

# Materiais na Engenharia Civil Baseados em Bactérias

*Biotecnologia, Bioengenharia e Materiais  
 Autorreparáveis*

Beatriz Oliveira de Almeida Lima  
 Antonio Luiz de Almeida

Publicação Acadêmica Independente  
 Zenodo



© 2026 Beatriz Oliveira de Almeida Lima

Este trabalho está licenciado sob a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

É permitida a reprodução, distribuição e adaptação do conteúdo, inclusive para fins comerciais, desde que seja atribuída a devida autoria.

DOI: [10.5281/zenodo.18794727](https://doi.org/10.5281/zenodo.18794727)

## Nota de Responsabilidade

As análises, interpretações, modelos conceituais e posicionamentos teóricos apresentados nesta obra são de inteira responsabilidade dos autores e não refletem, necessariamente, as diretrizes, opiniões ou orientações de quaisquer instituições às quais estejam vinculados.

Este livro possui natureza estritamente acadêmica, científica e tecnológica, sendo dedicado ao estudo dos fundamentos da Engenharia Bioativa, da biocimentação microbiana, da integração entre sistemas biológicos e infraestrutura civil, bem como das implicações ambientais, regulatórias e prospectivas associadas a tais tecnologias emergentes.

O conteúdo aqui desenvolvido aborda aspectos microbiológicos, materiais, ambientais, computacionais e sistêmicos relacionados ao uso de organismos vivos e processos bioinduzidos na engenharia civil, com finalidade exclusivamente educacional, investigativa e técnico-científica. Não se constitui como manual operacional, protocolo experimental normativo ou diretriz técnica de aplicação direta, devendo quaisquer implementações práticas observar regulamentações vigentes, normas técnicas específicas e avaliação especializada adequada.

A obra busca contribuir para o avanço do debate científico sobre infraestruturas sustentáveis e sistemas bioativos, promovendo reflexão crítica, integração interdisciplinar e desenvolvimento responsável da engenharia contemporânea.

# Conteúdo

<b>Parte I</b>	<b>Fundamentos Científicos</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Panorama Global e Estado da Arte</b>	<b>3</b>
1.1	Introdução ao Estado da Arte . . . . .	3
1.1.1	Objetivos do capítulo . . . . .	3
1.1.2	Importância estratégica da bioengenharia na construção . . . . .	4
1.1.3	Delimitação conceitual: biomateriais, biocimentação e materiais vivos . . . . .	4
1.2	Linha do Tempo Histórica . . . . .	4
1.2.1	Primeiros estudos sobre biomineralização (século XX) . . . . .	4
1.2.2	Desenvolvimento da MICP nos anos 1990 . . . . .	5
1.2.3	Consolidação do concreto autorreparável (2000–2010) . . . . .	5
1.2.4	Escalonamento experimental e testes em campo (2010–2020) . . . . .	5
1.2.5	Avanços recentes (2020–presente) . . . . .	6
1.3	Principais Grupos de Pesquisa Internacionais . . . . .	6
1.3.1	Europa . . . . .	6
1.3.2	Ásia . . . . .	6
1.3.3	América do Norte . . . . .	6
1.3.4	Redes internacionais de pesquisa . . . . .	6
1.3.5	Cooperação universidade-indústria . . . . .	6
1.4	Contribuições da Delft University of Technology . . . . .	7
1.4.1	Desenvolvimento do concreto autorreparável biológico . . . . .	7
1.4.2	Formulações pioneiras com bactérias encapsuladas . . . . .	7
1.4.3	Ensaio estruturais em escala real . . . . .	7
1.4.4	Publicações científicas de referência . . . . .	7
1.4.5	Impacto acadêmico e industrial . . . . .	7
1.5	Pesquisas conduzidas no MIT Media Lab . . . . .	7
1.5.1	Conceito de Living Materials . . . . .	7
1.5.2	Biofabricação e materiais programáveis . . . . .	8
1.5.3	Integração com design computacional . . . . .	8
1.5.4	Interfaces entre biologia sintética e engenharia . . . . .	8
1.6	Contribuições de Henk Jonkers . . . . .	8
1.6.1	Desenvolvimento do conceito de self-healing biológico . . . . .	8
1.6.2	Seleção de bactérias esporuladas alcalifílicas . . . . .	8

1.6.3	Estratégias de encapsulamento . . . . .	8
1.6.4	Resultados experimentais iniciais . . . . .	8
1.6.5	Influência na consolidação da área . . . . .	9
1.7	Publicações de Alto Impacto . . . . .	9
1.7.1	Artigos mais citados na área de MICP . . . . .	9
1.7.2	Revistas científicas relevantes . . . . .	9
1.7.3	Indicadores bibliométricos . . . . .	9
1.7.4	Evolução das citações ao longo do tempo . . . . .	9
1.8	Patentes Internacionais . . . . .	9
1.8.1	Patentes relacionadas a concreto autorreparável . . . . .	9
1.8.2	Patentes em biocimentação . . . . .	9
1.8.3	Patentes em encapsulamento bacteriano . . . . .	9
1.8.4	Tendências de proteção intelectual . . . . .	10
1.9	Tendências Emergentes . . . . .	10
1.9.1	Materiais vivos programáveis . . . . .	10
1.9.2	Bioengenharia sintética aplicada à construção . . . . .	10
1.9.3	Impressão 3D com biomateriais . . . . .	10
1.9.4	Integração com captura de carbono . . . . .	10
1.9.5	Digital Twins biológicos . . . . .	10
<b>2</b>	<b>A Emergência da Bioengenharia na Construção</b>	<b>11</b>
2.1	Evolução Histórica dos Materiais de Construção . . . . .	11
2.1.1	Materiais naturais primitivos . . . . .	11
2.1.2	Concreto romano . . . . .	12
2.1.3	Revolução do cimento Portland . . . . .	12
2.1.4	Industrialização do concreto armado . . . . .	12
2.2	Limitações dos Materiais Convencionais . . . . .	13
2.2.1	Fissuração e degradação . . . . .	13
2.2.2	Corrosão das armaduras . . . . .	13
2.2.3	Alta emissão de CO <sub>2</sub> . . . . .	13
2.2.4	Custos de manutenção . . . . .	13
2.3	Sustentabilidade e Descarbonização . . . . .	13
2.3.1	Pegada de carbono do cimento . . . . .	13
2.3.2	Metas globais de redução de emissões . . . . .	14
2.3.3	Materiais alternativos de baixo carbono . . . . .	14
2.3.4	Papel da biotecnologia na descarbonização . . . . .	14
2.4	Introdução aos Biomateriais na Engenharia . . . . .	14
2.4.1	Definição de biomateriais estruturais . . . . .	14
2.4.2	Materiais bioativos . . . . .	14
2.4.3	Materiais híbridos bio-minerais . . . . .	15
2.4.4	Materiais vivos . . . . .	15
2.5	Conceito de Materiais Vivos . . . . .	15
2.5.1	Sistemas bioativos incorporados . . . . .	15
2.5.2	Autorreparação metabólica . . . . .	15
2.5.3	Resposta adaptativa ao ambiente . . . . .	15
2.5.4	Comparação com materiais inteligentes tradicionais . . . . .	15

2.6	Transição para Engenharia Bioativa . . . . .	15
2.6.1	Mudança de paradigma: inerte → bioativo . . . . .	15
2.6.2	Integração interdisciplinar . . . . .	16
2.6.3	Desafios científicos . . . . .	16
2.6.4	Potencial transformador . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Fundamentos de Microbiologia Aplicada</b>	<b>17</b>
3.1	Estrutura e Fisiologia Bacteriana . . . . .	17
3.1.1	Parede celular . . . . .	17
3.1.2	Membrana plasmática . . . . .	18
3.1.3	Esporulação . . . . .	18
3.1.4	Enzimas ureolíticas . . . . .	18
3.2	Metabolismo Bacteriano . . . . .	19
3.2.1	Metabolismo autotrófico e heterotrófico . . . . .	19
3.2.2	Via ureolítica . . . . .	19
3.2.3	Produção de carbonato . . . . .	19
3.2.4	Condições ideais de crescimento . . . . .	20
3.3	Crescimento em Ambientes Alcalinos . . . . .	20
3.3.1	pH do concreto fresco . . . . .	20
3.3.2	Estratégias de sobrevivência . . . . .	20
3.3.3	Formação de esporos . . . . .	20
3.4	Protocolos de Cultivo Bacteriano . . . . .	20
3.4.1	Seleção de meio de cultura . . . . .	20
3.4.2	Preparação do inóculo . . . . .	20
3.4.3	Condições de incubação . . . . .	20
3.4.4	Monitoramento de crescimento . . . . .	21
3.4.5	Armazenamento de culturas . . . . .	21
3.5	Controle de Contaminação . . . . .	21
3.5.1	Esterilização de materiais . . . . .	21
3.5.2	Técnicas assépticas . . . . .	21
3.5.3	Monitoramento microbiológico . . . . .	21
3.5.4	Validação experimental . . . . .	21
3.6	Biossegurança Laboratorial . . . . .	21
3.6.1	Classificação de risco microbiológico . . . . .	21
3.6.2	Equipamentos de proteção individual . . . . .	21
3.6.3	Descarte de resíduos biológicos . . . . .	22
3.6.4	Procedimentos de emergência . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Biomíneralização e MICP</b>	<b>23</b>
4.1	Conceito de Biomíneralização . . . . .	23
4.1.1	Biomíneralização induzida biologicamente . . . . .	23
4.1.2	Biomíneralização controlada biologicamente . . . . .	24
4.1.3	Aplicações estruturais . . . . .	24
4.2	MICP - Microbially Induced Calcium Precipitation . . . . .	24
4.2.1	Fundamentos do processo . . . . .	24
4.2.2	Papel da urease . . . . .	24

4.2.3	Condições químicas necessárias . . . . .	25
4.3	Fórmulas Químicas . . . . .	25
4.3.1	Hidrólise da ureia . . . . .	25
4.3.2	Formação de íons carbonato . . . . .	25
4.3.3	Reação com cálcio . . . . .	25
4.3.4	Precipitação de $\text{CaCO}_3$ . . . . .	25
4.3.5	Fórmulas globais balanceadas . . . . .	25
4.4	Cinética da Precipitação . . . . .	26
4.4.1	Taxa de hidrólise . . . . .	26
4.4.2	Fatores limitantes . . . . .	26
4.4.3	Influência de temperatura . . . . .	26
4.4.4	Influência da concentração de ureia . . . . .	26
4.4.5	Modelos cinéticos . . . . .	26
4.5	Modelos Matemáticos de Nucleação . . . . .	26
4.5.1	Teoria clássica de nucleação . . . . .	26
4.5.2	Energia livre de Gibbs . . . . .	26
4.5.3	Crescimento cristalino . . . . .	27
4.5.4	Formação de calcita vs vaterita . . . . .	27
4.6	Transporte Reativo Acoplado . . . . .	27
4.6.1	Difusão de nutrientes . . . . .	27
4.6.2	Transporte de íons cálcio . . . . .	27
4.6.3	Reações químicas acopladas . . . . .	27
4.6.4	Modelagem por equações diferenciais parciais . . . . .	27
4.7	Acoplamento Mecânico-Químico . . . . .	27
4.7.1	Influência da precipitação na resistência . . . . .	27
4.7.2	Redução de porosidade . . . . .	28
4.7.3	Aumento de módulo elástico . . . . .	28
4.7.4	Modelos constitutivos acoplados . . . . .	28

## **Parte II Concretos Autorreparáveis com Bactérias 29**

<b>5</b>	<b>Fundamentos do Concreto Autorreparável</b>	<b>30</b>
5.1	Introdução ao Conceito de Autorreparação . . . . .	30
5.1.1	Definição de self-healing em materiais cimentícios . . . . .	30
5.1.2	Autorreparação autógena vs. autônoma . . . . .	31
5.1.3	Evolução histórica do conceito . . . . .	31
5.1.4	Aplicabilidade estrutural . . . . .	31
5.2	Mecanismos de Autorreparação . . . . .	32
5.2.1	Autorreparação física (hidratação tardia) . . . . .	32
5.2.2	Autorreparação química . . . . .	32
5.2.3	Autorreparação biológica via MICP . . . . .	32
5.2.4	Comparação entre mecanismos . . . . .	32
5.2.5	Limitações de cada abordagem . . . . .	33
5.3	Incorporação de Bactérias no Concreto . . . . .	33
5.3.1	Incorporação direta na matriz . . . . .	33

5.3.2	Encapsulamento em cápsulas poliméricas . . . . .	33
5.3.3	Encapsulamento em sílica-gel . . . . .	33
5.3.4	Uso de agregados leves impregnados . . . . .	33
5.3.5	Proteção da viabilidade bacteriana durante mistura . . . . .	33
5.4	Ativação do Processo de Autorreparo . . . . .	33
5.4.1	Formação de fissuras . . . . .	33
5.4.2	Entrada de água como gatilho biológico . . . . .	34
5.4.3	Germinação de esporos . . . . .	34
5.4.4	Produção de carbonato de cálcio . . . . .	34
5.4.5	Selamento da fissura . . . . .	34
5.5	Modelagem de Fissuras Críticas . . . . .	34
5.5.1	Conceito de largura crítica de fissura . . . . .	34
5.5.2	Modelos mecânicos de propagação . . . . .	34
5.5.3	Relação entre abertura de fissura e capacidade de selamento . . . . .	34
5.5.4	Modelagem probabilística de ocorrência de fissuras . . . . .	34
5.5.5	Simulação numérica da evolução da fissura . . . . .	35
5.6	Desempenho Estrutural . . . . .	35
5.6.1	Resistência à compressão . . . . .	35
5.6.2	Resistência à tração . . . . .	35
5.6.3	Módulo de elasticidade . . . . .	35
5.6.4	Recuperação de rigidez após autorreparo . . . . .	35
5.6.5	Comparação com concreto convencional . . . . .	35
5.7	Comparação Técnica com Concreto Convencional . . . . .	35
5.7.1	Emissões de CO <sub>2</sub> . . . . .	35
5.7.2	Vida útil projetada . . . . .	36
5.7.3	Necessidade de manutenção . . . . .	36
5.7.4	Custo inicial vs. custo de ciclo de vida . . . . .	36
5.7.5	Análise multicritério . . . . .	36
5.8	Tabelas Comparativas . . . . .	36
5.8.1	Tabela comparativa de desempenho mecânico . . . . .	36
5.8.2	Tabela comparativa de durabilidade . . . . .	36
5.8.3	Tabela comparativa ambiental . . . . .	36
5.8.4	Tabela comparativa econômica . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Espécies Bacterianas Aplicadas</b>	<b>38</b>
6.1	Critérios Técnicos de Seleção . . . . .	38
6.1.1	Capacidade ureolítica . . . . .	38
6.1.2	Resistência ao pH alcalino . . . . .	39
6.1.3	Capacidade de esporulação . . . . .	39
6.1.4	Produção de urease . . . . .	39
6.1.5	Segurança microbiológica . . . . .	40
6.1.6	Durabilidade no interior da matriz cimentícia . . . . .	40
6.2	Sporosarcina pasteurii . . . . .	40
6.2.1	Características microbiológicas . . . . .	40
6.2.2	Capacidade de precipitação de CaCO <sub>3</sub> . . . . .	40
6.2.3	Taxa de ureólise . . . . .	41

6.2.4	Aplicações experimentais . . . . .	41
6.2.5	Vantagens e limitações . . . . .	41
6.3	Bacillus spp. . . . .	41
6.3.1	Espécies mais utilizadas . . . . .	41
6.3.2	Formação de esporos . . . . .	41
6.3.3	Resistência térmica e alcalina . . . . .	41
6.3.4	Produção de carbonato . . . . .	41
6.3.5	Estudos comparativos . . . . .	42
6.4	Bactérias Alcalifílicas . . . . .	42
6.4.1	Definição e classificação . . . . .	42
6.4.2	Adaptação ao pH elevado . . . . .	42
6.4.3	Desempenho em matrizes cimentícias . . . . .	42
6.4.4	Potencial para aplicações de longo prazo . . . . .	42
6.5	Desempenho Comparativo entre Espécies . . . . .	42
6.5.1	Taxa de precipitação . . . . .	42
6.5.2	Eficiência de selamento . . . . .	42
6.5.3	Durabilidade bacteriana . . . . .	42
6.5.4	Custo de cultivo . . . . .	43
6.5.5	Tabela comparativa técnica . . . . .	43
6.6	Vida Útil Bacteriana na Matriz . . . . .	43
6.6.1	Estado latente (esporo) . . . . .	43
6.6.2	Ativação após fissuração . . . . .	43
6.6.3	Fatores que afetam sobrevivência . . . . .	43
6.6.4	Modelagem de degradação biológica . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Avaliação Experimental</b> . . . . .	<b>44</b>
7.1	Planejamento Experimental . . . . .	44
7.1.1	Definição de variáveis independentes . . . . .	44
7.1.2	Controle de variáveis . . . . .	45
7.1.3	Número de amostras . . . . .	45
7.1.4	Reprodutibilidade . . . . .	46
7.2	Ensaio Mecânicos . . . . .	46
7.2.1	Resistência à compressão . . . . .	46
7.2.2	Resistência à tração por compressão diametral . . . . .	46
7.2.3	Ensaio de flexão . . . . .	46
7.2.4	Recuperação de resistência pós-fissuração . . . . .	46
7.2.5	Avaliação estatística dos resultados . . . . .	47
7.3	Ensaio de Permeabilidade . . . . .	47
7.3.1	Permeabilidade à água . . . . .	47
7.3.2	Absorção capilar . . . . .	47
7.3.3	Índice de penetração de cloretos . . . . .	47
7.3.4	Comparação antes e depois do autorreparo . . . . .	47
7.4	Análise Microestrutural . . . . .	47
7.4.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) . . . . .	47
7.4.2	Identificação de cristais de $CaCO_3$ . . . . .	48
7.4.3	Morfologia cristalina . . . . .	48

