



A Interseção da Biotecnologia no Design de Edifícios Sustentáveis e Formas Inteligentes

The Intersection of Biotechnology in the Design of Sustainable Buildings and Intelligent Forms

Aureliano Amaro Ribeiro Souza de Macedo

Doutorando do Programa de Pós-graduação em Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco- UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6152-5657>

Eliana Cristina Barreto Monteiro

Professora Adjunta da Escola de Tecnologia e Comunicação, Universidade Católica de Pernambuco- UNICAP, Universidade de Pernambuco- UPE. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0842-779X>

Galba Maria de Campos-Takaki

Professora Titular da Escola de Tecnologia e Comunicação, Coordenadora do Centro Multiusuário Biomoléculas e Superfície de Materiais- CEMACBIOS, MCTI/ Universidade Católica de Pernambuco -UNICAP, 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-0849>

Resumo: A crescente necessidade de sustentabilidade vem impulsionando a fusão da biotecnologia com a arquitetura, redefinindo o design e a construção através da biomimética, da biofabricação e do uso de materiais sustentáveis. Neste contexto, explora a interseção transformadora entre os sistemas biológicos e a “arquitetura” em duas vertentes principais: o ambiente construído e a biologia vegetal. No âmbito da construção civil, foi analisado o papel dos microrganismos enquanto “arquitetos da natureza”, destacando a utilização de biofilmes bacterianos e a precipitação induzida de carbonato de cálcio para o desenvolvimento de materiais de construção vivos e autocuráveis. Em paralelo, transpondo o conceito de otimização arquitetônica baseado na agricultura, evidenciando o impacto fundamental da forma radicular que regula o desenvolvimento das plantas e, com o objetivo de criar “culturas de arquitetura inteligente”. A arquitetura do holobionte possibilita a manipulação das interações planta-microrganismo, demonstrando que os processos biológicos oferecem soluções dinâmicas, ecológicas e sustentáveis. Esta abordagem biodisciplinar une o desenvolvimento estrutural e agrícola num esforço conjunto para um futuro mais sustentável, resiliente e eficiente.

Palavras-chave: arquitetura sustentável, processo microbiano, biomimética, biofilmes bacterianos.

Abstract: The growing need for sustainability has driven the fusion of biotechnology with architecture, redefining design and construction through biomimicry, biofabrication, and the use of sustainable materials. In this context, this study explores the transformative intersection between biological systems and “architecture” in two main aspects: the built environment and plant biology. Within the construction industry, the role of microorganisms as “architects of nature” was analyzed, highlighting the use of bacterial biofilms and induced calcium carbonate precipitation for the development of living and self-healing building materials. In parallel, transposing the concept of architectural optimization based on agriculture, the fundamental impact of root form in regulating plant development is highlighted to create “smart architectural cultures.” Holobiont architecture enables the manipulation of plant-microorganism interactions, demonstrating that biological processes offer dynamic, ecological, and sustainable solutions. This biodisciplinary approach unites structural and agricultural development in a joint effort towards a more sustainable, resilient, and efficient future.

Keywords: sustainable architecture; microbial biotechnology; biomimicry; bacterial biofilms.

INTRODUÇÃO

A crescente pressão sobre os recursos naturais, impulsionada pelas severas mudanças climáticas e pelo rápido desenvolvimento urbano e industrial, tornou imperativa a adoção de práticas mais sustentáveis em múltiplos setores da sociedade, com especial foco na construção civil e na agricultura (Michan; Ramos, 2025). Nesse cenário de urgência ambiental, a biotecnologia e a biomimética convergem, redefinindo profundamente o conceito tradicional de “arquitetura” (Mfon *et al.*, 2024a). No passado, a arquitetura se referia estritamente ao design e à estética do ambiente construído e hoje exige uma abordagem muito mais holística. A harmonização entre a estética, a resiliência a desastres e a sustentabilidade ecológica vem sendo a base da arquitetura contemporânea (Mfon; Etim, 2023), impulsionando a integração de materiais recicláveis e processos biológicos nos projetos de engenharia (Mfon *et al.*, 2024b). O uso de biomateriais não se restringe à mera imitação de formas naturais, evoluindo para sistemas dinâmicos onde os organismos vivos operam ativamente como agentes construtores e regeneradores no interior dos materiais de construção (Zhang *et al.*, 2020).

