

**A biocimentação promovida por bactérias na recuperação de concreto e
estabilização de solos**

Ismar Batista Teles

Doutorando, Unifenas, Brasil
Ismar.teles@ifsuldeminas.edu.br

Ligiane Aparecida Florentino

Professora Doutora, Unifenas, Brasil
ligiane.florentino@unifenas.br

RESUMO

O uso de materiais inteligentes e adaptáveis vem ganhando espaço na indústria da construção civil, por causa da demanda do mercado ecológico e da conscientização em investir em técnicas sustentáveis, com baixo consumo de energia e de emissão antropogênica de dióxido de carbono. O desenvolvimento de materiais e métodos construtivos, com eficiência energética, adaptáveis às condições ambientais e não poluentes tornou-se uma exigência para o progresso do setor e o futuro das cidades. Dessa forma, objetiva-se com esta revisão bibliográfica fornecer uma visão geral da aplicação da biocimentação promovida por bactérias na recuperação de estruturas e estabilização de solos. Essa técnica utiliza minerais resultantes das atividades metabólicas bacterianas, que ocorrem à temperatura ambiente, como a precipitação de carbonato de cálcio induzida microbiologicamente (MICP), para produzir materiais cimentantes com funcionalidades estruturais, durabilidade e sem agredir o meio ambiente. Várias aplicações deste processo têm sido propostas na engenharia civil, tais como o bioconcreto na remediação de fissuras, na restauração de patrimônio cultural de pedra e na melhoria das propriedades físico-mecânicas do solo, alterando sua resistência e permeabilidade. A compreensão como essa biotecnologia pode mudar as estratégias e soluções atuais de construção, integrando sistemas baseado na natureza em projetos construtivos, será discutido neste estudo.

PALAVRAS-CHAVE: bioconcreto, bioestabilização, calcita.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil está em constante transformação e mudar a cultura construtiva em direção à sustentabilidade, uma vez que o setor é grande consumidor dos recursos naturais, passou a ser um importante desafio, principalmente na substituição de materiais que causam danos ambientais.

Da mesma forma, o emprego de recursos físicos ecologicamente correto e o uso eficiente de energia, através do desenvolvimento de materiais e métodos construtivos alternativos e adaptáveis às condições ambientais, representa o futuro para as cidades e comunidades sustentáveis (DADE-ROBERTSON *et al.*, 2017), particularmente em substituição aos materiais cimentícios.

O cimento é amplamente utilizado como material de construção, entretanto, sua produção gera impactos ambientais durante todas as etapas da fabricação. A produção de cimento mundial é responsável pelo consumo de cerca de 10 a 15% da energia industrial total e 5 a 8% da emissão antropogênica de CO₂ (USON *et al.*, 2013; GONZÁLEZ-KUNZ *et al.*, 2017).

Diante disso, o uso de materiais não poluentes vem ganhando importância na indústria da construção, por causa das demandas do mercado ecológico e da conscientização em investir em técnicas sustentáveis, proporcionando um importante espaço para a integração da biotecnologia nos projetos construtivos.

Uma alternativa biológica capaz de reduzir os impactos ambientais provocados pela construção civil é a utilização da precipitação de calcita induzida microbiologicamente (Microbial Induced Calcite Precipitates – MICP) (ALAZHARI *et al.*, 2018). Esta abordagem utiliza a atividade metabólica de bactérias e um mineral precursor do meio, para formar um composto inorgânico como material de cimentação, o carbonato de cálcio, na forma de calcita, vaterita e aragonita (AL-THAWADI, 2011; DE MUYNCK *et al.*, 2010).

A MICP formada pelas células bacterianas representa um campo interdisciplinar emergente, promissor para diversas áreas, que vão desde Geotecnologia, Paleobiologia e Engenharia Civil (DHAMI *et al.*, 2013), combinando a microbiologia com a pesquisa científica na produção e manutenção de materiais de construção, com objetivo de projetar novos materiais inteligentes, adaptáveis, integrando células vivas à construção e arquitetura (DADE-ROBERTSON *et al.*, 2017).

Essa técnica surgiu como uma opção eficaz para melhorar, entre outros, as propriedades mecânicas dos solos, as estruturas de concreto e de argamassa, bem como na reparação de fissuras e na proteção das superfícies destes elementos frente ao ataque de agentes nocivos. (DE MUYNCK *et al.*, 2010 ; DEJONG *et al.*, 2013 ; DHAMI *et al.*, 2017).

Além disso, essa biotecnologia pode fornecer solução em locais onde o acesso é limitado ou como fator de segurança, a exemplo de proteção de encostas, prédios antigos suscetíveis de colapso, revestimentos de túneis e estruturas marinhas, assim como, reduzir os custos do trabalho de inspeção e manutenção.

Dessa forma, objetiva-se com esta revisão fornecer uma visão geral da aplicação da biocimentação promovida por bactérias na recuperação de estruturas e estabilização de solos.

2 ITENS SOBRE OS TEMAS DA REVISÃO

2.1 Mecanismos de produção de carbonato de cálcio por microrganismos

Diferentes espécies de bactérias, como cianobactérias, bactérias ureolíticas, bactérias redutoras de nitrato, mixobactérias, bactérias redutoras de sulfato e arqueas metanogênicas, induzem a precipitação do carbonato de cálcio em forma de minerais, pelo aumento do pH, concentração do carbono inorgânico dissolvido, concentração de cálcio e disponibilidade de locais de nucleação (DHAMI *et al.*, 2013), HAMMES *et al.*, 2003; HAMMES & VESTRAETE, 2002).

Na precipitação da calcita induzida microbiologicamente (MICP), o pH e a concentração de carbono inorgânico dissolvido e de cálcio, são a chave para a precipitação, sendo que a disponibilidade de locais de nucleação não é crucial, pois as bactérias podem se comportar como sítios ativos de nucleação (AL-THAWADI, 2008).

O aumento do pH, devido à formação das hidroxilas (OH^-) geradas a partir da produção de íons de amônio (NH_4^+), é necessário para dissolver e dissociar o carbono inorgânico. A MICP ocorre para uma faixa de pH de 8,3 e 9,0, na qual a atividade de urease permanece alta (STOCKS-FISCHER *et al.*, 1999).