7.4.4	Análise de porosidade . . . . .	48
7.5	Difração de Raios X (DRX) . . . . .	48
7.5.1	Identificação de fases minerais . . . . .	48
7.5.2	Quantificação de calcita . . . . .	48
7.5.3	Presença de vaterita ou aragonita . . . . .	48
7.5.4	Interpretação dos difratogramas . . . . .	48
7.6	Protocolos Estatísticos . . . . .	48
7.6.1	Teste de normalidade . . . . .	48
7.6.2	Análise de variância (ANOVA) . . . . .	48
7.6.3	Intervalos de confiança . . . . .	49
7.6.4	Correlação entre variáveis . . . . .	49
7.6.5	Modelagem estatística preditiva . . . . .	49
<b>8</b>	<b>Projeto de Misturas e Dosagem</b> . . . . .	<b>50</b>
8.1	Princípios Gerais de Dosagem . . . . .	50
8.1.1	Objetivos de desempenho . . . . .	50
8.1.2	Compatibilidade cimento-bactéria . . . . .	51
8.1.3	Controle de trabalhabilidade . . . . .	51
8.2	Relação Água/Cimento . . . . .	52
8.2.1	Influência na resistência mecânica . . . . .	52
8.2.2	Influência na viabilidade bacteriana . . . . .	52
8.2.3	Compromisso entre porosidade e autorreparo . . . . .	52
8.2.4	Faixas recomendadas . . . . .	52
8.3	Dosagem Bacteriana . . . . .	52
8.3.1	Concentração celular ideal . . . . .	52
8.3.2	Quantidade de esporos por $m^3$ . . . . .	53
8.3.3	Proporção de nutrientes . . . . .	53
8.3.4	Custos associados . . . . .	53
8.4	Interação com Aditivos Químicos . . . . .	54
8.4.1	Superplastificantes . . . . .	54
8.4.2	Incorporadores de ar . . . . .	54
8.4.3	Retardadores . . . . .	54
8.4.4	Compatibilidade química . . . . .	54
8.4.5	Impacto na atividade biológica . . . . .	54
8.5	Modelagem Probabilística . . . . .	54
8.5.1	Variabilidade de resistência . . . . .	54
8.5.2	Probabilidade de fissuração . . . . .	54
8.5.3	Probabilidade de autorreparo bem-sucedido . . . . .	55
8.5.4	Simulação Monte Carlo aplicada . . . . .	55
8.5.5	Confiabilidade estrutural . . . . .	55
<b>Parte III</b>	<b>Biocimentação e Geotecnia</b> . . . . .	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>Fundamentos da Biocimentação</b> . . . . .	<b>57</b>
9.1	Introdução à Biocimentação . . . . .	57

9.2	MICP Aplicada a Solos . . . . .	58
9.3	Parâmetros Geotécnicos Fundamentais . . . . .	59
9.4	Modelagem Geotécnica Acoplada . . . . .	59
9.5	Distribuição Heterogênea de Precipitados . . . . .	60
9.6	Controle de Injeção em Campo . . . . .	60
9.7	Ensaio Geotécnicos Aplicados . . . . .	60
9.8	Limitações e Desafios Técnicos . . . . .	61
<b>10</b>	<b>Aplicações Geotécnicas</b>	<b>62</b>
10.1	Estabilização de Solos Arenosos . . . . .	62
10.2	Mitigação de Liquefação . . . . .	63
10.3	Estabilização de Taludes . . . . .	63
10.4	Reforço de Fundações . . . . .	64
10.5	Controle de Permeabilidade . . . . .	64
10.6	Comparação com Técnicas Tradicionais . . . . .	64
10.7	Síntese Comparativa . . . . .	65
<b>11</b>	<b>Aplicações Ambientais</b>	<b>66</b>
11.1	Introdução às Aplicações Ambientais . . . . .	66
11.2	Captura Biogênica de Carbono . . . . .	67
11.3	Imobilização de Metais Pesados . . . . .	67
11.4	Remediação Sustentável . . . . .	68
11.5	Economia Circular Aplicada . . . . .	68
11.6	Avaliação Ambiental Integrada . . . . .	68
11.7	Desafios Regulatórios e Ambientais . . . . .	69
<b>Parte IV</b>	<b>Materiais Bioinspirados e Inteligentes</b>	<b>70</b>
<b>12</b>	<b>Estruturas Naturais como Modelo</b>	<b>71</b>
12.1	Introdução à Biomimética na Engenharia Civil . . . . .	71
12.1.1	Conceito de biomimética . . . . .	71
12.1.2	Diferença entre bioinspiração e biomimetismo estrutural . . . . .	71
12.1.3	Importância da arquitetura hierárquica natural . . . . .	72
12.1.4	Aplicabilidade na engenharia estrutural . . . . .	72
12.2	Arquitetura Hierárquica em Sistemas Naturais . . . . .	72
12.2.1	Estruturas em múltiplas escalas (nano → micro → macro) . . . . .	72
12.2.2	Organização cristalina natural . . . . .	72
12.2.3	Interfaces orgânico-minerais . . . . .	73
12.2.4	Dissipação de energia em materiais biológicos . . . . .	73
12.2.5	Tolerância a danos em estruturas naturais . . . . .	73
12.3	Inspiração na Estrutura de Strombus gigas . . . . .	73
12.3.1	Estrutura mineral da concha . . . . .	73
12.3.2	Composição (aragonita e matriz orgânica) . . . . .	73
12.3.3	Arranjo lamelar e resistência mecânica . . . . .	73
12.3.4	Mecanismos naturais de dissipação de fratura . . . . .	74

12.3.5	Aplicações inspiradas em compósitos cimentícios . . . . .	74
12.3.6	Modelagem estrutural inspirada na concha . . . . .	74
12.4	Inspiração na Arquitetura Coralínea de <i>Acropora palmata</i> . . . . .	74
12.4.1	Estrutura porosa e leve . . . . .	74
12.4.2	Distribuição de tensões na estrutura ramificada . . . . .	74
12.4.3	Eficiência estrutural com baixo peso . . . . .	74
12.4.4	Inspiração para estruturas cimentícias porosas . . . . .	75
12.4.5	Aplicação em elementos arquitetônicos e geotécnicos . . . . .	75
12.5	Materiais Híbridos Bio-Minerais . . . . .	75
12.5.1	Interface entre matriz orgânica e fase mineral . . . . .	75
12.5.2	Integração de componentes vivos em matrizes inorgânicas . . . . .	75
12.5.3	Propriedades mecânicas emergentes . . . . .	75
12.5.4	Controle da microestrutura . . . . .	75
12.5.5	Aplicações estruturais avançadas . . . . .	75
12.6	Arquitetura Hierárquica Aplicada ao Concreto . . . . .	75
12.6.1	Organização da pasta cimentícia . . . . .	75
12.6.2	Controle de porosidade multiescala . . . . .	76
12.6.3	Distribuição estratégica de bactérias . . . . .	76
12.6.4	Gradientes funcionais de material . . . . .	76
12.6.5	Modelos estruturais bioinspirados . . . . .	76
<b>13</b>	<b>Materiais Inteligentes Biológicos</b> . . . . .	<b>77</b>
13.1	Conceito de Material Inteligente . . . . .	77
13.2	Sensores Biológicos Integrados . . . . .	78
13.3	Monitoramento Estrutural Vivo . . . . .	79
13.4	Materiais Programáveis . . . . .	79
13.5	Captura Contínua de Carbono . . . . .	80
13.6	Confiabilidade e Durabilidade de Sistemas Vivos . . . . .	80
<b>14</b>	<b>Integração com Engenharia Digital</b> . . . . .	<b>81</b>
14.1	Introdução à Digitalização da Bioengenharia . . . . .	81
14.2	Modelagem Multiescala . . . . .	82
14.3	Simulação Numérica (COMSOL / ABAQUS) . . . . .	82
14.4	Integração com BIM . . . . .	83
14.5	Digital Twins Biológicos . . . . .	83
14.6	Banco de Dados Paramétrico . . . . .	83
14.7	Inteligência Artificial Aplicada . . . . .	84
<b>Parte V</b>	<b>Sustentabilidade e Economia Circular</b> . . . . .	<b>85</b>
<b>15</b>	<b>Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)</b> . . . . .	<b>86</b>
15.1	Introdução à Avaliação de Ciclo de Vida . . . . .	86
15.2	Inventário do Ciclo de Vida (LCI) . . . . .	87
15.3	Pegada de Carbono . . . . .	87
15.4	Indicadores Ambientais . . . . .	88

15.5	Comparação Quantitativa . . . . .	88
15.6	Avaliação de Ciclo de Vida Expandida . . . . .	89
15.7	Limitações e Incertezas . . . . .	89
<b>16</b>	<b>Economia Circular e Biofabricação</b>	<b>90</b>
16.1	Fundamentos de Economia Circular . . . . .	90
16.2	Uso de Cinzas Volantes . . . . .	90
16.3	Uso de Escória de Alto-Forno . . . . .	91
16.4	Uso de Resíduos Agroindustriais . . . . .	91
16.5	Integração com Captura de Carbono . . . . .	92
16.6	Biofabricação . . . . .	92
16.7	Métricas de Circularidade . . . . .	93
<b>17</b>	<b>Escalonamento e Viabilidade Industrial</b>	<b>94</b>
17.1	Transição Laboratório–Indústria . . . . .	94
17.2	Custos . . . . .	95
17.3	Regulamentação . . . . .	95
17.4	Barreiras Tecnológicas . . . . .	96
17.5	Estratégias de Mercado . . . . .	96
17.6	Projeções Futuras . . . . .	96
<b>Parte VI</b>	<b>Ética, Segurança e Futuro</b>	<b>98</b>
<b>18</b>	<b>Biossegurança e Regulamentação</b>	<b>99</b>
18.1	Introdução à Biossegurança na Engenharia Bioativa . . . . .	99
18.2	Classificação de Risco Biológico . . . . .	100
18.3	Normas Técnicas Internacionais . . . . .	100
18.4	Avaliação de Risco Ambiental . . . . .	100
18.5	Controle de Dispersão Biológica . . . . .	101
18.6	Responsabilidade Ética e Social . . . . .	101
18.7	Aspectos Jurídicos . . . . .	102
<b>19</b>	<b>O Futuro dos Materiais Vivos</b>	<b>103</b>
19.1	Introdução à Engenharia de Materiais Vivos . . . . .	103
19.2	Concretos Regenerativos . . . . .	103
19.3	Bioengenharia Sintética Aplicada . . . . .	104
19.4	Infraestruturas Vivas . . . . .	104
19.5	Materiais Programáveis . . . . .	104
19.6	Fronteiras da Pesquisa . . . . .	105
19.7	Cenários Prospectivos . . . . .	105
19.8	Agenda Estratégica de Pesquisa . . . . .	106

<b>Parte VII</b>	<b>Estudos de Caso Internacionais</b>	<b>107</b>
<b>20</b>	<b>Estudos de Caso Internacionais</b>	<b>108</b>
20.1	Introdução aos Estudos de Caso . . . . .	108
20.2	Projetos na Netherlands . . . . .	108
20.3	Concreto Autorreparável em Ambiente Real . . . . .	109
20.4	Biocimentação Geotécnica . . . . .	109
20.5	Resultados Quantitativos . . . . .	109
20.6	Lições Aprendidas . . . . .	109
20.7	Projetos na China . . . . .	109
20.8	Aplicações em Engenharia Geotécnica . . . . .	110
20.9	Aplicações Ambientais . . . . .	110
20.10	Escalonamento Industrial . . . . .	110
20.11	Desafios Técnicos . . . . .	110
20.12	Aplicações Europeias . . . . .	110
20.13	Avaliação Comparativa . . . . .	111
20.14	Tabela Comparativa Consolidada . . . . .	111
20.15	Análise Crítica Integrada . . . . .	111
20.16	Síntese dos Estudos de Caso . . . . .	111



# Fundamentos Científicos

*Panorama Global e Estado da Arte; A Emergência da  
Bioengenharia na Construção; Fundamentos de  
Microbiologia Aplicada; Biomineralização e MICP*



## Capítulo 1

# Panorama Global e Estado da Arte

### 1.1 Introdução ao Estado da Arte

A incorporação de sistemas biológicos à engenharia civil representa uma das inflexões paradigmáticas mais significativas da história recente dos materiais de construção. Se o século XX foi marcado pela consolidação do concreto armado como infraestrutura dominante da modernidade, o século XXI assiste à emergência de um novo horizonte tecnológico no qual materiais deixam de ser entidades passivas para assumir comportamentos dinâmicos, adaptativos e, em certos contextos, regenerativos. O presente capítulo estabelece o panorama global desse movimento, delineando sua evolução histórica, seus principais atores institucionais e os vetores científicos que moldam o estado da arte.

#### 1.1.1 Objetivos do capítulo

Este capítulo tem como objetivo estruturar uma visão abrangente e crítica da evolução da bioengenharia aplicada à construção, situando-a em seu contexto histórico, científico e tecnológico. Busca-se não apenas descrever marcos cronológicos ou elencar grupos de pesquisa relevantes, mas interpretar a formação de um campo interdisciplinar que articula microbiologia, ciência dos materiais, geotecnia, química de sistemas cimentícios e engenharia digital.

Preende-se ainda identificar as bases conceituais que sustentam o desenvolvimento contemporâneo de concretos autorreparáveis, processos de biocimentação e materiais vivos, estabelecendo os fundamentos necessários para os capítulos subsequentes, nos quais tais conceitos serão aprofundados sob perspectivas experimentais, matemáticas e aplicadas.

### **1.1.2 Importância estratégica da bioengenharia na construção**

A construção civil é responsável por parcela substancial das emissões globais de dióxido de carbono, do consumo energético e da extração de recursos minerais. Nesse contexto, a introdução de mecanismos biológicos capazes de ampliar a durabilidade estrutural, reduzir intervenções corretivas e promover a fixação mineral de carbono adquire importância estratégica.

A bioengenharia na construção não deve ser compreendida como inovação incremental, mas como transformação estrutural do paradigma material. Ao introduzir sistemas metabólicos em matrizes cimentícias, inaugura-se a possibilidade de materiais que respondem a estímulos ambientais, que reagem a fissurações de maneira autônoma e que potencialmente capturam carbono ao longo de sua vida útil. Essa mudança altera a equação econômica e ambiental da infraestrutura, deslocando o foco da resistência inicial para o desempenho ao longo do ciclo de vida.

### **1.1.3 Delimitação conceitual: biomateriais, biocimentação e materiais vivos**

É fundamental distinguir três categorias conceituais frequentemente sobrepostas. Biomateriais, no contexto da construção, referem-se a materiais que incorporam componentes biológicos ou que são produzidos por processos biológicos, ainda que não mantenham atividade metabólica após a incorporação. Biocimentação designa processos nos quais microrganismos induzem a precipitação de minerais, tipicamente carbonato de cálcio, promovendo coesão entre partículas ou selamento de fissuras. Já materiais vivos constituem uma categoria mais radical: sistemas nos quais organismos permanecem metabolicamente ativos ou latentes, podendo responder a estímulos ambientais ao longo do tempo.

Essa delimitação não é meramente terminológica. Ela estrutura diferentes níveis de complexidade, distintos regimes regulatórios e diferentes desafios de modelagem, que serão explorados nos capítulos seguintes.

## **1.2 Linha do Tempo Histórica**

### **1.2.1 Primeiros estudos sobre biomineralização (século XX)**

As bases científicas da atual bioengenharia da construção remontam aos estudos de biomineralização desenvolvidos ao longo do século XX, sobretudo no campo da microbiologia ambiental e da geologia sedimentar. Observações de precipitação bacteriana de carbonatos em ambientes naturais revelaram que microrganismos poderiam desempenhar papel determinante na formação de estruturas minerais macroscópicas.

Esses estudos, inicialmente motivados por interesses geológicos e ecológicos, estabeleceram o arcabouço bioquímico da precipitação induzida por atividade metabólica, incluindo a hidrólise da ureia e a consequente elevação do pH

local. Embora ainda distantes de aplicações em engenharia civil, esses trabalhos forneceram o substrato teórico que permitiria, décadas depois, a transposição do fenômeno para sistemas cimentícios e solos granulares.

### **1.2.2 Desenvolvimento da MICP nos anos 1990**

Na década de 1990, a precipitação microbiana de carbonato de cálcio (MICP) passou a ser investigada com enfoque explícito em aplicações geotécnicas. Pesquisadores demonstraram que a atividade ureolítica de determinadas bactérias poderia promover cimentação entre grãos de areia, elevando a resistência ao cisalhamento e reduzindo a permeabilidade.

Esse período marca a transição do fenômeno natural para o processo controlado em laboratório. A MICP deixou de ser objeto de observação geológica para tornar-se técnica experimental, com protocolos de cultivo bacteriano, controle de nutrientes e modelagem de transporte reativo. A engenharia passou a interagir diretamente com a microbiologia.

### **1.2.3 Consolidação do concreto autorreparável (2000–2010)**

Entre 2000 e 2010, o conceito de concreto autorreparável biológico ganhou consistência experimental. A incorporação de bactérias esporuladas em matrizes cimentícias, associada à presença de fontes internas de nutrientes, demonstrou ser capaz de selar fissuras por meio da precipitação *in situ* de carbonato de cálcio.

Esse período caracteriza-se pela validação laboratorial da viabilidade do sistema, com ensaios de resistência, permeabilidade e durabilidade. A ideia de que um material estrutural poderia conter um mecanismo interno de reparo autônomo representou ruptura conceitual significativa, ampliando o horizonte da engenharia de materiais.

### **1.2.4 Escalonamento experimental e testes em campo (2010–2020)**

A década seguinte foi marcada pela transição do laboratório para o campo. Ensaios em escala real, aplicação em elementos estruturais e estudos de durabilidade de longo prazo consolidaram a viabilidade técnica do concreto bioativo. Simultaneamente, processos de biocimentação foram testados para estabilização de solos, mitigação de liquefação e controle de permeabilidade.

O desafio deixou de ser provar a possibilidade do fenômeno e passou a ser controlar sua uniformidade, escalabilidade e previsibilidade em ambientes complexos. A modelagem numérica e a análise de ciclo de vida tornaram-se componentes centrais da pesquisa.

### **1.2.5 Avanços recentes (2020–presente)**

A partir de 2020, observa-se integração crescente entre bioengenharia, engenharia digital e biologia sintética. Conceitos como materiais vivos, impressão 3D bioativa e captura contínua de carbono passaram a integrar a agenda científica. A discussão desloca-se gradualmente da autorreparação pontual para a concepção de infraestruturas adaptativas e regenerativas.

## **1.3 Principais Grupos de Pesquisa Internacionais**

### **1.3.1 Europa**

A Europa desempenha papel central na consolidação da área, com universidades técnicas liderando pesquisas em concreto autorreparável e biocimentação geotécnica. O ambiente regulatório voltado à descarbonização e os programas de financiamento colaborativo fomentaram a formação de centros de excelência dedicados à integração entre microbiologia e engenharia estrutural.

### **1.3.2 Ásia**

Na Ásia, o crescimento acelerado da infraestrutura impulsionou o interesse por tecnologias de estabilização sustentável de solos e redução de manutenção estrutural. Grupos de pesquisa desenvolveram aplicações em larga escala, com foco em eficiência de processo e redução de custos operacionais.

### **1.3.3 América do Norte**

Na América do Norte, a pesquisa combina investigação fundamental em ciência dos materiais com abordagens inovadoras em biologia sintética e design computacional. O diálogo entre engenharia civil, ciência dos materiais e arquitetura experimental contribuiu para ampliar o escopo conceitual dos materiais vivos.

