

Biocimentação na produção de argamassas: o papel das bactérias biocimentantes

Biocementation in the production of mortar: the role of biocementation bacteria

Jênifer Cristina Backes, Engenheira Civil, Universidade do Contestado - UNC

E-mail: jeniferbackes21@gmail.com

André Leão, Engenheiro Sanitarista e Ambiental, Mestrando ProfÁgua UFRGS

E-mail: engenheiro.andreleao@gmail.com

Laís Bruna Verona, Engenheira Sanitarista e Ambiental, Mestrando ProfÁgua UFRGS

E-mail: lbverona13@gmail.com

Julio Cesar Rech, Me. em Engenharia Civil, Sanitária e Ambiental, Universidade do Contestado - UNC

E-mail: juliocesar@unc.br

Aline Schuck Rech, Dra. em Engenharia Ambiental, Universidade do Contestado - UNC

E-mail: aline.schuck@unc.br

Resumo

O uso da biocimentação é uma técnica amplamente empregada no ramo da construção civil na reparação de patologias, a exemplo de trincas e fissuras. Essa técnica está atrelada com a atividade bacteriana (ureolíticas e/ou carbonatogênica), responsável pela conversão da ureia em carbonato, corrigindo problemas na estrutura. Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi identificar as principais bactérias ureolíticas capazes de precipitar carbonato de cálcio em argamassa, uma das áreas da construção de maior aplicação, bem como avaliar o desempenho de cada microrganismo nas mudanças das propriedades físicas e mecânicas da argamassa. Para isso, foi realizado uma pesquisa bibliográfica no banco de dados da Scopus, Scielo, Web of Science, bem como no portal acadêmico da CAPES. Os resultados mostram que a principal bactéria associada à técnica de biocimentação em argamassas é o gênero *Bacillus* sp. Não foi identificado parâmetros e padrões de avaliação do desempenho das diferentes bactérias empregadas entre os estudos. No entanto, avaliações relacionadas com resistência da argamassa estavam presentes na grande maioria das pesquisas. A utilização da biocimentação via atividade bacteriana mostrou ser uma importante estratégia que promove melhorias na resistência, compressão, potencial de absorção de água e porosidade da argamassa

Palavras-chave: Biocimentação; Argamassa; Revisão Bibliográfica.

Abstract

*The use of biocementation is a technique widely used in the civil construction to repair pathologies, such as cracks and fissures. This technique is linked to the bacterial activity (ureolytic and/or carbonategenic), responsible for the conversion of urea into carbonate, correcting problems in the structure. In this sense, the aim of this study was to identify the main ureolytic bacteria capable of precipitating calcium carbonate in mortar, one of the most widely applied construction areas, as well as to evaluate the performance of each microorganism in changing the physical and mechanical properties of the mortar. For this, a bibliographic search was carried out in the database of Scopus, Scielo, Web of Science, as well as in the academic portal of CAPES. The results show that the main bacteria associated with the mortar biocementation technique is the genus *Bacillus* sp. Parameters and standards for evaluating the*

performance of the different bacteria used between the studies were not identified. However, evaluations related to mortar strength were present in the vast majority of researches. The use of biocementation via bacterial activity proved to be an important strategy that promotes improvements in strength, compression, water absorption potential and porosity of the mortar

Keywords: *Biocementations; Mortar Construction; Literature review.*

1. Introdução

Nos dias atuais os materiais cimentícios associados a argamassa são amplamente utilizados em construções no mundo todo (BAUER, 2005). Esse comportamento está atrelado principalmente a dois fatores, relacionados ao baixo custo de material e ao baixo custo de manutenção associado (ABO-EL-ENEIN et al., 2013). Especialmente no Brasil, devido à alta disponibilidade, a argamassa é um dos maiores itens de consumo da construção civil, uma vez que é usado como material de ligação para tijolos pedras e outras unidades de alvenaria (ALMEIDA et al., 2019).

Apesar da argamassa apresentar múltiplas vantagens, esse material é vulnerável à deterioração, corrosão e rachaduras, sendo um material sensível às ações do intemperismo (MUYNCK et al., 2010). Essas patologias podem levar esse revestimento a perder sua funcionalidade original e ocasionar riscos à segurança do usuário, devido a entrada de agentes externos como a água que favorecem o estado de deterioração (KRISHNAPRIYA et al., 2015).

A fim de fazer a reparação desses problemas, vários elementos de enchimentos sintéticos como epóxi, resinas e diferentes aditivos comerciais vêm sendo utilizados para essa finalidade (CHOI et al., 2020). No entanto, esses aditivos possuem alto valor agregado, e em muitos casos não são biodegradáveis, pois são revestidos a base de compostos orgânicos voláteis. Estes compostos apresentam efeito poluidor do ar, tanto durante a fabricação quanto na aplicação, causando impactos ambientais negativos. Além da reparação, em alguns casos, para o conserto é necessário a retirada total do material, demandando alto custo e tempo (MUYNCK et al., 2010).

