

MATERIAIS CIMENTÍCIOS AUTOCULTURÁVEIS E BIO- INSPIRADOS PARA INFRAESTRUTURAS DE CARBONO NEGATIVO: CAPTURA ATIVA E AUTOCURA ESTRUTURAL

**SELF-CULTIVATING AND BIO-INSPIRED CEMENTITIOUS MATERIALS FOR
CARBON-NEGATIVE INFRASTRUCTURE: ACTIVE CARBON CAPTURE AND
STRUCTURAL SELF-HEALING**

Ciências Exatas e da Terra, Ciências Biológicas, Engenharias •

11/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/791607325](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/791607325)

Mário Vinício Garcia¹

RESUMO

A descarbonização da infraestrutura depende de materiais capazes de reduzir emissões incorporadas sem comprometer desempenho, durabilidade e segurança. Nesse contexto, materiais cimentícios autocuráveis, sistemas de biomineralização, materiais vivos engenheirados e matrizes bio-inspiradas oferecem uma possibilidade adicional: combinar extensão de vida útil, captura e mineralização de dióxido de carbono e regeneração localizada de fissuras. Este artigo analisa criticamente a integração entre autocura estrutural e captura ativa de CO₂ em materiais cimentícios destinados a infraestruturas de baixo ou potencialmente negativo balanço de carbono. Adota-se uma revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa, fundamentada em literatura científica sobre descarbonização do cimento, carbonatação acelerada, utilização de CO₂, precipitação microbiana de carbonato de cálcio, materiais vivos para construção, mecanismos não ureolíticos, enzimas como anidrase carbônica e avaliação do ciclo de vida. A análise demonstra que a expressão “carbono negativo” não pode ser atribuída apenas à presença de carbonatação ou biomineralização: exige balanço líquido de gases de efeito estufa em fronteira de ciclo de vida definida, incluindo produção do ligante, nutrientes, encapsulantes, energia de cura, transporte, manutenção e fim de vida. A autocura biológica pode reduzir permeabilidade e demanda de reparos, enquanto a carbonatação controlada pode fixar CO₂ em fases minerais estáveis; contudo, ureólise, perda de alcalinidade, sobrevivência microbiana, variabilidade da porosidade e impactos dos agentes de cura constituem restrições relevantes. Conclui-se que a convergência entre baixa intensidade de clínquer, captura mineral, biomineralização e desenho para vida útil prolongada é tecnicamente promissora, mas sua validação deve ser baseada em desempenho repetível, durabilidade do concreto armado, análise de

ciclo de vida e protocolos de medição verificáveis.

Palavras-chave: materiais cimentícios; autocura; biomineralização; captura de carbono; concreto bio-inspirado; MICP; infraestrutura de carbono negativo.

ABSTRACT

Infrastructure decarbonization requires materials that reduce embodied emissions without compromising performance, durability, or safety. In this context, self-healing cementitious materials, biomineralization systems, engineered living materials, and bio-inspired matrices provide an additional pathway: combining service-life extension, carbon dioxide capture and mineralization, and localized crack regeneration. This article critically examines the integration of structural self-healing and active CO₂ capture in cementitious materials intended for low-carbon or potentially carbon-negative infrastructure. A systematized qualitative review with narrative synthesis was adopted, drawing on scientific literature on cement decarbonization, accelerated carbonation, CO₂ utilization, microbially induced calcium carbonate precipitation, engineered living building materials, non-ureolytic pathways, enzymes such as carbonic anhydrase, and life-cycle assessment. The analysis shows that the term “carbon-negative” cannot be assigned solely because carbonation or biomineralization occurs; it requires a net greenhouse-gas balance within a defined life-cycle boundary, including binder production, nutrients, encapsulation materials, curing energy, transport, maintenance, and end of life. Biological self-healing may reduce permeability and repair demand, while controlled carbonation can permanently bind CO₂ in mineral phases; however, ureolysis, alkalinity loss, microbial survival, pore-structure variability, and the impacts of healing agents remain relevant constraints. The convergence of low-clinker binders, mineral

carbon capture, biomineralization, and service-life-oriented design is therefore technically promising, but validation must rely on repeatable performance, reinforced-concrete durability, life-cycle assessment, and verifiable measurement protocols.

Keywords: cementitious materials; self-healing; biomineralization; carbon capture; bio-inspired concrete; MICP; carbon-negative infrastructure.

1. INTRODUÇÃO

O concreto permanece como um dos materiais estruturais de maior relevância para a urbanização, porém seu desempenho ambiental está fortemente condicionado à produção de cimento Portland. A descarbonatação do calcário durante a fabricação do clínquer e a energia térmica necessária ao processo fazem com que a cadeia cimento-concreto responda por parcela relevante das emissões antropogênicas de dióxido de carbono. A literatura contemporânea converge em que não existe uma única solução capaz de eliminar esse impacto: a transição depende de redução do fator clínquer, eficiência térmica, combustíveis de menor carbono, cimentos alternativos, aproveitamento de resíduos minerais, captura de carbono, projeto estrutural eficiente e aumento da vida útil das estruturas. Essa abordagem sistêmica é importante porque intervenções concentradas apenas na composição do cimento podem deslocar impactos para energia, transporte ou durabilidade, enquanto soluções de alta durabilidade podem reduzir substancialmente a frequência de reparos e substituições ao longo do ciclo de vida (Monteiro; Miller; Horvath, 2017; Scrivener; John; Gartner, 2018; Habert et al., 2020).

A necessidade de combinar desempenho estrutural e mitigação climática deslocou o debate de “concreto verde” para materiais multifuncionais. Em vez de avaliar somente resistência mecânica aos 28 dias ou emissões por tonelada de ligante, passa a ser relevante perguntar quanto serviço estrutural é entregue por unidade de impacto ambiental e por quanto tempo. Fissuras pequenas, embora nem sempre representem risco imediato de colapso, aumentam a permeabilidade e favorecem a entrada de água, cloretos, sulfatos e outros agentes, contribuindo para corrosão das armaduras e degradação progressiva. A autocura de fissuras surge, assim, como estratégia de sustentabilidade baseada na extensão de vida útil. Revisões clássicas distinguem cura autógena, estimulada pela própria matriz, e cura autônoma, obtida por agentes incorporados, como polímeros encapsulados, adições minerais ou microrganismos. Essas tecnologias não substituem projeto estrutural, controle de fissuração e manutenção, mas podem acrescentar uma camada funcional de resiliência do material (Van Tittelboom; De Belie, 2013; De Belie et al., 2018).

Paralelamente, a carbonatação deixou de ser analisada apenas como mecanismo de deterioração. Em concreto armado convencional, a redução de pH decorrente da carbonatação pode despassar o aço e aumentar o risco de corrosão, o que justifica o tratamento tradicionalmente cauteloso do fenômeno. Entretanto, sob condições controladas, a reação entre CO₂ e fases cálcicas pode ser utilizada deliberadamente para curar produtos cimentícios, tratar agregados reciclados, estabilizar resíduos e armazenar carbono na forma de carbonatos minerais. O mesmo fenômeno químico assume, portanto, significados distintos conforme o estágio de produção, a geometria do elemento, a presença de armadura, a umidade, a profundidade de reação e a função estrutural. O desafio

não é maximizar carbonatação indiscriminadamente, mas controlar onde, quando e quanto CO₂ reage com o material, preservando a durabilidade necessária (Ashraf, 2016; Zhang; Ghouleh; Shao, 2017; Meng et al., 2022).

A biomineralização introduz uma terceira dimensão. Bactérias, fungos, microalgas e sistemas enzimáticos podem alterar pH, produzir espécies carbonatadas, oferecer sítios de nucleação e promover precipitação de CaCO₃. O uso de precipitação microbiana de carbonato de cálcio, frequentemente referido pela sigla MICP, tem sido investigado para selar fissuras e reduzir permeabilidade. A rota ureolítica é a mais estudada, mas apresenta custos ambientais e químicos importantes: a hidrólise da ureia gera amônia/amônio, e o carbono precipitado pode ter origem no próprio substrato de ureia, o que impede assumir que toda mineralização corresponde a captura de CO₂ atmosférico. Por isso, rotas não ureolíticas, microrganismos fotossintéticos e enzimas como anidrase carbônica ganharam interesse por oferecerem mecanismos potencialmente mais compatíveis com captura direta de carbono e menor geração de subprodutos nitrogenados (Jonkers et al., 2010; Fahimizadeh et al., 2022; Gilmour et al., 2024).

A expressão “materiais cimentícios autoculturáveis”, utilizada neste artigo, é empregada em sentido operacional e não como categoria normativa consolidada. Refere-se a materiais que incorporam ou suportam sistemas biológicos capazes de permanecer viáveis, ser reativados ou regenerados e participar de processos funcionais como biomineralização, cicatrização de fissuras ou captura de carbono. O conceito aproxima-se dos engineered living building materials, nos quais microrganismos integram a própria lógica de fabricação e desempenho. Heveran et al. (2020), por exemplo,

demonstraram materiais vivos à base de cianobactérias em matrizes de hidrogel e areia capazes de biomineralizar, manter viabilidade e gerar sucessivas “gerações” de material em condições experimentais. Essa linha expande a visão da autocura: o material deixa de ser apenas passivamente reparável e passa a incluir funções biológicas programáveis.