### **1.3.4 Redes internacionais de pesquisa**

A consolidação do campo dependeu da formação de redes interinstitucionais, envolvendo microbiologistas, engenheiros civis, químicos e cientistas da computação. Conferências especializadas e projetos multilaterais estruturaram uma comunidade científica global com linguagem conceitual compartilhada.

### **1.3.5 Cooperação universidade-indústria**

A transferência tecnológica tornou-se elemento decisivo. Parcerias entre universidades e empresas de materiais de construção permitiram a validação industrial de formulações bioativas, ao mesmo tempo em que levantaram questões regulatórias e de padronização.

## **1.4 Contribuições da Delft University of Technology**

### **1.4.1 Desenvolvimento do concreto autorreparável biológico**

A Delft University of Technology desempenhou papel seminal no desenvolvimento sistemático do concreto autorreparável baseado em bactérias esporuladas. A instituição estabeleceu protocolos experimentais robustos, integrando microbiologia aplicada e engenharia de materiais cimentícios.

### **1.4.2 Formulações pioneiras com bactérias encapsuladas**

Uma das inovações centrais foi o encapsulamento de bactérias e nutrientes em microcápsulas resistentes ao ambiente alcalino do concreto fresco. Essa estratégia permitiu preservar a viabilidade bacteriana até a ocorrência de fissuras e a entrada de água, momento no qual o sistema metabólico era ativado.

### **1.4.3 Ensaios estruturais em escala real**

Testes em elementos estruturais de dimensões reais demonstraram não apenas a eficácia do selamento de fissuras, mas também a manutenção de propriedades mecânicas globais. Esses ensaios foram decisivos para legitimar a tecnologia perante a comunidade de engenharia estrutural.

### **1.4.4 Publicações científicas de referência**

Os trabalhos publicados a partir dessas pesquisas tornaram-se referências internacionais, estabelecendo metodologias experimentais, parâmetros de dosagem e critérios de avaliação de desempenho.

### **1.4.5 Impacto acadêmico e industrial**

O impacto extrapolou o meio acadêmico, estimulando a criação de iniciativas empresariais voltadas à comercialização do concreto bioativo e consolidando a área como subcampo legítimo da engenharia civil contemporânea.

## **1.5 Pesquisas conduzidas no MIT Media Lab**

### **1.5.1 Conceito de Living Materials**

No MIT Media Lab, emergiu uma abordagem conceitual mais ampla, na qual materiais são concebidos como sistemas híbridos bio-digitais. O conceito de Living Materials propõe estruturas capazes de crescimento, regeneração e adaptação programada.

### **1.5.2 Biofabricação e materiais programáveis**

A biofabricação combina processos biológicos e fabricação digital, permitindo a criação de materiais cuja microestrutura é definida tanto por algoritmos quanto por atividade celular. Essa convergência redefine o próprio ato de construir.

### **1.5.3 Integração com design computacional**

Modelagem paramétrica e simulação computacional tornam-se instrumentos para orientar processos biológicos, estabelecendo diálogo entre código digital e metabolismo celular.

### **1.5.4 Interfaces entre biologia sintética e engenharia**

A incorporação de ferramentas de biologia sintética amplia o horizonte para materiais cujas propriedades possam ser programadas em nível genético, introduzindo nova camada de complexidade técnica e ética.

## **1.6 Contribuições de Henk Jonkers**

### **1.6.1 Desenvolvimento do conceito de self-healing biológico**

Henk Jonkers foi pioneiro na formulação sistemática do concreto autor-reparável baseado em bactérias, articulando microbiologia aplicada e engenharia estrutural de forma inédita.

### **1.6.2 Seleção de bactérias esporuladas alcalifílicas**

A seleção de bactérias capazes de sobreviver em ambientes altamente alcalinos e formar esporos resistentes foi etapa decisiva para viabilizar a tecnologia.

### **1.6.3 Estratégias de encapsulamento**

O desenvolvimento de sistemas de encapsulamento compatíveis com a matriz cimentícia garantiu proteção às bactérias durante a mistura e cura inicial.

### **1.6.4 Resultados experimentais iniciais**

Os resultados experimentais demonstraram selamento efetivo de fissuras e redução significativa de permeabilidade, estabelecendo prova de conceito robusta.

### **1.6.5 Influência na consolidação da área**

Seu trabalho exerceu influência estrutural na consolidação do campo, inspirando múltiplos grupos de pesquisa e iniciativas industriais.

## **1.7 Publicações de Alto Impacto**

### **1.7.1 Artigos mais citados na área de MICP**

Os artigos mais citados concentram-se na demonstração experimental da MICP e na modelagem de transporte reativo acoplado, estabelecendo parâmetros quantitativos para aplicação em solos e concretos.

### **1.7.2 Revistas científicas relevantes**

Periódicos de alto impacto em materiais, geotecnia e microbiologia ambiental tornaram-se os principais veículos de disseminação do conhecimento.

### **1.7.3 Indicadores bibliométricos**

A evolução dos indicadores bibliométricos revela crescimento exponencial do número de publicações e citações, refletindo consolidação do campo.

### **1.7.4 Evolução das citações ao longo do tempo**

A curva de citações evidencia transição de fase exploratória para fase de maturidade científica, com diversificação temática e aumento de colaborações internacionais.

## **1.8 Patentes Internacionais**

### **1.8.1 Patentes relacionadas a concreto autorreparável**

O registro de patentes em concreto autorreparável demonstra interesse industrial crescente, particularmente em formulações e métodos de encapsulamento.

### **1.8.2 Patentes em biocimentação**

Processos de injeção bacteriana para estabilização de solos também foram objeto de proteção intelectual, evidenciando potencial de mercado.

### **1.8.3 Patentes em encapsulamento bacteriano**

Tecnologias de microencapsulamento representam núcleo estratégico da proteção intelectual, por constituírem elemento crítico da viabilidade técnica.

#### **1.8.4 Tendências de proteção intelectual**

Observa-se aumento de depósitos internacionais e diversificação geográfica, indicando competição tecnológica global.

### **1.9 Tendências Emergentes**

#### **1.9.1 Materiais vivos programáveis**

A noção de materiais programáveis biologicamente desloca o foco da autorreparação reativa para sistemas adaptativos com comportamento predefinido.

#### **1.9.2 Bioengenharia sintética aplicada à construção**

Ferramentas de engenharia genética ampliam possibilidades de controle metabólico, permitindo otimização de taxas de precipitação e resposta a estímulos específicos.

#### **1.9.3 Impressão 3D com biomateriais**

A convergência entre fabricação aditiva e biomineralização abre caminho para estruturas complexas formadas por processos bioassistidos.

#### **1.9.4 Integração com captura de carbono**

A mineralização biogênica de  $CO_2$  insere a bioengenharia da construção no debate global sobre neutralidade climática.

#### **1.9.5 Digital Twins biológicos**

A modelagem digital de sistemas bioativos, atualizada por dados de sensores, aponta para infraestruturas monitoradas e adaptativas, integrando biologia e engenharia digital em um novo paradigma construtivo.

## Capítulo 2

# A Emergência da Bioengenharia na Construção

A história da construção é, em grande medida, a história da relação entre humanidade e matéria. Cada salto civilizatório esteve associado à capacidade de transformar recursos naturais em sistemas estruturais duráveis, previsíveis e economicamente viáveis. No entanto, ao longo de milênios, os materiais estruturais foram concebidos como entidades essencialmente inertes, corpos passivos que resistem, mas não reagem; que suportam, mas não se adaptam. A emergência da bioengenharia na construção inaugura uma ruptura conceitual profunda: a possibilidade de materiais que não apenas resistem ao ambiente, mas interagem com ele.

Este capítulo examina as bases históricas dessa transição, suas motivações técnicas e ambientais, e o deslocamento epistemológico que conduz da engenharia de materiais inertes à engenharia bioativa.

### 2.1 Evolução Histórica dos Materiais de Construção

#### 2.1.1 Materiais naturais primitivos

As primeiras formas de construção basearam-se em materiais naturais disponíveis localmente: pedra, madeira, argila e fibras vegetais. Esses materiais eram empregados em seu estado quase bruto, com modificações mínimas. Sua durabilidade dependia menos de formulações químicas e mais da seleção adequada do recurso e da técnica construtiva.

A madeira, por exemplo, apresentava comportamento anisotrópico e suscetível à degradação biológica; a pedra oferecia resistência elevada, mas demandava esforço significativo de extração e transporte. A argila, moldável e abundante, permitiu a fabricação de tijolos secos ao sol e posteriormente cozidos. Ainda que rudimentares, esses materiais já revelavam uma interação indireta com processos biológicos, a degradação por microrganismos, a carbonatação

natural, a fossilização, mas tais fenômenos eram vistos como inevitabilidades naturais, não como mecanismos projetáveis.

### **2.1.2 Concreto romano**

O concreto romano representou uma das mais notáveis inovações da engenharia antiga. A combinação de cal com pozolanas naturais resultou em um material hidráulico capaz de endurecer na presença de água, permitindo a construção de estruturas monumentais que atravessaram milênios.

O desempenho excepcional de muitas dessas estruturas decorre de reações químicas complexas entre cal, cinzas vulcânicas e água do mar, formando fases minerais estáveis ao longo do tempo. Embora não houvesse qualquer compreensão microbiológica subjacente, observa-se retrospectivamente que a durabilidade romana resultava de processos químicos e ambientais integrados, alguns dos quais envolvem transformações minerais progressivas. A ideia de um material que evoluiu ao longo do tempo já estava, de certa forma, presente, ainda que não intencionalmente.

### **2.1.3 Revolução do cimento Portland**

O século XIX marcou a consolidação do cimento Portland como ligante dominante. Sua produção padronizada, baseada na queima de calcário e argila em altas temperaturas, permitiu controle sem precedentes sobre propriedades mecânicas e tempo de pega. O concreto moderno emergiu como material versátil, moldável e estruturalmente confiável.

A lógica industrial que acompanhou o cimento Portland privilegiou previsibilidade e repetibilidade. A matriz cimentícia passou a ser concebida como sistema químico fechado, cujo desempenho dependia essencialmente da hidratação e da microestrutura resultante. O concreto tornou-se o símbolo da modernidade técnica: robusto, universal e aparentemente definitivo.

### **2.1.4 Industrialização do concreto armado**

A incorporação de armaduras metálicas ao concreto transformou definitivamente a engenharia estrutural. O concreto armado possibilitou edifícios mais altos, pontes mais longas e infraestruturas mais complexas. A combinação entre resistência à compressão do concreto e resistência à tração do aço produziu um sistema estrutural altamente eficiente.

Contudo, essa industrialização consolidou também uma visão mecanicista do material. A durabilidade passou a depender do controle da fissuração e da proteção das armaduras contra corrosão. O concreto era concebido como barreira física, cuja função era proteger o aço de agentes agressivos. A interação com o ambiente permanecia passiva, restrita à resistência.

## **2.2 Limitações dos Materiais Convencionais**

### **2.2.1 Fissuração e degradação**

A fissuração é inerente ao concreto. Tensões térmicas, retração por secagem, carregamentos mecânicos e variações ambientais produzem micro e microfissuras ao longo da vida útil da estrutura. Essas fissuras funcionam como portas de entrada para agentes agressivos, acelerando processos de degradação.

A engenharia tradicional desenvolveu estratégias de mitigação, aditivos, armaduras adicionais, juntas de dilatação, mas não eliminou o problema. A lógica predominante sempre foi corretiva: detectar, intervir, reparar.

### **2.2.2 Corrosão das armaduras**

A corrosão do aço é uma das principais causas de deterioração estrutural. A penetração de cloretos ou a redução do pH da matriz cimentícia compromete a camada passivadora do aço, iniciando processos eletroquímicos que resultam em expansão volumétrica e fissuração adicional.

Esse ciclo autoacelerado de degradação evidencia a limitação do paradigma inerte. O material não possui mecanismos internos de resposta; depende de inspeção externa e manutenção periódica.

### **2.2.3 Alta emissão de CO<sub>2</sub>**

A produção de cimento Portland é responsável por significativa parcela das emissões globais de dióxido de carbono. A calcinação do calcário e o consumo energético dos fornos contribuem diretamente para o aquecimento global.

A expansão urbana contínua amplifica esse impacto. A dependência estrutural do concreto como material dominante torna a descarbonização do setor uma das prioridades estratégicas globais.

### **2.2.4 Custos de manutenção**

Além do impacto ambiental, a manutenção de infraestruturas representa custo econômico expressivo. Reparos estruturais, substituição de elementos degradados e intervenções emergenciais geram despesas que superam, em muitos casos, o investimento inicial.

Essa realidade reforça a necessidade de materiais capazes de prolongar sua própria vida útil de maneira autônoma.

## **2.3 Sustentabilidade e Descarbonização**

### **2.3.1 Pegada de carbono do cimento**

A pegada de carbono do cimento deriva tanto das emissões processuais quanto do consumo energético. A descarbonização exige redução de clínquer, substituição por materiais suplementares e inovação tecnológica na produção.

Entretanto, mesmo com melhorias industriais, a lógica permanece extrativa e emissiva. A introdução de mecanismos biológicos que promovam captura mineral de carbono sugere alternativa complementar, potencialmente capaz de alterar o balanço líquido ao longo do ciclo de vida.

### **2.3.2 Metas globais de redução de emissões**

A comunidade internacional estabeleceu metas ambiciosas de redução de emissões nas próximas décadas. O setor da construção, como um dos maiores emissores, ocupa posição central nessas estratégias.

A bioengenharia aplicada à construção alinha-se a esse esforço ao propor materiais com maior durabilidade, menor necessidade de manutenção e potencial de mineralização de CO<sub>2</sub>.

### **2.3.3 Materiais alternativos de baixo carbono**

Diversas abordagens têm sido exploradas: cimentos alternativos, geopolímeros, substituições pozolânicas. Essas soluções, embora relevantes, ainda operam dentro do paradigma químico convencional.

A incorporação de sistemas biológicos amplia o escopo, permitindo pensar não apenas em reduzir emissões, mas em transformar o material em agente ativo de mitigação.

### **2.3.4 Papel da biotecnologia na descarbonização**

A biotecnologia introduz a possibilidade de utilizar processos metabólicos para induzir precipitação mineral e fixação estável de carbono. Diferentemente da captura temporária, a mineralização converte CO<sub>2</sub> em fase sólida estável, integrando-o à matriz estrutural.

Essa convergência entre biologia e engenharia redefine o papel do material na agenda climática.

## **2.4 Introdução aos Biomateriais na Engenharia**

### **2.4.1 Definição de biomateriais estruturais**

Biomateriais estruturais são aqueles cuja formulação ou desempenho depende de componentes biológicos, sejam células, enzimas ou metabólitos. Na construção, essa definição implica integração entre processos biológicos e matriz mineral.

### **2.4.2 Materiais bioativos**

Materiais bioativos incorporam agentes capazes de desencadear reações específicas em resposta a estímulos ambientais. No caso do concreto autorreparável, a bioatividade manifesta-se na precipitação de carbonato de cálcio quando há presença de água e oxigênio.

### **2.4.3 Materiais híbridos bio-minerais**

A interação entre matriz mineral e componentes biológicos produz sistemas híbridos. A fase mineral garante resistência estrutural; a fase biológica introduz funcionalidade adaptativa.

### **2.4.4 Materiais vivos**

Materiais vivos representam estágio mais avançado, no qual organismos permanecem viáveis e capazes de responder ao ambiente ao longo do tempo. Essa concepção desafia fronteiras tradicionais entre engenharia e biologia.

## **2.5 Conceito de Materiais Vivos**

### **2.5.1 Sistemas bioativos incorporados**

A incorporação de sistemas bioativos exige controle rigoroso das condições ambientais internas do material. pH, disponibilidade de água e nutrientes devem ser compatíveis com a sobrevivência celular.

### **2.5.2 Autorreparação metabólica**

A autorreparação metabólica baseia-se na capacidade de microrganismos de precipitar minerais que selam fissuras. Trata-se de mecanismo intrínseco, acionado por estímulos ambientais.

### **2.5.3 Resposta adaptativa ao ambiente**

Materiais vivos podem, em princípio, ajustar sua atividade metabólica conforme variações de umidade, temperatura ou concentração de CO<sub>2</sub>. Essa adaptabilidade representa salto qualitativo em relação à passividade convencional.

### **2.5.4 Comparação com materiais inteligentes tradicionais**

Materiais inteligentes tradicionais, como ligas com memória de forma ou sensores piezoelétricos, respondem a estímulos físicos por mecanismos físico-químicos. Materiais vivos, por sua vez, respondem por meio de metabolismo, replicação e expressão genética, introduzindo complexidade biológica inédita.

## **2.6 Transição para Engenharia Bioativa**

### **2.6.1 Mudança de paradigma: inerte → bioativo**

A transição da engenharia inerte para a bioativa constitui mudança paradigmática. O material deixa de ser concebido como objeto estático e passa a ser entendido como sistema dinâmico.

### **2.6.2 Integração interdisciplinar**

Essa transição exige integração entre microbiologia, ciência dos materiais, química, geotecnia e engenharia computacional. Nenhuma disciplina isolada é capaz de abarcar a complexidade envolvida.

### **2.6.3 Desafios científicos**

Persistem desafios significativos: estabilidade biológica em ambientes alcalinos, controle de uniformidade de precipitação, modelagem acoplada de processos químicos e mecânicos, regulamentação e biossegurança.

### **2.6.4 Potencial transformador**

Apesar dos desafios, o potencial transformador é evidente. A bioengenharia na construção inaugura possibilidade de infraestruturas que se regeneram, que capturam carbono e que interagem de maneira inteligente com o ambiente. Não se trata apenas de inovação material, mas de redefinição do próprio conceito de construir.

## Capítulo 3

# Fundamentos de Microbiologia Aplicada

A incorporação de sistemas biológicos em materiais cimentícios exige que o engenheiro civil ultrapasse as fronteiras tradicionais da mecânica dos sólidos e da química dos ligantes hidráulicos. A bioengenharia aplicada à construção não pode ser compreendida sem um domínio sólido da microbiologia fundamental. Este capítulo estabelece as bases conceituais necessárias para compreender como bactérias sobrevivem, metabolizam, interagem com o meio e podem ser instrumentalizadas para induzir processos de biomineralização em matrizes cimentícias altamente alcalinas.

Mais do que uma exposição introdutória, propõe-se aqui uma leitura integrada entre estrutura celular, fisiologia, metabolismo e protocolos experimentais, sempre com foco na aplicação em materiais de construção.

### 3.1 Estrutura e Fisiologia Bacteriana

#### 3.1.1 Parede celular

A parede celular bacteriana constitui elemento estrutural essencial à sobrevivência do microrganismo, especialmente em ambientes osmoticamente agressivos, como é o caso da matriz cimentícia. Em bactérias Gram-positivas, grupo no qual se encontram diversas espécies empregadas em biocimentação, a parede celular é espessa, composta predominantemente por camadas múltiplas de peptidoglicano. Essa macromolécula confere rigidez mecânica, resistência à pressão osmótica interna e proteção contra variações ambientais abruptas.

