM33 em 2 L de meio de cultura a partir de um pré-cultivo de 24 h, incubado a 30°C por 24h e agitação de 130 rpm. O meio de cultura continha: peptonas de caseína (15g) e de soja (5g), NaCl (5g), Agar (15g), água destilada (1000ml) e ureia (20g/L). Foi realizada uma concentração bacteriana por centrifugação (redução de 2 L para 200 mL) que foi armazenada a 4 °C.

Foram desenvolvidos 4 tratamentos de tijolos (Figura 1): RS (*recycled sand*), sem suspensão bacteriana e sem hidróxido de cálcio; RSB (*recycled sand with bacteria*) com suspensão bacteriana; RSC (*recycled sand with 2 w% lime*); e RSCB (*recycled sand with 2 w% lime and bacteria*).



Figura 1 – Imagem dos tijolos comprimidos em vista superior a), e vista lateral b). Fonte: Autores.

O RDC e a água (9%) foram misturados e armazenados hermeticamente 24h antes da fabricação dos tijolos no caso do RS e RSC, já o RSB e RSCB receberam apenas 3% de água, pois a solução bacteriana compreende 6%. As amostras cilíndricas (Ø50 mm X 50 mm) foram confeccionadas por compressão axial em prensa mecânica Zwick/Roell Z100 de 100 kN, de acordo com a norma NF EM 13286-53. As amostras foram pesadas após a desmoldagem. Todas as amostras foram mantidas dentro de uma câmara climática à temperatura de (25 ± 2) °C e umidade relativa de (62 ± 5) % (Figura 2).



Figura 2 – Tijolos comprimidos na câmara úmida. Fonte: Autores.

A resistência à compressão axial dos tijolos foi determinada de acordo com a norma NF EN 13286-41, em triplicata às (0, 8, 24, 72 e 168) h. A resistência à tração seguiu a norma NF EN 13286-42, em triplicata às 168h. Foi utilizada a mesma prensa da fabricação dos tijolos. As condições para os ensaios foram as seguintes: 20 N/s, 1,5 mm/min de deformação, (23 ± 5) °C, umidade relativa do ar (60 ± 5) %.

A análise de resistência à imersão em água (10cm/10min) às 168h, em triplicata a (23 ± 2) °C. O resultado foi avaliado visualmente em função da desagregação de material. As análises de perda de massa, teor de umidade, pH e calcimetria foram realizadas nos tempos (0, 8, 24, 72, 168) h. A carbonatação foi determinada às 168h conforme a norma UNE-EN 14630.

RESULTADOS

As imagens dos testes de resistência à compressão axial dos tijolos comprimidos se encontram na Figura 3, e o gráfico com os resultados, na Figura 4.



Figura 3 – Imagens do ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova antes a), e após rompimento b). Fonte: Autores.

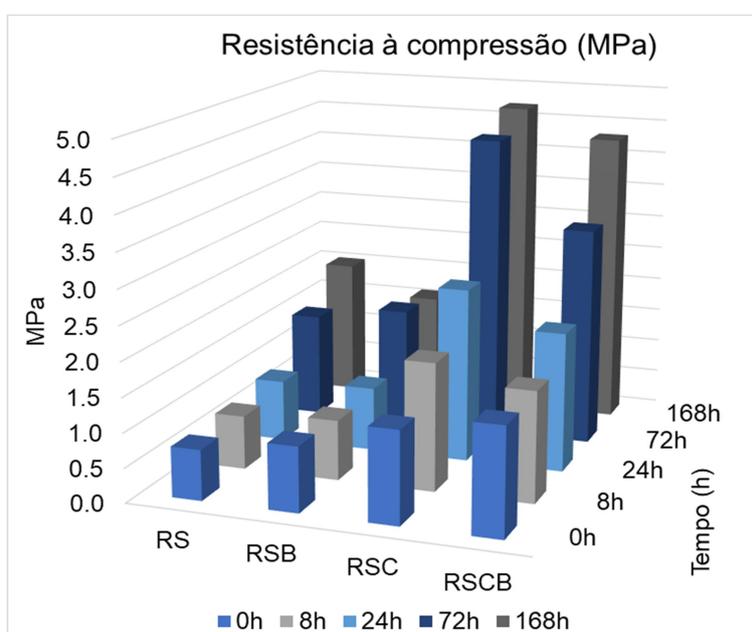


Figura 4 – Resultados de resistência à compressão (MPa) dos tijolos comprimidos versus tempo de cura. Fonte: Autores.