Nesse sentido, atualmente diferentes alternativas vêm sendo buscadas em ordem de sanar esses danos. Uma das tecnologias amplamente utilizadas no mundo para reparar os revestimentos de argamassa, e outros tipos de materiais utilizados na construção civil, é a utilização de carbonato de cálcio, que é um elemento abundante na natureza produzido por meio da síntese celular de microrganismos (LOPEZ-GARCIA et al., 2007). Diversos microrganismos possuem a capacidade de excretar como parte de seu metabolismo carbonato de cálcio. Algumas das bactérias presentes no solo e na água vêm sendo relatadas como microrganismos capazes de induzir a precipitação do cálcio em meio natural, devido possuírem características associadas com a aglutinação e a expressão da enzima uréase (LIAN et al., 2006).

Nesse sentido, os microrganismos utilizados para realizarem os reparos, são conhecidos como ureolíticos devido ao seu potencial de conversão da ureia em amônia e carbonato (LOPEZ-GARCIA et al., 2007). Esse processo, conhecido como biomineralização é bastante comum no meio ambiente e está atrelado ao processo pelo qual, organismos vivos precipitam minerais inorgânicos na forma de esqueletos, conchas, dentes, entre outros (XU et al., 2007). No processo de produção de carbonato de cálcio devido a via microbiana, conhecido internacionalmente como *microbially induced calcium carbonate precipitation* (MICP), a enzima uréase hidrolisa a ureia em diferentes polimorfos do cristal de carbonato de cálcio, e a estrutura que é formada depende do tipo da fonte de cálcio utilizada, período de incubação e atividades metabólicas referentes à espécie microbiana avaliada (BANG et al., 2001).

A utilização de carbonato de cálcio produzido via atividade microbiana é uma técnica mundialmente conhecida, sendo utilizada pela primeira vez para a reparação de fissuras para evitar a lixiviação de canais (GOLLAPUDI et al., 1995). Posteriormente, a aplicação dessa técnica passou a ser amplamente utilizada para diferentes materiais e finalidades, como remediações de argamassa, granito, calcário e concreto, de metais potencialmente tóxicos, e íons de cálcio, sequestro de CO₂ atmosférico, na restauração de prédios históricos, na consolidação de solos e taludes, na redução de poros em reservatórios, na proteção da superfície de concretos e argamassas, entre outros (MUYNCK et al., 2010; ABO-EL-ENEIN et al., 2013).

Assim, no mercado de construção civil a biomineralização é amplamente estudada e aplicada. Diante disso, elucidar o comportamento dos microrganismos responsáveis pela produção de cálcio, torna-se um papel fundamental no âmbito da biocimentação. Primeiramente, porque é primordial buscar materiais que produzam um menor impacto ambiental, e por fim, identificando a dinâmica dos microrganismos biomineralizadores, o processo de biocimentação pode ser otimizado (GONZÁLEZ-MUNOZ, 2008). Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi por meio de uma revisão bibliográfica, identificar as principais bactérias ureolíticas capazes de precipitar carbonato de cálcio em argamassa, bem como avaliar o desempenho de cada microrganismo nas mudanças das propriedades físicas e mecânicas da argamassa.

2. Materiais e Métodos

2.1 Pesquisa exploratória

Essa pesquisa foi desenvolvida baseada em uma revisão bibliográfica desenvolvida com diferentes trabalhos acadêmicos vinculados a teses, dissertações, trabalhos finais de conclusão de curso, bem como artigos científicos publicados tanto em periódicos nacionais quanto internacionais. Na Figura 1 apresenta-se de forma simplificada os principais guias norteadores utilizados como base para o desenvolvimento da revisão bibliográfica.



Figura 1 – Infográfico norteador do desenvolvimento da pesquisa bibliográfica. Fonte: Os autores (2021).

3. Resultados e Discussão

Nesse item em um primeiro momento, estão abordados os pressupostos teóricos referente a biocimentação, bem como a rota metabólica desenvolvida pela atividade microbiana para a precipitação de cálcio. Posteriormente, as principais bactérias associadas com esse processo são apresentadas, juntamente com o desempenho de cada microrganismo nas mudanças das propriedades físicas e mecânicas da argamassa.

3.1 Biocimentação

A biocimentação é a precipitação de materiais entre os espaços vazios unindo as partículas entre si. Esse processo pode ser aplicado tanto em obras de construção civil até nos espaços vazios do solo (ABO-EL-ENEIN et al., 2013). A permissa base da técnica de biocimentação consiste na precipitação de carbonato de cálcio entre os vazios de diferentes estruturas, via atividade microbiana (GURBUZ et al., 2015). Dessa forma, esse mecanismo, também, é conhecido como biomineralização ou precipitação de carbonato de cálcio (BANG et al., 2001).

Essa técnica consiste na inserção de bactérias juntamente com um meio contendo nutrientes, geralmente composto por ureia e cloreto de cálcio, onde ocorre uma reação química com produto final, o calcite (CaCO_3) (REIS, 2017). Esse processo, também é conhecido mundialmente como *microbiologically induced calcite precipitation* (MICP) e é advindo de um processo natural atrelado diretamente a ação de microrganismos. Nesse sentido, a MICP é conhecida por ser uma técnica que é identificada como uma alternativa para o melhoramento das estruturas de argamassa e de concreto, além da reparação de fissuras e na proteção de superfícies de concreto (REIS, 2017).