O peptidoglicano é formado por cadeias lineares de N-acetilglicosamina e ácido N-acetilmurâmico, interligadas por pontes peptídicas. Essa arquitetura tridimensional cria uma malha estrutural robusta, capaz de suportar pressões internas que podem ultrapassar diversas atmosferas. No contexto do concreto, essa resistência estrutural é crucial, pois o ambiente apresenta elevado pH, alta concentração de íons cálcio e gradientes de umidade variáveis.

Além da função mecânica, a parede celular participa de processos de adesão e nucleação mineral. Superfícies bacterianas carregadas negativamente podem atrair íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), funcionando como sítios iniciais de nucleação para a precipitação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Assim, a parede celular não é apenas estrutura de contenção, mas interface ativa entre biologia e mineralogia.

### **3.1.2 Membrana plasmática**

A membrana plasmática é uma bicamada lipídica dinâmica que regula o fluxo de substâncias entre o meio intracelular e o ambiente externo. Sua composição inclui fosfolipídios, proteínas integrais e periféricas, além de sistemas de transporte especializados.

No contexto da biomineralização induzida por microrganismos, a membrana desempenha papel central na regulação de gradientes iônicos e na excreção de metabólitos. Bombas de prótons, transportadores de ureia e canais específicos permitem o controle fino do equilíbrio interno mesmo em ambientes alcalinos extremos.

A plasticidade funcional da membrana é determinante para a sobrevivência em matrizes cimentícias. Alterações na composição lipídica podem ocorrer em resposta a estresse químico, aumentando a estabilidade estrutural e reduzindo a permeabilidade a íons potencialmente tóxicos. Essa adaptabilidade é uma das razões pelas quais certas bactérias alcalifílicas são preferidas em aplicações de concreto autorreparável.

### **3.1.3 Esporulação**

A esporulação é um dos mecanismos mais sofisticados de sobrevivência bacteriana. Em condições adversas, escassez de nutrientes, desidratação ou extremos de pH, algumas bactérias Gram-positivas formam endósporos. Esses esporos são estruturas altamente resistentes, metabolicamente inativas, capazes de sobreviver por longos períodos.

O processo de esporulação envolve reorganização celular profunda: duplicação do material genético, formação de septo assimétrico, deposição de camadas protetoras e desidratação controlada do citoplasma. O resultado é uma estrutura com múltiplas barreiras físicas e químicas, incluindo córtex espesso e proteínas protetoras do DNA.

Na engenharia civil, a esporulação é mecanismo-chave para viabilizar a incorporação bacteriana ao concreto. Durante a mistura e cura inicial, o ambiente é hostil; contudo, os esporos permanecem viáveis. Quando fissuras se formam e água penetra na matriz, as condições tornam-se favoráveis à germinação, reativando o metabolismo e desencadeando a precipitação mineral.

### **3.1.4 Enzimas ureolíticas**

A urease é a enzima central no processo de precipitação microbiana de carbonato induzida por ureólise. Trata-se de uma metaloenzima dependente de

níquel, capaz de catalisar a hidrólise da ureia em amônia e dióxido de carbono. A reação aumenta o pH local devido à formação de amônia, deslocando o equilíbrio químico em direção à formação de carbonato.

A atividade ureolítica depende de fatores como temperatura, disponibilidade de substrato e concentração de cofatores metálicos. A cinética enzimática influencia diretamente a taxa de precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , afetando a eficiência do processo de autorreparação.

Do ponto de vista aplicado, compreender a regulação genética da produção de urease é fundamental. Estratégias de engenharia metabólica podem potencializar a atividade enzimática ou adaptá-la a condições específicas da matriz cimentícia.

## **3.2 Metabolismo Bacteriano**

### **3.2.1 Metabolismo autotrófico e heterotrófico**

O metabolismo bacteriano pode ser classificado de acordo com a fonte de carbono e energia. Organismos autotróficos utilizam  $\text{CO}_2$  como fonte de carbono, enquanto heterotróficos dependem de compostos orgânicos. Em aplicações de biocimentação, a maioria das bactérias empregadas é heterotrófica, utilizando ureia ou outras fontes orgânicas.

Essa distinção é relevante porque define a necessidade de nutrientes incorporados ao material. A formulação do concreto bioativo deve prever substratos adequados que não comprometam propriedades mecânicas.

### **3.2.2 Via ureolítica**

A via ureolítica consiste na hidrólise da ureia pela urease, produzindo amônia e dióxido de carbono. A amônia reage com água formando íons amônio e hidróxido, elevando o pH. O aumento do pH favorece a conversão de  $\text{CO}_2$  em carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), que reage com  $\text{Ca}^{2+}$  disponível para formar  $\text{CaCO}_3$  sólido.

Esse mecanismo não é apenas reação química; trata-se de processo bioquimicamente mediado, cuja eficiência depende da viabilidade celular e da expressão enzimática.

### **3.2.3 Produção de carbonato**

A produção de carbonato é etapa intermediária crítica. O equilíbrio entre bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e carbonato depende fortemente do pH. Em ambientes altamente alcalinos, a forma predominante tende a ser o carbonato, facilitando a precipitação.

A morfologia e a cristalinidade do carbonato precipitado podem variar conforme condições ambientais e espécie bacteriana, influenciando propriedades mecânicas do material reparado.

### **3.2.4 Condições ideais de crescimento**

Temperatura, pH, disponibilidade de oxigênio e concentração de nutrientes são fatores determinantes para crescimento bacteriano. Em aplicações estruturais, o crescimento deve ser controlado: suficiente para promover biomineralização, mas não a ponto de comprometer estabilidade do sistema.

O desafio reside em projetar microambientes internos no concreto que preservem viabilidade sem induzir degradação indesejada.

## **3.3 Crescimento em Ambientes Alcalinos**

### **3.3.1 pH do concreto fresco**

O concreto fresco apresenta pH entre 12 e 13, resultado da presença de hidróxidos alcalinos. Esse ambiente é hostil à maioria dos microrganismos. A seleção de bactérias alcalifílicas é, portanto, condição indispensável.

### **3.3.2 Estratégias de sobrevivência**

Bactérias alcalifílicas mantêm pH intracelular próximo da neutralidade por meio de sistemas de transporte ativo de íons e adaptações estruturais na membrana. Essas estratégias garantem funcionalidade metabólica mesmo em meios extremos.

### **3.3.3 Formação de esporos**

A formação de esporos, já discutida, representa estratégia adicional. Em concreto, a alternância entre estado latente e ativo é elemento central do conceito de autorreparação.

## **3.4 Protocolos de Cultivo Bacteriano**

### **3.4.1 Seleção de meio de cultura**

A escolha do meio de cultura deve considerar requisitos nutricionais da espécie e objetivo experimental. Meios ricos favorecem crescimento rápido; meios definidos permitem controle preciso de variáveis.

### **3.4.2 Preparação do inóculo**

A padronização do inóculo é essencial para reprodutibilidade. A concentração celular deve ser determinada por densidade óptica ou contagem direta.

### **3.4.3 Condições de incubação**

Temperatura, agitação e aeração influenciam atividade metabólica. Para bactérias ureolíticas, condições aeróbias costumam ser preferíveis.

### **3.4.4 Monitoramento de crescimento**

Curvas de crescimento permitem identificar fases lag, exponencial e estacionária. A colheita ideal para incorporação no concreto geralmente ocorre na fase estacionária, quando há maior resistência ao estresse.

### **3.4.5 Armazenamento de culturas**

Culturas podem ser armazenadas sob refrigeração ou criopreservadas. A viabilidade a longo prazo é requisito para aplicação industrial.

## **3.5 Controle de Contaminação**

### **3.5.1 Esterilização de materiais**

Esterilização pode ser realizada por autoclavação, filtração ou radiação. A escolha depende do material a ser tratado.

### **3.5.2 Técnicas assépticas**

Manipulação em condições assépticas previne contaminações cruzadas que poderiam comprometer resultados experimentais.

### **3.5.3 Monitoramento microbiológico**

Testes periódicos asseguram pureza das culturas e validade dos experimentos.

### **3.5.4 Validação experimental**

Protocolos devem ser reprodutíveis e documentados, garantindo confiabilidade científica.

## **3.6 Biossegurança Laboratorial**

### **3.6.1 Classificação de risco microbiológico**

Bactérias empregadas em biocimentação geralmente pertencem a classes de baixo risco, mas sua manipulação requer conformidade com normas de biossegurança.

### **3.6.2 Equipamentos de proteção individual**

Uso de jaleco, luvas e proteção ocular é obrigatório em ambiente laboratorial.

### **3.6.3 Descarte de resíduos biológicos**

Resíduos devem ser autoclavados ou tratados antes do descarte, evitando contaminação ambiental.

### **3.6.4 Procedimentos de emergência**

Planos de contingência devem prever derramamentos, exposições acidentais e falhas de equipamento, assegurando integridade dos pesquisadores e do ambiente.

## Capítulo 4

# Biomíneralização e MICP

A biomíneralização representa um dos fenômenos mais sofisticados de interação entre sistemas biológicos e o mundo mineral. Muito antes de sua incorporação à engenharia civil, organismos já produziam estruturas minerais complexas: conchas, esqueletos, carapaças e depósitos sedimentares. A Microbially Induced Calcium Precipitation (MICP) constitui uma das expressões tecnicamente mais promissoras desse fenômeno, ao permitir que microrganismos induzam a formação controlada de carbonato de cálcio em meios artificiais.

Neste capítulo, abordaremos a biomíneralização sob perspectiva conceitual, química, cinética e mecânica, estabelecendo as bases teóricas necessárias para compreender sua aplicação estrutural em materiais cimentícios.

### 4.1 Conceito de Biomíneralização

#### 4.1.1 Biomíneralização induzida biologicamente

A biomíneralização induzida biologicamente ocorre quando a atividade metabólica de um organismo altera as condições químicas do meio, promovendo precipitação mineral sem controle morfológico direto sobre o cristal formado. Nesse caso, o microrganismo não “projeta” o mineral, mas cria ambiente favorável à sua formação.

Na MICP, a hidrólise da ureia eleva o pH e aumenta a concentração de carbonato, levando à supersaturação em relação ao carbonato de cálcio. A precipitação ocorre como consequência termodinâmica desse estado supersaturado. A bactéria atua como catalisadora ambiental, não como arquiteta cristalográfica.

Esse tipo de biomíneralização é particularmente adequado à engenharia civil, pois permite que o material hospedeiro, como o concreto, determine parcialmente a morfologia final do precipitado por meio de sua microestrutura porosa.

### 4.1.2 Biomineralização controlada biologicamente

Na biomineralização controlada biologicamente, o organismo exerce controle direto sobre nucleação, crescimento e orientação cristalina. Esse processo é observado em sistemas biológicos complexos, como formação de ossos ou conchas.

Embora a MICP aplicada ao concreto seja majoritariamente induzida e não controlada, há evidências de que superfícies celulares e biofilmes podem influenciar morfologia e polimorfismo do  $\text{CaCO}_3$ , afetando proporções relativas de calcita, vaterita e aragonita. O avanço da biologia sintética pode permitir, no futuro, maior controle sobre essas características.

### 4.1.3 Aplicações estruturais

A aplicação estrutural da biomineralização fundamenta-se na capacidade do  $\text{CaCO}_3$  precipitado preencher vazios, selar fissuras e reduzir permeabilidade. Em solos, pode promover cimentação intergranular; em concreto, pode restaurar continuidade estrutural parcial.

Do ponto de vista macroscópico, o ganho mecânico resulta da transição de um sistema poroso para um sistema parcialmente densificado. Contudo, o desempenho depende da distribuição espacial da precipitação, da aderência entre cristal e matriz e da estabilidade mineral ao longo do tempo.

## 4.2 MICP - Microbially Induced Calcium Precipitation

### 4.2.1 Fundamentos do processo

A MICP baseia-se na capacidade de determinadas bactérias produzirem enzimas que alteram o equilíbrio químico do meio, promovendo precipitação de carbonato de cálcio. O processo envolve quatro componentes essenciais: microrganismo viável, substrato metabólico (geralmente ureia), fonte de cálcio e condições ambientais adequadas.

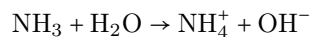
O mecanismo é governado por princípios de termodinâmica química e cinética enzimática. A supersaturação em relação ao  $\text{CaCO}_3$  é condição necessária, mas a presença de superfícies nucleantes, incluindo paredes celulares, reduz a barreira energética para formação do cristal.

### 4.2.2 Papel da urease

A urease catalisa a reação:



A amônia produzida reage com água:



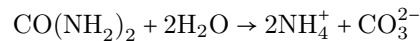
O aumento de  $\text{OH}^-$  eleva o pH, deslocando o equilíbrio do  $\text{CO}_2$  dissolvido para carbonato. Assim, a urease atua como gatilho bioquímico da cascata mineralizante.

### 4.2.3 Condições químicas necessárias

Para que a precipitação ocorra, o produto iônico  $[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]$  deve exceder o produto de solubilidade ( $K_{sp}$ ) do  $\text{CaCO}_3$ . O pH elevado favorece a formação de  $\text{CO}_3^{2-}$ . A disponibilidade de cálcio, por sua vez, depende da formulação do meio ou da matriz cimentícia.

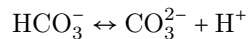
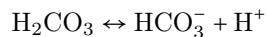
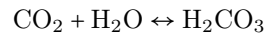
## 4.3 Fórmulas Químicas

### 4.3.1 Hidrólise da ureia



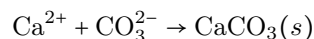
### 4.3.2 Formação de íons carbonato

O  $\text{CO}_2$  dissolvido passa por etapas de equilíbrio:



Em pH elevado, o equilíbrio desloca-se para  $\text{CO}_3^{2-}$ .

### 4.3.3 Reação com cálcio

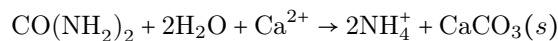


### 4.3.4 Precipitação de $\text{CaCO}_3$

A precipitação ocorre quando a solução atinge supersaturação. O sólido formado pode assumir diferentes polimorfos, dependendo de condições termodinâmicas e cinéticas.

### 4.3.5 Fórmulas globais balanceadas

A reação global simplificada pode ser representada como:



## 4.4 Cinética da Precipitação

### 4.4.1 Taxa de hidrólise

A taxa de hidrólise da ureia depende da concentração de enzima e do substrato. Em regime de saturação enzimática, a cinética pode ser descrita por modelo de Michaelis-Menten.

### 4.4.2 Fatores limitantes

Limitações podem surgir por difusão de ureia, disponibilidade de cálcio ou inibição por acúmulo de amônio. O controle desses fatores é crucial para aplicação eficiente.

### 4.4.3 Influência de temperatura

A atividade enzimática aumenta com temperatura até um ponto ótimo, após o qual ocorre desnaturação. Em aplicações estruturais, variações térmicas ambientais influenciam desempenho da MICP.

### 4.4.4 Influência da concentração de ureia

Concentrações muito elevadas podem gerar precipitação rápida e heterogênea; concentrações baixas podem limitar eficiência. O balanço adequado é requisito de projeto.

### 4.4.5 Modelos cinéticos

Modelos combinam equações de transporte com cinética enzimática e equilíbrio químico, permitindo prever distribuição espacial de precipitação ao longo do tempo.

## 4.5 Modelos Matemáticos de Nucleação

### 4.5.1 Teoria clássica de nucleação

Segundo a teoria clássica, a formação de um núcleo cristalino envolve competição entre energia volumétrica favorável e energia superficial desfavorável. Existe raio crítico acima do qual o núcleo cresce espontaneamente.

### 4.5.2 Energia livre de Gibbs

A variação de energia livre total  $\Delta G$  é dada por:

$$\Delta G = \Delta G_v + \Delta G_s$$

onde  $\Delta G_v$  representa contribuição volumétrica e  $\Delta G_s$  contribuição superficial. A supersaturação reduz a barreira energética crítica.

### 4.5.3 Crescimento cristalino

Após nucleação, o crescimento ocorre por incorporação de íons à superfície cristalina. Taxas de crescimento dependem de difusão e cinética de superfície.

### 4.5.4 Formação de calcita vs vaterita

Calcita é a forma termodinamicamente mais estável do  $CaCO_3$ , enquanto vaterita é metastável. Condições de pH, temperatura e presença de macromoléculas podem influenciar qual polimorfo predomina.

## 4.6 Transporte Reativo Acoplado

### 4.6.1 Difusão de nutrientes

A difusão de ureia e oxigênio através da matriz porosa é governada pela lei de Fick. A redução de porosidade ao longo do processo altera coeficientes efetivos de difusão.

### 4.6.2 Transporte de íons cálcio

Íons  $Ca^{2+}$  podem ser fornecidos externamente ou liberados da própria matriz cimentícia. Seu transporte envolve difusão e, eventualmente, advecção em sistemas saturados.

### 4.6.3 Reações químicas acopladas

As reações químicas alteram concentração local, influenciando gradientes de transporte. O sistema é fortemente não linear.

### 4.6.4 Modelagem por equações diferenciais parciais

O acoplamento entre transporte e reação pode ser descrito por equações diferenciais parciais do tipo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C - R(C)$$

onde  $C$  é concentração,  $D$  coeficiente de difusão e  $R(C)$  termo de reação dependente da cinética enzimática.

## 4.7 Acoplamento Mecânico-Químico

### 4.7.1 Influência da precipitação na resistência

A precipitação de  $CaCO_3$  aumenta coesão interna e pode restaurar parte da resistência perdida por fissuração. O ganho depende da aderência entre cristal e matriz.

#### **4.7.2 Redução de porosidade**

A ocupação de vazios reduz permeabilidade e difusividade, melhorando durabilidade frente a agentes agressivos.

#### **4.7.3 Aumento de módulo elástico**

O preenchimento de microfissuras pode elevar módulo elástico efetivo, alterando resposta estrutural global.

#### **4.7.4 Modelos constitutivos acoplados**

Modelos constitutivos acoplados consideram evolução da microestrutura como variável interna dependente do grau de precipitação. Assim, propriedades mecânicas tornam-se funções do estado químico, estabelecendo ponte definitiva entre biologia, química e mecânica estrutural.

# Concretos Autorreparáveis com Bactérias

*Fundamentos do Concreto Autorreparável; Espécies Bacterianas Aplicadas; Avaliação Experimental; Projeto de Misturas e Dosagem.*

## Capítulo 5

# Fundamentos do Concreto Autorreparável

A fissuração sempre acompanhou a história do concreto. Desde as primeiras formulações com cimento Portland até os concretos de alto desempenho contemporâneos, a presença de micro e microfissuras é uma consequência inevitável da retração, das variações térmicas, da fluência e das solicitações mecânicas. Durante décadas, a engenharia estrutural tratou a fissuração como fenômeno a ser limitado, controlado ou remediado por meio de reforço, detalhamento adequado e manutenção periódica. O conceito de concreto autorreparável representa uma inflexão profunda nesse paradigma: não se trata apenas de resistir à fissuração, mas de permitir que o próprio material reaja a ela.