O uso do adjetivo “bio-inspirado” também requer precisão. Em alguns casos, a inspiração provém de organismos e estruturas naturais - conchas, corais, ossos, esponjas e tecidos vegetais - cuja organização hierárquica associa resistência, porosidade funcional e mineralização. Em outros, a inspiração é funcional e reside na capacidade de regular transporte de fluidos, nucleação mineral ou resposta a dano. Revisões recentes sobre materiais cimentícios porosos bio-inspirados enfatizam que a engenharia da porosidade pode aumentar difusão de CO₂ e cinética de carbonatação, mas há um compromisso inevitável com resistência, permeabilidade e durabilidade. Uma rede de poros excelente para transporte de gás pode ser desfavorável à resistência mecânica ou à proteção da armadura. O valor da biomimética, portanto, não está em copiar formas naturais de modo superficial, mas em traduzir princípios funcionais de forma compatível com requisitos de engenharia (Constantino; Castro-Gomes; Vicente, 2026).

A questão central deste artigo é como combinar captura ativa de carbono e autocura estrutural sem transformar duas tecnologias promissoras em uma alegação ambiental não demonstrada. O objetivo geral é analisar os fundamentos, as sinergias e as limitações de materiais cimentícios autoculturáveis e bio-inspirados aplicados a infraestruturas com potencial de balanço de carbono negativo. Especificamente, pretende-se: diferenciar captura mineral efetiva de

simples carbonatação de serviço; comparar mecanismos autógenos, encapsulados e biológicos de autocura; discutir rotas microbianas e enzimáticas de biomineralização; examinar a integração entre porosidade, transporte de CO₂ e proteção estrutural; e propor critérios para que a qualificação de “carbono negativo” seja sustentada por balanço de ciclo de vida, desempenho mecânico e durabilidade verificável. O argumento desenvolvido é que a fronteira tecnológica mais promissora não é um único “bioconcreto”, mas sistemas híbridos em que baixo teor de clínquer, captura mineral, controle de fissuras e desenho para longa vida útil atuem de forma complementar.

2. METODOLOGIA

O estudo foi estruturado como revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa. Essa denominação foi adotada porque o objetivo é integrar campos com métodos e unidades de análise muito heterogêneos - química de cimentos, ciência de materiais, microbiologia aplicada, engenharia estrutural, carbonatação, biotecnologia e avaliação de ciclo de vida - sem produzir uma estimativa combinada de efeito. Não foi executado protocolo PRISMA com trilha auditável de deduplicação e exclusão, nem metanálise. Em consequência, não são apresentados números de artigos encontrados, excluídos ou incluídos. A estratégia metodológica priorizou literatura científica revisada por pares e documentos bibliográficos verificáveis por DOI, com leitura orientada por mecanismos, desempenho, limitações e validade das alegações de sustentabilidade.

A busca temática foi organizada por grupos de descritores em português e inglês: “self-healing concrete”, “cementitious materials”,

“microbially induced calcium carbonate precipitation”, “biomineralization”, “engineered living building materials”, “carbonation curing”, “CO₂ utilization”, “carbon sequestration in concrete”, “bio-inspired cementitious materials”, “carbonic anhydrase”, “non-ureolytic self-healing” e “life cycle assessment self-healing concrete”. Foram consultadas páginas de periódicos e registros bibliográficos de editoras científicas e bases de acesso público, com conferência cruzada de título, autoria, ano, periódico e DOI. Foram priorizados artigos de revisão e estudos experimentais de referência, além de publicações recentes que permitissem incorporar o estado do conhecimento até 2026.

Os critérios de relevância privilegiaram quatro tipos de evidência: revisões de alto impacto sobre descarbonização do cimento e concreto; revisões ou experimentos fundamentais sobre autocura e MICP; estudos sobre captura e mineralização de CO₂ em materiais cimentícios; e avaliações de ciclo de vida capazes de testar a hipótese de benefício ambiental em escala de material ou serviço. Estudos exclusivamente geotécnicos foram utilizados apenas quando contribuíam para compreender mecanismos microbianos, enquanto alegações de desempenho comercial sem suporte científico verificável não foram empregadas como base das conclusões. Resultados laboratoriais de culturas, pastas ou argamassas foram tratados como evidência de mecanismo, e não automaticamente como comprovação de desempenho estrutural em concreto armado de campo.

A síntese foi conduzida em cinco eixos: (1) emissões e rotas de descarbonização do cimento; (2) mecanismos de autocura; (3) biomineralização e materiais vivos; (4) captura ativa e mineralização de CO₂; e (5) desempenho ao longo do ciclo de vida. As evidências

foram comparadas por convergência, contradição e transferência de escala. Atenção especial foi dada a situações em que uma mesma reação possui efeitos opostos: a carbonatação pode armazenar CO₂, mas também reduzir alcalinidade; a porosidade pode acelerar difusão de CO₂, mas aumentar transporte de agentes agressivos; microrganismos podem selar fissuras, mas demandar nutrientes e encapsulantes com impacto ambiental próprio.

A análise do termo “carbono negativo” adotou um critério conservador. A ocorrência de sequestro mineral foi considerada condição potencialmente favorável, mas insuficiente. Para qualificar um sistema como de balanço negativo seria necessário demonstrar que, dentro de uma unidade funcional e fronteira de ciclo de vida explícitas, as remoções e emissões evitadas superam todas as emissões associadas à produção, processamento, transporte, cura, manutenção e destinação. Assim, o artigo diferencia “material que captura CO₂”, “material de baixo carbono” e “material de carbono líquido negativo”. Essa distinção evita que ganhos locais de carbonatação sejam convertidos, sem base, em afirmação climática global (Habert et al., 2020; Justo-Reinoso et al., 2023; Ahmed et al., 2026).

3. DESCARBONIZAÇÃO, CARBONATAÇÃO E FRONTEIRA DO BALANÇO DE CARBONO

3.1. Emissões do Cimento e Necessidade de Estratégias Combinadas

A fabricação de clínquer Portland apresenta uma dificuldade estrutural para a descarbonização porque parcela importante das emissões é de processo, associada à decomposição de carbonatos, e

não apenas ao combustível do forno. Mesmo uma matriz energética integralmente renovável não eliminaria essa fração. Por isso, cenários de redução profunda de emissões combinam menor conteúdo de clínquer, substituições minerais, melhoria de eficiência, cimentos alternativos e captura de CO₂. Scrivener, John e Gartner (2018) enfatizam que soluções de baixo carbono devem ser avaliadas também por disponibilidade global de matérias-primas, custo, padronização e capacidade de atender a volumes massivos. Gartner e Sui (2018) mostram que clínqueres alternativos podem reduzir emissões, mas enfrentam restrições de disponibilidade de elementos, compatibilidade com processos industriais e maturidade tecnológica. Provis (2018), ao discutir materiais ativados alcalinamente, destaca que seu benefício depende da disponibilidade local de precursores, do impacto dos ativadores e do controle de produção.

Essa literatura conduz a uma consequência relevante para materiais bio-inspirados: nenhuma função de autocura ou captura deve ser avaliada isoladamente do ligante de base. Um concreto biologicamente ativo produzido com alto teor de clínquer pode apresentar maior pegada inicial que uma formulação convencional otimizada, enquanto um sistema de baixo clínquer e longa vida útil pode alcançar desempenho ambiental superior sem qualquer função biológica. O potencial de materiais vivos ou biomineralizados precisa ser entendido como camada adicional de funcionalidade. Sua contribuição pode ocorrer em três níveis: reduzir reparos ao selar fissuras, capturar ou mineralizar CO₂, e habilitar geometrias ou processos com menor uso de material. O benefício total dependerá da soma desses efeitos e dos impactos introduzidos pelo próprio sistema de cura.

A abordagem por unidade funcional é particularmente importante. Comparar um metro cúbico de dois concretos sem controlar resistência, classe de exposição e vida útil pode levar a conclusões equivocadas. Uma formulação mais impactante por metro cúbico pode tornar-se preferível se permitir reduzir volume estrutural ou duplicar a vida em serviço; de modo inverso, uma matriz com baixo impacto inicial pode apresentar pior desempenho total se exigir reparos frequentes. Habert et al. (2020) defendem justamente a integração entre química de ligantes, eficiência de uso e projeto de infraestrutura. No caso de autocura, a unidade funcional deve incorporar desempenho de durabilidade, frequência de ativação e capacidade real de evitar intervenções.

Quadro 1. Rotas de descarbonização do sistema cimento-concreto e sua relação com materiais bio-inspirados

Rota	Mecanismo principal	Possível sinergia com autocura/captura	Limitação crítica
Redução do fator clínquer	Substituição parcial por adições ou uso de ligantes alternativos.	Diminui a emissão inicial que a captura deverá compensar.	Disponibilidade, variabilidade e requisitos de desempenho.
Carbonatação controlada	Reação de CO ₂ com fases cálcicas para formar carbonatos estáveis.	Pode densificar matriz, curar produtos e armazenar CO ₂ .	Risco de perda de alcalinidade e limitação de profundidade.
Autocura	Selamento autógeno, químico, polimérico ou	Pode reduzir ingresso de agentes	Eficácia dependente de largura de fissura,

	biológico de fissuras.	agressivos e manutenção.	umidade e repetibilidade.
Biomíneralização	Atividade microbiana ou enzimática promove precipitação mineral.	Pode combinar selamento de fissuras e mineralização de carbono.	Nutrientes, viabilidade, subprodutos e custo de encapsulação.
Materiais vivos	Microrganismos permanecem funcionais dentro de uma matriz hospedeira.	Possibilidade de regeneração e funções ambientais adaptativas.	Escala, biossegurança, estabilidade e compatibilidade estrutural.
Projeto para longa vida	Redução de material e intervenções por unidade de serviço.	Amplifica benefício da autocura quando esta evita reparos reais.	Exige modelagem de vida útil e validação em campo.

Fonte: elaboração própria a partir da literatura revisada.