Na precipitação de carbonato de cálcio induzida microbiologicamente os microrganismos são capazes de secretar um ou mais produtos metabólicos que reagem com íons cálcio no ambiente, resultando na precipitação de minerais (DHAMI et al., 2013). Esse processo, realizado naturalmente pelas bactérias, as quais podem produzir diferentes fases de polimorfos anidridos de carbonato de cálcio tais como calcita, aragonita e vaterita, bem como fases cristalinas hidratadas (monohidrocalcita, ikeita e carbonato de cálcio amorfo) (ABO-EL-ENEIN et al., 2013).

Nesse sentido, as bactérias ureolíticas são elementos primordiais nesse processo (LOPEZ-GARCIA et al., 2007). Essas bactérias possuem a habilidade de expressar a enzima uréase. Essas enzimas possuem centros metálicos em seus sítios ativos, os quais são responsáveis por ativar o substrato para que a reação ocorra (HAUSINGER et al., 2001). Alguns estudos reportam a precipitação química de carbonato de cálcio sem a presença de bactérias ureolíticas. No entanto, esse processo torna-se lento, e em alguns casos ele pode ser interrompido (BORGES, 2015). Para comprovar os bons resultados alcançados juntos ao concreto com o uso de bactérias ureolíticas e descritos na literatura a seguir será elencado os fatores que influenciam na atividade microbiana de produção de carbonato de cálcio, bem como a rota metabólica do processo.

3.2 Precipitação de cálcio via atividade microbiana

A biocimentação é um processo químico controlado por diferentes fatores. Atualmente, existe uma vasta literatura abordando os principais fatores atrelados com a precipitação de cálcio via atividade microbiana. Para Alt-Thawadi (2018), a concentração de carbono inorgânico dissolvido, a concentração de íons de cálcio, o pH, e a presença de sítios de nucleação são os

principais fatores elencados nessa rota metabólica. Enquanto que o pH, a temperatura, a quantidade de ureia, e os nutrientes presentes no meio são abordados como fatores fundamentais (BORGES, 2015). Apesar de existir uma ampla variedade de fatores apontados pela literatura que contribuem para o processo de biocimentação ocorrer, o pH é um elemento chave que regula todo esse processo. Stocks-Fischer (2009) enfatiza que o pH ótimo para a atividade da enzima uréase é entre 7,5 e 8. Já Hammes e Verstraete (2002) relatam que a condição ótima para que a via bioquímica se desenvolva é um pH próximo a 9.0.

De forma geral, existem duas vias metabólicas microbianas associadas com a precipitação de cálcio. A via autotrófica, onde o dióxido de carbono é utilizado como fonte de carbono, provocando sua redução no ambiente bacteriano e na presença de íons de Ca^{2+} , e a sua depleção resulta no aumento da produção de carbonato de cálcio. Enquanto que na via heterotrófica, os microrganismos podem formar carbonato através da precipitação ativa ou passiva. Na precipitação ativa, a produção de íons carbonato ocorre devido à troca iônica de cálcio ou de magnésio. Já no processo de precipitação passiva, a produção do íon carbonato ocorre devido à amonificação de aminoácidos, redução de nitratos ou pela degradação da ureia. Independentemente dos casos supracitados, a amônia é produzida como produto metabólico final, o que resulta no aumento do pH (AL-THAWADI, 2008). Na Figura 2, apresenta-se em linhas gerais o processo de precipitação de cálcio, através da atividade da enzima uréase.

As bactérias biomineralizadoras estão diretamente atreladas a saturação atingível e a taxa de precipitação de carbonato de cálcio, regulando a morfologia dos cristais formados. Quando a concentração destes íons excede o produto de solubilidade a solução do meio se torna supersaturada. Quanto mais supersaturada for a solução, maior é a probabilidade de a precipitação de carbonato de cálcio ocorrer.

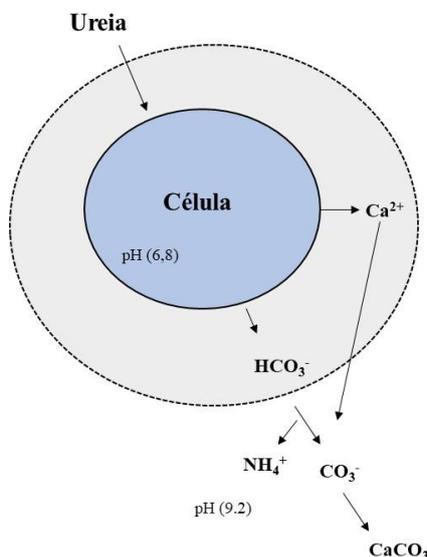


Figura 2 – Desenho esquemático representando a atividade da enzima uréase durante o processo de precipitação de cálcio, via atividade microbiana. Fonte: Adaptado de Al-Thawadi (2008).

Quando a enzima uréase presente nas bactérias ureolíticas faz a hidrólise da ureia, ocorre a produção de amônia e carbonato (Equação 1), que posteriormente de forma espontânea esses elementos são hidrolisados para produzir uma nova molécula de amônia e ácido carbônico (Equação 2). Estes produtos equilibram-se em meio aquoso, formando bicarbonato e amônio, além de íons de hidróxido (Equação 3 e 4), que resultam na elevação do pH. Esta alteração do pH pode alterar o equilíbrio do bicarbonato, gerando íons carbonato (Equação 5), que na presença de íons solúveis de cálcio, precipitam como CaCO_3 (Equação 6) (DHAMI et al., 2013).