As concentrações de cálcio e de ureia entre 0,05 a 0,25 M são mais eficazes na precipitação de $CaCO_3$ (AL QABANY & SOGA, 2013). Entre as fontes de cálcio (cloreto de cálcio, óxido de cálcio e acetato de cálcio), o cloreto de cálcio é a melhor para MICP, uma vez que proporciona maior atividade urease e maior produção de calcita (ACHAL & PAN, 2014).

No processo da MICP, o carbonato é produzido extracelularmente por microrganismos através de duas vias metabólicas, a saber: autotrófica e heterotrófica (SEIFAN *et al.*, 2016).

Na via autotrófica, os microrganismos convertem dióxido de carbono em carbonato de três maneiras: metanogênese não metilotrófica, por arqueas metanogênicas (este caminho é mais comum em sedimentos marinhos); fotossíntese oxigenada, por cyanobacteria e fotossíntese anoxigênica, por bactérias purpuras (CASTANIER *et al.*, 1999).

Em relação à via heterotrófica, são três os principais grupos de microrganismos envolvidos no processo: os organismos que utilizam ácidos orgânicos, as bactérias redutoras de sulfato e os organismos envolvidos no ciclo do nitrogênio (DHAMI *et al.*, 2013).

No primeiro caso, diferentes gêneros de bactérias como *Bacillus*, *Arthrobacter* e espécies de *Rhodococcus* usam compostos orgânicos (acetato, lactato,

citrato, succinato, oxalato, malato e glioxilato) como fonte de energia, convertendo-os em minerais carbônicos, a citar o carbonato de cálcio e carbonato de magnésio (SEIFAN *et al.*, 2016).

De acordo com Knorre *et al.*, (2000) a oxidação aeróbica para formar o carbonato de cálcio (CaCO_3), a partir do acetato (CH_3COO^-) como fonte de ácido e com a presença de íon cálcio (Ca^{2+}) resulta na Eqs. (1-2-3).



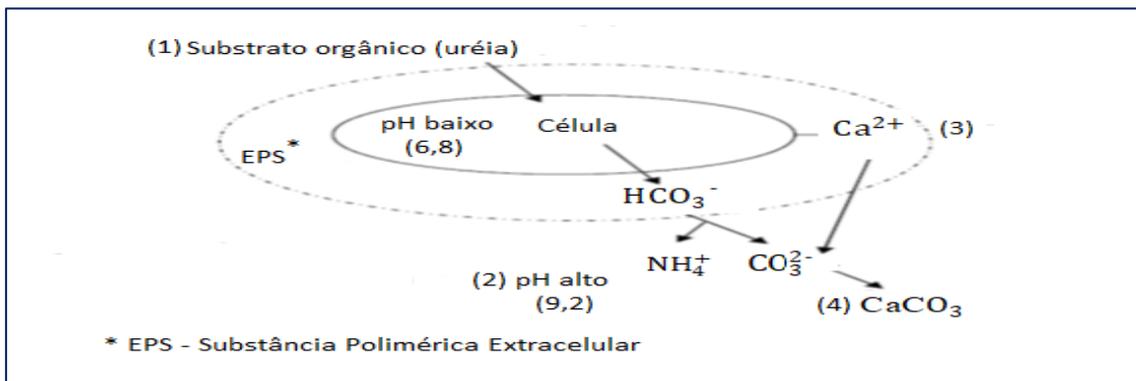
No ciclo do enxofre, bactérias redutoras de sulfato são responsáveis pela redução dissimilatória do sulfato e o sulfeto de hidrogênio (H_2S) é produzido em um processo de respiração anaeróbica. Nesse processo, o carbonato de cálcio (CaCO_3) é produzido se a fonte de cálcio, matéria orgânica e sulfato estiverem presentes no meio (DHAMI *et al.*, 2013).

Por sua vez, a produção de carbonato ou bicarbonato através do ciclo do nitrogênio, pode ser estabelecida por três vias principais: a degradação de ureia (ureólise); amonificação de aminoácidos e redução dissimilatória de nitrato (ALAZHARI *et al.*, 2018; SEIFAN *et al.*, 2016). Dos mecanismos de produção de CaCO_3 , a hidrólise da ureia é o método mais simples e amplamente utilizado para precipitação de carbonatos para diversas aplicações técnicas (DHAMI *et al.*, 2013).

Na ureólise, a enzima urease hidrolisa a ureia para produzir carbamato e amônia (Eq. 4), que hidrolisa espontaneamente em outra molécula de amônia e ácido carbônico (Eq. 5). Esses produtos se equilibram para formar bicarbonato na presença de água, na qual são formados íons amônio e hidróxido, levando ao aumento do pH (Eqs. 6–7). Na presença de cálcio e ambiente alcalino, essas reações abrem caminho para a precipitação de carbonato de cálcio (Eq. 8) (HAMMES *et al.*, 2003; DHAMI *et al.*, 2013).



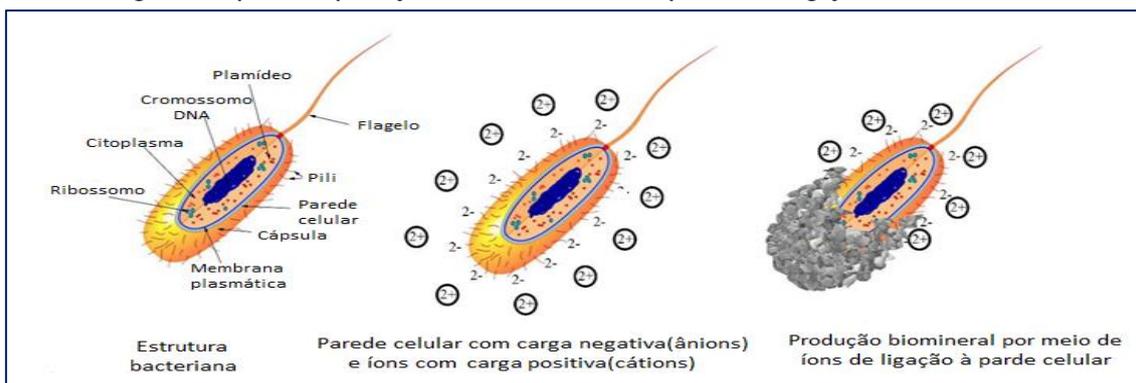
Figura 1 – Apresentação do esquema da mineralização pela via ureolítica