As imagens dos testes de resistência à tração dos tijolos comprimidos se encontram na Figura 5, o gráfico com os resultados, na Figura 6 a, e os resultados de resistência à compressão úmida na Figura 6 b.

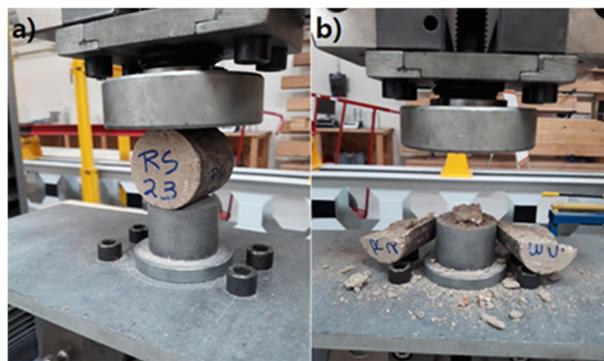


Figura 5 – Imagens do teste de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova antes a), e após rompimento b). Fonte: Autores.

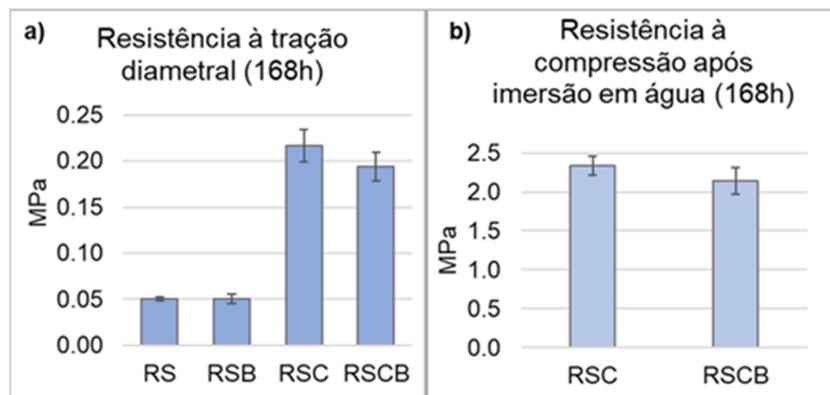


Figura 6 – Resultados de resistência à tração a) e resistência à compressão após imersão em água dos tijolos comprimidos ao tempo de 168h b). Fonte: Autores.

As imagens do ensaio de resistência à imersão em água se encontram na Figura 7.

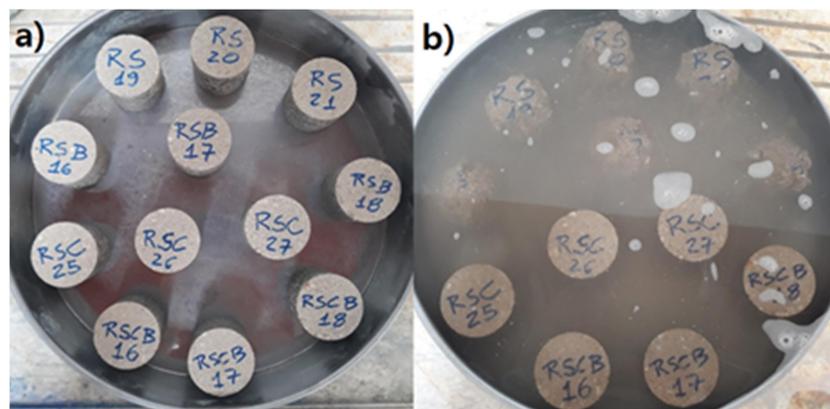


Figura 7 – Imagens do teste de resistência à imersão em água antes a), e depois b). Fonte: Autores.