A parede celular bacteriana pode atrair cátions (Ca^{2+}), devido a mesma apresentar cargas negativas, e posteriormente depositarem na superfície celular. Os cátions na reação com os íons CO_3^{2-} , precipitando carbonato de cálcio na superfície da parede celular, promovendo a morte das bactérias (Equações 7 e 8).



As principais etapas vinculadas com a precipitação de cálcio via atividade bacteriana são apresentadas na Figura 3. De forma geral, os íons cálcio na solução são atraídos para parede celular bacteriana devido à carga negativa da célula (a). Após a adição de ureia às bactérias, o carbono inorgânico dissolvido (*Dissolved Organic Carbonic- DIC*) e o amônio (NH_4) são liberados no microambiente da bactéria (b). Na presença de íons cálcio, pode resultar em uma supersaturação local e, portanto, uma precipitação heterogênea do carbonato de cálcio na parede da célula bacteriana (c). Depois de um tempo, a célula inteira fica encapsulada, limitando a transferência de nutrientes, resultando em morte celular (d).

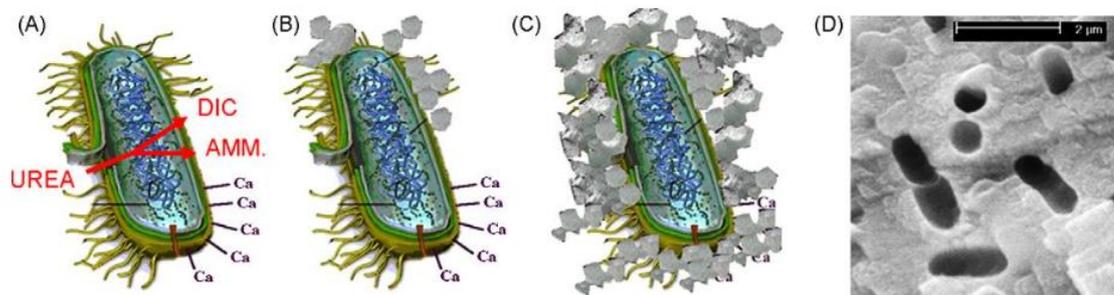


Figura 3 – Formação de carbonato de cálcio no interior de uma célula bacteriana. Fonte: Adaptado de Muyneck et al. (2010).

3.3 Bactérias biocimentantes

Na literatura especializada encontra-se diferentes microrganismos capazes de realizar o mecanismo de biocimentação. A espécie da bactéria empregada no processo é essencial para a produção da enzima uréase e, portanto, o tipo de bactéria mais adequadas para MICP são bactérias capazes de catalisar a hidrólise da ureia. As bactérias aeróbias são preferíveis, uma vez que liberam CO_2 da respiração celular, e a produção de CO_2 é acompanhada pelo aumento do pH devido à produção de amônio (MUYNCK et al., 2010).

Os microrganismos amplamente empregados com essa finalidade são as bactérias do gênero *Bacillus* e *Sporosarcina* (MUYNCK et al., 2010). Essas bactérias são capazes de crescer em um meio de cultura contendo aminoácidos e ágar como nutriente (JIMENEZ-LOPEZ et al., 2007). Além disso, possuem uma alta taxa de produção da enzima urease e melhor adaptabilidade ao ambiente (WANG et al., 2012). No entanto, atualmente diferentes estudos já foram desenvolvidos utilizando diferentes espécies de bactérias. Na Tabela 1 é apresentando diferentes trabalhos juntamente com as bactérias utilizadas no processo de reparo de argamassas e cimentos utilizados na construção civil.

Bactéria	Referência
Bacillus cereus	Metayer-Levrel et al. (1999)
Micrococcus sp.	Tiano et al. (1999)
Bacillus pasteurii	Ramachandran et al. (2001); Bang et al. (2001)
Bacillus sphaericus	Belie et al. (2008)
Sporosarcina pasteurii	Albo-EL-Enein et al. (2013)
Bacillus cohniiine Bacillus megaterium	Chaurasia et al. (2019)
Shewanella	Ghosh et al. (2005)

Tabela 1 – Diferentes bactérias utilizadas no processo de biocimentação. Fonte: Os autores (2021).

Além da diversidade bacteriana, a taxa de hidrólise da ureia é proporcional a abundância das bactérias. Para otimizar a produção de carbonato de cálcio é necessário determinar a concentração celular ótima para o processo de biocimentação, quanto ao tempo específico em que as bactérias se encontram em sua fase exponencial, onde ocorre a maior produção enzimática (MUYNCK et al., 2010). Nesse sentido, a literatura especializada recomenda uma concentração de bactérias junto ao substrato na ordem de 10^6 a 10^8 células (WANG et al., 2012).

3.3.1 Aplicação das bactérias biocimentantes na argamassa

Segundo a Albo-el-enein et al. (2013), as células microbianas devem ser adicionadas junto a argamassa imediatamente após o preparo da argamassa. As bactérias de interesse devem ser cultivadas em caldo nutriente, suplementado com o 2% de ureia e misturado a argamassa em uma relação de água/ argamassa de 0,6. Na Figura 4 apresenta-se a precipitação de carbonato de cálcio após 28 dias de cultivo de bactérias biocimentantes (*Bacillus* sp.)