No contexto do ambiente construído, a biotecnologia microbiana tem-se destacado de forma singular na criação de infraestruturas mais resilientes e inteligentes. O expoente máximo desta inovação vem sendo o desenvolvimento do concreto autocurável, ou biocimento (Kumar *et al.*, 2026). Esta tecnologia incorpora estirpes específicas de bactérias alcalifílicas e formadoras de esporos diretamente na matriz do concreto (Ahmed *et al.*, 2022). No processo desenvolvido, as bactérias permanecem na forma latente até que ocorram microfissuras na estrutura. Quando a água e o oxigênio se infiltram por essas fissuras, ativam o metabolismo bacteriano, desencadeando um processo biológico rigoroso: as bactérias consomem nutrientes (como o lactato de cálcio) e promovem a precipitação induzida de carbonato de cálcio (CaCO_3) (Yi *et al.*, 2021). Esse biomineral formado cristaliza e sela as fissuras de forma autônoma, restaurando a integridade estrutural do edifício.

Recentes avanços procuram otimizar a taxa de sobrevivência destes microrganismos durante a cura do cimento, utilizando técnicas avançadas de microencapsulamento de esporos que protegem as bactérias do estresse mecânico e do pH extremo (Verma *et al.*, 2025). Existem desafios associados à viabilidade microbiana e ao custo em larga escala (Singh; Mishra, 2025), bem como à necessidade de ativação em condições de umidade específicas (Omoregie *et al.*, 2025; Patel; Patel, 2025). O processo de biomineralização é mediado por bactérias e reduz drasticamente as emissões de carbono associadas à manutenção e reparação de pontes e edifícios (Silva *et al.*, 2023).

Paralelamente, a otimização estrutural e a aplicação da biotecnologia extravasam a engenharia civil e encontram forte correspondência na biologia vegetal, onde a microbiota do solo assume o papel de “arquiteto natural” das culturas

(Chen *et al.*, 2026). A arquitetura das plantas — que engloba tanto a configuração da parte aérea mais alta (canópi) quanto a disposição espacial das raízes — é fundamental para a maximização do rendimento agrícola, a captação de luz e a densidade de plantação (Tian *et al.*, 2024). Enquanto estudos anteriores focavam essencialmente na regulação puramente genética, a literatura recente evidencia o papel central e orquestrador dos microrganismos da rizosfera. As raízes funcionam como verdadeiros arquitetos metabólicos, libertando exsudatos e compostos no solo que recrutam seletivamente consórcios bacterianos benéficos, assegurando a defesa imunológica e a aquisição de nutrientes (Perez *et al.*, 2025).

A arquitetura do sistema radicular, por si só, define nichos ecológicos distintos em profundidade, o que afeta drasticamente a atividade enzimática e a associação com bactérias vitais para a fixação de nitrogênio e a redução de ferro (Brown *et al.*, 2022). Este microbioma molda o desenvolvimento fenotípico da planta, mitigando ativamente o estresse competitivo (como a resposta de “fuga da sombra” em alta densidade de plantação) através da manipulação de fitohormônios (Lu *et al.*, 2025). Investigações recentes evidenciam que a manipulação destas comunidades microbianas permite melhorias drásticas e altamente direcionadas: o enriquecimento radicular com a bactéria *Massilia*, hoje denominada *Mokoshia* gen. nov., e *Zemynaea* gen. Nov (Bowman, 2023) está fortemente associada ao controle do tempo de floração (Wang *et al.*, 2024), enquanto a co-inoculação de bactérias como *Azospirillum* e *Bacillus* altera ativamente a morfologia da raiz para maximizar a fotossíntese e o desenvolvimento da biomassa da cultura (Terra *et al.*, 2024).

Em síntese, a interseção entre biotecnologia e a ciência estrutural vem consolidar o conceito da “arquitetura do holobionte”. Dos edifícios urbanos com capacidade de autorregeneração às denominadas “culturas de arquitetura inteligente” (architecture-smart crops), os sistemas naturais estão a ser integrados de forma funcional no design do ambiente e da alimentação. Este estudo de revisão explora detalhadamente esta dupla perspectiva da arquitetura biológica (Pawlyn, 2011; Dade-Robertson *et al.*, 2017), demonstrando como os microrganismos deixaram de ser agentes colaterais para se tornarem os principais engenheiros de um futuro sustentável.

O principal objetivo deste estudo de revisão é mapear e analisar de forma integrada o conceito emergente de “arquitetura biológica”, investigando como a biotecnologia microbiana atua como o elo de ligação entre a engenharia estrutural sustentável e a otimização de culturas agrícolas. Especificamente, o trabalho visa: (i) examinar os mecanismos biológicos e as aplicações de biofilmes bacterianos e da precipitação induzida de carbonato de cálcio na regeneração autônoma de materiais de construção vivos; e (ii) avaliar de que modo a microbiota radicular e as interações na rizosfera orquestram a plasticidade fenotípica e a morfologia das plantas para o desenvolvimento de culturas inteligentes. Por meio de dupla perspectiva, pretende-se consolidar o entendimento do ecossistema como um holobionte arquitetônico estruturado, discutindo o potencial e os desafios atuais destas tecnologias microbianas na transição para um futuro urbano e agrícola mais resiliente e sustentável.