Os resultados de perda de massa (%), umidade versus tempo (%), pH e teor de carbonato de cálcio dos tijolos se encontram nas Figuras 8, 9, 10 e 11 respectivamente.

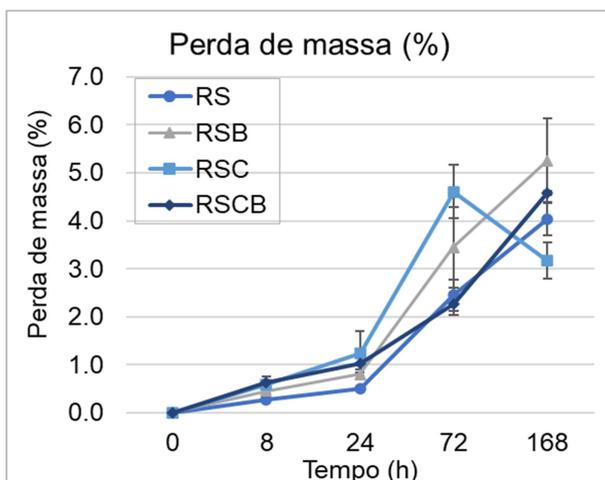


Figura 8 – Resultados de perda de massa versus tempo dos tijolos comprimidos. Fonte: Autores.

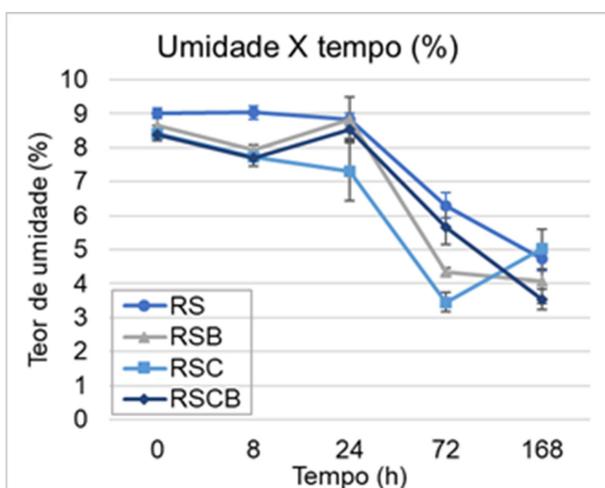


Figura 9 – Resultados de umidade dos corpos de prova versus tempo. Fonte: Autores.

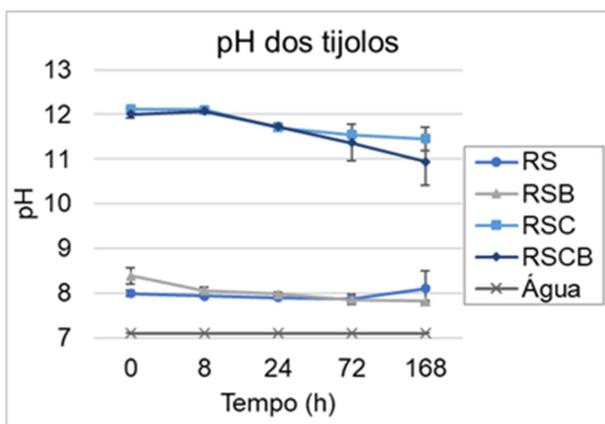


Figura 10 – Resultados de pH dos corpos de prova versus tempo. Fonte: Autores.