Fonte: Al-Thawadi (2008)

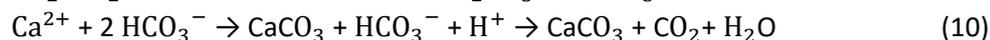
Na Figura 2 é demonstrado, no diagrama esquemático, que produção do carbonato de cálcio ocorre por fixação dos íons de cálcio carregados positivamente às paredes celulares microbianas carregadas negativamente por carbonatos.

Figura 2. Esquema da produção do carbonato de cálcio por meio da ligação de íons



Fonte: adaptado de Seifan *et al.* (2016)

Dhami *et al.* (2017) complementam, além das vias metabólicas já citadas, a rota enzimática da anidrase carbônica que desempenha um papel significativo na captura de CO₂ na forma de carbonatos na natureza. Esta enzima atua como um catalisador biológico para a hidratação do CO₂ em ácido carbônico (H₂CO₃) que se dissocia espontaneamente em íon bicarbonato (HCO₃⁻) e cátion hidrogênio (H⁺). Na presença de uma fonte de cálcio, produz o carbonato de cálcio (Eqs. 9 - 10).



2.2 Espécies e concentração de células bacterianas

Diferentes espécies bacterianas precipitam carbonatos em ambientes alcalinos, ricos em íons Ca²⁺. Porém, as bactérias mais adequadas para MICP, capazes de catalisar a hidrólise da ureia, são urease positiva e do gênero *Bacillus* e *Sporosarcina* (KUCHARSKI *et al.*, 2012).

As espécies bacterianas aeróbias são indicadas para a produção da enzima urease, uma vez que liberam CO₂ da respiração celular e a produção de CO₂ é acompanhada pelo aumento do pH devido à produção de amônio (KUCHARSKI *et al.*, 2012).

Muitos pesquisadores avaliaram o potencial de aplicação da MICP por bactérias na estabilização de solos e areias, concreto e na restauração de prédios históricos (DHAMI *et al.*, 2013; ABO-EL-ENEIN *et al.*, 2013; JONKERS *et al.*, 2010; DE BELIE & DE MUYNCK, 2008; Lee, 2003; DICK *et al.*, 2006).

O *Bacillus megaterium* tem sido usado para melhorar a dureza do concreto e para reduzir a compressibilidade de solos residuais (LEE *et al.*, 2013).

Achal *et al.* (2011) avaliaram cubos de argamassa tratados com *Bacillus* sp e o resultado foi quase seis vezes menos absorção de água em comparação com amostras não tratadas. Dick *et al.* (2006) também relataram redução de 50% na absorção de água pela aplicação de *Bacillus sphaericus* em cubos de calcário.

Estudando *Sporosarcina pasteurii* na viabilidade da precipitação de calcita e seu efeito na resistência e compressibilidade do solo orgânico, Canakci *et al.* (2015) concluíram que o tratamento bacteriano influenciou a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento do solo.

Dhami *et al.* (2017) investigaram as vias urease e anidrase carbônica, através de *Sporosarcina pasteurii* e *Bacillus cereus*, respectivamente, sob condições de bioestimulação e bioaumentação em consolidação de coluna de areia, sob altas condições nutricionais, com sucesso pelas duas rotas.

Em estudo na recuperação de prédios históricos, Tiano *et al.* (1999) investigaram o efeito consolidador do biomineral bacteriano de calcita, no calcário *Pietra di Lecce* pelo uso de espécies de *Micrococcus* sp. e *Bacillus subtilis*. Já Webster & May (2006), utilizaram bactérias anaeróbicas redutoras de sulfato, *Desulfovibrio desulfuricans* e *D. vulgaris*, para a remoção das crostas de sulfato preto que frequentemente manchavam os edifícios.

Os principais microrganismos, do gênero *Bacillus* e *Sporosarcina*, utilizados na MICP citados pela literatura são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Principais microrganismos, utilizados em pesquisas com MICP

Microrganismos	Filo	Aplicação	Referencias
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Firmicutes	Restauração de pedras ornamentais	Lee (2003)
<i>Bacillus cereus</i>	Firmicutes	Formação de biocimento, consolidação de calcário e de coluna de areia.	Casteneir <i>et al.</i> (1999) Dhami <i>et al.</i> (2017)
<i>Bacillus cohnii</i>	Firmicutes	Precipitação de calcita e remediação do concreto	Jonkers & Schlangen (2008)
<i>Bacillus lentus</i>	Firmicutes	Consolidação de pedra de calcário.	Dick <i>et al.</i> (2006)
<i>Bacillus megaterium</i>	Firmicutes	Aumento da força compressiva no concreto, melhora na durabilidade de materiais de construção, estruturas e compressibilidade de solos	Dhami <i>et al.</i> (2013) Lee <i>et al.</i> (2013). Soon <i>et al.</i> (2013)
<i>Bacillus subtilis</i>	Firmicutes	Redução na absorção de água de pedra calcário.	Tiano <i>et al.</i> (1999)
<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Firmicutes	Reparo de fissuras de concreto, aumento da força compressiva e a redução da permeabilidade.	Alazhari <i>et al.</i> (2018) Jonkers <i>et al.</i> (2010)
<i>Sporosarcina pasteurii</i> (<i>Bacillus pasteurii</i>)	Firmicutes	Formação de biocimento, consolidação de coluna de areia, reparo de fissuras de concreto, aumento da força compressiva e a redução da permeabilidade, estabilização de solo	Dhami <i>et al.</i> (2017) Canakci <i>et al.</i> (2015) Abo-El-Enein <i>et al.</i> (2013)
<i>Lysinibacillus sphaericus</i> (<i>Bacillus sphaericus</i>)	Firmicutes	Consolidação do concreto: formação de biocimento, reparo de fissuras de concreto, e a redução da permeabilidade.	Dick <i>et al.</i> (2006) De Belie & De Muynck (2008)

Fonte: Autor (2022)

Além das espécies, a concentração de células bacterianas, influencia na quantidade de carbonato de cálcio precipitado e na atividade da urease (HAMMES & VERSTRAETE, 2002).