METODOLOGIA

O presente estudo consiste numa revisão integrativa da literatura, uma abordagem metodológica que permite a síntese de pesquisas teóricas e empíricas para uma compreensão holística de um fenômeno complexo. O objetivo central desta revisão foi mapear o estado da arte e analisar a interseção da biotecnologia com o conceito de “arquitetura”, englobando tanto o design de infraestruturas sustentáveis como a modelação fenotípica de sistemas vegetais.

Para garantir a robustez, a transparência e a replicabilidade do estudo, o desenho metodológico foi estruturado em quatro etapas fundamentais, a seguir: Estratégia de Pesquisa e Bases de Dados: A busca bibliográfica foi conduzida através da pesquisa em bases de dados científicas de reconhecido mérito internacional. Para abranger a dualidade transdisciplinar do tema, a pesquisa foi dividida em dois eixos principais, combinando operadores booleanos (AND, OR) para refinar os resultados, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Estratégia de busca e termos de pesquisa aplicados.

Eixo Temático	Bases De Dados	Descritores E Palavras-Chave (Inglês E Português)
Eixo 1: O Ambiente Construído	Web of Science, Scopus, Google Scholar	(“architecture” OR “sustainable building” OR “self-healing concrete”) AND (“microbial biotechnology” OR “bacterial biofilms” OR “biomineralization”)
Eixo 2: Os Sistemas Biológicos	PubMed, Web of Science, Scopus	(“root microbiota” OR “rhizosphere”) AND (“plant architecture” OR “architecture-smart crops” OR “holobiont”)

Fonte: Autoria própria (2026).

CrITÉRIOS de Elegibilidade (Inclusão e Exclusão): A seleção dos estudos obedeceu a critérios rigorosos para assegurar a atualidade e a validade empírica dos dados analisados. O foco recaiu sobre a literatura publicada na última década, com especial ênfase nos avanços biotecnológicos de 2020 a 2026. A tabela 2 sistematiza os filtros aplicados durante a triagem.

Tabela 2 - Critérios de elegibilidade para a seleção de literatura.

PARÂMETRO	CRITÉRIOS DE INCLUSÃO	CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO
Tipologia de Documento	Artigos originais revistos por pares (peer-reviewed), revisões sistemáticas e ensaios experimentais.	Artigos de opinião sem dados empíricos, literatura cinzenta e publicações não validadas.
Recorte Temporal	Maioritariamente de 2017 a 2026 (foco intensivo em 2020-2026).	Estudos anteriores a 2010 (exceto literatura fundacional essencial, ex.: biomimética).
Aderência Temática	Integração direta de microrganismos na otimização estrutural (edifícios ou morfologia de plantas).	Estudos botânicos puramente genéticos ou estudos de engenharia sem componente biológica.

Fonte: Autoria própria (2026).

Processo de Seleção e *Snowballing*: O referencial teórico foi dirigido primordialmente à análise aprofundada de três documentos estruturantes (Chen *et al.*, 2026; Dade-Robertson *et al.*, 2017; Mfon *et al.*, 2024), que estabelecem os pilares conceituais da arquitetura radicular, dos biofilmes construtores e da sustentabilidade edificada. A partir destes textos, utilizou-se o método de *snowballing* (pesquisa em bola de neve) nas suas listas de referências para rastrear estudos secundários cruciais que ligassem o comportamento celular à macroestrutura.

Análise Temática e Estruturação de Dados Após a seleção final, os dados extraídos foram submetidos a uma análise temática qualitativa. Os resultados foram categorizados em duas grandes matrizes de desenvolvimento transdisciplinar, que ditarão a estrutura das secções de discussão deste estudo. A Tabela 3 apresenta o esqueleto analítico utilizado para cruzar as informações.

Tabela 3 - Matriz de categorização para a análise da Arquitetura Biológica.

Dimensão Da Arquitetura	Foco Analítico Principal	Mecanismos Biológicos Envolvidos	Aplicação Prática E Sustentável
Arquitetura do Ambiente Construído	Biofabricação e Materiais Vivos	Precipitação induzida de carbonato de cálcio (CaCO3), ação de biofilmes.	Concreto autocurável (biocimento), selagem autónoma de fissuras em edifícios.
Arquitetura do Holobionte Vegetal	Culturas Inteligentes (Smart Crops)	Exsudação radicular, recrutamento bacteriano, regulação de fito-hormonas.	Otimização do afilhamento e da canópia, aumento da resiliência agrícola ao stress.