Figura 4 – Desenvolvimento de bactérias biocimentantes em argamassa. A) Controle sem adição de bactérias. B) Após 28 dias de desenvolvimento das células bacterianas.

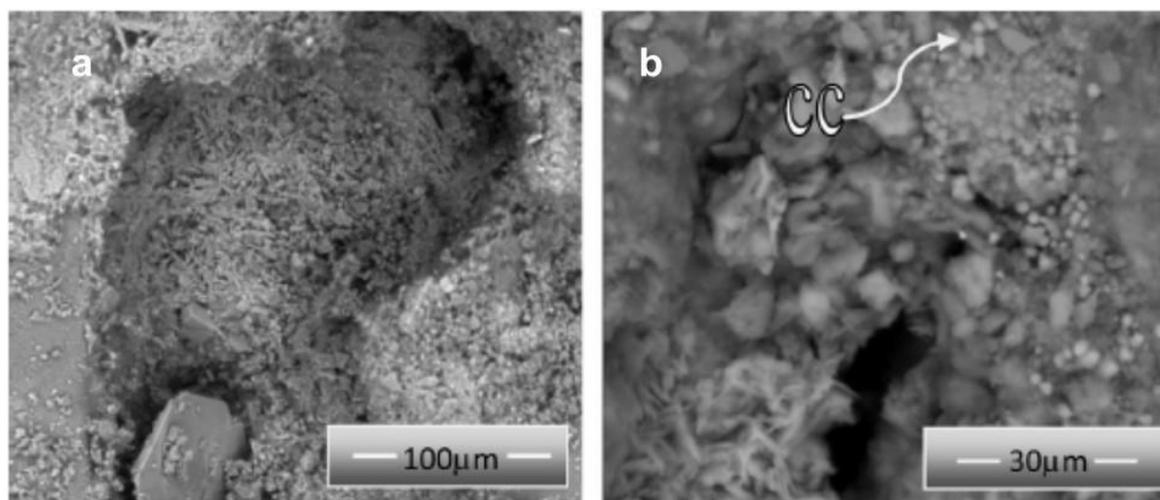


Figura 4 – Desenvolvimento de bactérias biocimentantes em argamassa. A) Controle sem adição de bactérias. B) Após 28 dias de desenvolvimento das células bacterianas. Fonte: Adaptado de Albo-el-enein et al. (2013).

3.3.2 Desempenho da aplicação de bactérias biocimentantes em argamassa

Atualmente já está bem elucidado tanto na literatura nacional quanto internacional que a biocimentação melhora de forma significativa as propriedades da argamassa. De forma geral, não foi identificado parâmetros padrões de avaliação do desempenho das diferentes bactérias

empregadas entre os estudos. No entanto, parâmetros associados com a resistência da argamassa estavam presentes na grande maioria das pesquisas.

Apesar da biocimentação ser amplamente utilizada, os estudos desenvolvidos para avaliar o potencial bacteriano na produção de carbonato de cálcio encontram-se em ascensão nos últimos anos (ALMEIDA et al., 2019). A seguir será abordado aplicações de diferentes tipos de bactérias, juntamente com o desempenho das mesmas na melhoria das propriedades da argamassa. Além disso, na Tabela 2 apresenta-se de forma resumida algumas bactérias estudadas e o seu desempenho em relação a melhorias realizadas em argamassa.

Tabela 2– Principais resultados atrelados a atividade bacteriana na técnica de biocimentação.

Bactéria	Principal resultado	Referência
Bacillus Pasteurii	A biocimentação melhorou a rigidez, a resistência a compressão, o modulo de ruptura e a durabilidade do concreto	Ramakrishnam, (2007)
Bacillus Pasteurii	A biocimentação proporcionou uma diminuição de absorção de água de 65 a 90%.	Muynck et al. (2008)
Bacillus sp. CT-5	A biocimentação. aumentou 36% na resistência a compressão da argamassa de cimento	Achal et al. (2010)
Sporosarcina pasteurii	A biocimentação aumento de 33% em 28 dias na resistência a compressão da argamassa de cimento.	Abo-El-Enein et al., (2012)
Bacillus sp.	A biocimentação demonstrou uma redução de mais de 50% na porosidade das amostras de argamassa.	Achal et al. (2013)
Bacillus Cohnii megaterium	A biocimentação aumentou na ordem de 20% a resistência a compressão das argamassas.	Chaurasia et al. (2019)
Sporosarcina pasteurii	A biocimentação proporcionou efeito positivos em relação a compressão e resistência a aderência em argamassa.	Al-Salloum et al. (2016)
Bacillus sp.	melhor hidratação da argamassa em função da presença dos agregados leves umedecidos com a atividade de biocimentação.	Bunder et al. (2017a)

Tabela 2– Principais resultados atrelados a atividade bacteriana na técnica de biocimentação. Fonte: Os autores (2021).