3.2. Carbonatação: Sumidouro Mineral e Mecanismo de Deterioração

A carbonatação é uma reação inevitável ao longo da vida de materiais cimentícios expostos ao CO₂. Xi et al. (2016) estimaram que a carbonatação de produtos de cimento entre 1930 e 2013 correspondeu a um sumidouro global substancial, compensando parte das emissões de processo históricas do cimento quando combustíveis não eram considerados. Esse resultado é relevante para inventários de carbono, mas não significa que o concreto convencional seja neutro ou negativo: a fabricação libera CO₂ em grande magnitude e consome energia, enquanto a carbonatação de serviço ocorre lentamente, é incompleta e depende de condições

ambientais. Além disso, no concreto armado, a frente de carbonatação pode reduzir o pH do cobrimento e comprometer a passivação das armaduras.

A carbonatação acelerada transforma essa reação espontânea em processo de fabricação controlado. Zhang, Ghouleh e Shao (2017) revisaram o uso de CO₂ como agente de cura e mostraram que silicatos de cálcio e fases hidratadas podem reagir rapidamente sob condições adequadas de umidade e concentração de CO₂. A formação de CaCO₃ pode contribuir para ganho precoce de resistência e refinamento de poros em produtos específicos, especialmente pré-moldados e materiais sem armadura exposta a risco de despassivação. Ashraf (2016) ressalta, porém, que a resposta depende da química do ligante e que materiais alternativos podem apresentar comportamento de carbonatação distinto do cimento Portland. Portanto, “mais carbonatação” não é objetivo universal.

A distinção entre carbonatação de cura e carbonatação de serviço é fundamental. Na cura, o processo é deliberado, ocorre em janela controlada e pode ser limitado a produtos cuja composição e exposição foram projetadas para essa reação. Na vida em serviço, a carbonatação é governada por difusão, umidade, fissuração e interação com outros mecanismos de degradação. Em concreto armado, capturar CO₂ no cobrimento pode ser incompatível com a necessidade de manter elevada alcalinidade junto ao aço. Em blocos, agregados reciclados, resíduos minerais ou elementos sem armadura, as restrições são diferentes. Um sistema de carbono negativo deve, assim, localizar a mineralização onde ela agregue valor e manter a proteção eletroquímica onde esta for necessária (Meng et al., 2022).

Esse princípio de separação funcional oferece uma rota promissora para materiais híbridos. Agregados previamente carbonatados, por exemplo, podem armazenar CO₂ antes de serem incorporados a concreto armado, reduzindo o risco de que a captura dependa da carbonatação profunda do cobrimento. De modo semelhante, elementos pré-moldados podem receber cura por CO₂ em condições de fábrica, e camadas funcionais superficiais podem utilizar biomineralização para selar fissuras sem alterar toda a massa do concreto. O desenho futuro tende a ser multiescala: carbono capturado em constituintes específicos, baixa intensidade de clínquer no ligante e autocura localizada nas interfaces mais vulneráveis.

3.3. O Que Significa “Infraestrutura de Carbono Negativo”

O termo “carbono negativo” deve ser reservado a sistemas em que o balanço líquido de gases de efeito estufa seja inferior a zero em uma fronteira declarada. Em materiais cimentícios, medir apenas a massa de CO₂ absorvida durante cura ou serviço pode superestimar o benefício. É necessário contabilizar emissões da matéria-prima, moagem, clínquer, ativadores, cultivo microbiano, nutrientes, encapsulantes, energia de câmaras de cura, compressão e transporte de CO₂, aditivos, reparos e fim de vida. Também é necessário evitar dupla contagem quando o CO₂ utilizado é capturado de uma fonte industrial e já foi atribuído a outra cadeia. A permanência da mineralização é favorável quando o carbono é convertido em carbonatos estáveis, mas a contabilidade deve permanecer coerente com a origem e o destino do carbono.

A escala temporal também altera o resultado. Uma tecnologia de autocura pode aumentar o impacto na fase de produção e ainda

reduzir o impacto do ciclo de vida se evitar diversas intervenções. Inversamente, se o agente de cura nunca for ativado, o impacto adicional foi incorporado sem retorno funcional. A análise de ciclo de vida de Justo-Reinoso et al. (2023) mostrou precisamente essa tensão: uma formulação bacteriana encapsulada apresentou impacto inicial maior que o concreto de referência por causa de constituintes do sistema de cura. O potencial de sustentabilidade aparece quando o prolongamento da vida útil e a redução de reparos compensam o investimento ambiental inicial. A conclusão correta não é que bioconcreto seja sempre melhor ou pior, mas que seu benefício depende do cenário de serviço.

A unidade funcional mais adequada para infraestrutura pode ser expressa como serviço ao longo do tempo, e não apenas volume de material. Para uma ponte, por exemplo, interessa o impacto por área de tabuleiro capaz de atender uma carga e classe de exposição durante determinado número de anos. Essa perspectiva permite valorar autocura repetida, redução de interdições e manutenção evitada. Também impede que pequenas quantidades de CO₂ mineralizado sejam usadas para rotular como negativo um material cuja fabricação permanece intensiva em clínquer. Em síntese, captura ativa é um componente do balanço, não o balanço em si.

4. AUTOCURA, AUTOCULTIVO E MATERIAIS VIVOS PARA CONSTRUÇÃO

4.1. Autocura Autógena, Estimulada e Autônoma

O concreto possui certa capacidade de autocura autógena. Hidratação tardia de partículas não reagidas, precipitação de carbonato de cálcio e transporte de produtos pelo fluxo de água

podem selar fissuras estreitas. Esse fenômeno é mais eficiente quando as aberturas são pequenas e há disponibilidade de umidade. Revisões de Van Tittelboom e De Belie (2013) e De Belie et al. (2018) mostram que a cura autógena pode ser estimulada por adições minerais, agentes cristalinos, fibras que limitam largura de fissura e polímeros superabsorventes. A vantagem é utilizar mecanismos compatíveis com a própria matriz; a limitação é que a quantidade de reagentes disponíveis é finita e o desempenho cai à medida que a fissura aumenta ou as condições de exposição deixam de favorecer precipitação.

A autocura autônoma incorpora um reservatório funcional independente. Microcápsulas podem liberar polímeros ou reagentes quando rompidas pela fissura; redes vasculares podem transportar agentes; microrganismos encapsulados podem ser reativados por ingresso de água. Em muitos estudos, mecanismos autônomos conseguem tratar fissuras maiores do que a cura autógena, embora as faixas relatadas não constituam garantia de projeto e dependam de formulação e protocolo. De Belie et al. (2018) descrevem que mecanismos autógenos estimulados frequentemente se concentram em fissuras da ordem de 100-150 micrômetros, enquanto sistemas autônomos podem alcançar aberturas maiores, em alguns casos superiores a 300 micrômetros e ocasionalmente próximas de 1 mm. Esses valores devem ser lidos como resultados de pesquisa, não como limites normativos universais.

Para infraestrutura, selamento visual da fissura é apenas uma dimensão. O objetivo deve ser recuperar função: estanqueidade, resistência à penetração de cloretos, transporte de água, rigidez ou integridade mecânica, conforme o mecanismo de dano. Uma fissura preenchida superficialmente pode parecer “curada” e ainda manter

conectividade interna. Por isso, protocolos de avaliação empregam microscopia, absorção de água, permeabilidade, transporte iônico, ultrassom e ensaios mecânicos. A autocura de alto valor é aquela que reduz a taxa de degradação ao longo do tempo e, idealmente, pode ser ativada mais de uma vez. O desempenho repetido é especialmente importante para justificar o custo ambiental de encapsulantes, nutrientes ou componentes especiais.

Quadro 2. Principais famílias de autocura em materiais cimentícios

Família	Gatilho	Produto/ação de cura	Vantagem	Limitação
Autógena	Água e exposição ambiental.	Hidratação tardia, carbonatação e deposição física.	Sem agente adicional.	Restrita a fissuras pequenas e disponibilidade de reagentes.
Autógena estimulada	Umidade e reação de adições.	Produtos cristalinos, expansão controlada ou retenção de água.	Integração simples à matriz.	Desempenho dependente da formulação e exposição.
Microencapsulada	Ruptura da cápsula pela fissura.	Polímero, mineral ou reagente de selamento.	Resposta localizada e rápida.	Volume finito e possível impacto da cápsula nas propriedades.
Vascular	Interseção da fissura com rede interna.	Fluxo de agente líquido.	Possibilidade de recarga em alguns conceitos.	Complexidade de fabricação e risco de

				interferência estrutural.
Microbiana	Água, nutrientes e reativação celular.	Precipitação de CaCO ₃ e biofilmes.	Compatibilidade mineral e potencial de repetição.	Sobrevivência, nutrientes, cinética e subprodutos.
Enzimática	Contato entre substrato, íons e enzima.	Aceleração de reações de carbonato.	Sem necessidade de célula viva.	Estabilidade enzimática, custo e vida funcional.
Material vivo engenheira do	Condições de crescimento e estímulos ambientais.	Biomíneralização, regeneração e produção de matriz.	Integra fabricação e função biológica.	Maturidade estrutural, controle biológico e padronização.

Fonte: elaboração própria a partir da literatura revisada.

4.2. Do Material Autocurável Ao Material Autoculturável

O salto conceitual entre autocura e autocultivo ocorre quando a função biológica deixa de ser um reagente dormiente de uso único e passa a constituir parte regenerável do sistema material. Engineered living materials combinam células vivas com matrizes poliméricas, minerais ou híbridas para produzir propriedades que podem evoluir no tempo. Heveran et al. (2020) utilizaram cianobactérias em um arcabouço de hidrogel e areia, demonstrando biomineralização e sucessivas gerações de material a partir de uma geração parental. O estudo não equivale a concreto estrutural convencional, mas estabelece uma prova de princípio importante: fabricação de

material e metabolismo podem ser integrados de maneira que a fase biológica permaneça funcional após a conformação.