Este capítulo examina os fundamentos científicos, tecnológicos e estruturais do concreto autorreparável, com ênfase na abordagem biológica baseada na precipitação microbiana de carbonato de cálcio (MICP). Ao longo das seções, discutem-se os mecanismos de reparo, as estratégias de incorporação bacteriana, a modelagem mecânica das fissuras e a avaliação comparativa de desempenho.

### 5.1 Introdução ao Conceito de Autorreparação

#### 5.1.1 Definição de self-healing em materiais cimentícios

O termo *self-healing*, aplicado a materiais cimentícios, refere-se à capacidade intrínseca ou incorporada de restaurar parcial ou totalmente propriedades físicas, químicas ou mecânicas após a ocorrência de dano. No caso do concreto, esse dano manifesta-se predominantemente sob a forma de fissuras, que comprometem estanqueidade, durabilidade e, em casos extremos, capacidade resistente.

A autorreparação não implica necessariamente recuperação integral da resistência original, mas deve ser compreendida como processo de restauração funcional. Em muitas aplicações, o objetivo primário é a redução da permeabilidade e a proteção das armaduras contra agentes agressivos. Em outras, busca-se

também recuperação de rigidez e de capacidade de transferência de tensões.

Conceitualmente, o concreto autorreparável é um material com capacidade de resposta interna ao dano, transformando a fissura, tradicionalmente vista como falha, em gatilho para ativação de mecanismos reparadores.

### **5.1.2 Autorreparação autógena vs. autônoma**

A autorreparação autógena corresponde à capacidade natural do concreto de selar pequenas fissuras sem adição de agentes externos específicos. Esse fenômeno ocorre principalmente por hidratação tardia de partículas de cimento não reagidas e por precipitação de carbonato de cálcio decorrente da reação entre hidróxido de cálcio e dióxido de carbono dissolvido.

Já a autorreparação autônoma depende da incorporação deliberada de sistemas reparadores, cápsulas poliméricas, agentes químicos encapsulados ou microrganismos viáveis. No caso biológico, a ativação ocorre quando fissuras permitem a entrada de água, reativando esporos bacterianos e desencadeando a MICP.

A distinção entre autógena e autônoma é essencial para delimitar o escopo tecnológico. Enquanto a primeira é limitada a fissuras de pequena abertura (tipicamente inferiores a 0,2 mm), a segunda pode ser projetada para atuar em fissuras mais amplas, dependendo da estratégia adotada.

### **5.1.3 Evolução histórica do conceito**

As primeiras observações de autorreparação autógena datam do início do século XX, quando pesquisadores identificaram que fissuras finas podiam se fechar espontaneamente em ambientes úmidos. Entretanto, somente no final do século XX surgiram propostas sistemáticas de incorporar agentes reparadores ao concreto.

O desenvolvimento do concreto autorreparável biológico ganhou impulso no início dos anos 2000, quando se demonstrou que bactérias alcalifílicas esporuladas poderiam sobreviver na matriz cimentícia e precipitar carbonato de cálcio após ativação hídrica. A partir desse momento, consolidou-se uma nova linha de pesquisa, articulando microbiologia, ciência dos materiais e engenharia estrutural.

### **5.1.4 Aplicabilidade estrutural**

A aplicabilidade estrutural do concreto autorreparável depende da natureza da estrutura e das exigências de desempenho. Em elementos submetidos predominantemente à compressão, o selamento de fissuras pode ser suficiente para restaurar integridade funcional. Em elementos tracionados ou flexionados, a recuperação de capacidade resistente deve ser cuidadosamente avaliada.

Aplicações potenciais incluem túneis, reservatórios, pontes, fundações e estruturas marítimas, onde a redução de permeabilidade é crítica. Em ambientes

agressivos, a autorreparação pode prolongar significativamente a vida útil da estrutura, reduzindo intervenções corretivas.

## **5.2 Mecanismos de Autorreparação**

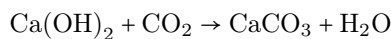
### **5.2.1 Autorreparação física (hidratação tardia)**

A hidratação tardia ocorre quando partículas de cimento não reagidas entram em contato com água após formação de fissura. A reação gera produtos de hidratação adicionais, como C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que podem preencher parcialmente o espaço fissurado.

Esse mecanismo depende da presença de cimento anidro residual e de disponibilidade de água. Sua eficácia diminui com o tempo, à medida que o grau de hidratação se aproxima do máximo.

### **5.2.2 Autorreparação química**

A autorreparação química envolve reações secundárias entre compostos presentes no concreto e agentes ambientais. A carbonatação do hidróxido de cálcio é exemplo clássico:



O carbonato formado pode preencher fissuras finas. Contudo, a carbonatação excessiva pode reduzir o pH e comprometer a passivação das armaduras, evidenciando ambiguidade do processo.

### **5.2.3 Autorreparação biológica via MICP**

A autorreparação biológica baseia-se na ativação de bactérias incorporadas ao concreto. Quando a fissura se forma e a água penetra, esporos germinam, metabolizam ureia (ou outro substrato) e precipitam  $\text{CaCO}_3$ , selando a abertura.

Esse mecanismo apresenta vantagem de ser direcionado ao local da fissura, pois depende da entrada de água exatamente onde o dano ocorreu. Além disso, pode gerar volume mineral significativo, capaz de preencher fissuras de maior abertura.

### **5.2.4 Comparação entre mecanismos**

Comparativamente, a autorreparação autógena é limitada em alcance e previsibilidade; a química é dependente de condições ambientais externas; a biológica oferece potencial de controle e maior capacidade de preenchimento, porém exige formulação mais complexa e controle microbiológico.

### **5.2.5 Limitações de cada abordagem**

Cada mecanismo apresenta limitações: esgotamento de reagentes na autógena, riscos de carbonatação excessiva na química, desafios de viabilidade bacteriana e custo inicial elevado na biológica. A escolha tecnológica deve considerar contexto estrutural e ambiental.

## **5.3 Incorporação de Bactérias no Concreto**

### **5.3.1 Incorporação direta na matriz**

A incorporação direta consiste na adição de esporos e nutrientes à mistura fresca. Embora simples, expõe microrganismos a condições severas de pH e cisalhamento durante a mistura.

### **5.3.2 Encapsulamento em cápsulas poliméricas**

Cápsulas poliméricas protegem bactérias e nutrientes até que a fissura rompa a cápsula, liberando o agente reparador. O diâmetro, espessura e resistência das cápsulas devem ser compatíveis com a matriz cimentícia.

### **5.3.3 Encapsulamento em sílica-gel**

Sílica-gel oferece microambiente protetor e compatível com matriz mineral. Pode atuar como reservatório de água e nutrientes, aumentando viabilidade a longo prazo.

### **5.3.4 Uso de agregados leves impregnados**

Agregados leves porosos podem ser impregnados com solução bacteriana e nutrientes. Funcionam como reservatórios internos distribuídos ao longo do volume do concreto.

### **5.3.5 Proteção da viabilidade bacteriana durante mistura**

A mistura mecânica impõe tensões de cisalhamento e elevação térmica. A escolha do estágio de adição, a proteção por encapsulamento e o controle da temperatura são determinantes para manter viabilidade celular.

## **5.4 Ativação do Processo de Autorreparo**

### **5.4.1 Formação de fissuras**

Fissuras surgem quando tensões superam resistência à tração do concreto. Podem ser estruturais ou não estruturais, superficiais ou profundas.

### **5.4.2 Entrada de água como gatilho biológico**

A água é o principal gatilho de ativação. Ao penetrar na fissura, dissolve nutrientes e cria ambiente propício à germinação bacteriana.

### **5.4.3 Germinação de esporos**

Esporos reidratam-se, retomam metabolismo e iniciam produção enzimática. O tempo de germinação depende de temperatura e disponibilidade de substrato.

### **5.4.4 Produção de carbonato de cálcio**

A atividade metabólica eleva o pH local e promove precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , que se deposita nas paredes da fissura.

### **5.4.5 Selamento da fissura**

O crescimento cristalino progressivo reduz a abertura até interromper fluxo de água, restabelecendo estanqueidade.

## **5.5 Modelagem de Fissuras Críticas**

### **5.5.1 Conceito de largura crítica de fissura**

Define-se largura crítica como abertura máxima que pode ser efetivamente selada pelo mecanismo autorreparador dentro de determinado intervalo de tempo.

### **5.5.2 Modelos mecânicos de propagação**

Modelos baseados em mecânica da fratura descrevem propagação de fissuras em função do fator de intensidade de tensão  $K_I$ .

### **5.5.3 Relação entre abertura de fissura e capacidade de selamento**

A capacidade de selamento depende do volume de  $\text{CaCO}_3$  produzido e da geometria da fissura. Relações empíricas e modelos analíticos podem correlacionar abertura inicial e tempo de fechamento.

### **5.5.4 Modelagem probabilística de ocorrência de fissuras**

Análises probabilísticas consideram variabilidade de carregamentos, propriedades do material e condições ambientais para estimar distribuição estatística de fissuras.

### **5.5.5 Simulação numérica da evolução da fissura**

Métodos numéricos, como elementos finitos com dano coesivo, podem ser acoplados a modelos de precipitação mineral para simular evolução simultânea de dano e reparo.

## **5.6 Desempenho Estrutural**

### **5.6.1 Resistência à compressão**

A incorporação bacteriana, quando adequadamente projetada, não compromete significativamente a resistência à compressão inicial. Em alguns casos, a precipitação adicional pode gerar leve incremento.

### **5.6.2 Resistência à tração**

A resistência à tração pode ser parcialmente restaurada após autorreparo, especialmente em fissuras finas.

### **5.6.3 Módulo de elasticidade**

O módulo de elasticidade pode apresentar variações modestas, dependendo da fração volumétrica de cápsulas ou agregados leves incorporados.

### **5.6.4 Recuperação de rigidez após autorreparo**

Ensaio de carregamento cíclico demonstram recuperação parcial de rigidez após processo de selamento biológico, indicando recomposição da capacidade de transferência de tensões.

### **5.6.5 Comparação com concreto convencional**

Comparado ao concreto convencional, o concreto autorreparável apresenta desempenho mecânico inicial semelhante, porém superior em durabilidade e manutenção ao longo do ciclo de vida.

## **5.7 Comparação Técnica com Concreto Convencional**

### **5.7.1 Emissões de CO<sub>2</sub>**

Embora a incorporação bacteriana não elimine emissões associadas ao cimento, o aumento da vida útil reduz emissões acumuladas por intervenções e reconstruções.

### 5.7.2 Vida útil projetada

Modelos de durabilidade indicam potencial de extensão significativa da vida útil em ambientes agressivos.

### 5.7.3 Necessidade de manutenção

A redução de intervenções corretivas constitui uma das principais vantagens econômicas e ambientais.

### 5.7.4 Custo inicial vs. custo de ciclo de vida

O custo inicial tende a ser maior devido a encapsulamento e cultivo bacteriano. Entretanto, análises de custo de ciclo de vida frequentemente indicam vantagem econômica a longo prazo.

### 5.7.5 Análise multicritério

Avaliações multicritério devem integrar desempenho mecânico, durabilidade, impacto ambiental e viabilidade econômica, permitindo decisão técnica fundamentada.

## 5.8 Tabelas Comparativas

### 5.8.1 Tabela comparativa de desempenho mecânico

Propriedade	Concreto Convencional	Concreto Autorreparável
Resistência à compressão	Alta	Alta (similar)
Resistência à tração	Baixa	Parcialmente recuperável
Módulo de elasticidade	Elevado	Ligeiramente variável
Recuperação pós-fissura	Nula	Parcial a significativa

### 5.8.2 Tabela comparativa de durabilidade

Aspecto	Convencional	Autorreparável
Permeabilidade	Moderada	Reduzida após fissura
Proteção de armaduras	Dependente de cobrimento	Melhorada por selamento
Vida útil estimada	Padrão de projeto	Estendida

### 5.8.3 Tabela comparativa ambiental

Critério	Convencional	Autorreparável
Emissão inicial de CO <sub>2</sub>	Alta	Similar
Emissão ao longo da vida	Elevada (manutenção)	Reduzida
Potencial de captura mineral	Nulo	Presente (MICP)

#### 5.8.4 Tabela comparativa econômica

Parâmetro	Convencional	Autorreparável
Custo inicial	Menor	Maior
Custo de manutenção	Elevado	Reduzido
Custo de ciclo de vida	Moderado/Alto	Potencialmente menor

O concreto autorreparável, especialmente na vertente biológica, não representa mera inovação incremental, mas redefinição funcional do material estrutural. Ao integrar processos metabólicos à matriz cimentícia, a engenharia civil passa a operar na fronteira entre matéria inerte e sistemas bioativos, inaugurando uma nova geração de infraestruturas adaptativas e resilientes.

## Capítulo 6

# Espécies Bacterianas Aplicadas

A escolha da espécie bacteriana constitui uma das decisões mais críticas no projeto de concretos autorreparáveis baseados em biomineralização. Não se trata apenas de selecionar um microrganismo capaz de precipitar carbonato de cálcio em meio aquoso, mas de identificar organismos que resistam ao ambiente extremo da matriz cimentícia, mantenham viabilidade ao longo de anos e apresentem perfil microbiológico seguro para aplicação em larga escala.

A bactéria, nesse contexto, deixa de ser mero agente biológico e passa a integrar o sistema estrutural como componente funcional. Sua fisiologia, metabolismo, capacidade de esporulação e estabilidade genética tornam-se variáveis de engenharia. Este capítulo examina de forma aprofundada os critérios técnicos de seleção e analisa as principais espécies empregadas em aplicações estruturais.

### 6.1 Critérios Técnicos de Seleção

#### 6.1.1 Capacidade ureolítica

A capacidade ureolítica é frequentemente o primeiro critério considerado. A eficiência da precipitação microbiana de carbonato de cálcio depende diretamente da atividade da enzima urease, responsável pela hidrólise da ureia e subsequente elevação do pH local.

Contudo, não basta que a bactéria produza urease; é necessário que o faça em condições adversas, como elevada alcalinidade e disponibilidade limitada de nutrientes. A taxa específica de hidrólise (expressa, por exemplo, em mmol de ureia hidrolisada por unidade de biomassa e tempo) influencia diretamente a cinética de precipitação e, portanto, a velocidade de selamento da fissura.

Além disso, a regulação genética da produção de urease deve ser estável. Cepas com alta variabilidade fenotípica podem apresentar desempenho inconsistente, o que compromete previsibilidade estrutural. Assim, a avaliação da capacidade ureolítica deve considerar não apenas valores máximos obtidos

em laboratório, mas também robustez metabólica sob condições simuladas de concreto.

### 6.1.2 Resistência ao pH alcalino

O concreto fresco apresenta pH entre 12 e 13, e mesmo após endurecimento mantém ambiente fortemente alcalino devido à presença de hidróxido de cálcio e álcalis solúveis. A maioria das bactérias ambientais não sobrevive nessas condições.

Portanto, espécies candidatas devem ser alcalifílicas ou, ao menos, alcalitolerantes. A resistência ao pH elevado envolve adaptações estruturais da membrana plasmática, sistemas eficientes de transporte de prótons e estabilidade de proteínas em meio alcalino. A manutenção do pH intracelular próximo à neutralidade é condição essencial para viabilidade metabólica.

Ensaio de sobrevivência em meios com pH progressivamente elevado são fundamentais para avaliar esse critério. A simples tolerância temporária não é suficiente; é necessário que a bactéria mantenha viabilidade por períodos prolongados em estado latente.

### 6.1.3 Capacidade de esporulação

A esporulação é talvez o atributo mais estratégico no contexto da engenharia civil. Esporos bacterianos são estruturas metabolicamente inativas, altamente resistentes à desidratação, radiação, calor e extremos químicos.

No interior da matriz cimentícia, onde a disponibilidade de água é intermitente e a difusão de nutrientes é limitada, a capacidade de permanecer em estado latente por anos é essencial. Bactérias que não formam esporos tendem a perder viabilidade rapidamente após a hidratação inicial do concreto.

A eficiência do processo de esporulação, o tempo necessário para formação de esporos e a taxa de germinação após reidratação são parâmetros críticos. Esporos devem ser capazes de sobreviver ao processo de mistura, ao calor de hidratação do cimento e à alcalinidade persistente.

### 6.1.4 Produção de urease

Embora relacionada à capacidade ureolítica, a produção de urease merece análise específica. Algumas espécies produzem urease constitutivamente; outras a expressam apenas sob determinadas condições ambientais.

A estabilidade da enzima, sua resistência a variações de temperatura e sua afinidade pelo substrato (constante de Michaelis-Menten,  $K_m$ ) influenciam diretamente o desempenho. Em ambientes onde a difusão de ureia é limitada, enzimas com maior afinidade podem ser vantajosas.

Além disso, a presença de cofatores metálicos, como níquel, deve ser considerada na formulação do sistema. A deficiência desses cofatores pode limitar a atividade enzimática, mesmo que a bactéria seja geneticamente apta.

### 6.1.5 Segurança microbiológica

Qualquer aplicação em infraestrutura pública exige avaliação rigorosa de biossegurança. Espécies patogênicas ou oportunistas são absolutamente inadequadas.

O microrganismo ideal deve pertencer a classe de risco microbiológico baixo, não produzir toxinas relevantes e não apresentar potencial significativo de transferência horizontal de genes que possam gerar impactos ambientais indesejados.

Além disso, a estabilidade genética é desejável para evitar mutações que comprometam desempenho ou segurança.

### 6.1.6 Durabilidade no interior da matriz cimentícia

A durabilidade bacteriana refere-se à capacidade de manter viabilidade ao longo de anos ou décadas no interior do concreto. Esse parâmetro envolve interação entre biologia e microestrutura do material.

A matriz cimentícia sofre transformações ao longo do tempo, incluindo carbonatação, redução gradual do pH e mudanças na porosidade. Tais alterações podem afetar tanto positivamente quanto negativamente a sobrevivência bacteriana.

Ensaio acelerados de envelhecimento e modelagem de sobrevivência são necessários para estimar a vida útil funcional das bactérias incorporadas.

## 6.2 *Sporosarcina pasteurii*

### 6.2.1 Características microbiológicas

*Sporosarcina pasteurii* é uma bactéria Gram-positiva, aeróbia, formadora de esporos e altamente ureolítica. Seu metabolismo eficiente da ureia e sua robustez em ambientes alcalinos tornaram-na a espécie modelo em estudos de MICP.