Ramakrishnam (2007) mostrou que a adição da bactéria *Bacillus Pasteurii* melhorou significativamente as trincas e fissuras presentes em um concreto de argamassa. O desempenho da biocimentação foi avaliado comparando a resistência a compressão e rigidez de amostras fissuradas com a presença de bactérias e uma amostra controle sem a adição de bactérias. Além de testarem a durabilidade dos elementos do concreto tratados com bactérias, expostos a ambientes alcalinos, sulfatados e de congelamento-descongelamento. Os resultados mostraram que a técnica de biocimentação melhorou a rigidez, a resistência a compressão, o modulo de ruptura e a durabilidade do concreto.

Em outro estudo utilizando a mesma espécie de bactéria (*Bacillus Pasteurii*), os efeitos da precipitação de carbonato de cálcio na durabilidade de amostras de argamassa com diferentes porosidades para a recuperação de estruturas de concreto foram investigados. A durabilidade foi avaliada a partir das propriedades de permeabilidade e resistência aos processos de degradação. Os resultados mostraram que as presenças dos cristais de carbonato de cálcio proporcionaram uma diminuição de absorção de água de 65 a 90%. Além disso, um aumento da resistência ao congelamento e descongelamento também foi identificado devido a ação bacteriana (MUYNCK et al., 2008).

Em ordem de realizar a recuperação de fissuras de concreto em obras já construídas, Achal et al. (2010) estudaram o desempenho da bactéria *Bacillus sp. CT-5* no processo de biocimentação. Identificou-se um aumento de 36% na resistência a compressão da argamassa de cimento com a adição das bactérias. Além disso, a produção de calcita devido a presença da bactéria *Bacillus* absorveu quase 6 vezes menos água que o material de controle.

Em 2012, Abo-El-Enein et al. (2013) investigaram o desempenho da bactéria *Sporosarcina Pasteurri* na força e na absorção de água de argamassa de cimento e areia, devido a precipitação de carbonato de cálcio de forma induzida. Os resultados mostraram um aumento de 33% em 28 dias na resistência à compressão da argamassa de cimento.

Posteriormente, foi desenvolvido um estudo com a bactéria *Bacillus sp.* para avaliar a durabilidade e remediação de fissuras em estruturas de concreto de argamassa. A biocimentação induzida pela atividade da bactéria *Bacillus sp.*, demonstrou uma redução de mais de 50% na porosidade das amostras de argamassa. Além disso, a permeabilidade ao cloreto de concreto mudou de moderada para muito baixa. Nesse sentido, os autores concluíram que a bactéria foi benéfica para o reparo das fissuras (ACHAL et al., 2013).

Resultados semelhantes foram obtidos por Chaurasia et al. (2019), onde foi estudado o desempenho de dois gêneros da bactéria *Bacillus* (*B. Cohnii* e *B. Megaterium*). Os autores produziram diferentes concentrações de argamassa e foi medida a resistência à compressão. Os resultados mostraram que ambas as bactérias apresentaram comportamento similar, aumentando na ordem de 20% a resistência a compressão das argamassas. Esse mesmo comportamento foi obtido por Masheswaran et al. (2014), utilizando as bactérias *Bacillus* do gênero *Cereus* e *Pasteurri*. Os autores mostraram que a adição dessas culturas bacterianas aumentou a resistência à compressão da argamassa de cimento devido a biomineralização de carbonato de cálcio. Os resultados dos testes revelaram um aumento de 38% na resistência a compressão com *Bacillus Cereus* e 29% para o *Bacillus Pasteurri*.

Al-Salloum et al. (2016) mostraram que a precipitação de cálcio por meio da bactéria *Sporosarcina Pateurri* proporcionou efeitos positivos em relação a compressão e resistência a aderência em argamassa. Nesse mesmo sentido, William et al. (2016) avaliaram a eficácia de diferentes agentes de reparo de fissuras de concreto, com materiais impermeabilizantes e argamassa com a adição de bactérias (*Bacillus sp.*), em vigas de concreto fissuradas. Argamassas contendo bactérias e sem bactérias foram utilizadas para o fechamento de fissuras. Os resultados mostraram que as argamassas pré-rebocadas com a presença bacteriana exibiram maior recuperação de resistência à flexão (8 a 30% de recuperação) em comparação com as argamassas pré-rebocadas sem bactérias (3 a 5% de recuperação).

Bundur et al., (2017a) mostraram um significativo aumento da resistência da argamassa com a presença de diferentes espécies do gênero *Bacillus*. Além disso, os autores relatam melhor hidratação da argamassa em função da presença dos agregados leves umedecidos com a atividade de biocimentação produzida pelas bactérias.

Em outro estudo, a capacidade de remediar rachaduras e reduzir porosidade em matrizes a base de cimento utilizando *Sporosarcina Pasteurri* foi estudado. Os resultados mostraram que a adição de bactérias mostrou ter impacto substancial na redução da porosidade da argamassa (BUNDUR et al. 2017b). Kumari et al. (2017) avaliaram as propriedades mecânicas da argamassa de cimento com a adição de bactérias do gênero *Bacillus*. Os resultados mostraram que o cimento que continha a presença de bactérias apresentou maior resistência a compressão, tempo de endurecimento, solidez, sorvoplastia e morfologia microestrutural.