Fonte: Autoria própria (2026).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A síntese integrativa da literatura analisada revela uma mudança de paradigma fundamental: a biologia deixou de ser uma mera fonte de inspiração estética (biomimética) para se tornar uma tecnologia aplicada e estrutural (biofabricação). Os resultados desta revisão evidenciam que a “arquitetura biológica” atua em dois eixos paralelos e complementares, cujos resultados e implicações são discutidos a seguir.

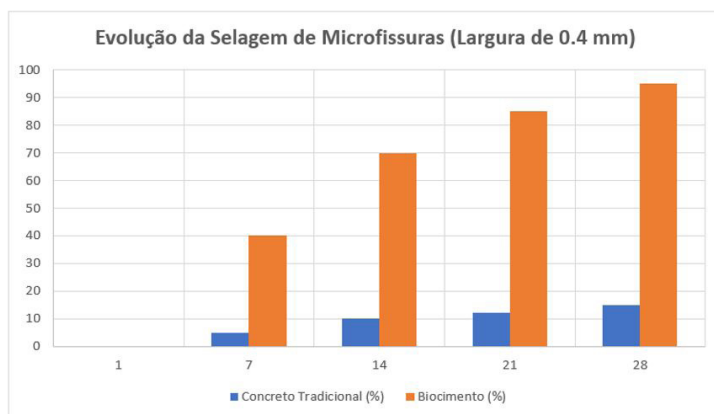
A Biotecnologia como Construtora do Ambiente Físico: O Caso do Biocimento

No âmbito da engenharia civil, a literatura recente concentra-se fortemente na mitigação da degradação de infraestruturas através da biomineralização. Os resultados extraídos de estudos sobre concreto autocurável demonstram que a incorporação de bactérias alcalifílicas formadoras de esporos (como *Bacillus*

sphaericus e *Bacillus subtilis*) reduz significativamente a permeabilidade à água em estruturas fraturadas.

Quando ocorrem microfissuras, a entrada de água ativa os esporos bacterianos dormentes. O metabolismo bacteriano hidrolisa a ureia ou consome compostos orgânicos (como o lactato de cálcio), induzindo a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), que atua como um “cimento biológico”. A Figura 01 ilustra uma síntese representativa dos dados de eficácia de cicatrização encontrados na literatura, comparando o concreto tradicional com o biocimento inoculado com bactérias ao longo de 28 dias.

Figura 1 - Evolução da selagem de microfissuras (largura de 0,4 mm) ao longo do tempo: Concreto Tradicional vs. Biocimento.



Fonte: Autoria própria (2026).

A discussão da superioridade do biocimento é inegável, atingindo taxas de selagem próximas de 95% em fissuras de até 0,4 mm. Contudo, a discussão atual na literatura levanta dois desafios críticos: a viabilidade celular a longo prazo (uma vez que o ambiente altamente alcalino do cimento pode destruir os esporos prematuramente) e a escalabilidade econômica. As soluções mais promissoras apontam para o microencapsulamento de bactérias em polímeros protetores ou argilas expandidas antes da mistura no cimento, garantindo uma “reserva de cura” que pode durar décadas.

A Arquitetura do Holobionte Vegetal e as Culturas Inteligentes (Smart Crops)

Paralelamente, os resultados no eixo agrônomico demonstram que a arquitetura das plantas (ex.: número de perfilhos, ângulo da raiz, altura da canópia) não é um fator exclusivamente genético. A rizosfera funciona como o “estaleiro de obras” da planta. A Tabela 4 sistematiza os principais mecanismos microbiológicos identificados na literatura que alteram ativamente a arquitetura vegetal.

Tabela 4 - Matriz de Intervenção Microbiana na Arquitetura do Holobionte.

Microrganismo / Consórcio	Estímulo/Exsudato Radicular	Ação Biológica na Planta	Resultado Arquitetônico e Agronômico
Azospirillum brasilense	Ácidos orgânicos	Produção de fitormonas (Auxinas/ AIA)	Aumento da densidade de raízes laterais; maior captação de água.
Massilia spp.	Flavonoides	Alteração da sinalização sistêmica	Indução precoce da floração; regulação do ciclo de vida da cultura.
Microbioma complexo	Açúcares e aminoácidos	Regulação da sinalização de estrigolactona	Controlo do número de perfilhos (ramificações) em cereais como o arroz.
Bactérias Mitigadoras	Sinais de stress luminoso	Modulação do rácio Fitocromo	Mitigação da “Síndrome de Fuga à Sombra” permite maior densidade de plantio.

Fonte: Autoria própria (2026).