Altas concentrações de células bacterianas produzem mais urease por unidade de volume para iniciar a hidrólise da ureia (KADHIM & ZHENG, 2016), concentrações na ordem de 10^6 a 10^8 células aumentam a quantidade de urease (OKWADHA & LI, 2010).

2.3 Aplicações da MICP na engenharia

A tecnologia da MICP tem potencial na restauração de argamassa de cimento, reparo de monumento de calcário, redução da permeabilidade e trincas no concreto, enchimento de poros e consolidação de areia e solos (CHENG *et al.*, 2013 ; DHAMI *et al.*, 2013).

A – Concreto autocura: o bioconcreto

Alguns microrganismos, em seu estado natural, podem habitar lugares inóspitos e quando entram em estresse ambiental, formam endósporos resistentes (células de sobrevivência), que são tolerantes a altas temperaturas, produtos químicos, luz ultravioleta e que podem sobreviver por séculos (JONKERS, 2011).

Dessa forma, quanto se utiliza bactérias para a produção do bioconcreto, a maioria dos sistemas, exige o uso de endósporos e que os mesmos sejam imobilizados, normalmente via encapsulamento, antes da adição no concreto autocura, para ajudar as bactérias a permanecerem vivas em condições adversas por um longo período de tempo. Isso também supera as preocupações com sua viabilidade nas condições agressivas que ocorrem na hidratação do concreto (JONKERS *et al.*, 2010).

Além disso, a concentração de endósporos necessária para fornecer a precipitação de carbonato de cálcio precisa ser maior que 4×10^7 (endósporos/ml) (ZHANG *et al.*, 2017), assim como a quantidade suficiente de Ca^{2+} esteja disponível no concreto para permitir que a formação de carbonato de cálcio seja satisfatório e preencha as trincas (ALAZHARI *et al.*, 2018).

O processo se inicia, quando uma estrutura do bioconcreto é danificada, a umidade começa a penetrar nas rachaduras, os endósporos bacterianos germinam ao entrar em contato com a água e os nutrientes e começam a consumir fontes de cálcio e como produto final produzem o carbonato. O principal mecanismo da cicatrização bacteriana de trincas é que as próprias bactérias atuam amplamente como catalisador e transformam um composto precursor em um material de enchimento adequado (JONKERS, 2011).

Mistura do agente microbiano no concreto

De acordo com Seifan *et al.* (2016) o agente microbiano (bactérias e nutrientes) pode ser inserido na matriz do concreto através de uma rede vascular que já foi incorporada na fase de produção ou pode ser misturado diretamente durante a sua preparação, de duas maneiras: por aplicação separada de bactérias e nutrientes ou por encapsulamento.

No primeiro processo, os endósporos bacterianos e o precursor biológico de minerais (fonte de cálcio, nitrogênio e fósforo) são adicionados separadamente no concreto. Neste processo, as bactérias alcalifílicas são as espécies mais atraentes para o concreto autocura por tolerar o seu ambiente extremo (SEIFAN *et al.*, 2016).

No segundo, os endósporos bacterianos e o precursor biológico, são colocados dentro de cápsulas de argila expandida ou por outros materiais de proteção, como terra de diatomáceas, hidrogel, gel de sílica, carvão ativado granular (WANG *et al.*, 2012). O processo de cura começa quando a cápsula se rompe com a formação de fissuras no concreto.

A proteção bacteriana por encapsulamento têm sido o objetivo de alguns artigos.

Alazhari *et al.* (2018) utilizaram perlita expandida revestida para imobilizar endósporos bacterianos de *Bacillus pseudofirmus*, nutrientes e avaliaram o desempenho da autocura através de imagem e pela absorção superficial inicial da água. Os resultados indicaram que a cura poderia ser alcançada quando perlita expandida revestida contendo agentes de autocura era

usada como uma substituição de 20% de agregado fino e se uma proporção adequada de esporos para acetato de cálcio fosse fornecida.

Wiktor & Jonkers (2011) encapsularam lactato de cálcio (6% massa do agregado) e extrato de levedura (menos de 0,1% massa do agregado) junto com os endósporos de *Bacillus alkalinitriculus* em argila expandida (1 a 4 mm) a fim de eliminar os efeitos das propriedades do concreto. Foi demonstrado que, ao rachar, essas partículas encapsuladas eram capazes de proporcionar cura em argamassas.

Zhang *et al.* (2017) usaram perlita expandida para imobilizar endósporos de *Bacillus cohnii*. Os volumes utilizados foram $3,6 \times 10^9$ células / ml. O lactato de cálcio (8 g / l) e o extrato de levedura (1 g / l) foram pulverizados na superfície das partículas, mas não foram encapsulados ou impedidos de interferir nas reações de hidratação.

Avaliações do concreto bacteriano

A influência de agentes de cura biológicos na resistência e absorção de água de concreto tem sido relatado por vários estudos. Abo-El-Enein *et al.* (2013) incorporaram diferentes concentrações de *Sporosarcina pasteurii* com a água de mistura do concreto e obtiveram um aumento de 33%, em 28 dias, na resistência à compressão da argamassa de cimento. A melhoria da resistência e absorção de água deveu-se ao crescimento de cristais de calcita nos poros da matriz da argamassa.

Achal *et al.* (2011) verificaram que a aplicação de *Bacillus sphaericus* causou melhoria na permeabilidade do concreto. O teste de permeabilidade mostrou que o coeficiente de absorção de água nas amostras tratadas foi seis vezes menor que as amostras controle, durante um período de 168 horas.