Em matrizes cimentícias tradicionais, o ambiente é hostil à vida: pH elevado, dessecação, calor de hidratação, confinamento por poros finos e escassez de nutrientes reduzem viabilidade. A resposta tecnológica tem sido utilizar esporos bacterianos, agregados porosos, hidrogéis, cápsulas e suportes que criam microambientes protetores. A lógica de “autoculturabilidade” exigiria ir além da sobrevivência inicial: seria necessário que o microrganismo pudesse reativar-se repetidamente, acessar fontes de carbono e cálcio, produzir mineral na região do dano e retornar a estado estável sem comprometer a matriz. Isso transforma a engenharia do concreto em problema acoplado de transporte, microbiologia, mecânica de fratura e química de solução.

A escala espacial do sistema é decisiva. Em um bloco vivo não armado, a porosidade pode ser desenhada para favorecer troca gasosa e iluminação; em uma viga de concreto armado, a mesma porosidade poderia facilitar ingresso de cloretos. Por isso, aplicações de materiais vivos tendem a se desenvolver primeiro em elementos não estruturais, revestimentos, componentes de fachada, barreiras, painéis, agregados funcionais e sistemas pré-fabricados. A migração para elementos estruturais exige demonstrar estabilidade dimensional, resistência à fadiga, compatibilidade com armaduras, resposta a ciclos de umidade e temperatura e comportamento ao fogo. Não basta manter a célula viva; é necessário garantir que a função biológica permaneça subordinada aos requisitos de segurança da engenharia.

Beatty, Williams e Srubar (2022) situam os materiais biomineralizados dentro de uma transição mais ampla para construção sustentável e durável. A biomineralização permite produzir ligações minerais em condições potencialmente menos intensivas em energia, além de reparar matrizes existentes. Contudo, os autores destacam desafios técnicos, econômicos e ambientais para escalonamento. Isso é particularmente relevante para o conceito de autocultivo: uma função biológica regenerável pode ser poderosa, mas o sistema de cultivo, nutrientes e controle precisa ter impacto e custo menores que a solução convencional que substitui.

5. BIOMINERALIZAÇÃO E ESTRATÉGIAS BIO-INSPIRADAS

5.1. Precipitação Microbiana de Carbonato de Cálcio

A precipitação microbiana de carbonato de cálcio pode ocorrer por diferentes rotas metabólicas. Na ureólise, a urease catalisa a hidrólise da ureia, elevando o pH e aumentando a disponibilidade de espécies carbonatadas. Na presença de Ca^{2+} , ocorre supersaturação e precipitação de CaCO_3 , frequentemente nucleada em superfícies celulares. A simplicidade cinética explica a ampla utilização de *Sporosarcina pasteurii* e espécies do gênero *Bacillus* em pesquisas de autocura. Jonkers et al. (2010) demonstraram precocemente que bactérias incorporadas ao concreto poderiam atuar como agentes de autocura. Desde então, numerosas formulações foram desenvolvidas com esporos, nutrientes e veículos de proteção, e revisões apontam redução de permeabilidade e selamento de fissuras em condições específicas (Vijay; Murmu; Deo, 2017; Garg; Garg; Eddy, 2023).

O principal problema ambiental da ureólise é que sua elevada eficiência de precipitação não corresponde automaticamente a captura de carbono atmosférico. A ureia é o substrato que fornece carbono ao sistema e sua hidrólise gera amônia/amônio. Em aplicações em larga escala, o nitrogênio residual pode demandar tratamento, e sais de cálcio podem introduzir cloretos ou outros íons indesejáveis. Fahimizadeh et al. (2022) revisam rotas não ureolíticas como alternativa, destacando vias baseadas em oxidação de compostos orgânicos, desnitrificação e outras formas de alcalinização microbiana. Essas rotas podem reduzir o problema do amônio, mas normalmente apresentam cinética, disponibilidade de substrato e controle ambiental distintos.

A sustentabilidade da MICP depende, portanto, da origem do carbono e do cálcio. Se o carbonato precipitado provém de um reagente de alto impacto, a massa mineral formada não é sinônimo de remoção líquida de CO₂. Por outro lado, se o sistema utiliza CO₂ gasoso ou bicarbonato de fonte capturada e promove sua conversão estável em carbonato, o mecanismo pode contribuir diretamente para armazenamento mineral. Essa distinção deve ser refletida em inventários de ciclo de vida. Para autocura, a função primária pode ser durabilidade; para captura, deve haver comprovação da origem do carbono e quantificação da massa efetivamente fixada.

A sobrevivência microbiana acrescenta outra camada. O concreto jovem apresenta pH elevado e sofre secagem; as fissuras podem permanecer secas por longos períodos e depois receber água abruptamente. Esporos bacterianos são atraentes por tolerarem dormência, mas a germinação exige condições adequadas. Encapsulantes e agregados porosos criam microambientes, porém alteram custo, pegada e, em alguns casos, resistência. A pesquisa

recente procura otimizar carriers, disponibilidade de nutrientes e organismos mais robustos, além de fungos e consórcios microbianos. Wong et al. (2024) observam que a transição da prova de conceito para aplicação requer demonstrar viabilidade em condições ambientais reais e custo compatível com o valor da manutenção evitada.

5.2. Anidrase Carbônica, Fotossíntese e Captura Direta de CO₂

A anidrase carbônica catalisa a interconversão entre CO₂ dissolvido e bicarbonato, acelerando uma etapa que pode limitar a formação de carbonatos. Em sistemas de captura biológica, enzimas livres ou expressas por microrganismos podem aumentar a velocidade de disponibilização de espécies carbonatadas para precipitação com cálcio. Meng et al. (2022) identificam a anidrase carbônica entre abordagens microbianas relevantes para sequestro em materiais cimentícios. A vantagem conceitual é clara: a rota pode ser desenhada para utilizar CO₂ como insumo, em vez de depender do carbono da ureia. A limitação é que enzimas podem perder atividade em pH extremo, temperatura e longos períodos de armazenamento, exigindo imobilização ou proteção.

Gilmour et al. (2024) forneceram uma demonstração particularmente importante ao expressar anidrases carbônicas em *Bacillus subtilis* e observar remoção de CO₂ gasoso acompanhada pela formação de calcita e vaterita. O estudo é uma prova de conceito microbiológica e não uma validação de elemento estrutural, mas mostra que captura e biomineralização podem ser conectadas em um mesmo sistema celular. A integração futura com cimento exigirá controlar transferência de massa, disponibilidade de cálcio, estabilidade da enzima, distribuição do precipitado e impacto

no material. Também será necessário comparar a energia e os reagentes do bioprocesso com rotas químicas de carbonatação.

Microrganismos fotossintéticos, como cianobactérias, oferecem outra lógica: capturam CO_2 por metabolismo autotrófico e podem induzir ambientes favoráveis à precipitação de carbonato. Sua aplicação é naturalmente mais adequada a superfícies iluminadas, revestimentos, fachadas e materiais porosos do que ao interior de elementos espessos. A iluminação, umidade e difusão de nutrientes tornam a geometria parte do sistema biológico. Isso ilustra uma diferença central entre concreto tradicional e material vivo: a arquitetura do poro e a exposição ambiental deixam de ser apenas variáveis de durabilidade e passam a definir também a disponibilidade metabólica.

A utilização de fotossíntese ou anidrase carbônica não elimina a necessidade de análise crítica. Capturar CO_2 e precipitá-lo como CaCO_3 pode demandar uma fonte de Ca^{2+} cuja produção possui emissões. A quantidade de carbono mineralizado deve ser comparada com a emissão do ligante e do processo. Além disso, a estabilidade biológica não pode comprometer saúde ocupacional ou ecossistemas. Por isso, sistemas enzimáticos não vivos podem ser atraentes quando o objetivo é catalisar captura sem manter organismos ativos durante toda a vida de serviço, enquanto materiais vivos podem ser preferíveis quando a regeneração repetida oferece valor adicional.

Quadro 3. Rotas biológicas e bioquímicas para mineralização e autocura

Rota	Fonte de carbono	Função dominante	Vantagem	Ponto de atenção
MICP ureolítica	Ureia.	Precipitação rápida de CaCO_3 e selamento.	Alta taxa de mineralização e ampla literatura.	Geração de amônia/amônio; não implica captura atmosférica.
MICP não ureolítica	Substratos diversos e carbono inorgânico conforme a via.	Mineralização e autocura.	Pode reduzir subprodutos nitrogenados.	Cinética e controle dependem da rota metabólica.
Anidrase carbônica	CO_2 dissolvido/gasoso convertido em bicarbonato.	Aceleração da captura e nucleação de carbonatos.	Conecta diretamente CO_2 a mineralização.	Estabilidade enzimática e necessidade de Ca^{2+} .
Fotossíntese	CO_2 atmosférico ou fornecido.	Fixação biológica e alteração local de pH.	Captura autotrófica e possibilidade de material vivo.	Dependência de luz, água e transporte de nutrientes.
Material vivo regenerativo	Definida pelo organismo e pelo meio de cultivo.	Biomíneralização, reparo e produção de matriz.	Potencial de repetição e regeneração.	Biossegurança, controle metabólico e maturidade estrutural.

Fonte: elaboração própria a partir da literatura revisada.

5.3. Bioinspiração por Arquitetura Porosa e Mineralização Hierárquica

Sistemas naturais raramente maximizam uma única propriedade. Conchas combinam camadas minerais e orgânicas para dissipar energia; ossos utilizam porosidade hierárquica para equilibrar massa e resistência; corais constroem esqueletos carbonáticos permeáveis ao transporte; esponjas marinhas exibem redes porosas com elevada razão área-volume. O interesse de materiais cimentícios bio-inspirados está em extrair princípios: gradientes de porosidade, interfaces mineral-orgânico, caminhos de transporte e deposição mineral localizada. Constantino, Castro-Gomes e Vicente (2026) revisam como estruturas porosas inspiradas na natureza podem favorecer carbonatação acelerada ao ampliar acesso do CO₂ às fases reativas.