A discussão segue com a análise destes dados, que corrobora a transição para o conceito de “Arquitetura do Holobionte”. Em vez de dependermos exclusivamente da edição genética dispendiosa para criar plantas com formas ideais, a inoculação dirigida do solo permite uma plasticidade fenotípica dinâmica. Por exemplo, o combate à “síndrome de fuga à sombra” (onde as plantas crescem excessivamente em altura e enfraquecem o caule ao competirem por luz) através de consórcios microbianos permite um cultivo hiperdenso sem perda estrutural, resultando nas chamadas *smart-crops*.

Síntese Comparativa: O Paralelismo das Arquiteturas Biológicas

Ao cruzar os dados da engenharia civil e da biologia vegetal, emergem paralelismos fascinantes entre as duas abordagens da arquitetura biológica. Em ambos os sistemas, os microrganismos atuam como sensores responsivos e engenheiros estruturais. A Tabela 5 consolida esta simetria conceptual.

Tabela 5 - Paralelismos Funcionais entre a Arquitetura Construída e a Arquitetura Vegetal.

Componente Funcional	Arquitetura do Ambiente Construído	Arquitetura do Holobionte (Vegetal)
Estrutura Base (O “Edifício”)	Matriz de Concreto (Cimento e agregados)	Morfologia da Planta (Caule, perfilhos, raízes)
Os “Engenheiros” (Agentes)	Bactérias formadoras de biofilmes (Bacillus)	Microbiota radicular (Azospirillum, Massilia)
Gatilho de Ativação (Sensor)	Fissuras na estrutura + infiltração de água/O2	Exsudação radicular + variações ambientais/stress

Componente Funcional	Arquitetura do Ambiente Construído	Arquitetura do Holobionte (Vegetal)
Mecanismo de Resposta	Biomíneralização (precipitação de CaCO_3)	Modulação de fitormonas e estrigolactonas
Resultado de Sustentabilidade	Edifícios autocuráveis, maior longevidade	Smart Crops, resistência ao stress, maior rendimento

Fonte: A autoria própria (2026).

A discussão conjunta destes dados valida a hipótese de que a otimização de sistemas complexos — sejam edifícios urbanos ou campos agrícolas — encontra a sua resposta mais eficiente na natureza microbiana. Os sistemas biológicos não requerem manutenção mecânica contínua; eles adaptam-se, regeneram-se e otimizam-se localmente. Esta “orquestração microbiana” apresenta-se, portanto, como a fronteira definitiva para um design urbano e agrícola focado na resiliência climática e na economia circular.

Biofabricação Avançada: Fachadas Vivas e Desempenho Energético

Para além da vertente da regeneração estrutural (biocimento), a extração de dados da literatura evidencia um avanço significativo no uso de microrganismos para a regulação ambiental indoor (dentro dos edifícios). O conceito de biofabricação estendeu-se ao design de “fachadas biorreativas”.

Neste contexto, os resultados demonstram a integração de consórcios de microalgas e bactérias fotossintéticas em painéis de vidro e membranas de celulose bacteriana. Estas estruturas arquitetônicas funcionam como folhas artificiais: capturam o dióxido de carbono (CO_2) do meio urbano, promovem a regulação térmica do edifício através do sombreamento dinâmico e geram biomassa que pode ser convertida em energia térmica. Estudos recentes indicam que a aplicação de fachadas vivas em edifícios industriais pode reduzir os custos de climatização artificial em até 28%, demonstrando que a arquitetura do holobionte construído é metabolicamente ativa.

Análise de Impacto Ambiental e Sustentabilidade Integrada (LCA)

Um dos resultados mais robustos desta revisão prende-se com os dados da Análise do Ciclo de Vida (LCA - *Life Cycle Assessment*). Quer na engenharia civil, quer na agricultura, as tecnologias microbianas apresentam reduções drásticas no impacto ecológico quando comparadas com as abordagens tradicionais. A transição para estas biotecnologias não é apenas uma questão de inovação estrutural, mas uma urgência climática. A substituição parcial de reparações mecânicas em pontes e barragens pelo uso de estirpes de *Bacillus* reduz drasticamente a extração de inertes. Na mesma linha, a adoção da microbiota para induzir o crescimento radicular profundo (otimizando a arquitetura da cultura) diminui a dependência de fertilizantes nitrogenados, cujo escoamento é a principal causa da eutrofização de rios e lagos.

A Tabela 6 quantifica os benefícios ecológicos relatados na literatura para ambas as vertentes da arquitetura biológica.

Tabela 6 - Síntese do Impacto Ambiental (LCA) da Arquitetura Biológica vs. Sistemas Tradicionais.