Apresenta morfologia cocóide e capacidade de formar biofilmes em superfícies minerais. Sua parede celular rica em peptidoglicano contribui para resistência osmótica e para atuação como sítio de nucleação mineral.

### 6.2.2 Capacidade de precipitação de $CaCO_3$

A eficiência de precipitação de carbonato de cálcio por *S. pasteurii* é amplamente documentada. Em condições ideais, pode gerar quantidades significativas de  $CaCO_3$  em poucas horas, formando predominantemente calcita.

A morfologia cristalina obtida tende a apresentar boa aderência a substratos minerais, favorecendo cimentação intergranular em solos e selamento de fissuras em concreto.

### 6.2.3 Taxa de ureólise

A taxa de ureólise dessa espécie é elevada, com atividade enzimática expressiva mesmo em pH alcalino. Esse desempenho torna o processo relativamente rápido, característica desejável para autorreparo.

Contudo, taxas muito elevadas podem levar à precipitação superficial e heterogênea, exigindo controle adequado de concentração de reagentes.

### 6.2.4 Aplicações experimentais

*S. pasteurii* foi amplamente utilizada em estudos laboratoriais de consolidação de solos, produção de biocimento e concretos autorreparáveis. Sua previsibilidade metabólica contribuiu para padronização inicial da área.

### 6.2.5 Vantagens e limitações

Entre as vantagens estão alta atividade ureolítica e robustez. Entre as limitações, destacam-se custo de cultivo relativamente elevado e necessidade de fornecimento de ureia externa.

## 6.3 *Bacillus* spp.

### 6.3.1 Espécies mais utilizadas

Diversas espécies do gênero *Bacillus* têm sido exploradas, incluindo *Bacillus sphaericus*, *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis*. Muitas apresentam capacidade de esporulação eficiente e tolerância a ambientes extremos.

### 6.3.2 Formação de esporos

Esporos de *Bacillus* são reconhecidos por sua elevada resistência térmica e química. Essa característica favorece sua incorporação direta ou encapsulada na matriz cimentícia.

### 6.3.3 Resistência térmica e alcalina

Espécies do gênero exibem ampla faixa de tolerância térmica e alcalina. Algumas são naturalmente encontradas em solos calcários e ambientes ricos em carbonato.

### 6.3.4 Produção de carbonato

A produção de carbonato pode ocorrer via ureólise ou por outras rotas metabólicas, como degradação de compostos orgânicos com geração de CO<sub>2</sub>.

### **6.3.5 Estudos comparativos**

Estudos comparativos indicam variações significativas entre espécies quanto à taxa de precipitação, estabilidade e eficiência de selamento, reforçando a importância de seleção específica para cada aplicação.

## **6.4 Bactérias Alcalifílicas**

### **6.4.1 Definição e classificação**

Bactérias alcalifílicas são aquelas cujo crescimento ótimo ocorre em pH superior a 9. Podem ser classificadas como alcalifílicas obrigatórias ou facultativas.

### **6.4.2 Adaptação ao pH elevado**

A adaptação envolve sistemas de transporte de íons, proteínas estáveis em meio alcalino e composição lipídica diferenciada da membrana.

### **6.4.3 Desempenho em matrizes cimentícias**

Espécies alcalifílicas apresentam desempenho superior em concreto, mantendo viabilidade por períodos prolongados e atividade metabólica após fissuração.

### **6.4.4 Potencial para aplicações de longo prazo**

Seu potencial reside na capacidade de resistir às condições iniciais severas e permanecer latentes até ativação.

## **6.5 Desempenho Comparativo entre Espécies**

### **6.5.1 Taxa de precipitação**

A taxa de precipitação varia conforme espécie, concentração celular e condições ambientais.

### **6.5.2 Eficiência de selamento**

Eficiência depende não apenas da quantidade de  $\text{CaCO}_3$  produzido, mas da distribuição espacial e aderência à matriz.

### **6.5.3 Durabilidade bacteriana**

Espécies com esporulação robusta apresentam maior durabilidade.

#### 6.5.4 Custo de cultivo

Custos variam conforme meio de cultura, tempo de incubação e escala de produção.

#### 6.5.5 Tabela comparativa técnica

Critério	<i>S. pasteurii</i>	<i>Bacillus spp.</i>	Alcalifílicas diversas
Ureólise	Muito alta	Moderada a alta	Variável
Esporulação	Sim	Sim	Geralmente sim
Resistência alcalina	Alta	Alta	Muito alta
Custo de cultivo	Moderado/Alto	Moderado	Variável
Durabilidade	Alta	Alta	Muito alta

### 6.6 Vida Útil Bacteriana na Matriz

#### 6.6.1 Estado latente (esporo)

No estado de esporo, a bactéria pode permanecer viável por longos períodos, protegida contra desidratação e alcalinidade extrema.

#### 6.6.2 Ativação após fissuração

A entrada de água promove germinação, retomada metabólica e início da precipitação mineral.

#### 6.6.3 Fatores que afetam sobrevivência

Temperatura, variações de pH, carbonatação e difusão de oxigênio influenciam sobrevivência a longo prazo.

#### 6.6.4 Modelagem de degradação biológica

Modelos matemáticos podem descrever decaimento exponencial da viabilidade ao longo do tempo:

$$N(t) = N_0 e^{-kt}$$

onde  $N(t)$  é número de células viáveis no tempo  $t$ ,  $N_0$  é população inicial e  $k$  constante de degradação dependente do ambiente.

A compreensão profunda desses parâmetros é condição indispensável para projetar concretos autorreparáveis com desempenho previsível ao longo do ciclo de vida estrutural.

## Capítulo 7

# Avaliação Experimental

A consolidação científica do concreto autorreparável exige fundamentação experimental rigorosa. A introdução de bactérias, nutrientes, sistemas de encapsulamento e variáveis ambientais adicionais amplia significativamente a complexidade do sistema quando comparado ao concreto convencional. Não se trata apenas de medir resistência à compressão, mas de compreender a interação entre fenômenos mecânicos, químicos e biológicos ao longo do tempo.

A avaliação experimental deve, portanto, ser concebida como um programa integrado, envolvendo planejamento estatisticamente robusto, ensaios mecânicos convencionais e específicos, análises microestruturais detalhadas e interpretação quantitativa de dados. Este capítulo apresenta diretrizes metodológicas aprofundadas para investigação científica e validação tecnológica de concretos autorreparáveis baseados em MICP.

### 7.1 Planejamento Experimental

#### 7.1.1 Definição de variáveis independentes

O primeiro passo no planejamento experimental consiste na definição clara das variáveis independentes, aquelas que serão deliberadamente manipuladas para avaliar seu impacto no desempenho do material. Em sistemas de concreto autorreparável biológico, essas variáveis podem incluir:

- Concentração de esporos bacterianos (células/g de cimento);
- Tipo de espécie bacteriana;
- Concentração de ureia e fonte de cálcio;
- Tipo de encapsulamento;
- Relação água/cimento;
- Condições de cura (temperatura e umidade);

- Idade do concreto no momento da fissuração induzida.

A escolha dessas variáveis deve estar alinhada à hipótese central da pesquisa. Em estudos exploratórios, múltiplos fatores podem ser investigados simultaneamente por meio de planejamento fatorial. Em estudos confirmatórios, recomenda-se reduzir o número de variáveis e concentrar-se em parâmetros de maior impacto.

A definição adequada das variáveis independentes é fundamental para garantir clareza causal. Experimentos mal planejados, com múltiplas alterações simultâneas não controladas, inviabilizam conclusões robustas.

### **7.1.2 Controle de variáveis**

As variáveis de controle são aquelas mantidas constantes durante o experimento para evitar interferências indesejadas. Entre as principais variáveis de controle em estudos com concreto autorreparável destacam-se:

- Tipo e origem do cimento;
- Granulometria dos agregados;
- Procedimento de mistura;
- Geometria dos corpos de prova;
- Método de adensamento;
- Condições de armazenamento.

O controle rigoroso dessas variáveis é ainda mais crítico quando se trabalha com sistemas biológicos, pois pequenas variações ambientais podem afetar significativamente a viabilidade bacteriana.

Além disso, deve-se estabelecer protocolo padronizado para indução de fissuras, caso o objetivo seja avaliar capacidade de autorreparo. Métodos inconsistentes de fissuração geram variabilidade excessiva nos resultados.

### **7.1.3 Número de amostras**

A determinação do número de amostras deve basear-se em análise estatística prévia de poder experimental. Ensaio com número insuficiente de corpos de prova podem gerar resultados inconclusivos ou estatisticamente frágeis.

Em geral, recomenda-se mínimo de três a cinco corpos de prova por condição experimental para ensaios mecânicos, podendo esse número aumentar em estudos comparativos mais complexos. Para análises microestruturais, múltiplas regiões da mesma amostra devem ser examinadas para reduzir viés local.

O dimensionamento amostral deve considerar variabilidade intrínseca do concreto e variabilidade adicional introduzida pelo sistema biológico.

### **7.1.4 Reprodutibilidade**

A reprodutibilidade é pilar da ciência experimental. Para garanti-la, todos os procedimentos devem ser detalhadamente documentados: composição exata da mistura, concentração bacteriana, método de encapsulamento, tempo de mistura e condições de cura.

A repetição de experimentos em diferentes lotes e, idealmente, em diferentes laboratórios, fortalece a validade externa dos resultados. No contexto de materiais bioativos, a reprodutibilidade também depende da estabilidade genética das cepas bacterianas utilizadas.

## **7.2 Ensaio Mecânicos**

### **7.2.1 Resistência à compressão**

A resistência à compressão é o parâmetro mecânico mais tradicionalmente avaliado. Corpos de prova cilíndricos ou prismáticos são submetidos a carregamento axial até ruptura.

Em concretos autorreparáveis, avaliam-se dois momentos principais:

1. Resistência inicial, antes da fissuração;
2. Resistência após ciclo de fissuração e autorreparo.

É essencial verificar se a incorporação bacteriana compromete resistência inicial. Em seguida, deve-se quantificar eventual recuperação após processo de selamento.

### **7.2.2 Resistência à tração por compressão diametral**

O ensaio brasileiro permite estimar resistência à tração indireta. Como a fissuração do concreto ocorre predominantemente por tração, esse parâmetro é especialmente relevante.

Após indução de fissura controlada e período de autorreparo, o ensaio pode ser repetido para avaliar recuperação parcial da capacidade resistente.

### **7.2.3 Ensaio de flexão**

Ensaio de flexão em três ou quatro pontos fornecem informações sobre comportamento à tração na zona inferior do elemento.

A abertura de fissuras pode ser monitorada por extensômetros ou técnicas de correlação digital de imagens. Após período de autorreparo, novo carregamento permite avaliar recuperação de rigidez e capacidade última.

### **7.2.4 Recuperação de resistência pós-fissuração**

A recuperação pode ser expressa como:

$$R_r = \frac{f_{rec}}{f_{orig}} \times 100\%$$

onde  $f_{rec}$  é resistência após autorreparo e  $f_{orig}$  é resistência inicial.

Esse índice permite comparação direta entre diferentes formulações e espécies bacterianas.

## **7.2.5 Avaliação estatística dos resultados**

Os resultados mecânicos devem ser analisados estatisticamente, considerando média, desvio padrão e coeficiente de variação. Diferenças entre grupos devem ser avaliadas por testes apropriados (ver seção de protocolos estatísticos).

## **7.3 Ensaios de Permeabilidade**

### **7.3.1 Permeabilidade à água**

A permeabilidade à água sob pressão é indicador direto da eficácia do selamento de fissuras. Mede-se vazão através do corpo de prova antes e após autorreparo.

Reduções significativas de fluxo indicam sucesso no preenchimento da fissura por  $CaCO_3$ .

### **7.3.2 Absorção capilar**

A absorção capilar avalia taxa de penetração de água por sucção. A diminuição da absorção após autorreparo sugere redução da conectividade porosa.

### **7.3.3 Índice de penetração de cloretos**

Ensaio acelerados de migração de cloretos permitem estimar durabilidade frente à corrosão das armaduras. A precipitação de carbonato pode reduzir difusividade efetiva.

### **7.3.4 Comparação antes e depois do autorreparo**

A análise comparativa deve quantificar percentual de redução de permeabilidade e correlacioná-lo com dados microestruturais.

## **7.4 Análise Microestrutural**

### **7.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

A MEV permite visualização detalhada da superfície fissurada e dos cristais precipitados. Imagens de alta resolução revelam morfologia, distribuição espacial e aderência dos cristais.

#### **7.4.2 Identificação de cristais de $CaCO_3$**

A identificação pode ser feita por análise espectroscópica acoplada (EDS), confirmando presença de cálcio, carbono e oxigênio.

#### **7.4.3 Morfologia cristalina**

A forma dos cristais (romboédrica, esférica, acicular) fornece indícios sobre polimorfo predominante e condições de precipitação.

#### **7.4.4 Análise de porosidade**

Técnicas como porosimetria por intrusão de mercúrio permitem quantificar redução da porosidade total e da distribuição de tamanhos de poros.

### **7.5 Difração de Raios X (DRX)**

#### **7.5.1 Identificação de fases minerais**

A DRX permite identificar fases cristalinas presentes no material reparado, distinguindo calcita, vaterita e aragonita.

#### **7.5.2 Quantificação de calcita**

A intensidade dos picos característicos pode ser utilizada para estimar fração relativa de calcita precipitada.

#### **7.5.3 Presença de vaterita ou aragonita**

A identificação de polimorfos metastáveis fornece informações sobre cinética de precipitação e estabilidade a longo prazo.

#### **7.5.4 Interpretação dos difratogramas**

A análise exige comparação com padrões cristalográficos e consideração da sobreposição com fases cimentícias existentes.

### **7.6 Protocolos Estatísticos**

#### **7.6.1 Teste de normalidade**

Testes como Shapiro–Wilk avaliam se dados seguem distribuição normal, condição necessária para aplicação de testes paramétricos.

#### **7.6.2 Análise de variância (ANOVA)**

A ANOVA permite verificar se diferenças entre grupos experimentais são estatisticamente significativas.

### **7.6.3 Intervalos de confiança**

Intervalos de confiança de 95% fornecem estimativa da precisão das médias obtidas.

### **7.6.4 Correlação entre variáveis**

Coefficientes de correlação (Pearson ou Spearman) podem avaliar relação entre, por exemplo, quantidade de  $CaCO_3$  precipitado e redução de permeabilidade.

### **7.6.5 Modelagem estatística preditiva**

Modelos de regressão múltipla ou técnicas de aprendizado de máquina podem ser utilizados para prever desempenho em função de variáveis experimentais.

A avaliação experimental, quando conduzida com rigor metodológico e profundidade analítica, transforma o concreto autorreparável de conceito promissor em tecnologia validada. Somente por meio de integração entre ensaios mecânicos, análises microestruturais e tratamento estatístico robusto é possível consolidar a bioengenharia do concreto como disciplina científica madura.

## Capítulo 8

# Projeto de Misturas e Dosagem

O projeto de misturas para concreto autorreparável com incorporação bacteriana não pode ser tratado como simples extensão das metodologias clássicas de dosagem desenvolvidas para concretos convencionais. A presença de um agente biológico ativo — ainda que em estado latente — introduz novas variáveis físico-químicas, cinéticas e mecânicas que transformam o processo de formulação em um problema multifatorial de engenharia de materiais.

Enquanto o concreto convencional é dosado com foco primário na resistência mecânica, durabilidade e trabalhabilidade, o concreto autorreparável exige simultaneamente a otimização da viabilidade bacteriana, da disponibilidade de nutrientes, da cinética de precipitação de carbonato de cálcio e da compatibilidade entre todos os constituintes da mistura. Trata-se, portanto, de um sistema híbrido, no qual interagem fases sólidas minerais, solução alcalina intersticial e microrganismos em estado de dormência ou atividade metabólica.

Este capítulo aprofunda os fundamentos técnicos da dosagem, articulando critérios clássicos da tecnologia do concreto com princípios de microbiologia aplicada e modelagem probabilística.

## 8.1 Princípios Gerais de Dosagem

### 8.1.1 Objetivos de desempenho

O ponto de partida de qualquer projeto de mistura deve ser a definição clara dos objetivos de desempenho. No contexto do concreto autorreparável, tais objetivos podem ser agrupados em quatro dimensões principais:

1. Desempenho mecânico inicial (resistência, módulo de elasticidade, ductilidade);
2. Capacidade de autorreparo (largura máxima de fissura selável, tempo de selamento);

3. Durabilidade aprimorada (redução de permeabilidade, resistência a agentes agressivos);
4. Viabilidade econômica e ambiental.

A dosagem deve equilibrar essas dimensões frequentemente conflitantes. Por exemplo, aumento da porosidade pode favorecer mobilidade de água e ativação bacteriana, mas compromete resistência mecânica inicial. De modo análogo, maior concentração de nutrientes pode acelerar precipitação de  $CaCO_3$ , porém aumentar custo e risco de interferência química.

Assim, a dosagem não deve ser orientada exclusivamente por resistência à compressão aos 28 dias, mas por um conjunto de critérios multidimensionais que reflitam o desempenho ao longo do ciclo de vida da estrutura.

### **8.1.2 Compatibilidade cimento-bactéria**

A compatibilidade entre o cimento Portland e as bactérias incorporadas constitui questão central. O ambiente cimentício fresco apresenta pH entre 12,5 e 13,5, elevada concentração de hidróxido de cálcio e calor de hidratação significativo. Essas condições são hostis à maioria dos microrganismos.

A seleção de cepas alcalifílicas e esporuladas minimiza o impacto dessas condições extremas. Entretanto, a compatibilidade não se restringe à sobrevivência biológica. Deve-se considerar:

- Interferência da atividade bacteriana na hidratação do cimento;
- Adsorção de nutrientes na superfície das partículas cimentícias;
- Possível formação prematura de precipitados antes da fissuração.

Estudos indicam que a encapsulação ou imobilização bacteriana em agregados leves ou matrizes porosas pode reduzir contato direto com a solução altamente alcalina, aumentando taxa de sobrevivência sem comprometer o desenvolvimento da matriz cimentícia.

### **8.1.3 Controle de trabalhabilidade**

A incorporação de bactérias, cápsulas ou agregados impregnados altera reologia do concreto fresco. A trabalhabilidade deve ser cuidadosamente controlada para evitar segregação e perda de homogeneidade.

A introdução de partículas encapsuladas pode aumentar atrito interno e reduzir abatimento. Superplastificantes tornam-se frequentemente necessários, mas sua compatibilidade com a atividade biológica deve ser avaliada (ver seção específica).

A trabalhabilidade ideal deve permitir lançamento e adensamento adequados sem comprometer distribuição uniforme dos agentes autorreparadores.

## 8.2 Relação Água/Cimento

### 8.2.1 Influência na resistência mecânica

A relação água/cimento (a/c) permanece como parâmetro dominante na definição da resistência mecânica. Relações mais baixas produzem matriz mais densa e resistente, porém menos permeável.