Krishnapriya *et al.* (2015), estudaram a influência das bactérias *Bacillus megaterium*, *Bacillus licheniformis* e *Bacillus flexus* na resistência à compressão e na cicatrização de fissuras no concreto. A resistência à compressão das amostras de concreto bacteriano aumentou quando comparada ao controle.

De Belie & De Muynck (2008), avaliaram a capacidade de *B. sphaericus* de reparar fissuras em concreto através da precipitação de carbonato de cálcio pela via de hidrólise da ureia. Observaram-se que cristais de CaCO_3 formaram no interior dos poros do material estudado, selando a rachadura. Um dos resultados desse efeito foi o decréscimo da permeabilidade à água.

Bang *et al.* (2010) estudaram o efeito de *Sporosarcina pasteurii* na resistência à compressão de amostras de argamassa por 7 e 28 dias. Foi descoberto que a maior concentração de *S. pasteurii* imobilizada em esferas de vidro porosas pode aumentar substancialmente a resistência à compressão da amostra de argamassa em 24%.

B - Estabilização de solos por biocimentação

A presença de bactérias na superfície terrestre, cerca de 10^{12} microrganismos por kg de solo, é vista como um recurso para aplicações de cimentação *in situ* no fortalecimento do solo (DHAMI *et al.*, 2017; DEJONG *et al.*, 2013; DE MUYNCK *et al.*, 2010; MITCHELL &

SANTAMARINA, 2005). Além disso, a prevalência de comunidades ureolíticas tem sido amplamente vista em diferentes solos, independentemente do tipo, mineralogia, condições ambientais (GAT *et al.*, 2016; ZHU & DITTRICH, 2016), como os gêneros *Bacillus*, *Sporolactobacillus*, *Clostridium* e *Desulfotomaculum* (KUCHARSKI *et al.*, 2006).

Diante disso, a biomineralização de carbonato de cálcio se torna promissora na estabilização de solos, pois visa alterar as propriedades do mesmo, estimulando os processos naturais bioquímicos *in situ* para produzir precipitado de calcita (DHAMI *et al.*, 2013; DEJONG *et al.*, 2010; HARKES *et al.*, 2010).

A MICP promove ligações de cimentação das partículas de solos não coesivos, permitindo o contato entre estas, modificando a resistência mecânica do material e resultando na diminuição de condutividade hidráulica, aumento da rigidez a pequenas deformações e aumento da resistência a grandes deformações (DEJONG *et al.*, 2014; VAN DER STAR *et al.*, 2011; VAN PAASSEN *et al.*, 2010).

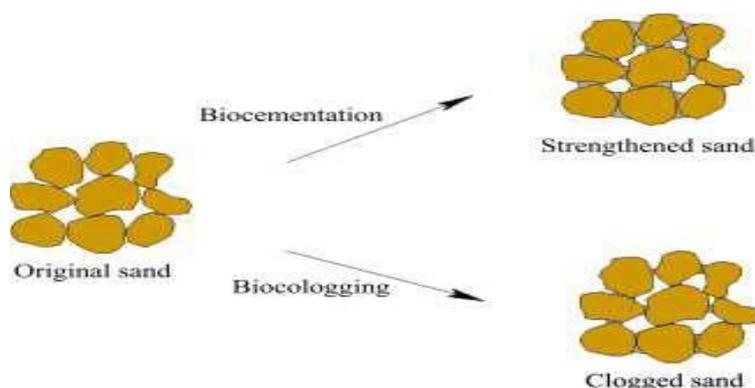
Os processos biogeoquímicos podem favorecer a mudança nas propriedades físicas do solo (densidade, porosidade, distribuição granulométrica), condutividade (hidráulica, elétrica, térmica), mecânicas (rigidez, compressibilidade, expansão, contração, coesão, cimentação, ângulo de atrito, erodibilidade e curva de retenção solo-água) e nas composições químicas (reatividade, capacidade de troca catiônica) (DEJONG *et al.*, 2013).

São dois os processos para aumentar a resistência ao cisalhamento e reduzir a permeabilidade do solo: a biocimentação e o *bioclogging*, respectivamente.

A biocimentação ou cimentação microbiana melhora as propriedades de resistência e de rigidez do solo e rochas através da atividade microbiana ou produtos microbianos, formando material de ligação entre partículas do solo, após a introdução de microrganismos e aditivos específicos no solo.

O *Bioclogging* consiste em reduzir a condutividade hidráulica de solos e rochas porosas, a partir da atividade de microrganismos e seus produtos, com a formação de carbonatos que entope os poros e liga as partículas do solo (IVANOV & CHU, 2008).

Figura 3. Processos de Biocimentação e *Bioclogging*



Fonte: Chu *et al.* (2015)

A incorporação bacteriana que forma o carbonato de cálcio nos materiais de construção fornece uma solução sustentável para a bioengenharia, como fortalecimento de

depósitos liquefeitos de areia, estabilização de taludes e encostas, reforço de subleitos (AL QABANY & SOGA, 2013; CHENG *et al.*, 2013; WHIFFIN *et al.*, 2007), controle de erosão e facilidade de escavação no solo sem coesão (IVANOV & CHU, 2008).

As abordagens de utilização da MICP em aplicações no solo são a bioestimulação e a bioaumentação. Na bioestimulação, as bactérias calcificantes indígenas são estimuladas pela adição de nutrientes e fontes de carbono. No caso de bioaumentação, o sistema é suplementado com bactérias não nativas e fontes de nutrientes (GAT *et al.*, 2016).

A introdução de bactérias no solo, pode ser alcançada através de injeção direta ou pré-misturadas. No primeiro método, o fluxo da solução bacteriana é injetado no solo de cima para baixo, mas a solução deve ter um período de retenção, de modo que as bactérias sejam fixadas aos grãos antes da injeção da solução de nutrientes. No segundo método, as bactérias são misturadas mecanicamente com o solo antes da introdução da solução de nutrientes (MUJAH *et al.*, 2017).