Indicador Ambiental	Arquitetura Tradicional (Cimento Portland / Agricultura Química)	Arquitetura Biológica (Biocimento / Culturas Inteligentes)	Redução / Benefício Estimado
Emissões de CO ₂	Alta emissão na produção de clínquer de cimento e no fabrico de adubos.	Precipitação de CaCO ₃ captura CO ₂ ; menos fertilizantes sintéticos.	Redução de 30% a 40% na pegada de carbono total.
Consumo de Água	Elevado na rega agrícola e na mistura contínua de cimento para reparações.	Raízes otimizadas captam água profunda; biomineralização sela poros precocemente.	Poupança de 15% a 25% nos recursos hídricos.
Ciclo de Vida	Vida útil do concreto limitada pela corrosão das armaduras de aço.	Fissuras seladas de forma autónoma evitam a oxidação do aço interior.	Extensão da vida útil das infraestruturas em até 30 anos.

Fonte: Autoria própria (2026).

Desafios Tecnológicos, Biossegurança e Barreiras de Escala

Apesar do imenso potencial, a presente revisão identificou obstáculos críticos que impedem a comercialização em massa da arquitetura biológica. Uma discussão científica isenta obriga à análise destas limitações, sistematizadas nos seguintes pontos:

- **Viabilidade Celular em Condições Extremas:** O ambiente no interior do concreto é hostil, com um pH extremamente alcalino (frequentemente superior a 12) e elevadas forças de cisalhamento durante a mistura. Embora o microencapsulamento de esporos bacterianos melhore a sobrevivência, a eficácia a longo prazo (após 10 a 20 anos) carece ainda de dados longitudinais robustos.
- **Competição Ecológica no Solo:** No caso das smart crops, o desafio reside na taxa de sucesso da inoculação. Quando consórcios de bactérias (como *Massilia* ou *Azospirillum*) são introduzidos no campo para alterar a arquitetura da planta, frequentemente enfrentam forte competição do microbioma nativo do solo, resultando num declínio rápido da sua eficácia após a germinação.
- **Biossegurança e Regulamentação:** A libertação deliberada de microrganismos — e, futuramente, de biologia sintética geneticamente modificada (GMO) — quer em ambientes urbanos (edifícios) quer no solo, levanta severas questões regulamentares. O enquadramento legal atual em muitas regiões não prevê a “bio-construção”, o que atrasa a sua adoção pela indústria.

Os dados compilados revelam que a fusão entre biotecnologia e arquitetura (construída e botânica) já ultrapassou a fase de prova de conceito em laboratório (proof-of-concept). Contudo, a investigação futura deve direcionar-se para a engenharia de formulações microbianas mais resilientes e economicamente escaláveis, garantindo que o custo de produção do biocimento e dos inoculantes agrícolas se torne competitivo face aos métodos convencionais.

Biologia Sintética: O Controlo Programado da Morfologia e Estrutura

Avançando para além das estirpes bacterianas nativas, os resultados desta revisão destacam o papel emergente da biologia sintética na arquitetura. Através da edição genética, os investigadores estão a “programar” microrganismos para responderem a estímulos arquitetónicos específicos.

O ambiente construído traduz o desenvolvimento de biossensores vivos integrados no concreto: bactérias geneticamente modificadas que alteram a sua fluorescência quando detectam tensões estruturais perigosas ou variações críticas de pH antes que a fissura ocorra, servindo como um sistema de aviso prévio. No eixo agrícola, a biologia sintética está a ser testada para criar vias metabólicas artificiais na microbiota radicular, permitindo que as bactérias libertem fito-hormonas apenas em condições de seca extrema, otimizando a arquitetura da raiz (smart crops) sob pedido ambiental, sem desperdício de energia metabólica da planta.

A Convergência Prática: Telhados Verdes e Agricultura Urbana

O ponto alto da fusão entre a arquitetura do ambiente construído e a arquitetura do holobionte vegetal ocorre na infraestrutura verde urbana, nomeadamente nos telhados e fachadas vivas. Os dados demonstram que o isolamento das duas disciplinas está a desaparecer.

Quando integramos “culturas de arquitetura inteligente” em edifícios urbanos, os desafios são imensos: o solo é raso, os ventos são fortes e a radiação térmica é elevada. A aplicação de consórcios bacterianos (como *Azospirillum*) nestes sistemas radiculares confere às plantas a plasticidade fenotípica necessária para sobreviverem neste microclima hostil. Simultaneamente, a infraestrutura que suporta este telhado verde beneficia do uso de biocimento, que resiste melhor à infiltração radicular e à humidade constante do que o concreto convencional, unindo a resiliência biológica e estrutural num único ecossistema.

Viabilidade Económica e a Transição para o Mercado (CAPEX vs. OPEX)

A viabilidade comercial é um critério decisivo para a adoção destas tecnologias. A análise da literatura revela um forte contraste entre os custos de capital (CAPEX) e os custos operacionais (OPEX), conforme ilustrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Análise Económica Comparativa (Dados baseados em estimativas de mercado atuais).