No concreto autorreparável, a redução excessiva da relação a/c pode dificultar transporte de água até o interior das fissuras, limitando ativação bacteriana. Portanto, a relação ótima não é necessariamente a mínima possível.

### 8.2.2 Influência na viabilidade bacteriana

A água desempenha papel duplo: participa da hidratação do cimento e atua como meio de transporte para nutrientes e íons necessários à MICP. Após endurecimento, a disponibilidade de água nas fissuras é condição essencial para germinação de esporos.

Concretos com relação a/c muito baixa apresentam microestrutura altamente densa, dificultando mobilidade de soluções nutritivas. Por outro lado, relações muito elevadas aumentam porosidade e podem reduzir resistência inicial.

### 8.2.3 Compromisso entre porosidade e autorreparo

O projeto de mistura deve encontrar compromisso ótimo entre:

Resistência mecânica vs. Capacidade de autorreparo

Uma matriz excessivamente densa pode apresentar excelente desempenho inicial, mas baixa capacidade de ativação biológica. Uma matriz demasiadamente porosa facilita autorreparo, porém compromete integridade estrutural.

Esse equilíbrio depende da aplicação estrutural prevista, ambiente de exposição e nível de desempenho requerido.

### 8.2.4 Faixas recomendadas

Com base em estudos experimentais, relações a/c típicas para concreto autorreparável situam-se entre 0,40 e 0,50, embora aplicações específicas possam justificar valores fora dessa faixa. A definição final deve resultar de validação experimental associada a análise estatística.

## 8.3 Dosagem Bacteriana

### 8.3.1 Concentração celular ideal

A concentração bacteriana influencia diretamente taxa de precipitação de  $CaCO_3$  e eficiência de selamento. Entretanto, aumento indiscriminado da concentração não implica necessariamente melhor desempenho.

Concentrações excessivas podem:

- Elevar custo significativamente;
- Interferir na hidratação do cimento;
- Gerar precipitação prematura indesejada.

A concentração ideal deve garantir número suficiente de células viáveis por unidade de volume fissurado, considerando taxa de ativação esperada.

### **8.3.2 Quantidade de esporos por $m^3$**

Valores típicos relatados na literatura variam entre  $10^6$  e  $10^9$  esporos por grama de cimento, resultando em bilhões de esporos por metro cúbico de concreto. Entretanto, a dosagem deve ser ajustada conforme:

- Volume estimado de fissuração ao longo da vida útil;
- Espessura média das fissuras;
- Taxa de sobrevivência esperada durante mistura.

### **8.3.3 Proporção de nutrientes**

A precipitação de carbonato de cálcio depende não apenas da presença bacteriana, mas também de substratos adequados, como ureia e fontes de cálcio.

A proporção de nutrientes deve ser suficiente para promover selamento completo das fissuras críticas previstas. No entanto, excesso pode provocar formação indesejada de precipitados na matriz intacta.

O dimensionamento pode ser estimado a partir da estequiometria da reação de precipitação, relacionando massa de  $CaCO_3$  necessária ao volume de fissura.

### **8.3.4 Custos associados**

O custo da componente biológica ainda representa parcela significativa do preço final do concreto autorreparável. A análise econômica deve considerar:

- Custo de cultivo bacteriano;
- Processos de secagem e esporulação;
- Encapsulamento;
- Armazenamento e logística.

A viabilidade comercial depende da redução progressiva desses custos por meio de escala industrial.

## **8.4 Interação com Aditivos Químicos**

### **8.4.1 Superplastificantes**

Superplastificantes à base de policarboxilatos são frequentemente utilizados para manter trabalhabilidade em baixas relações a/c. Contudo, sua ação dispersante pode alterar distribuição de cápsulas ou partículas biológicas.

Além disso, a adsorção dessas moléculas na superfície bacteriana pode influenciar viabilidade celular.

### **8.4.2 Incorporadores de ar**

Incorporadores de ar introduzem microbolhas estáveis que aumentam resistência a ciclos gelo-degelo. Contudo, a presença dessas bolhas modifica a microestrutura e pode afetar difusão de nutrientes.

É necessário avaliar se a distribuição de vazios influencia eficiência de autorreparo.

### **8.4.3 Retardadores**

Retardadores de pega podem alterar cinética de hidratação e temperatura interna, afetando sobrevivência bacteriana durante fase inicial.

### **8.4.4 Compatibilidade química**

Testes laboratoriais específicos devem verificar se aditivos interferem na atividade ureolítica ou na precipitação de carbonato.

### **8.4.5 Impacto na atividade biológica**

Ensaio bioquímicos podem quantificar atividade ureásica na presença de diferentes aditivos, permitindo seleção de combinações compatíveis.

## **8.5 Modelagem Probabilística**

### **8.5.1 Variabilidade de resistência**

A resistência do concreto é variável aleatória influenciada por dispersão inerente dos materiais e do processo construtivo. Em concreto autorreparável, essa variabilidade pode aumentar devido à distribuição heterogênea de agentes biológicos.

Modelos probabilísticos permitem estimar distribuição estatística da resistência e definir níveis de confiabilidade.

### **8.5.2 Probabilidade de fissuração**

A fissuração estrutural pode ser modelada como evento probabilístico dependente de tensões, retração, fluência e ações externas.

A análise de confiabilidade estrutural pode estimar probabilidade de ocorrência de fissuras superiores à largura crítica de autorreparo.

### **8.5.3 Probabilidade de autorreparo bem-sucedido**

A eficiência de autorreparo depende de múltiplos fatores: presença de água, viabilidade bacteriana, disponibilidade de nutrientes e dimensão da fissura.

Pode-se definir variável indicadora de sucesso  $S$  tal que:

$$S = 1 \quad \text{se fissura for completamente selada}$$

A probabilidade  $P(S = 1)$  pode ser modelada em função das variáveis mencionadas.

### **8.5.4 Simulação Monte Carlo aplicada**

A simulação Monte Carlo permite incorporar incertezas nas variáveis de entrada (resistência, largura de fissura, concentração bacteriana) e estimar distribuição probabilística do desempenho global.

Essa abordagem é particularmente útil para avaliar risco residual e comparar diferentes estratégias de dosagem.

### **8.5.5 Confiabilidade estrutural**

A integração entre modelos mecânicos e probabilísticos permite calcular índice de confiabilidade estrutural  $\beta$ , considerando capacidade resistente recuperada após autorreparo.

O projeto de misturas deixa, assim, de ser apenas exercício empírico e passa a integrar arcabouço de engenharia baseada em desempenho e confiabilidade.

Em síntese, a dosagem do concreto autorreparável representa problema interdisciplinar que exige compreensão simultânea de tecnologia do concreto, microbiologia aplicada, cinética química e análise probabilística. Somente por meio dessa abordagem integrada é possível desenvolver materiais que não apenas resistam, mas que possuam capacidade intrínseca de regeneração ao longo de sua vida útil.

# Biocimentação e Geotecnia

*Fundamentos da Biocimentação; Aplicações Geotécnicas;  
Aplicações Ambientais.*

## Capítulo 9

# Fundamentos da Biocimentação

A biocimentação constitui uma das mais instigantes convergências entre microbiologia, geoquímica e engenharia geotécnica. Ela não surge como mera alternativa técnica, mas como uma inflexão conceitual: ao invés de impor ao solo um ligante externo em larga escala, mobiliza processos biológicos capazes de transformar o próprio espaço poroso em ambiente reativo. Nesse cenário, microrganismos passam a desempenhar papel estrutural, induzindo a precipitação de minerais, sobretudo carbonato de cálcio, que alteram de modo controlado as propriedades hidráulicas e mecânicas do meio granular.

O solo, tradicionalmente compreendido como um sistema particulado cuja resistência deriva essencialmente do atrito entre grãos, passa a incorporar uma dimensão adicional: a cimentação biogênica. O fenômeno mais amplamente estudado nesse contexto é a precipitação de carbonato de cálcio induzida microbiologicamente (MICP), frequentemente associada à hidrólise da ureia por bactérias ureolíticas. Contudo, a biocimentação não se limita a esse mecanismo específico; ela engloba um conjunto mais amplo de vias metabólicas capazes de promover a formação de minerais no interior da matriz porosa.

Este capítulo percorre os fundamentos conceituais, os parâmetros geotécnicos envolvidos, os modelos matemáticos necessários para descrever o fenômeno e os desafios técnicos que emergem quando se busca transpor a tecnologia do laboratório para o campo.

### 9.1 Introdução à Biocimentação

Biocimentar significa introduzir coesão onde antes predominava apenas fricção. Em termos formais, trata-se do processo pelo qual a precipitação biogênica de minerais estabelece pontes intergranulares que aumentam rigidez e resistência ao cisalhamento de um meio particulado. No caso mais recorrente, cristais de  $CaCO_3$  nucleiam nos pontos de contato entre partículas de solo e ali crescem, reduzindo a mobilidade relativa entre os grãos.

Sob perspectiva microestrutural, essa transformação é profunda. O solo deixa de se comportar como um arranjo puramente friccional e passa a adquirir características de um material parcialmente cimentado. Forma-se um compósito solo-mineral biogênico, no qual o carbonato precipitado atua como um cimento natural, distribuído de maneira íntima e adaptativa ao espaço poroso existente.

É importante distinguir biocimentação de bioestabilização. Embora frequentemente empregados como sinônimos, os termos não são equivalentes. A biocimentação refere-se especificamente à formação de ligações minerais capazes de aumentar coesão e rigidez. Já a bioestabilização é conceito mais amplo, abrangendo qualquer processo biológico que melhore o comportamento geotécnico, seja por formação de biofilmes que reduzem permeabilidade, por alteração da química intersticial ou por precipitação de minerais que não necessariamente desempenham papel cimentante relevante. Toda biocimentação é uma forma de bioestabilização, mas nem toda bioestabilização implica efetiva cimentação mineral.

Historicamente, a observação de precipitação microbiana de carbonato remonta a estudos do século XIX sobre formações calcárias naturais. Entretanto, sua aplicação deliberada em engenharia geotécnica consolidou-se apenas nas últimas décadas, impulsionada por avanços experimentais e pela necessidade de soluções mais sustentáveis. Inicialmente investigada como estratégia de mitigação da liquefação sísmica em areias, a técnica evoluiu para aplicações que incluem controle de erosão, estabilização de taludes, redução de permeabilidade em barragens e reforço de fundações rasas.

Comparada aos métodos convencionais, como injeção de cimento Portland ou cal, a biocimentação apresenta vantagens potenciais significativas. A produção de cimento é intensiva em emissões de  $\text{CO}_2$ , enquanto a biocimentação, dependendo da rota metabólica utilizada, pode reduzir substancialmente esse impacto. Além disso, as soluções injetadas possuem baixa viscosidade, favorecendo penetração em solos granulares onde pastas cimentícias encontram limitações. A rigidez pode ser aumentada de forma gradual e controlada, e o processo tende a ser menos agressivo em ambientes sensíveis.

## 9.2 MICP Aplicada a Solos

No contexto geotécnico, a precipitação ocorre no interior dos vazios do solo. A solução contendo ureia e íons cálcio percola o meio poroso, e a atividade ureolítica eleva o pH local, promovendo a formação de carbonato que reage com o cálcio dissolvido, resultando em precipitação de  $\text{CaCO}_3$  sólido.

A nucleação mineral tende a ocorrer preferencialmente nas superfícies minerais e, de modo especial, nos pontos de contato entre partículas. Esses locais oferecem condições energéticas favoráveis ao crescimento cristalino. À medida que os cristais se desenvolvem, formam-se “pescoços” minerais que conectam grãos adjacentes, consolidando uma rede cimentante distribuída.

A porosidade inicial desempenha papel central nesse processo. Solos muito densos dificultam a injeção e a distribuição homogênea dos reagentes; solos excessivamente soltos, por outro lado, podem demandar maiores quantidades

de precipitado para alcançar ganhos mecânicos significativos. À medida que o carbonato se acumula, a porosidade diminui, alterando o regime de fluxo e tornando o sistema altamente não linear.

A granulometria também exerce influência decisiva. O tamanho médio dos grãos determina a dimensão dos poros e a permeabilidade inicial, enquanto a distribuição granulométrica controla o número de pontos de contato por unidade de volume. Areias uniformes tendem a apresentar comportamento mais previsível; solos com ampla faixa granulométrica podem gerar heterogeneidades marcantes na distribuição do precipitado.

### 9.3 Parâmetros Geotécnicos Fundamentais

A transformação promovida pela biocimentação manifesta-se nos parâmetros clássicos da mecânica dos solos. O índice de vazios  $e$ , definido como a razão entre volume de vazios e volume de sólidos, é progressivamente reduzido pelo preenchimento parcial dos poros com carbonato. Essa redução influencia diretamente compressibilidade e resistência.

De forma correlata, a porosidade  $n$ , razão entre volume de vazios e volume total, diminui ao longo do tratamento, alterando o comportamento hidráulico do meio. A permeabilidade, descrita pelo coeficiente  $k$ , tende a decrescer com a precipitação de  $CaCO_3$ ; contudo, essa relação não é linear, pois depende da conectividade dos poros remanescentes.

No plano mecânico, a resistência ao cisalhamento pode ser descrita pela expressão de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (9.1)$$

A biocimentação atua principalmente elevando o intercepto coesivo  $c'$ , ainda que modificações no ângulo de atrito efetivo  $\phi'$  também possam ocorrer em função da alteração da microestrutura. Paralelamente, o módulo de deformabilidade aumenta com o grau de cimentação. Ensaio triaxiais demonstram que pequenas quantidades de carbonato já são suficientes para elevar significativamente a rigidez inicial do solo.

### 9.4 Modelagem Geotécnica Acoplada

Descrever matematicamente a biocimentação exige abordagem multiphísica. O processo envolve fluxo em meios porosos, transporte de espécies químicas, reações biológicas e alterações mecânicas estruturais.

O fluxo de fluidos pode ser representado pela Lei de Darcy:

$$\mathbf{q} = -k \nabla h \quad (9.2)$$

na qual a permeabilidade  $k$  não é constante, mas evolui com a precipitação mineral.

O transporte de espécies químicas segue a equação de advecção-difusão-reação:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D\nabla C + \mathbf{v}C) = R(C) \quad (9.3)$$

onde o termo  $R(C)$  incorpora a cinética bioquímica das reações envolvidas.

À medida que o carbonato se deposita, modifica-se a estrutura do solo, alterando tensões efetivas e comportamento constitutivo. Modelos avançados incorporam variáveis internas associadas ao grau de cimentação. A resolução numérica, frequentemente via método dos elementos finitos, permite simular domínios complexos, ciclos de injeção e evolução temporal do tratamento, considerando ainda heterogeneidades naturais do solo em escala de campo.

## 9.5 Distribuição Heterogênea de Precipitados

Um dos principais desafios práticos reside na tendência à formação não uniforme de  $CaCO_3$ . A precipitação frequentemente se concentra nas proximidades dos pontos de injeção, criando gradientes espaciais de cimentação. A velocidade de injeção influencia esse padrão: fluxos elevados podem transportar reagentes mais profundamente, mas reduzem o tempo de residência necessário à reação; fluxos baixos favorecem precipitação precoce e possível entupimento local.

Gradientes de concentração química determinam zonas de maior ou menor formação mineral, e distribuições heterogêneas podem resultar em regiões estruturalmente frágeis. Técnicas de monitoramento, como tomografia computadorizada e métodos sísmicos, tornam-se ferramentas essenciais para avaliar a distribuição espacial do tratamento.

## 9.6 Controle de Injeção em Campo

A implementação em campo exige controle refinado de variáveis operacionais. A injeção pode ser realizada por ponteiros diretas, por percolação superficial ou por sistemas de múltiplos poços estrategicamente distribuídos. A pressão aplicada deve superar a resistência hidráulica do solo sem induzir fraturamento hidráulico indesejado. A vazão controla o tempo de contato entre reagentes e matriz granular, influenciando a eficiência de reação.

Frequentemente empregam-se ciclos alternados de injeção de bactérias e soluções nutritivas para melhorar a uniformidade do tratamento. Sensores de pressão, condutividade elétrica e pH permitem monitoramento em tempo real, enquanto critérios de parada podem basear-se na redução de permeabilidade, no volume total injetado ou na resistência alvo previamente estabelecida.

## 9.7 Ensaios Geotécnicos Aplicados

A avaliação do desempenho do solo tratado requer ensaios clássicos adaptados ao novo contexto microestrutural. O ensaio triaxial permite determinar parâmetros de resistência e rigidez sob diferentes estados de confinamento; o ensaio de cisalhamento direto evidencia o ganho de coesão decorrente da ci-

mentação; ensaios de permeabilidade quantificam a redução de fluxo; ensaios de compressibilidade avaliam a mitigação de recalques potenciais.

A interpretação dos resultados deve considerar a variabilidade espacial da precipitação e a relação entre teor de  $CaCO_3$  e parâmetros mecânicos, reconhecendo que a eficiência estrutural depende não apenas da quantidade, mas da distribuição do mineral precipitado.

## 9.8 Limitações e Desafios Técnicos

Apesar de seu potencial transformador, a biocimentação enfrenta desafios significativos. O escalonamento de volumes laboratoriais para aplicações em campo impõe dificuldades de controle de uniformidade e de custos operacionais. A hidrólise da ureia pode liberar amônia, exigindo avaliação ambiental cuidadosa. A produção bacteriana em escala, a logística de injeção e o monitoramento contínuo representam componentes relevantes do custo total.

Por fim, a consolidação da biocimentação como tecnologia corrente depende da padronização de procedimentos e do desenvolvimento de normas técnicas específicas que estabeleçam critérios de projeto, execução e controle.

A biocimentação não é apenas uma técnica emergente; ela representa uma mudança paradigmática na engenharia geotécnica. Ao incorporar processos biológicos como instrumentos de modificação estrutural do solo, integra ciência dos materiais, microbiologia e mecânica dos solos em uma abordagem genuinamente interdisciplinar.

## Capítulo 10

# Aplicações Geotécnicas

A aplicação da biocimentação em engenharia geotécnica representa uma transformação conceitual profunda. Em vez de introduzir grandes volumes de ligantes externos ao solo, promove-se a formação *in situ* de um cimento mineral biogênico que modifica progressivamente o comportamento mecânico e hidráulico do maciço. O solo deixa de ser apenas um meio granular passivo e passa a integrar um sistema reativo, no qual processos biogeoquímicos induzem reorganizações estruturais internas capazes de alterar resistência, rigidez e permeabilidade.

Essa abordagem permite intervenções potencialmente menos invasivas, com maior controle microestrutural e menor pegada de carbono quando comparada a técnicas tradicionais baseadas em cimento Portland ou cal. Mais do que uma técnica alternativa, trata-se de uma ampliação do repertório geotécnico contemporâneo, incorporando princípios da microbiologia aplicada à engenharia de solos.