A engenharia da porosidade apresenta, porém, um conflito de objetivos. CO₂ precisa difundir-se, e reações de mineralização necessitam de água e íons. Poros excessivamente fechados limitam transporte; poros excessivamente conectados podem aumentar permeabilidade à água e a agentes agressivos. A formação de CaCO₃ durante carbonatação pode bloquear poros próximos à superfície e criar uma barreira que desacelera reações mais profundas. Assim, o melhor material de captura não é necessariamente o de maior porosidade total, mas aquele cuja distribuição de tamanhos e conectividade permite transporte suficiente antes de a reação autopassivar a superfície.

O desenho bio-inspirado pode usar gradientes: uma camada externa mais porosa e carbonatável para captura, uma zona intermediária de transição e um núcleo estrutural denso para resistência e proteção da armadura. Outra possibilidade é incorporar agregados funcionais previamente carbonatados ou porosos que atuem como reservatórios para microrganismos. Em ambos os casos, a

biomimética deixa de ser estética e torna-se arquitetura de transporte. A fabricação aditiva e a impressão 3D podem criar canais e redes internas, mas introduzem desafios de anisotropia, interfaces entre camadas e custo. O princípio de projeto deve ser sempre vincular geometria à função mensurável.

A bioinspiração também pode ocorrer na resposta a fissuras. Organismos mineralizados frequentemente direcionam recursos para regiões danificadas mediante gradientes químicos ou transporte localizado. Em materiais cimentícios, o próprio ingresso de água pela fissura pode funcionar como gatilho, transportando nutrientes e ativando esporos. Redes vasculares artificiais procuram imitar sistemas de circulação, enquanto microcápsulas imitam reservatórios locais. A combinação com microrganismos permite imaginar canais recarregáveis que forneçam meio de crescimento apenas quando a fissura se abre. Contudo, cada canal ou inclusão é também uma descontinuidade potencial; sua integração deve ser verificada por mecânica de fratura e fadiga.

6. CAPTURA ATIVA DE CO₂ EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

6.1. Cura por Carbonatação, Injeção e Mineralização Acelerada

A utilização de CO₂ em materiais cimentícios pode ocorrer em diferentes momentos. Na cura por carbonatação, produtos recém-moldados são expostos a atmosfera rica em CO₂ após controle da umidade. Na injeção em concreto fresco, CO₂ é dosado durante mistura e reage com fases de cálcio, formando partículas de carbonato que podem atuar como sítios de nucleação. Resíduos alcalinos e agregados reciclados podem ser carbonatados antes de entrar no concreto. Essas rotas têm uma vantagem comum:

transformam CO_2 em fase mineral estável e permitem medir a massa introduzida no processo. A quantidade efetivamente retida, contudo, depende da estequiometria, da eficiência da reação e das perdas do sistema.

Zhang, Ghouleh e Shao (2017) mostram que cura por carbonatação pode acelerar endurecimento de materiais adequadamente formulados, enquanto Ashraf (2016) destaca que a reação altera microestrutura e pode ser explorada para armazenamento. Meng et al. (2022) revisam tecnologias mais recentes e observam que produtos à base de cimento Portland e resíduos industriais apresentam capacidades de absorção variáveis, com espaço significativo para otimização. Cho, Lee e Kim (2025) ampliam a análise para agregados tratados, ligantes alternativos e aplicações estruturais, enfatizando que condições de pressão, umidade e temperatura precisam ser ajustadas para evitar gradientes excessivos e passivação superficial.

A umidade é uma variável de controle porque o CO_2 precisa dissolver-se em fase aquosa para reagir, mas excesso de água obstrui poros e reduz difusão gasosa. Pressões elevadas aceleram reação inicial, mas podem favorecer formação rápida de camadas densas de carbonato que limitam penetração. O balanço entre transporte e reação é, portanto, central. Em um material bio-inspirado, a arquitetura porosa pode ser desenhada para retardar o bloqueio precoce e distribuir CO_2 em profundidade. Contudo, em elementos armados, a zona de reação deve ser compatibilizada com cobrimento e alcalinidade.

O CO_2 utilizado também possui uma história energética. Capturar, purificar, comprimir e transportar gás consome energia. Usar

diretamente gás de processo pode reduzir etapas, mas impurezas precisam ser avaliadas. A vantagem da mineralização é a permanência do armazenamento, pois carbonatos são termodinamicamente estáveis nas condições usuais de serviço. Mesmo assim, o crédito climático deve refletir a origem do CO₂ e as emissões do sistema de captura. Em outras palavras, uma tonelada de CO₂ dosada não corresponde necessariamente a uma tonelada de CO₂ removida da atmosfera.

6.2. Carbonatação de Agregados Reciclados e Resíduos Minerais

A carbonatação de materiais reciclados permite separar espacialmente a captura do núcleo estrutural. Resíduos de concreto contêm pasta aderida rica em fases cálcicas que pode reagir com CO₂. O tratamento pode reduzir porosidade da pasta antiga, estabilizar constituintes e melhorar algumas propriedades do agregado reciclado. Poon et al. (2023) revisam estratégias de reciclagem total de resíduos de concreto por carbonatação acelerada, destacando o potencial de circularidade ao combinar valorização de resíduo e armazenamento mineral. Essa rota é especialmente interessante porque o CO₂ pode ser fixado antes da produção do novo concreto, reduzindo o conflito com a passivação do aço.

Escórias, cinzas e outros resíduos alcalinos também contêm Ca ou Mg reativos. Sua carbonatação pode produzir agregados ou adições. O benefício depende da composição química, presença de contaminantes e energia de moagem ou pré-tratamento. Resíduos industriais não são automaticamente “gratuitos” do ponto de vista ambiental; alocações de inventário e transporte podem alterar resultados. Além disso, alguns materiais secundários têm

disponibilidade regional limitada. A circularidade deve ser avaliada em escala de cadeia produtiva.

Ligantes alternativos podem ampliar o espaço de projeto. Clínqueres de belita, sistemas belita-ye'elimita-ferrita, cimentos de magnésio e materiais ativados alcalinamente apresentam reatividades e produtos de carbonatação distintos. Gartner e Sui (2018) e Provis (2018) mostram que alternativas ao clínquer Portland devem ser julgadas pela disponibilidade de matérias-primas, durabilidade e emissões reais dos ativadores. A integração com captura por carbonatação pode ser vantajosa quando o ligante possui fases altamente reativas ao CO₂, mas não existe substituto universal. A escolha deve ser orientada por contexto regional e função do elemento.

Para materiais autoculturáveis, agregados porosos carbonatáveis podem desempenhar dupla função: suporte de células e reservatório de espécies cálcicas. Essa hipótese é atraente porque concentra o sistema biológico em inclusões discretas, preservando uma matriz estrutural convencional. Entretanto, o suporte deve proteger o microrganismo durante mistura e, ao mesmo tempo, permitir acesso de água quando surgir uma fissura. Se a carbonatação precoce vedar completamente seus poros, a função biológica pode ser perdida. O projeto precisa coordenar as escalas temporal e espacial das reações.

Quadro 4. Rotas de captura e mineralização de CO₂ em materiais cimentícios

Estratégia	Momento de aplicação	Local de armazenamento	Benefício potencial	Risco/limitação
------------	----------------------	------------------------	---------------------	-----------------

Cura por CO ₂	Após moldagem, sobretudo em pré-fabricados.	Matriz cimentícia carbonatada.	Ganho precoce e armazenamento mineral.	Controle de umidade, profundidade e compatibilidade com armadura.
Injeção em concreto fresco	Durante mistura.	Carbonatos dispersos na pasta.	Nucleação e utilização de CO ₂ sem carbonatar todo o cobrimento.	Quantidade capturada limitada pela química e dosagem.
Agregado reciclado carbonatado	Antes da nova mistura.	Pasta antiga aderida ao agregado.	Circularidade e separação da captura do aço.	Variabilidade do resíduo e logística de tratamento.
Resíduo mineral carbonatado	Pré-tratamento industrial.	Carbonatos de Ca/Mg em agregado ou adição.	Valorização de resíduos e armazenamento estável.	Impurezas, moagem, disponibilidade regional.
Biomineralização com CO ₂	Durante cura, serviço ou reparo.	CaCO ₃ precipitado biologicamente.	Integra captura e selamento de fissuras.	Cinética, nutrientes, Ca ²⁺ , estabilidade biológica.
Carbonatação natural	Ao longo do serviço e fim de vida.	Produtos hidratados expostos ao ar.	Sumidouro passivo contabilizável.	Lenta, variável e potencialmente nociva à armadura.

Fonte: elaboração própria a partir da literatura revisada.

6.3. Compatibilidade Entre Captura e Durabilidade do Concreto Armado

A infraestrutura de carbono negativo não pode ser obtida sacrificando a durabilidade. No concreto armado, a alcalinidade elevada da solução dos poros contribui para a formação de uma película passiva no aço. À medida que a carbonatação avança, o pH cai e o risco de corrosão aumenta quando oxigênio e umidade estão disponíveis. Portanto, estratégias que maximizem carbonatação profunda de um elemento armado podem reduzir vida útil e gerar emissões futuras de reparo, invertendo o benefício climático. O desenho deve preservar uma zona protetora ao redor da armadura ou utilizar constituintes carbonatados antes da moldagem.

A autocura pode atuar como mecanismo de proteção indireta. Ao selar fissuras, reduz caminhos preferenciais para água e cloretos e pode desacelerar transporte de CO₂. Surge então uma aparente contradição: deseja-se CO₂ para mineralização, mas não para despassivar o aço. A solução está na compartimentalização. Camadas superficiais ou agregados funcionais podem capturar carbono; fissuras podem ser seladas por precipitação local; o núcleo armado permanece com química adequada. Esse princípio é semelhante a sistemas biológicos, nos quais diferentes tecidos desempenham funções distintas em vez de exigir que cada volume realize todas as tarefas.