4. Conclusões

Baseado em uma revisão bibliográfica desenvolvida sobre o tema biocimentação e os principais microrganismos envolvidos com o processo, pode-se concluir que as pesquisas desenvolvidas com biocimentação em argamassa apresentaram resultados promissores, devido a necessidade de melhorias e incrementos quando ocorrer manifestações patológicas em

argamassas. A principal bactéria empregada no processo de biocimentação está atrelada ao gênero *Bacillus*. Além disso, o pH presente do meio é um fator primordial para a atividade da enzima urease, sendo indicado valores na faixa de 7,5 a 9.

Não foi identificado parâmetros padrões de avaliação do desempenho das diferentes bactérias empregadas entre os estudos. No entanto, parâmetros associados com a resistência da argamassa estavam presentes na grande maioria das pesquisas, indicando um aumento na resistência na argamassa cerca de 30% após a adição das bactérias. A utilização da biocimentação via atividade bacteriana mostrou ser uma importante estratégia que promove melhorias na resistência, compressão, potencial de absorção de água e porosidade da argamassa.

Referências

- ABO-EL-ENEIN, S.A.; ALI, A.H.; TALKHAN, Fatma N.; ABDEL-GAWWAD, H.A. Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of cement mortar. **Hbrc Journal**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 36-40, abr. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2012.10.004>.
- ACHAL, Vareniam; MUKERJEE, Abhijeet; REDDY, M. Sudhakara. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 48, p. 1-5, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.061>.
- ACHAL, Vareniam; MUKHERJEE, Abhijit; REDDY, M. Sudhakara. Microbial Concrete: way to enhance the durability of building structures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 730-734, jun. 2010. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000159](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000159).
- ALMEIDA, Jupira; COLLA, Luciane Maria; THOMÉ, Antônio. Características das publicações sobre o uso da técnica de biocimentação na produção de argamassas. **Revista Ciateg**, Passo Fundo, v. 11, n. 11, p. 62-79, 2019.
- AL-SALLOUM, Yousef; ABBAS, H.; SHEIKH, Q.I.; HADI, S.; ALSAYED, Saleh; ALMUSALLAM, Tarek. Effect of some biotic factors on microbially-induced calcite precipitation in cement mortar. **Saudi Journal Of Biological Sciences**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 286-294, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.016>.
- AL-THAWADI, Salwa. **High strength in-situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria**. 2008. 209 f. Tese (Doutorado) - Curso de School Of Biology Scienceand Biotechnology, Murdoch University, Austrália, 2008.
- BANG, Sookie S.; GALINAT, Johnna K.; RAMAKRISHNAN, V. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*. **Enzyme And Microbial Technology**, [S.L.], v. 28, n. 4-5, p. 404-409, mar. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0141-0229\(00\)00348-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0141-0229(00)00348-3).
- BAUER, E. (Ed.). *Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades*. Brasília: IEM-Unb/Sinduscon-dF, 2005.
- BELIE, N de; MUYNCK, W de. Crack repair in concrete using biodeposition. **Concrete Repair, Rehabilitation And Retrofitting II**, [S.L.], p. 291-292, out. 2008. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/9781439828403.ch107>.
- BORGES, Hugo Moreira Ramos Rodrigues. **Bio-cimentação como técnica de reparação de argamassas cimentícias**. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2015.
- BUNDER, Zeynep Başaran; BAE, Sungwoo; KIRISITS, Mary Jo; FERRON, Raissa Douglas. Biomineralization in Self-Healing Cement-Based Materials: investigating the temporal evolution of microbial metabolic state and material porosity. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 29, n. 8, p. 04017079, ago. 2017b. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001838](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001838).
- BUNDUR, Zeynep Başaran; KIRISITS, Mary Jo; FERRON, Raissa Douglas. Use of pre-wetted lightweight fine expanded shale aggregates as internal nutrient reservoirs for microorganisms in bio-mineralized mortar. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 84, p. 167-174, nov. 2017a. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.003>.
- CHAURASIA, Leena; BISHT, Vishakha; SINGH, L.P.; GUPTA, Sanjay. A novel approach of biomineralization for improving micro and macro-properties of concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 195, p. 340-351, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.031>.
- CHOI, Sun-Gyu; CHANG, Ilhan; LEE, Minhyeong; LEE, Ju-Hyung; HAN, Jin-Tae; KWON, Tae-Hyuk. Review on geotechnical engineering properties of sands treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and biopolymers. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 246, p. 118415, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118415>.

DHAMI, Navdeep Kaur. Biomineralization of Calcium Carbonate Polymorphs by the Bacterial Strains Isolated from Calcareous Sites. **Journal Of Microbiology And Biotechnology**, [S.L.], v. 23, n. 5, p. 707-714, maio 2013. Korean Society for Microbiology and Biotechnology. <http://dx.doi.org/10.4014/jmb.1212.11087>.

GOLLAPUDI, U.K.; KNUTSON, C.L.; BANG, S.s.; ISLAM, M.R. A new method for controlling leaching through permeable channels. **Chemosphere**, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 695-705, fev. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0045-6535\(94\)00435-w](http://dx.doi.org/10.1016/0045-6535(94)00435-w).

GHOSH, P.; MANDAL, S.; CHATTOPADHYAY, B.D.; PAL, S. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 35, n. 10, p. 1980-1983, out. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.005>.

González-Munoz, M.T. 2008. Bacterial biomineralization applied to the protection/consolidation of ornamental stone: current development and perspectives. *Coalition* 15, 12–18.