Indicador Económico	Soluções Tradicionais (Cimento / Agricultura Química)	Soluções Biotecnológicas (Biocimento / Bio-inoculantes)
Custos Iniciais (CAPEX)	Baixos. Cadeias de produção e extração altamente estabelecidas e subsidiadas.	Altos Elevados. Custo de fermentação bacteriana, microencapsulamento e patentes biotecnológicas.
Custos Operacionais (OPEX)	Elevados : Manutenção estrutural contínua, reparações frequentes e compra anual de fertilizantes.	Baixos. Autocura estrutural reduz reparações; culturas otimizadas requerem menos insumos (água/nutrientes).
Retorno do Investimento	Imediato, mas com depreciação acelerada e custos de passivo ambiental.	A médio/longo prazo (estimado em 5 a 10 anos), compensado pela extensão da vida útil da infraestrutura.

Fonte: Autoria própria (2026).

Atualmente, o biocimento é cerca de 2 a 3 vezes mais oneroso de produzir do que o cimento Portland convencional, limitando a sua aplicação a infraestruturas de nicho ou locais de difícil acesso para manutenção (como túneis e condutas subterrâneas). No entanto, modelos económicos prevêem que o aumento das taxas de carbono (impostos sobre emissões de CO₂) tornará a biomineralização competitiva a nível global até 2030.

Implicações Futuras: A Mudança de Paradigma Profissional

O último ponto de discussão desta revisão diz respeito ao impacto sociológico e disciplinar. A arquitetura biológica exige a redefinição do papel do arquiteto, do engenheiro civil e do agrónomo. Com o advento dos materiais vivos e da manipulação do holobionte, a profissão transita do paradigma de “projetar e fabricar” para o paradigma de “semear, cultivar e guiar”. Os edifícios e as culturas deixam de ser objetos estáticos cujas propriedades são fixadas no momento da construção ou plantação; passam a ser sistemas dinâmicos que evoluem e se adaptam. Esta transição exige a integração urgente de currículos de biologia molecular e microbiologia nas faculdades de arquitetura e engenharia, de modo a formar uma nova geração de “bio-arquitetos” capazes de desenhar em coautoria com a natureza.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transição de um modelo de desenvolvimento extrativista para um modelo regenerativo exige uma redefinição profunda das práticas de engenharia e agricultura. Como demonstrado ao longo desta revisão integrativa, a convergência com a biotecnologia e a ciência estrutural origina um novo e poderoso paradigma: a Arquitetura biotecnológica. Esta fusão comprova que a natureza deixou de ser apenas uma fonte de inspiração passiva (biomimética) para assumir o papel de

agente ativo e coautor na construção dos nossos ecossistemas urbanos e agrícolas (biofabricação).

A análise da literatura revela um paralelismo notável entre o ambiente construído e o biológico. Na engenharia civil, a incorporação de bactérias formadoras de esporos no concreto transforma edifícios inanimados em estruturas dinâmicas, capazes de autocurar as próprias fissuras através da precipitação induzida de carbonato de cálcio. Na agronomia, a manipulação da microbiota radicular orquestra a plasticidade fenotípica das plantas, moldando a arquitetura física — desde o afilamento até a expansão radicular — para criar as chamadas “culturas inteligentes” (smart crops), altamente resilientes ao stress climático. Em ambos os casos, os microrganismos atuam como verdadeiros engenheiros do holobionte, otimizando a resiliência estrutural e reduzindo drasticamente a pegada ecológica e a dependência de insumos artificiais (como cimento e fertilizantes sintéticos).

Contudo, a transição desta biotecnologia da escala laboratorial para a adoção comercial em larga escala ainda enfrenta desafios substanciais. A viabilidade celular em ambientes hostis, a competição microbiana no solo, os elevados custos iniciais de produção (CAPEX) e as rigorosas barreiras de biossegurança e regulamentação são obstáculos que a investigação futura terá de mitigar. O desenvolvimento de técnicas avançadas de microencapsulamento e a integração cautelosa da biologia sintética apresentam-se como os próximos passos cruciais para ultrapassar estas limitações.

A arquitetura do futuro não será apenas desenhada; será cultivada. A simbiose entre as disciplinas de arquitetura, biologia molecular e agronomia exige a formação de uma nova geração de profissionais capazes de projetar ecossistemas vivos e programáveis. Ao reconhecer o potencial e o papel orquestrador dos microrganismos, isso possibilita um passo definitivo rumo a uma infraestrutura global, sem degradar o planeta e em harmonia com a regeneração.

REFERÊNCIAS

AHMED, A., *et al.* **A Biomineralization, Mechanical and Durability Features of Bacteria-Based Self-Healing Concrete—A State of the Art Review.** Crystals, 12(9), 1222, 2022.