Avaliação da resistência ao cisalhamento e permeabilidade do solo

Vários estudos avaliaram a bioestabilização de solos através da resistência ao cisalhamento, permeabilidade do solo: reduzindo a condutividade hidráulica e a absorção de água (CHU *et al.*, 2012; AL QABANY & SOGA, 2013; CANAKCI *et al.* 2015).

O carbonato de cálcio precipitado nos espaços vazios solo, aumentam a ligação entre os grãos, melhorando a resistência do solo, como apresentado nos estudos de Soon *et al.* (2013), cujos resultados provaram uma resistência ao cisalhamento de 96% na concentração de 0,5 M dos reagentes de cimentação.

Dejong *et al.* (2006) demonstraram que a cimentação microbiana promoveu aumento na resistência do solo arenoso e que o comportamento dos corpos de prova cimentados com bactérias era semelhante ao do solo cimentado com gesso.

Estudos de Whiffin *et al.* (2007) em uma coluna de areia de 5 metros, para simular as condições de campo, mostraram que a porosidade, resistência e rigidez do solo foram afetadas significativamente pelo teor de carbonato de cálcio. Relataram também que o aumento na resistência do solo é diretamente proporcional ao aumento do conteúdo de carbonato de cálcio produzido, sendo necessário um teor mínimo de carbonato de cálcio de 60 kg/m³ para uma melhoria mensurável da resistência no material.

Chu *et al.* (2012) utilizaram bactérias ureolíticas da espécie *Sporosarcina pasteurii* e observaram uma redução substancial na permeabilidade e na melhoria da resistência ao cisalhamento do solo em 35,9 Mpa comparável ao do calcário.

Canakci *et al.* (2015) estudaram a precipitação de carbonato de cálcio bacteriano e seu efeito na compressibilidade e resistência de um solo orgânico. Verificaram que a quantidade de carbonato de cálcio precipitado no solo orgânico aumentou cerca de 20% nas amostras tratadas em comparação com as amostras não tratadas.

A MICP promove a redução do volume de vazios, causada pela precipitação de carbonato de cálcio, reduzindo a permeabilidade do solo, como as pesquisas realizadas por Whiffin *et al.* (2007), que relataram uma redução de 22% para 75% da permeabilidade inicial do solo após o tratamento microbiano.

Lee *et al.* (2013) estudaram o efeito do MICP na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de solos arenosos e solos residuais, com a redução da condutividade hidráulica (1,14–1,25 vezes) e aumento na resistência ao cisalhamento (1,41–2,64 vezes) para ambos os tipos de solo.

Soon *et al.* (2013), avaliaram o biotratamento de um solo residual tropical e uma areia, através da MICP, com variação nas densidades. Os resultados mostraram maiores reduções da condutividade hidráulica nas amostras de areia do que nas amostras de solo residual. Nas amostras de areia, a condutividade hidráulica diminuiu em aproximadamente uma ordem de $3,5 \times 10^{-3}$ m/s para $3,2 \times 10^{-4}$ m/s.

Al Qabany & Soga (2013) conduziram testes de permeabilidade e de resistência a compressão não confinada em amostras de areia tratadas com soluções de 0,1, 0,25, 0,5 e 1 M de ureia e cloreto de cálcio. O tratamento com baixa concentração da solução aumentou a resistência das amostras tratadas. Já o uso de uma solução com alta concentração de cloreto de cálcio e ureia resultou em uma rápida queda na permeabilidade no estágio inicial, enquanto o uso de uma baixa concentração resultou em uma gradual e uniforme diminuição da permeabilidade.

2.4 Desafios da MICP

O campo da biomineralização tem potencial em vários setores, porém, é necessário fazer vários esforços, envolvendo especialistas de diversas áreas, para abordar as principais questões de pesquisa e desenvolvimento necessárias para aplicações em escala comercial (DHAMI *et al.*, 2013).

A MICP é um processo mais complexo e mais lento que os métodos químicos, pois a atividade microbiana depende de muitos fatores ambientais, incluindo temperatura, pH, concentrações de doadores e aceptadores de elétrons, concentrações e taxas de difusão de nutrientes e metabólitos (DHAMI *et al.*, 2013).

A escolha do microrganismo a ser utilizado no processo de biomineralização deve considerar que a bactéria deve ser resistente a ambientes alcalinos (alcalinofílicos) como o concreto, possuir capacidade de formar esporos e assim ser capaz de sobreviver a condições ambientais adversas e não pertencer ao grupo de microrganismos patogênicos que causem riscos à saúde das pessoas e do meio ambiente (JONKERS *et al.*, 2010).

A produção de íons amônio através da atividade ureolítica resulta na emissão de óxidos de nitrogênio na atmosfera. Além disso, a presença de excesso de amônio na matriz de concreto aumenta o risco de danos ao sal por conversão em ácido nítrico. Portanto, uma otimização para encontrar a quantidade necessária de ureia é importante para evitar excesso na emissão de amônio (DE MUYNCK *et al.*, 2010).

Da mesma forma, a produção de amônia na hidrólise da ureia, onde se geram dois mols de amônia por cada mol de ureia, pode formar cloreto ou nitrato de amônia no solo. Concentrações elevadas de amônia são tóxicas para a maior parte dos organismos (VAN PAASSEN *et al.*, 2010), sendo necessário evitar a lixiviação da amônia para o nível do lençol freático, tratando o efluente rico em amônia pela biocimentação (MUJAH *et al.*, 2017).

A atividade dos microrganismos pode ser limitada em solos argilosos, pois as bactérias têm um tamanho de 0,5 a 5 μm , e não poderiam se locomover em solos de grãos finos (VAN PAASSEN *et al.*, 2010; MITCHELL & SANTAMARINA, 2005), possivelmente devido ao espaço poroso limitado, o que poderia dificultar o transporte e a sobrevivência dos microrganismos, pela interação da célula com o sedimento e, assim, poderia causar falha de punção ou tração da membrana celular (REBATA-LANDA & SANTAMARINA, 2006).