A avaliação deve combinar medições de captura com indicadores de durabilidade. Profundidade de carbonatação, resistividade elétrica, difusão de cloretos, sorptividade, permeabilidade, potencial de corrosão e recuperação de estanqueidade são mais informativos que resistência à compressão isolada. Também é necessário estudar

ciclos: uma fissura curada pode reabrir em outra posição; agentes podem ser consumidos; microrganismos podem perder viabilidade. Um material multifuncional só pode ser considerado robusto se mantiver desempenho sob repetição de dano e exposição.

Em estruturas não armadas, como blocos, pavimentos específicos, elementos de paisagismo, barreiras e componentes arquitetônicos, a janela de projeto para carbonatação é mais ampla. Isso pode acelerar a adoção industrial de materiais bio-inspirados antes de seu uso em elementos primários de pontes e edifícios. A transição tecnológica prudente tende a começar por aplicações com alto valor funcional e menor risco de segurança, gerando dados de campo para calibração de modelos de vida útil.

7. INTEGRAÇÃO ENTRE CAPTURA ATIVA E AUTOCURA ESTRUTURAL

7.1. Arquitetura de um Material de Dupla Função

A integração mais promissora não é simplesmente adicionar bactérias a um concreto carbonatável, mas desenhar uma arquitetura em que cada função tenha recursos e gatilhos coerentes. Uma matriz de baixo clínquer pode reduzir emissões iniciais; agregados ou camadas reativas podem receber CO₂ durante fabricação; microrganismos encapsulados podem permanecer dormentes até o surgimento de fissura; quando água ingressa, ocorre reativação e precipitação mineral localizada. A própria fissura serve como canal de transporte e gatilho. Esse arranjo minimiza consumo de nutrientes durante condições normais e concentra biomineralização onde há dano.

Uma segunda arquitetura seria manter organismos fotossintéticos em camada superficial porosa conectada a um núcleo estrutural convencional. A camada funcionaria como “pele viva”, capturando CO₂, modulando umidade e reparando microfissuras superficiais, enquanto o núcleo garantiria resistência. Essa solução aproxima materiais vivos de sistemas de fachada e revestimento antes de exigir que microrganismos permaneçam ativos dentro de concreto denso. Também facilita substituição ou renovação da camada funcional sem demolir o elemento principal.

A terceira arquitetura emprega enzimas em vez de células. Anidrase carbônica imobilizada em partículas ou géis pode acelerar hidratação de CO₂ e precipitação, evitando questões de sobrevivência e biossegurança. Se combinada com reservatórios de íons e microcápsulas, a enzima poderia ser liberada por fissuração. A vida útil enzimática, porém, é finita e precisa ser comparada com a dormência de esporos. O material ideal talvez seja híbrido: enzima para captura durante cura inicial, microrganismo dormente para reparos futuros e matriz de baixo clínquer como base.

Uma quarta arquitetura combina controle de fissura por fibras com biomineralização. Sistemas cimentícios reforçados com fibras que mantêm aberturas pequenas aumentam a probabilidade de cura eficiente, pois reduzem volume de precipitado necessário. Essa sinergia ilustra por que autocura deve ser incorporada desde o projeto mecânico. Em vez de pedir ao agente biológico que repare fissuras largas, o material pode ser formulado para dispersar dano em microfissuras tratáveis. A combinação entre mecânica de fratura e biologia é mais racional que depender exclusivamente da capacidade mineralizante.

7.2. Critérios de Desempenho: Carbono, Cura, Resistência e Repetibilidade

Uma plataforma de dupla função deve apresentar métricas independentes para cada objetivo. Para captura: massa de CO₂ fornecida, massa fixada, eficiência de mineralização, origem do CO₂ e estabilidade do carbono. Para autocura: largura inicial da fissura, porcentagem de fechamento, profundidade preenchida, recuperação de estanqueidade e capacidade de nova cura após ciclos subsequentes. Para desempenho estrutural: resistência, módulo, retração, fluência, fadiga e aderência com armadura. Para durabilidade: permeabilidade, cloretos, sulfatos, ciclos térmicos e corrosão. Somente a combinação dessas métricas permite avaliar trade-offs.

Medições de CO₂ precisam diferenciar absorção física temporária de conversão mineral. Termogravimetria, difração de raios X e balanços de massa podem quantificar carbonatos, enquanto análise isotópica pode ser útil em estudos de origem do carbono. Em autocura, microscopia superficial deve ser complementada por técnicas que avaliem volume e conectividade da fissura. O simples fechamento visual pode resultar de depósitos frágeis ou superficiais. A função de engenharia é reduzir transporte e recuperar desempenho suficiente para o estado limite considerado.

A repetibilidade é uma das questões mais importantes e menos resolvidas. Microcápsulas tradicionais são consumidas quando rompidas; materiais vivos podem, em princípio, regenerar-se, mas só se células, nutrientes e espaço permanecem disponíveis. A promessa de “autocultivo” deve ser demonstrada por ciclos de dano-cura-dano, não apenas por um evento. Heveran et al. (2020)

mostraram regeneração sucessiva em material vivo experimental, o que estabelece uma referência conceitual; transferir essa capacidade para concreto estrutural exigirá superar confinamento e desidratação.

A captura também pode ser repetida apenas enquanto houver fases reativas e transporte de CO₂. A carbonatação tende a consumir Ca(OH)₂ e descalcificar C-S-H em graus variáveis. O sistema não possui capacidade infinita. Por isso, materiais que utilizam resíduos minerais ou agregados recarregáveis podem oferecer reservatórios adicionais. O projeto deve estabelecer uma capacidade teórica máxima e uma eficiência operacional real, evitando extrapolar resultados iniciais para toda a vida do elemento.

Quadro 5. Matriz integrada para qualificação de materiais cimentícios bio-inspirados de baixo ou negativo carbono

Eixo	Indicadores mínimos	Pergunta de validação	Condição para alegação robusta
Carbono	kg CO ₂ e por unidade funcional; kg CO ₂ mineralizado; origem do CO ₂ .	As remoções superam emissões em fronteira definida?	ACV transparente e sem dupla contagem.
Autocura	Largura e profundidade curadas; estanqueidade; ciclos de repetição.	A fissura recupera função, e não apenas aparência?	Ensaio funcionais e múltiplos ciclos quando aplicável.
Estrutura	Resistência, módulo, retração, fadiga e aderência.	A função biológica altera segurança ou deformabilidade?	Desempenho compatível com classe estrutural.

Durabilidade	Carbonatação, cloretos, permeabilidade, corrosão e exposição ambiental.	A captura compromete proteção da armadura?	Vida útil projetada igual ou superior à referência.
Biologia	Viabilidade, atividade, biossegurança, subprodutos e nutrientes.	O organismo permanece controlável durante a vida útil?	Protocolos de contenção e estabilidade funcional.
Industrialização	Custo, produtividade, controle de qualidade e variabilidade.	A solução pode ser fabricada de forma repetível?	Processo escalável com tolerâncias definidas.
Circularidade	Reciclabilidade, reativação, destino do componente e resíduos.	O fim de vida preserva ou perde o carbono mineralizado?	Cenário de fim de vida incluído no balanço.

Fonte: elaboração própria a partir da literatura revisada.

8. CICLO DE VIDA, ESCALABILIDADE E PADRONIZAÇÃO

8.1. A Sustentabilidade Não Está Garantida Pelo Mecanismo de Autocura

A literatura de ciclo de vida é particularmente valiosa porque corrige uma tendência comum de associar “biológico” a “baixo impacto”. Justo-Reinoso et al. (2023) avaliaram concreto autocurável bacteriano com esporos não ureolíticos encapsulados e encontraram, na formulação estudada, impacto de produção superior ao concreto equivalente, influenciado por componentes como nitrato de cálcio e materiais do encapsulamento. O resultado

não invalida a tecnologia; mostra que o ganho ambiental depende do número de reparos evitados e da extensão de vida útil. Um agente funcional que aumenta significativamente a pegada inicial precisa entregar benefício duradouro suficiente para amortizar esse “investimento ambiental”.

Evidência ainda mais recente reforça o caráter contextual. Ahmed et al. (2026) compararam abordagens biológicas de autocura com reparos convencionais em tabuleiros de pontes. Para fissuras leves, selamento epoxídico apresentou pegada de carbono muito menor que a média das alternativas biológicas analisadas; para danos que demandariam recobrimentos poliméricos, certas abordagens biológicas mostraram vantagem. O estudo destaca que severidade do dano, capacidade de cura repetida e tipo de intervenção de referência alteram completamente a conclusão. Portanto, não existe hierarquia universal entre autocura biológica e reparo convencional.

Essa constatação é central para infraestrutura de carbono negativo. Se a tecnologia de cura for instalada em todo o volume do concreto, mas apenas uma pequena fração for ativada, a relação impacto-benefício pode ser desfavorável. Estratégias localizadas, como proteção em zonas críticas, revestimentos funcionais ou cápsulas concentradas próximas às superfícies de maior risco, podem reduzir material adicional. O projeto baseado em risco pode ser ambientalmente superior à incorporação uniforme de agentes caros em toda a estrutura.

A ACV deve incluir cenários de falha. Se a função biológica perder viabilidade antes do dano, o sistema se comportará como concreto com inclusões inertes. Se a cura ocorrer, mas não impedir corrosão, o reparo ainda será necessário. Por isso, modelos devem vincular

eficácia de cura a probabilidades de intervenção e vida útil. A incerteza não deve ser escondida; pode ser tratada por análise de sensibilidade e cenários. Quanto mais emergente a tecnologia, maior a importância de apresentar intervalos em vez de valores pontuais.