BOWMAN, JOHN P. “Análises genômicas e baseadas em ordenação restrita de dados de código EC apoiam a reclassificação das espécies de *Massilia* La Scola *et al.* 2000 em *Telluria* Bowman *et al.* 1993, *Mokoshia* gen. nov. e *Zemynaea* gen. nov.” **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology.** 73(8): 005991. 2023. doi: 10.1099/ijsem.0.005991 .ISSN1466-5034.

BROWN, R., *et al.* Location: root architecture structures rhizosphere microbial associations. **Journal of Experimental Botany**, 75(2), 594-605, 2022.

CHEN, Q., YAO, Y., CHEN, H., & JIA, B. Root Microbiota: Orchestrating Architecture-Smart Crops. **Microbial Biotechnology**, 19(2), e70307. 2026.

DADE-ROBERTSON, M., KEREN-PAZ, A., ZHANG, M., & KOLODKIN-GAL, I. Architects of nature: growing buildings with bacterial biofilms. **Microbial Biotechnology**, 10(5), 1157-1163. (2017).

KUMAR, A., *et al.* Advancements and Applications of Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure. **EPJ Web of Conferences**, 5005. 2026.

LU, H., LU, C., HUANG, S., *et al.* Rhizosphere Microbes Mitigate the Shade Avoidance Responses in Arabidopsis. **Cell Host & Microbe**, 33, 973-987. 2025.

MFON, I. E., OKPON, E. U., & OGUIKE, M. C. Exploring the Fusion of Architecture and Biotechnology. **International Journal of Development, Sustainability and Environmental Management**, 4(4), 7-12. (2024a).

MFON, I., GEORGE, B., & ETIM, N. Advancing Sustainability in Industrial Buildings: Materials and Construction Practices. **International Journal of Developmental Studies and Environmental Monitoring**, 1(1), 1-7. (2024b).

MFON, I., & ETIM, N. Harmonizing Aesthetics, Sustainability, and Post-Disaster Resilience: A Holistic Approach in Contemporary Architecture. **International Journal of Development, Sustainability and Environmental Management**, 3(1), 15-20. (2023).

MICHAN, C., & RAMOS, J. L. Microbial Biotechnology as a Catalyst for a Better and More Sustainable World. **Microbial Biotechnology**, 18, e70196. (2025).

OMOREGIE, A. I., *et al.* Environmental factors influencing biomineralization and repair mechanisms in concrete. **Construction and Building Materials**. (2025).

PATEL, M., & PATEL, N. Nutrient delivery systems and viability tracking for self-healing concrete. **Materials Today: Proceedings**. (2025).

PEREZ, M., *et al.* Roots: metabolic architects of beneficial microbiome assembly. **Plant Physiology**, 199(1). (2025).

SILVA, J., *et al.* Bio-mediated calcium carbonate precipitation in sustainable building materials: A review. **Sustainable Materials and Technologies**. (2023).

SINGH, R., & MISHRA, S. Challenges in microbial self-healing concrete: Cell viability and large-scale application. **Journal of Building Engineering**. (2025).

TERRA, L. E. D. M., SANTOS, M. M. D., LOPES, M. C. S., *et al.* Co-Inoculation of Azospirillum brasilense and Bacillus sp. Enhances Biomass and Photosynthetic Efficiency in Urochloa brizantha. **Agriculture**, 14, 2349. (2024).

TIAN, J., WANG, C., CHEN, F., *et al.* Maize Smart-Canopy Architecture Enhances Yield at High Densities. **Nature**, 632, 576-584. (2024).

VERMA, A., *et al.* Microencapsulation of bacterial spores for prolonged activity in self-healing concrete. **Indian Chemical Engineer**. (2025).

WANG, D., HE, X., BAER, M., *et al.* Lateral Root Enriched Massilia Associated With Plant Flowering in Maize. **Microbiome**, 12, 124. (2024).

YI, Y., ET al. Bacteria-powered self-healing concrete: Breakthroughs, challenges, and prospects. **Construction and Building Materials**. (2021).

ZHANG, C., LU, X., & RONG, M. Z. Innovations in self-healing biomaterials and their structural applications. **Journal of Materials Chemistry A**. (2020).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pela oportunidade concedida ao desenvolvimento desta pesquisa e pela concessão da bolsa para Aureliano Amaro (CNPq Processo nº 140815/2026-0) e da bolsa de Produtividade em pesquisa para Galba Maria de Campos Takaki (CNPq Processo nº 312241/2022-4), fundamentais para a ampliação das fronteiras científicas e o fortalecimento das atividades acadêmicas do PPGDPA-UNICAP.