Estudos detalhados da ecologia microbiana do solo são essenciais para determinar os efeitos da introdução de novas bactérias nas comunidades nativas, assim como o desenvolvimento das comunidades a curto, médio e longo prazo e a eventual colonização secundária de microrganismos heterotróficos (DHAMI *et al.*, 2013).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biomineralização trouxe solução para várias aplicações da engenharia, integrando sistemas baseado na natureza em métodos construtivos, com a redução da emissão antropogênica de dióxido de carbono, minimizando os impactos ambientais e promovendo sistema de produção sustentáveis com baixo consumo de energia.

Além disso, é uma técnica eficaz em comparação com as abordagens de tratamento convencional, devido a sua compatibilidade e ligação eficiente na matriz do concreto e do solo, promovendo o aumento da resistência dos materiais a força compressiva e a impermeabilidade.

4 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PROSUP/CAPES pelo apoio financeiro, ao Instituto Federal do Sul de Minas e a Unifenas.

5 BIBLIOGRAFIA

ABO-EL-ENEIN, S. A.; ALI, A. H.; TALKHAN, F. N.; ABDEL-GAWWAD, H. A. Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of cement mortar. **HBRC Journal**, v. 9, Issue 1, p. 36-40. 2013.

ACHAL, V., MUKHERJEE, A., REDDY, M. S. Microbial concrete: a way to enhance the durability of building structures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.23, p.730–734. 2011.

ACHAL, V.; PAN, X. Influence of Calcium Sources on Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation by *Bacillus* sp. CR2. **Appl Biochem Biotechnol.**, 173, p.307–317. 2014.

ALAZHARI, M.; SHARMA, T.; HEATH, A. ; COOPER, R.; PAINE, K. Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 610–619. 2018.

AL QABANY, A.; SOGA, K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils. **Géotechnique**, v.63, p.331-339. 2013.

AL-THAWADI, S. M. High strength in situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria. Murdoch University. Thesis for the degree of doctor of philosophy. **Murdoch University**, Western Australia, 2008.

AL-THAWADI, S.M. Ureolytic bacteria and calcium carbonate formation as a mechanism of strength enhancement of sand. **Journal of Advanced Science and Engineering Research**, p. 98–114. 2011.

BANG, S.S.; LIPPERT, J. J.; YERRA, U.; MULUKUTLA, S. Microbial calcite, a bio-based smart nanomaterial in concrete remediation. **International Journal of Smart and Nano Materials**, 1(1): p. 28-39. 2010.

CANAKCI, H.; SIDIK, W.; KILIC, I. H. Effect of bacterial calcium carbonate precipitation on compressibility and shear strength of organic soil. **Soils and Foundations**, 55(5), p.1211–1221. 2015.

CASTANIER, S., G. LE MÉTAYER-LEVREL; J.P. PERTHUISOT, Ca-carbonates precipitation and limestone genesis - the microbiogeological point of view. **Sedimentary Geology**, v.126, p. 9-23. 1999.

CHENG, L.; CORD-RUWISCH, R.; SHAHIN, M. A. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. **Canadian Geotechnical Journal**, 50, p.81–90. 2013.

CHU, J.; STABNIKOV, V.; IVANOV, V. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil. **Geomicrobiology Journal**. v.29, p.544-549. 2012.

CHU, J.; IVANOV, V.; HE, J.; MAEIMI, M.; WU, S. Use of Biogeotechnologies for Soil Improvement. **Ground Improvement Case Histories: Chemical, Electrokinetic, Thermal and Bioengineering Methods**. p.571-589. 2015.

DADE-ROBERTSON, M.; KEREN-PAZ, A.; ZHANG, M.; KOLODKIN-GAL, I. Architects of nature: growing buildings with bacterial biofilms. **Microbial Biotechnology**, v.10, p.1157–1163. 2017.

DEJONG, J. T.; FRITZGES, M. B.; NUSSLEIN, K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.132, p.1381–1392. 2006.

DEJONG, J. T.; MORTENSEN, B. M.; MARTINEZ, B. C.; NELSON, D. C. Bio-mediated soil improvement. **Ecological Engineering**, V.36(2), p.197-210. 2010.

DEJONG, J.; BURBANK, M.; KAVAZANJIAN, E.; WEAVER, T.; MONTOYA, B.; HAMDAN, N. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. **Géotechnique**, v.63, p.287–301. 2013.

DEJONG, J. T., PROTO, C., KUO, M.; GOMEZ, M. Bacteria, Bio-films, and Invertebrates...the Next Generation of Geotechnical Engineers? **Geo-Congress**, Technical Papers, ASCE: p.3959-3968. 2014.

DE BELIE, N.; DE MUYNCK, W. Crack repair in concrete using biodeposition. **Concrete repair, rehabilitation and retrofitting II**. In: Alexander et al. (Eds.), Taylor & Francis Group, p. 291-292. 2008.

DE MUYNCK, W.; N. DE BELIE, W. VERSTRAETE, Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review, **Ecol. Eng.**, v.36 (2), p.118–136. 2010.

DHAMI, N. K.; REDDY, M. S.; MUKHERJEE, A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. **Front. Microbiol**, v.4, a.314, p.01-13. 2013.

DHAMI, N. K.; ALSUBHI, W. R.; WATKIN, E.; MUKHERJEE, A. Bacterial Community Dynamics and Biocement Formation during Stimulation and Augmentation: Implications for Soil Consolidation. **Front. Microbiol**. V.8, a.1267. 2017.

DICK, J., DE WINDT, W., DE GRAEF, B., SAVEYN, H., VAN DER MEEREN, P., DE BELIE, N., Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species. **Biodegradation**, v.17, p.357–367. 2006.

GAT, D.; RONEN, Z.; TSESARSKY, M. Soil bacteria population dynamics following stimulation for ureolytic microbial-induced CaCO₃ precipitation. **Environ. Sci. Technol.** 50, p.616-624. 2016.

GONZÁLEZ-KUNZ, R. N.; PINEDA, P.; BRAS, A.; MORILLAS, L. Plant biomass ashes in cement-based building materials. Feasibility as eco-efficient structural mortars and grouts. **Sustainable Cities and Society**, v. 31, p. 151-172. 2017.