8.2. Escalonamento Industrial e Aplicação em Campo

A passagem do laboratório para infraestrutura exposta altera simultaneamente escala, heterogeneidade e controle. Culturas produzidas em condições ideais precisam sobreviver a mistura, bombeamento, vibração, hidratação e anos de seca. Câmaras de carbonatação de pequenas amostras precisam tornar-se processos industriais com fluxo de gás, recuperação, segurança e controle de umidade. Materiais bio-inspirados precisam ser produzidos com tolerâncias e custo compatíveis com construção. A escalabilidade não é etapa posterior à ciência do material; deve ser incorporada desde o desenho do sistema.

Pré-fabricação oferece vantagens importantes. Em fábrica, é possível controlar composição, teor de umidade, exposição a CO₂ e qualidade do encapsulamento. Elementos podem ser monitorados antes de chegar à obra, reduzindo variabilidade. Aplicações em blocos, tubos, painéis, telhas e componentes não armados podem permitir carbonatação mais intensa. Em concreto moldado in loco, as condições são menos controláveis e a logística de CO₂ é mais complexa. A estratégia industrial mais plausível pode, portanto, variar conforme o produto.

A padronização de autocura ainda é um obstáculo. Diferentes estudos utilizam larguras de fissura, tempos de cura, temperaturas e

métodos de quantificação distintos, dificultando comparação. Zhang et al. (2024) e Wong et al. (2024) destacam a necessidade de protocolos comuns para caracterizar mecanismos microbianos e desempenho. Para captura de carbono, também são necessários métodos de medição, reporte e verificação que diferenciem CO₂ fornecido, absorvido e mineralizado. Sem padronização, uma alegação comercial de “carbono capturado” pode não ser comparável a outra.

Biossegurança e regulação devem acompanhar aplicações vivas. Esporos bacterianos de espécies não patogênicas são geralmente selecionados, mas uso de organismos geneticamente modificados, como em sistemas experimentais de anidrase carbônica, exigiria avaliação regulatória específica. A enzima purificada pode contornar algumas questões, porém adiciona desafios de produção e estabilidade. O projeto de um material vivo precisa definir o que acontece no corte, demolição, reciclagem e contato com água. A segurança não é apenas da estrutura, mas também do processo biológico.

Custo e cadeia de suprimentos podem determinar adoção antes mesmo da limitação científica. Nutrientes, cápsulas e biopolímeros têm custo maior que constituintes convencionais. A proposta de valor deve ser ligada a estruturas nas quais manutenção é cara ou difícil: túneis, estruturas marítimas, reservatórios, pontes e infraestruturas subterrâneas. Nesses casos, evitar uma intervenção pode ter valor econômico e ambiental elevado. Em elementos facilmente reparáveis, uma solução simples pode ser preferível. A seleção de aplicação é, portanto, parte da otimização tecnológica.

9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A síntese da literatura revela uma convergência robusta: extensão de vida útil e redução da intensidade de clínquer são condições estruturantes para a sustentabilidade do concreto, enquanto captura de CO₂ e autocura funcionam como mecanismos adicionais cujo benefício depende do contexto. Nenhum dos estudos revisados sustenta a ideia de que simples adição de microrganismos transforme automaticamente concreto em material carbono negativo. O balanço climático é resultado de uma cadeia. A mesma conclusão emerge de campos diferentes: revisões de descarbonização destacam a necessidade de múltiplas rotas; revisões de autocura destacam limitações de escala e repetibilidade; avaliações de ciclo de vida mostram que componentes especiais podem aumentar impacto de produção (Habert et al., 2020; De Belie et al., 2018; Justo-Reinoso et al., 2023).

Uma segunda convergência é a importância da mineralização de carbonatos como ponto de encontro entre captura e reparo. A precipitação de CaCO₃ pode preencher fissuras, reduzir permeabilidade e estabilizar CO₂ quando o carbono provém de fonte apropriada. Contudo, os mecanismos bioquímicos não são equivalentes. Ureólise é eficiente para gerar carbonato, mas produz amônio e não deve ser classificada como captura direta de CO₂ sem balanço da origem do carbono. Rotas não ureolíticas e sistemas de anidrase carbônica são mais compatíveis com a ideia de utilizar CO₂ como reagente, embora ainda tenham menor maturidade em estruturas reais (Fahimizadeh et al., 2022; Gilmour et al., 2024).

A terceira convergência diz respeito ao papel da porosidade. Carbonatação e metabolismo precisam de transporte; resistência e durabilidade frequentemente exigem redução da conectividade de poros. O projeto bio-inspirado oferece uma alternativa ao conflito ao

distribuir funções espacialmente. Em vez de uma matriz homogênea, materiais graduados podem reservar superfícies porosas para captura e manter núcleos densos para resistência. O avanço recente de materiais porosos bio-inspirados mostra que esse campo está deixando de copiar geometrias naturais e passando a explorar princípios de transporte e mineralização (Constantino; Castro-Gomes; Vicente, 2026).

Há, entretanto, divergência relevante sobre a escala em que a biologia deve permanecer ativa. Materiais vivos engenheirados demonstram capacidade de regeneração e abrem possibilidades de fabricação biológica, mas o concreto estrutural tradicional é ambiente severo para crescimento. Esporos encapsulados representam uma solução intermediária: não exigem metabolismo contínuo e podem ser ativados por fissuras. Sistemas enzimáticos vão ainda mais longe, mantendo a função catalítica sem organismo vivo. Em termos de maturidade, essas três classes - material vivo, microrganismo dormente e enzima - devem ser vistas como tecnologias distintas, com regimes regulatórios e perfis de risco diferentes.

A avaliação ambiental recente também demonstra que autocura só é climaticamente relevante quando substitui efetivamente manutenção de impacto comparável ou superior. O estudo de Ahmed et al. (2026) é particularmente instrutivo porque o benefício mudou conforme o tipo de reparo de referência. Isso reforça a proposta de que a unidade funcional deve ser “serviço estrutural ao longo do tempo” e não apenas “metro cúbico produzido”. Um material com captura modesta, mas que reduz numerosas intervenções, pode ser mais valioso que um material com grande carbonatação inicial e curta vida útil.

Outro resultado é a necessidade de separar captura da região de proteção da armadura. Carbonatar profundamente concreto armado para maximizar armazenamento pode aumentar risco de corrosão. A literatura de carbonatação mostra que a mesma reação que produz carbonatos também reduz alcalinidade. As rotas mais coerentes são aquelas que promovem carbonatação controlada antes da inserção do aço, em agregados e resíduos, ou em camadas funcionais afastadas da armadura. Essa separação pode ser combinada com autocura para manter fissuras estreitas e reduzir ingresso de CO₂ e cloretos no núcleo estrutural (Ashraf, 2016; Meng et al., 2022).

A noção de autoculturabilidade possui valor prospectivo, mas ainda precisa ser convertida em métricas. Um material verdadeiramente autoculturável deveria demonstrar manutenção ou regeneração de população funcional, repetição de mineralização após mais de um evento de dano e ausência de comprometimento estrutural. A experiência de Heveran et al. (2020) mostra que regeneração é possível em materiais vivos específicos, porém essa propriedade não pode ser transferida por analogia ao concreto armado. O campo precisa de experimentos de longa duração que acoplem viabilidade microbiana, mecânica de fissura e exposição real.

Do ponto de vista de pesquisa e desenvolvimento, emerge uma hierarquia de prioridades. Primeiro, reduzir a emissão do ligante e controlar fissuração por projeto. Segundo, selecionar uma rota de captura cuja origem do carbono seja verificável e cuja mineralização não comprometa durabilidade. Terceiro, introduzir autocura onde a manutenção evitada possa compensar impacto adicional. Quarto, avaliar o sistema por ciclo de vida e repetição de dano. Essa ordem

evita que tecnologias sofisticadas sejam aplicadas para compensar um material de base desnecessariamente intensivo em carbono.

A integração futura pode ocorrer em produtos modulares. Um componente poderia conter núcleo estrutural de baixo carbono, agregado reciclado previamente carbonatado, zona externa bio-inspirada porosa e microcápsulas ou suportes com microrganismos não ureolíticos. Durante fabricação, CO₂ capturado seria mineralizado nos constituintes; durante serviço, a porosidade externa continuaria permitindo captura limitada; diante de fissura, o sistema biológico promoveria selamento. A hipótese é tecnicamente coerente, mas deve ser tratada como arquitetura de pesquisa, não como tecnologia já validada. Cada função precisa ser testada de forma independente e depois em interação.

A principal lacuna, portanto, não é provar que CaCO₃ pode ser formado, mas demonstrar que um material multifuncional consegue atingir simultaneamente quatro requisitos: resistência e segurança; durabilidade equivalente ou superior à referência; captura líquida verificável; e autocura repetível com impacto ambiental aceitável. É essa simultaneidade que distingue uma curiosidade laboratorial de uma solução para infraestrutura. A literatura revisada fornece componentes do sistema, mas ainda há poucos estudos que os integrem sob a mesma fronteira de ciclo de vida.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida indica que materiais cimentícios autoculturáveis e bio-inspirados constituem uma fronteira plausível para a engenharia de infraestruturas de menor impacto, mas sua

contribuição deve ser enquadrada com rigor. A captura de CO₂ e a autocura atuam sobre problemas diferentes e complementares: a primeira pode reduzir o balanço de emissões por mineralização, enquanto a segunda pode prolongar vida útil e reduzir reparos. A combinação das duas funções é conceitualmente poderosa porque conecta mitigação climática à durabilidade. Entretanto, nenhuma delas elimina a necessidade de reduzir o clínquer, otimizar o projeto e selecionar materiais de base com baixa intensidade de carbono. Um concreto de alta emissão não se torna automaticamente sustentável por receber um pequeno mecanismo de captura.