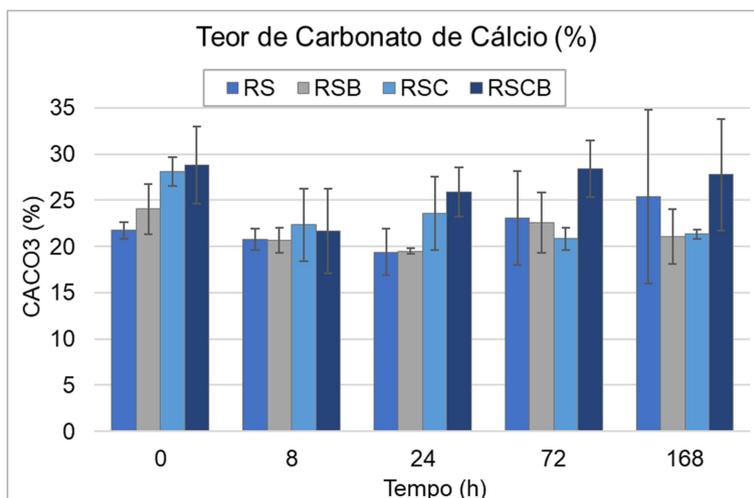


Figura 11 – Resultados dos testes de calcimetria das amostras conforme o tempo de cura. Fonte: Autores.

As imagens referentes ao ensaio de carbonatação dos tijolos se encontram nas Figuras 12 a, b e c.



Figura 12 – Imagens do ensaio de carbonatação com fenolftaleína antes a), b) e após o ensaio c). Fonte: Autores.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em relação às resistências mecânicas (Figuras 4 e 6 a), não foi possível determinar se a MICP melhorou de fato o material. Embora os resultados tenham mostrado melhora em todos os períodos de tempo analisados, exceto no tempo de 168h, o aumento da resistência à compressão não foi significativo (Figura 4). Comparando-se os tratamentos com hidróxido de cálcio, houve aumento com o uso de bactérias (RSCB) apenas ao T0h. O mesmo pode ser observado nos resultados do ensaio de resistência à tração (Figura 6 a), onde a MICP não melhorou o produto. Portanto, o comportamento dos tratamentos com cal está relacionado à sua presença na constituição, e não pela ação das bactérias.

Na imersão em água (Figura 7), apenas os tratamentos com cal resistiram, não sendo possível romper os tratamentos RS e RSB, pois estes se desestruturaram. Na ruptura à compressão das amostras com cal (Figura 6 b), o tratamento sem adição de bactérias (RSC) apresentou melhor desempenho.

A perda de massa (Figura 8) e teor de umidade das amostras (Figura 9) nos mostra a perda de umidade ao longo do tempo. O ligeiro aumento da massa do RSC entre os tempos 72h e 168h deve-se ao aumento da umidade das amostras na câmara úmida. Os resultados de pH (Figura 10) estão de acordo com o esperado para os tratamentos com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pois o mesmo promove aumento do pH dos materiais.

O teste de teor de CaCO_3 das amostras (Figura 11), demonstrou que no início do ensaio, houve um aumento de precipitação ao comparar o RSB com o RS e o RSCB com o RSC, no entanto ao passar do tempo, o mesmo não ocorreu. A calcimetria mostrou que o processo de precipitação de cálcio não foi continuado ao longo do ensaio. Esses resultados vão ao encontro com os valores de resistências mecânicas.

Para o ensaio de carbonatação (Figura 12) foi usado o indicador de pH fenolftaleína, que confere cor rósea à parte não carbonatada ($\text{pH} > 9,8$). Apenas os tratamentos com cal demonstraram partes ainda não carbonatadas, no meio da

amostra (Figura 12), o que corrobora com os resultados de pH (Figura 10). A base da amostra não sofreu carbonatação, pois não esteve em contato com o CO₂ do ar.

A caracterização das amostras sem bactérias foi ao encontro da literatura atual (HOU, 2023; MORSELLI et al., 2024; OUEDRAOGO et al., 2020).

A MICP pode não ter sido eficiente devido à alguns motivos encontrados: a alta compressão empregada na fabricação das amostras, que pode ter causado danos e morte às bactérias, e a quantidade relativamente baixa de meio aquoso que pode ter sido insuficiente para a locomoção bacteriana no material hospedeiro.