GURBUZ, Ayhan; SARI, Yasin Dursun; YUKSEKDAG, Zehra Nur. Bacteria-Induced Cementation in Sandy Soils. **Geomicrobiology Journal**, [S.L.], v. 32, n. 9, p. 853-859, 21 maio 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01490451.2015.1016246>.

HAMMES, Frederik; VERSTRAETE, Willy. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 3-7, mar. 2002. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1015135629155>.

HAUSINGER R. P., KARPLUS P. A. EM: WIEGHARDT K., HUBER R., POULUS T. L., Messer-Schmidt A Handbook of Metalloproteins. West Sussex, UK, 2001.

JIMENEZ-LOPEZ, C.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; PIÑAR, G.; CARRILLO-ROSÑA, F.J.; RODRIGUEZ-GALLEGO, M.; GONZALEZ-MUÑOZ, M.T. Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting the stone. **Chemosphere**, [S.L.], v. 68, n. 10, p. 1929-1936, ago. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.02.044>.

KRISHNAPRIYA, S.; BABU, D.L. Venkatesh; G., Prince Arulraj. Isolation and identification of bacteria to improve the strength of concrete. **Microbiological Research**, [S.L.], v. 174, p. 48-55, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2015.03.009>.

KUMARI, C.; BHASKAR DAS; JAYABALAN, R; DAVIDS, R; SARKAR, P. Effect of Nonureolytic Bacteria on Engineering Properties of Cement Mortar. *Jornal Matering Civil Engineering*, [S.L.], v. 29, n. 6, p. 06016024-1, 2017.

LIAN, Bin; HU, Qiaona; CHEN, Jun; JI, Junfeng; TENG, H. Henry. Carbonate biomineralization induced by soil bacterium *Bacillus megaterium*. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, [S.L.], v. 70, n. 22, p. 5522-5535, nov. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2006.08.044>.

LÓPEZ-GARCÍA, Purificación; KAZMIERCZAK, Józef; BENZERARA, Karim; KEMPE, Stephan; GUYOT, François; MOREIRA, David. Bacterial diversity and carbonate precipitation in the giant microbialites from the highly alkaline Lake Van, Turkey. **Extremophiles**, [S.L.], v. 9, n. 4, p. 263-274, 15 jun. 2005.

Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00792-005-0457-0>.

MASHEWARAN, S; DASURU, A; MURTHY, R.M; BHUVANESHWARI, V; RAMESH KUMAR. Strength Improvement Studies Using New Type Wild Strain *Bacillus Cereus* on Cement Mortar. *Current Science*, [S.L.], v. 106, no. 1, Current Science Association, 2014, pp. 50–57, <http://www.jstor.org/stable/24099862>.

MÉTAYER-LEVREL, G Le; CASTANIER, S; ORIAL, G; LOUBIÈRE, J.-F; PERTHUISOT, J.-P. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. **Sedimentary Geology**, [S.L.], v. 126, n. 1-4, p. 25-34, jul. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00029-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00029-9).

MUYNCK, Willem de; BELIE, Nele de; VERSTRAETE, Willy. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. **Ecological Engineering**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 118-136, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>.

MUYNCK, Willem de; COX, Kathelijin; BELIE, Nele de; VERSTRAETE, Willy. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 22, n. 5, p. 875-885, maio 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.011>.

RAMAKRISHNAN, V. Performance characteristics of bacterial concrete-a smart biomaterial. *Proceedings of the First International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, Washington, DC, 2007; p. 67-78.

RAMACHANDRAN, S.K; RAMAKRISHNAN, V; BANG, S.S. Remediation of concrete using microorganisms. *ACI Material Journal*, v.98, n.3 p.3–9, 2001.

REIS, L G V. **Biociologia microbiana da construção: potencial de biomineralização de bactérias ureolíticas de solo de cerrado e de rejeitos de construção civil**. 2017. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

STOCKS-FISCHER, Shannon; GALINAT, Johnna K.; BANG, Sookie S. Microbiological precipitation of CaCO₃. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 31, n. 11, p. 1563-1571, out. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0038-0717\(99\)00082-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-0717(99)00082-6).

TIANO, P.; BIAGIOTTI, L.; MASTROMEI, G. Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. **Journal of Microbiological Methods**, [S.L.], v. 36, n. 1-2, p. 139-145, maio 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-7012\(99\)00019-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-7012(99)00019-6).

WANG, J y; BELIE, N de; VERSTRAETE, W. Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. **Journal Of Industrial Microbiology And Biotechnology**, [S.L.], v. 39, n. 4, p. 567-577, 1 abr. 2012. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1007/s10295-011-1037-1>.

WILLIAM, Sarah L.; SAKIB, Nazmus; KIRISITS, Mary Jo; FERRON, Raissa D. Flexural Strength Recovery Induced by Vegetative Bacteria Added to Mortar. **Aci Materials Journal**, [S.L.], v. 113, n. 4, p. 332-339, ago. 2016. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/51688831>.

XU, An-Wu; MA, Yurong; CÖLFEN, Helmut. Biomimetic mineralization. **J. Mater. Chem.**, [S.L.], v. 17, n. 5, p. 415-449, 2007. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/b611918m>.