O uso do termo “carbono negativo” exige a maior cautela. Carbonatação natural, carbonatação acelerada e biomineralização armazenam carbono em carbonatos, porém a magnitude desse armazenamento deve ser comparada a todas as emissões geradas pela produção e operação do sistema. O balanço deve declarar unidade funcional, fronteira, origem do CO₂, consumo energético, reagentes e manutenção. Avaliações recentes de autocura biológica demonstram que materiais especiais podem ter impacto inicial elevado e que a vantagem depende do tipo e da frequência de reparo evitado. Portanto, a alegação climática deve ser resultado de ACV, e não característica presumida do material.

Entre os mecanismos de autocura, a biomineralização oferece compatibilidade química com a matriz cimentícia, pois produz carbonatos minerais capazes de selar fissuras. A rota ureolítica permanece tecnologicamente importante por sua eficiência, mas a geração de amônio e a origem do carbono limitam sua interpretação como estratégia de captura. Rotas não ureolíticas, fotossintéticas e baseadas em anidrase carbônica apresentam maior coerência com captura direta, embora precisem avançar em

cinética, estabilidade e custo. A escolha da rota deve separar claramente o objetivo de reparo do objetivo de remoção de carbono.

O conceito de material autoculturable amplia a autocura ao introduzir possibilidade de regeneração biológica. Materiais vivos já demonstraram, em sistemas experimentais, capacidade de biomineralização e reprodução de novas unidades. Contudo, levar essa propriedade ao concreto estrutural requer resolver sobrevivência em ambiente alcalino, secagem, compatibilidade com armaduras, transporte de nutrientes, biossegurança e desempenho sob ciclos de dano. No horizonte próximo, aplicações em superfícies, componentes não armados, revestimentos e elementos pré-fabricados parecem oferecer caminhos mais controláveis para maturação tecnológica.

A bioinspiração deve ser utilizada como ferramenta de engenharia de funções. Estruturas naturais mostram que porosidade, mineralização e resistência podem coexistir quando organizadas hierarquicamente. Materiais cimentícios podem adotar gradientes e compartimentos: superfícies porosas para captura, agregados carbonatados como reservatórios e núcleos densos para resistência. Esse desenho é mais racional que tentar maximizar uma única propriedade em toda a seção. Em concreto armado, particularmente, a região de captura deve ser compatibilizada com a necessidade de preservar alcalinidade ao redor do aço.

A principal agenda experimental deve avançar de resultados de fechamento de fissura para desempenho de serviço. Ensaios precisam quantificar profundidade de cura, estanqueidade, transporte de íons, resistência após cicatrização, repetibilidade e durabilidade em ambientes reais. Para captura, é necessário medir

carbono mineralizado e não apenas CO₂ introduzido. Para sustentabilidade, a unidade funcional deve refletir anos de serviço. Esses três níveis - material, estrutura e ciclo de vida - precisam ser conectados no mesmo programa de pesquisa.

Em termos de desenvolvimento tecnológico, a combinação mais promissora parece ser híbrida: ligantes com menor teor de clínquer, constituintes minerais previamente carbonatados, arquitetura de poros inspirada em sistemas naturais e agentes de autocura localizados. Sistemas vivos ou enzimáticos podem ser adicionados onde sua função tenha maior valor, e não necessariamente em todo o volume. Essa estratégia reduz a quantidade de agentes especiais e facilita controle industrial. Também torna possível evoluir por etapas, começando com produtos pré-fabricados e não armados antes de alcançar aplicações estruturais críticas.

Conclui-se que a convergência entre captura ativa de carbono e autocura estrutural pode contribuir para uma nova geração de materiais cimentícios regenerativos, desde que a inovação seja medida por desempenho e não por terminologia. O avanço científico mais relevante será demonstrar, em escala representativa, que o mesmo sistema consegue mineralizar carbono de origem verificável, manter segurança estrutural, resistir à exposição, reparar dano de forma repetível e apresentar balanço de ciclo de vida superior ao material de referência. Quando esses requisitos forem atendidos simultaneamente, a ideia de infraestrutura de carbono negativo deixará de ser apenas um objetivo conceitual e poderá tornar-se uma especificação de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, M.; MERINO, N.; WAT, A.; JIN, H. Does biological self-healing concrete have lower environmental impacts than conventional crack repair solutions? *Resources, Conservation and Recycling*, v. 235, art. 109094, 2026. DOI: 10.1016/j.resconrec.2026.109094.

ASHRAF, W. Carbonation of cement-based materials: challenges and opportunities. *Construction and Building Materials*, v. 120, p. 558-570, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080.

BEATTY, D. N.; WILLIAMS, S. L.; SRUBAR, W. V. Biomineralized materials for sustainable and durable construction. *Annual Review of Materials Research*, v. 52, p. 411-439, 2022. DOI: 10.1146/annurev-matsci-081720-105303.

CHANG, J. et al. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) process in concrete self-healing and environmental restoration to facilitate carbon neutrality: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 31, n. 26, p. 38083-38098, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-33824-7.

CHO, S.; LEE, N.; KIM, M. O. A comprehensive review on CO₂ utilization in cement and concrete: from microstructural transformations to structural applications. *Case Studies in Construction Materials*, v. 23, e05265, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05265.

CONSTANTINO, J.; CASTRO-GOMES, J.; VICENTE, M. I. A. Bioinspired porous cementitious materials for CO₂ capture: a critical review of accelerated carbonation strategies. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 104, art. 103299, 2026. DOI: 10.1016/j.jcou.2025.103299.

DANIELI, S. et al. Shaping a sustainable path: exploring opportunities and challenges in carbon capture and utilization in cement and concrete industry. CEMENT, v. 19, art. 100135, 2025. DOI: 10.1016/j.cement.2025.100135.

DE BELIE, N. et al. A review of self-healing concrete for damage management of structures. Advanced Materials Interfaces, v. 5, n. 17, art. 1800074, 2018. DOI: 10.1002/admi.201800074.

FAHIMIZADEH, M.; PASBAKHSH, P.; MAE, L. S.; TAN, J. B. L.; RAMAN, R. K. S. Multifunctional, sustainable, and biological non-ureolytic self-healing systems for cement-based materials. Engineering, v. 13, p. 217-237, 2022. DOI: 10.1016/j.eng.2021.11.016.

GARG, R.; GARG, R.; EDDY, N. O. Microbial induced calcite precipitation for self-healing of concrete: a review. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, v. 12, n. 3, p. 317-330, 2023. DOI: 10.1080/21650373.2022.2054477.

GARTNER, E.; SUI, T. Alternative cement clinkers. Cement and Concrete Research, v. 114, p. 27-39, 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.002.

GILMOUR, K. A. et al. Microbially induced calcium carbonate precipitation through CO₂ sequestration via an engineered *Bacillus subtilis*. Microbial Cell Factories, v. 23, art. 168, 2024. DOI: 10.1186/s12934-024-02437-7.

HABERT, G. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nature Reviews Earth & Environment, v. 1, p. 559-573, 2020. DOI: 10.1038/s43017-020-0093-3.

HEVERAN, C. M. et al. Biomineralization and successive regeneration of engineered living building materials. *Matter*, v. 2, n. 2, p. 481-494, 2020. DOI: 10.1016/j.matt.2019.11.016.

JONKERS, H. M.; THIJSSSEN, A.; MUIJZER, G.; COPUROGLU, O.; SCHLANGEN, H. E. J. G. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 2, p. 230-235, 2010. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036.

JUSTO-REINOSO, I.; ARENA, N.; REEKSTING, B. J.; GEBHARD, S.; PAINE, K. Bacteria-based self-healing concrete - a life cycle assessment perspective. *Developments in the Built Environment*, v. 16, art. 100244, 2023. DOI: 10.1016/j.dibe.2023.100244.

MENG, D.; UNLUER, C.; YANG, E.-H.; QIAN, S. Carbon sequestration and utilization in cement-based materials and potential impacts on durability of structural concrete. *Construction and Building Materials*, v. 361, art. 129610, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129610.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, v. 16, p. 698-699, 2017. DOI: 10.1038/nmat4930.

POON, C. S.; SHEN, P. L.; JIANG, Y.; MA, Z. H.; XUAN, D. X. Total recycling of concrete waste using accelerated carbonation: a review. *Cement and Concrete Research*, v. 173, art. 107284, 2023. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107284.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 40-48, 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.009.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2-26, 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-healing in cementitious materials - a review. *Materials*, v. 6, n. 6, p. 2182-2217, 2013. DOI: 10.3390/ma6062182.

VIJAY, K.; MURMU, M.; DEO, S. V. Bacteria based self healing concrete - a review. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 1008-1014, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040.

WONG, P. Y. et al. Advances in microbial self-healing concrete: a critical review of mechanisms, developments, and future directions. *Science of the Total Environment*, v. 947, art. 174553, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174553.

XI, F. et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nature Geoscience*, v. 9, p. 880-883, 2016. DOI: 10.1038/ngeo2840.

ZHANG, D.; GHOULEH, Z.; SHAO, Y. Review on carbonation curing of cement-based materials. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 21, p. 119-131, 2017. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.07.003.

ZHANG, J. et al. A review of biomineralization in healing concrete: mechanism, biodiversity, and application. *Science of the Total Environment*, v. 917, art. 170445, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170445.

ZHANG, L.; ZHENG, M.; ZHAO, D.; FENG, Y. A review of novel self-healing concrete technologies. *Journal of Building Engineering*, v.

¹ Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia de Produção. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Currículo Lattes: <https://lattes.cnpq.br/4162336053607154>.