CONCLUSÃO

A MICP com o uso da bactéria biocalcificante *Sporosarcina Pasteurii* DSM33 não mostrou efetividade e melhora no desempenho mecânicos dos tijolos comprimidos fabricados com RDC e no aumento do teor de carbonato de cálcio. O ensaio de teor de CaCO₃ não foi suficientemente preciso nos seus resultados. Apesar disso, a não formação de precipitação de cálcio conforme o tempo analisado foi ao encontro com os resultados de resistências mecânicas realizadas.

Apesar da MICP não ter atingido os objetivos desejados nessa pesquisa, os resultados com 2% de cal no tratamento RSC mostra a possibilidade da fabricação de tijolos sustentáveis com apenas 2% de Ca(OH)₂. Os tijolos RSC apresentaram resistência mecânica condizente com a literatura, e resistência à imersão em água. A fabricação de tijolos comprimidos com resíduos de demolição e construção civil é benéfica para o meio ambiente, pois representa a redução dos impactos ambientais como poluição e contaminação causados pela indústria da construção civil. Além de evitar a extração de matérias primas e da necessidade de baixa quantidade de estabilizante, nesse caso a cal, cuja fabricação é menos prejudicial para o meio ambiente do que o cimento, comumente utilizado na fabricação de tijolos de terra crua na França.

A utilização de resíduos de demolição e construção civil em conjunto com a técnica de MICP para a fabricação de tijolos comprimidos apresentou limitações e desafios nessa pesquisa, sendo imprescindível sua divulgação no meio acadêmico e científico e a consequente continuidade do estudo.

Para pesquisas futuras, sugere-se a aplicação de técnicas de microscopia eletrônica para a avaliação das bactérias antes e após a compressão. Podem ser feitos estudos mais aprofundados sobre formas de empregar a MICP em materiais comprimidos, estudos comparativos entre técnicas de fabricação de tijolos com MICP, podendo ser utilizados outros resíduos, outras cepas de bactérias biocalcificantes e/ou outras fontes de químicos utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ahenkorah, I.; Rahman, M. M.; Karim, M. R.; Beecham, S.. Unconfined compressive strength of MICP and EICP treated sands subjected to cycles of wetting-drying, freezing-thawing and elevated temperature: Experimental and EPR modelling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 15, n. 5, p. 1226–1247, 2023.
2. Arpajirakul, S.; Pungrasmi, W.; Likitlersuang, S.. Efficiency of microbially-induced calcite precipitation in natural clays for ground improvement. *Construction and Building Materials*, v. 282, p. 122722, 2021.
3. Hoong, J. D. L. H.; Lux, J.; Mahieux, P-Y.; Turcry, P.; Ait-Mokhtar, A.. Determination of the composition of recycled aggregates using a deep learning-based image analysis. *Automation in Construction*, v. 116, n. May, p. 103204, 2020.
4. Hou, Y.. Contribution au développement de la valorisation des déchets inertes du BTP: Étude de la carbonatation des granulats recyclés compactés, La Rochelle University, PHD Thesis, 2021, France.
5. 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*, v. 65, p. 1213–1221, 2022.
6. Mi, T.; Peng, L.; Yu, K.; Zhao, Y.. Optimizing microbial- and enzyme-induced carbonate precipitation treatment regimes to improve the performance of recycled aggregate concrete. *Case Studies in Construction Materials*, v. 19, n. June, p. e02261, 2023.
7. Morselli, L. B. G. A.; Younsi, A.; Mahieux, P-Y.; Quadro, M. S.; Andrezza, R.. A Feasibility Study on the Development of Eco-Friendly Compressed Recycled Sand Brick Stabilized with Low Blast-Furnace Slag Cement Content. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, p. 1–4, 2024.
8. Ouedraogo, K. A. J.; Aubert, J. E.; Tribout, C.; Escadeillas, G.. Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials*, v. 236, p. 117578, 2020.

9. 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*, v. 45, n. January, 2022.
10. Zhang, K.; Tang, C-S.; Jiang, N-J.; Pan, X-H.; Liu, B.; Wang, Y-J.; Shi, B. Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) technology: a review on the fundamentals and engineering applications. *Environmental Earth Sciences*, v. 82, n. 9, p. 1-33, 26 abr. 2023.