HAMMES, F.; VERSTRAETE, W. Key roles and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. **Environmental Science e Bio/Technology**, 1, p.3-7. 2002.

HAMMES, F.; BOON, N.; DE VILLIERS, J.; VERSTRAETE, W.; SICILIANO, S. D. Strain-specific ureolytic microbial calcium carbonate precipitation. **Appl. Environ. Microbiol.**, 69, p.4901–4909. 2003.

HARKES, M. P.; VAN PAASSEN, L. A.; BOOSTER, J.L.; WHIFFIN, V. S.; VANLOOS-DRECHTA, M. C. M. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement. **Ecol.Eng.**, 36 (2), p.112–117. 2010.

IVANOV, V.; CHU, J. Applications of microorganism to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. **Rev. Environ, Sci Biotechnol**, 7, p.139-153. 2008.

JONKERS, H. M, SCHLANGEN, E. Development of a bacteria-based self healing concrete. **Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoeilhorst (eds)** Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-47535-8, p. 425-430. 2008.

JONKERS, H.M.; THIJSSSEN, A.; MUYZER, G.; COPUROGLU, O.; SCHLANGEN, E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, **Ecol. Eng.**, 36 (2) p.230–235. 2010.

JONKERS, H.M., Bacteria-based self-healing concrete. **Heron**, 56(1-2): p. 5-16. 2011.

KADHIM F.; ZHENG J. Review of the Factors That Influence on the Microbial Induced Calcite Precipitation. **Civil and Environmental Research**, 8 (10), p.69-76. 2016.

KRISHNAPRIYA, S.; VENKATESH BABU, D. L.; PRÍNCIPE ARULRAJ, G. Isolation and identification of bacteria to improve the strength of concrete. **Microbiological Research**, 174, p.48–55. 2015.

KNORRE, H. V.; W.E. KRUMBEIN, Bacterial calcification, in **Microbial Sediments**, R.E. Riding and S.M. Awramik, Editors. Springer, p. 25-31. 2000.

KUCHARSKI, E. S.; CORD-RUWISCH R.; WHIFFIN. V.; AL-THAWADI S. M. J. Microbial biocementation. **World Patent**. WO/2006/066326. 2006.

KUCHARSKI, E. S.; CORD-RUWISCH, R.; WHIFFIN, V.; AL-THAWADI, S. M. J. Microbial biocementation. **Google Patents**. 8182604. 2012.

LEE, M. L., NG, W. S. TANAKA, Y. Stress-deformation and compressibility responses of bio-mediated residual soils. **Ecological Engineering**, v.60, p.142–149. 2013.

LEE, Y. N. Calcite Production by *Bacillus amyloliquefacies* CMB01. **Journal of Microbiology**, 41 (4), p.345-348. 2003.

MITCHELL, J. K.; SANTAMARINA, J. C. Biological considerations in geotechnical engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.131, p.1222-1233. 2005.

MUJAH, D.; SHAHIN, M.A.; CHENG, L. State-of-the-Art Review of Biocementation by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization. **Geomicrobiology Journal**, 34:6, p.524-537. 2017.

OKWADHA G. D. O.; LI, J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. **Chemosphere**, v.81, p.1143–1148. 2010.

REBATA-LANDA, V.; J. C. SANTAMARINA. Mechanical limits to microbial activity in deep sediments, **Geochem. Geophys. Geosyst.**, v.7, Q11006. 2006.

SEIFAN, M.; SAMANI, A. K; BERENJIAN, A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. **Appl Microbiol Biotechnol**, 100, p.2591-2602. 2016.

SOON, N. W.; LEE, L. M.; KHUN, T. C.; LING, H. S. Improvements in engineering properties of soils through microbial induced calcite precipitation. **KSCIE Journal of Civil Engineering**. 17(4), p.718-28. 2013.

STOCKS-FISCHER, S.; GALINAT, J. K.; BANG, S. S. Microbiological precipitation of CaCO₃. **Soil Biol. Biochem.**, 3 (11), p.1563 – 1571. 1999.

TIANO, P.; BIAGIOTTI, L.; MASTROMEI, G. Bacterial biomediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. **J. Microbiol.Methods** v.36, p.139–145. 1999.

USON, A. A.; LÓPEZ-SABIRÓN, A. M.; FERREIRA, G.; SASTRESA, E. L. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 242-260, 2013.

VAN DER STAR, W. L. R.; VAN WIJNGAARDEN, W. K.; VAN PAASSEN, L.; VAN BAALEN, L. R.; ZWIETEN, G. Stabilization of gravel deposits using microorganisms. **A. Anagnostopoulos et al. (Eds.)** p. 85–90. 2011.

VAN PAASSEN, L. A.; GHOSE, R.; VAN DER LINDEN, T. J. M.; VAN DER STAR, W. R. L.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.**, 136(12), p.1721–1728. 2010.

WANG, J.Y., N. DE BELIE, AND W. VERSTRAETE, Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, 39(4): p. 567-577. 2012.

WEBSTER, A., MAY, E. Bioremediation of weathered-building stone surfaces. **Trends Biotechnol.** v.24, p.256–260. 2006.

WHIFFIN, V. S.; VAN PAASSEN, L. A.; HARKES, M. P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. **Geomicrobiology Journal**. 24(5), p.417- 423. 2007.

WIKTOR, V; JONKERS, H.M. Quantification of crack-healing in novel bacteriabased self-healing concrete. **Cement Concr. Compos.**, 33 (7), p.763–770. 2011.

ZHANG, J.; LIU, Y.; FENG, T.; ZHOU, M.; ZHAO, L.; ZHOU, A.; LI, Z. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. **Constr. Build. Mater.** 148, p.610–617. 2017.

ZHANG, J.; MAI, B.; CAI, T.; LUO, J.; WU, W.; LIU, B.; HAN, N.; XING, F.; DENG, X. Optimization of a binary concrete crack self-healing system containing bacteria and oxygen, **Materials** 10 116. 2017.

ZHU, T.; DITTRICH, M. Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: a review. **Front. Bioeng. Biotechnol.** 4:4. 2016.