Neste capítulo são exploradas as principais aplicações geotécnicas da biocimentação, com aprofundamento técnico sobre mecanismos de melhoria, implicações estruturais e comparação com métodos convencionais.

### 10.1 Estabilização de Solos Arenosos

Solos arenosos apresentam comportamento predominantemente friccional, baixa coesão e elevada permeabilidade. Embora possuam boa drenagem natural, são suscetíveis à erosão, recalques excessivos e, em condições sísmicas, liquefação. A biocimentação atua diretamente na estrutura granular, promovendo ligações interparticulares por meio da precipitação de  $CaCO_3$  nos pontos de contato entre grãos.

O aumento da resistência ao cisalhamento decorre principalmente da introdução de um componente coesivo ao solo. Pela envoltória de Mohr–Coulomb,

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (10.1)$$

a biocimentação tende a elevar o parâmetro de coesão efetiva  $c'$ , en-

quanto o ângulo de atrito  $\phi'$  permanece aproximadamente constante ou sofre pequenas variações associadas à alteração da rugosidade intergranular. Mesmo pequenas quantidades de carbonato precipitado — da ordem de 1 a 3% em massa, podem duplicar ou triplicar a resistência não confinada em areias uniformes, desde que a distribuição espacial do precipitado seja relativamente homogênea. O ganho mecânico depende do número de pontes cimentantes formadas, do grau de confinamento e da conectividade dessas ligações.

A redução da erodibilidade constitui outro efeito relevante. Quando as partículas deixam de se mover livremente sob ação hidráulica, o desprendimento granular diminui significativamente. O carbonato biogênico cria uma estrutura parcialmente rígida, capaz de resistir ao arraste hidráulico superficial e interno. Essa aplicação mostra-se particularmente promissora em obras costeiras, leitos de rios e na proteção de fundações contra fenômenos de piping.

No que diz respeito ao controle de recalques, o aumento do módulo de deformabilidade reduz a compressibilidade do solo sob carregamento estrutural. O módulo edométrico pode apresentar crescimento expressivo, sobretudo em areias inicialmente soltas e tratadas de forma homogênea. A consequência prática é a mitigação de recalques totais e diferenciais, com melhoria global do desempenho da fundação.

## 10.2 Mitigação de Liquefação

A liquefação é um fenômeno no qual solos granulares saturados perdem resistência devido ao aumento rápido da poropressão sob carregamento cíclico, como ocorre em eventos sísmicos. A tensão efetiva diminui drasticamente, aproximando-se de zero, e o solo passa a comportar-se como um fluido viscoso, incapaz de sustentar cargas estruturais.

A biocimentação atua em dois níveis complementares. Primeiramente, o aumento da rigidez inicial do solo reduz as deformações volumétricas induzidas por carregamentos cíclicos. Em segundo lugar, as ligações cimentantes dificultam o rearranjo das partículas sob vibração, reduzindo a tendência à contração volumétrica que está na origem da geração de poropressão.

Ensaio triaxiais cíclicos demonstram que solos tratados com MICP apresentam maior número de ciclos necessários para atingir a condição de liquefação, menor deformação acumulada e maior resistência residual após carregamento. Ainda que o solo não se torne completamente imune ao fenômeno, a severidade e a velocidade de degradação estrutural são significativamente reduzidas.

## 10.3 Estabilização de Taludes

O fator de segurança (FS) de um talude depende da relação entre a resistência ao cisalhamento disponível e as tensões mobilizadas ao longo de superfícies potenciais de ruptura. Ao elevar a coesão efetiva e aumentar a rigidez do maciço, a biocimentação contribui diretamente para o aumento do FS.

A aplicação pode ser superficial, formando uma crosta cimentada que protege contra erosão pluvial, ou localizada em camadas críticas, criando zonas

reforçadas que funcionam como verdadeiras “costuras minerais” no interior do maciço. Essa estratégia permite intervenções direcionadas, com menor volume tratado e maior eficiência estrutural.

Em encostas naturais sensíveis, a técnica apresenta vantagem adicional por não exigir escavações extensas nem a inserção de grandes volumes de concreto projetado. O tratamento pode ser realizado por injeções controladas, preservando a morfologia e reduzindo impactos ambientais e paisagísticos.

## 10.4 Reforço de Fundações

A capacidade de carga última de fundações rasas depende diretamente dos parâmetros de resistência do solo de apoio. O aumento da coesão e da rigidez promovido pela biocimentação amplia a capacidade resistente e reduz deformações associadas ao carregamento.

Tratamentos localizados sob sapatas ou blocos de fundação podem equalizar a rigidez do subsolo, mitigando recalques diferenciais que frequentemente comprometem o desempenho estrutural. Uma das aplicações mais promissoras reside no reforço de fundações já existentes. Por meio de injeções controladas, é possível melhorar o solo de apoio sem necessidade de escavações extensas ou interrupção significativa das operações da estrutura.

## 10.5 Controle de Permeabilidade

A precipitação de carbonato reduz a conectividade dos poros, promovendo selamento progressivo dos vazios. A redução do coeficiente de permeabilidade pode atingir uma ou duas ordens de magnitude, dependendo do teor de  $CaCO_3$  precipitado e da distribuição do tratamento.

Essa aplicação é particularmente relevante em barragens e diques, onde a mitigação da percolação excessiva e do risco de piping é essencial para a segurança hidráulica. Ao reduzir o fluxo subterrâneo, a biocimentação contribui para a estabilidade global da estrutura, podendo atuar como barreira complementar a sistemas convencionais de impermeabilização.

## 10.6 Comparação com Técnicas Tradicionais

A compreensão do potencial da biocimentação torna-se mais clara quando comparada às técnicas tradicionais de melhoria de solos.

O Jet Grouting baseia-se na utilização de jatos de alta pressão para misturar o solo com cimento, formando colunas rígidas de elevada resistência. Trata-se de método altamente eficiente do ponto de vista mecânico, capaz de atingir grandes profundidades com controle geométrico preciso. Entretanto, apresenta custos elevados, demanda equipamentos especializados e envolve consumo significativo de cimento, associado a altas emissões de  $CO_2$  e geração de resíduos. Além disso, a elevada rigidez das colunas pode criar descontinuidades acentuadas em relação ao solo adjacente.

O solo-cimento, por sua vez, consiste na mistura mecânica *in situ* do solo com cimento. Embora proporcione boa durabilidade e resistência elevada,

depende de alto consumo de ligante convencional e, conseqüentemente, de significativa emissão de dióxido de carbono durante a produção do cimento.

A injeção de cal baseia-se em reações pozolânicas entre a cal e minerais argilosos, formando compostos cimentantes ao longo do tempo. O impacto ambiental é inferior ao do cimento Portland, mas ainda envolve processos de calcinação de calcário. As reações podem ser relativamente lentas e dependem fortemente da composição mineralógica do solo, podendo ocorrer variações volumétricas associadas a reações secundárias.

Quando comparada a essas técnicas, a biocimentação apresenta resistência mecânica que varia de moderada a elevada, dependendo do teor e da distribuição de  $CaCO_3$ . Seu impacto ambiental é potencialmente inferior, sobretudo quando se consideram alternativas metabólicas que minimizam subprodutos indesejáveis. O custo por metro cúbico tratado é variável e ainda dependente de escala e otimização operacional, enquanto a complexidade executiva situa-se em nível intermediário, exigindo controle bioquímico e monitoramento adequado.

## 10.7 Síntese Comparativa

De forma consolidada, pode-se afirmar que o Jet Grouting oferece resistência muito elevada, porém com alto custo e elevado impacto ambiental. O solo-cimento apresenta resistência elevada, com impacto igualmente significativo. A estabilização com cal proporciona resistência moderada e impacto ambiental intermediário. A biocimentação, por sua vez, situa-se entre resistência moderada e elevada, com potencial de sustentabilidade superior, especialmente quando integrada a estratégias de otimização ambiental.

A biocimentação não substitui integralmente as técnicas tradicionais, mas amplia o leque de soluções geotécnicas sustentáveis. Sua aplicação estratégica pode reduzir emissões, melhorar desempenho mecânico e permitir intervenções menos invasivas. Assim, consolida-se como tecnologia promissora na engenharia geotécnica contemporânea, especialmente em um contexto no qual eficiência estrutural e responsabilidade ambiental tornam-se exigências indissociáveis.

## Capítulo 11

# Aplicações Ambientais

A biocimentação, inicialmente desenvolvida no contexto da engenharia geotécnica, revela um alcance que ultrapassa a mera melhoria mecânica dos solos. Quando observada sob a perspectiva ambiental, ela se apresenta como uma tecnologia capaz de integrar estabilização física, mitigação de impactos e estratégias de sustentabilidade em uma mesma abordagem técnico-biológica. O que antes era apenas um mecanismo de reforço estrutural passa a configurar também um instrumento de engenharia ambiental aplicada.

A interseção entre processos biogeoquímicos e gestão ambiental cria um campo fértil para soluções inovadoras. A formação *in situ* de minerais estáveis, a imobilização de contaminantes e a potencial captura de carbono posicionam a biocimentação como tecnologia promissora em um cenário global que exige redução de emissões, controle de passivos ambientais e racionalização do uso de recursos naturais.

### 11.1 Introdução às Aplicações Ambientais

A engenharia ambiental tradicionalmente opera por meio de contenção, remoção ou tratamento físico-químico de contaminantes. A biocimentação introduz uma lógica complementar: ao invés de apenas remover ou isolar, transforma quimicamente o meio, promovendo reações que resultam em estabilização permanente.

Nesse contexto, a bioengenharia assume papel central na mitigação de impactos ambientais. Microrganismos deixam de ser vistos apenas como agentes de degradação ou contaminação e passam a atuar como catalisadores de processos estabilizadores. A manipulação controlada de rotas metabólicas permite direcionar reações de precipitação mineral, alterar a mobilidade de contaminantes e promover modificações estruturais que reduzem riscos ambientais de longo prazo.

## 11.2 Captura Biogênica de Carbono

Um dos aspectos mais relevantes das aplicações ambientais da biocimentação é sua capacidade de promover a formação de carbonato estável. Durante o processo de precipitação de  $CaCO_3$ , o carbono é incorporado a uma fase mineral sólida, termodinamicamente estável em condições ambientais comuns.

A fixação mineral permanente diferencia-se de formas temporárias de captura biológica. Enquanto processos baseados em biomassa dependem da manutenção do carbono em estruturas orgânicas suscetíveis à decomposição, a mineralização converte o carbono em carbonato, cuja estabilidade pode se estender por escalas geológicas.

Comparativamente aos métodos convencionais de captura e armazenamento de carbono (CCS), que frequentemente envolvem compressão e injeção de  $CO_2$  em formações profundas, a captura biogênica associada à biocimentação pode ocorrer em ambientes superficiais e integrados a obras de engenharia. Embora o volume capturado por unidade de solo tratado ainda seja objeto de investigação, o potencial de integração com projetos geotécnicos amplia a relevância estratégica da tecnologia.

O potencial de neutralidade climática depende do balanço entre o carbono fixado na forma mineral e as emissões associadas à produção de reagentes, transporte e operação. A modelagem do balanço de carbono deve considerar entradas e saídas ao longo de todo o processo, incluindo emissões indiretas. Em termos simplificados, pode-se expressar o balanço líquido como:

$$C_{liquido} = C_{fixado} - C_{emitido} \quad (11.1)$$

onde  $C_{fixado}$  representa o carbono incorporado ao carbonato precipitado e  $C_{emitido}$  corresponde às emissões totais associadas ao processo. A condição de neutralidade climática é alcançada quando  $C_{liquido} \leq 0$ .

## 11.3 Imobilização de Metais Pesados

A precipitação de carbonato não atua apenas na cimentação do solo, mas também pode incorporar íons metálicos na estrutura cristalina ou promover sua coprecipitação. Metais como chumbo, cádmio e zinco podem formar carbonatos pouco solúveis ou serem adsorvidos na superfície dos cristais formados.

A redução da mobilidade decorre da diminuição da fração dissolvida desses metais na água intersticial. Ao serem incorporados a fases sólidas estáveis, sua biodisponibilidade e potencial de transporte diminuem significativamente. Essa característica torna a biocimentação uma ferramenta promissora para estabilização de solos contaminados.

Em áreas industriais desativadas, aterros ou zonas impactadas por atividades minerárias, o tratamento *in situ* pode reduzir riscos sem necessidade de escavação extensiva. A avaliação de risco ambiental deve considerar a estabilidade química das fases formadas, possíveis variações de pH e condições redox, além da durabilidade do processo ao longo do tempo.

## 11.4 Remediação Sustentável

A remediação tradicional frequentemente envolve escavação, transporte e disposição externa de solos contaminados, com elevado consumo energético e geração de emissões associadas. A biocimentação oferece alternativa baseada no tratamento *in situ*, reduzindo a necessidade de movimentação de material.

A redução de escavação implica menor perturbação ambiental e menor exposição ocupacional a contaminantes. Além disso, o consumo energético tende a ser inferior ao de processos térmicos ou físico-químicos convencionais.

A análise de ciclo de vida ambiental (ACV) constitui ferramenta essencial para avaliar a sustentabilidade do processo. Devem ser considerados os impactos desde a produção de reagentes até o monitoramento pós-aplicação. Em muitos cenários, a integração da biocimentação a estratégias de economia circular pode reduzir significativamente a pegada ambiental total.

## 11.5 Economia Circular Aplicada

A incorporação de princípios de economia circular amplia o potencial ambiental da biocimentação. Resíduos industriais ricos em cálcio, como escórias siderúrgicas ou cinzas específicas, podem ser utilizados como fontes alternativas de íons cálcio, reduzindo a necessidade de matérias-primas virgens.

De forma semelhante, efluentes contendo compostos nitrogenados podem servir como fontes de nutrientes para microrganismos, desde que adequadamente tratados e controlados. Essa integração transforma passivos ambientais em insumos produtivos, promovendo sinergias entre diferentes cadeias industriais.

A valorização de subprodutos reforça a lógica de fechamento de ciclos materiais. Ao converter resíduos em insumos para processos de estabilização ambiental, a biocimentação contribui para a redução do descarte e para o aumento da eficiência sistêmica das cadeias produtivas locais.

## 11.6 Avaliação Ambiental Integrada

A avaliação ambiental integrada exige o uso de indicadores de sustentabilidade que permitam comparar diferentes soluções tecnológicas. Entre os principais indicadores destacam-se a pegada de carbono, a pegada hídrica e o consumo energético total.

A pegada de carbono quantifica as emissões de gases de efeito estufa associadas ao processo, enquanto a pegada hídrica avalia o volume de água utilizado direta e indiretamente. A comparação com métodos convencionais deve considerar não apenas emissões diretas, mas também impactos indiretos decorrentes da produção de cimento, transporte de materiais e disposição de resíduos.

Em muitos cenários, a biocimentação apresenta desempenho ambiental favorável, sobretudo quando associada a fontes alternativas de reagentes e a estratégias de otimização operacional. Contudo, a superioridade ambiental não é automática e depende do contexto específico de aplicação.

## 11.7 Desafios Regulatórios e Ambientais

A implementação em campo está sujeita a processos de licenciamento ambiental, que devem avaliar riscos potenciais associados à introdução de microrganismos e reagentes químicos no solo. A conformidade regulatória exige demonstração de segurança, eficácia e ausência de impactos adversos significativos.

A segurança biológica em campo envolve o controle das cepas utilizadas, a prevenção de dispersão indesejada e a avaliação de possíveis efeitos ecológicos. Protocolos de biossegurança devem ser claramente estabelecidos antes da aplicação em larga escala.

O monitoramento pós-aplicação constitui etapa fundamental para verificar estabilidade das fases minerais formadas, evolução das concentrações de contaminantes e possíveis alterações químicas ao longo do tempo. A aceitação pública, por sua vez, depende da transparência técnica, da comunicação adequada dos riscos e benefícios e da construção de confiança social em tecnologias baseadas em processos biológicos.

A biocimentação, quando inserida em um arcabouço regulatório robusto e acompanhada por avaliação ambiental rigorosa, pode consolidar-se como instrumento relevante na transição para práticas de engenharia mais sustentáveis. Ao integrar estabilização geotécnica, captura mineral de carbono e remediação ambiental, ela amplia o horizonte da engenharia contemporânea, aproximando infraestrutura e responsabilidade ecológica de maneira estrutural e duradoura.

# Materiais Bioinspirados e Inteligentes

*Estruturas Naturais como Modelo; Materiais Inteligentes  
Biológicos; Integração com Engenharia Digital; .*

## Capítulo 12

# Estruturas Naturais como Modelo

### 12.1 Introdução à Biomimética na Engenharia Civil

#### 12.1.1 Conceito de biomimética

A biomimética constitui uma das mais sofisticadas aproximações contemporâneas entre ciência, engenharia e natureza. Mais do que mera observação de formas naturais, trata-se de um campo disciplinar que investiga princípios organizacionais, estratégias estruturais e mecanismos de adaptação desenvolvidos ao longo de milhões de anos de evolução biológica, com o objetivo de reinterpretá-los sob a ótica da engenharia. A natureza não opera por excesso; ela opera por eficiência, economia de material e máxima funcionalidade. Nesse sentido, a biomimética propõe uma mudança paradigmática: em vez de impor soluções artificiais sobre o meio físico, busca-se aprender com os sistemas naturais que já resolveram, com notável elegância, problemas estruturais complexos.

#### 12.1.2 Diferença entre bioinspiração e biomimetismo estrutural

É importante distinguir, contudo, entre bioinspiração e biomimetismo estrutural. A bioinspiração refere-se à adoção de formas ou padrões visuais provenientes da natureza, frequentemente aplicados com finalidade estética ou conceitual. Já o biomimetismo estrutural envolve a compreensão profunda da lógica interna de organização do material natural, sua microestrutura, seus mecanismos de dissipação de energia, sua hierarquia interna, e a tradução desses princípios em sistemas construtivos equivalentes. Enquanto a bioinspiração pode permanecer no plano formal, o biomimetismo estrutural exige decodificação mecânica, modelagem física e adaptação tecnológica.

### **12.1.3 Importância da arquitetura hierárquica natural**

No centro dessa discussão encontra-se o conceito de arquitetura hierárquica. Materiais naturais raramente são homogêneos; ao contrário, apresentam organização em múltiplas escalas, nas quais estruturas nanométricas influenciam comportamentos macroscópicos. Essa hierarquia permite que propriedades aparentemente antagônicas, rigidez e tenacidade, resistência e leveza, coexistam em um mesmo sistema. A eficiência estrutural emerge da interação entre escalas, não de uma única propriedade isolada.

### **12.1.4 Aplicabilidade na engenharia estrutural**

Na engenharia estrutural, tal compreensão abre caminhos para o desenvolvimento de materiais cimentícios bioinspirados, concretos com microestrutura controlada, sistemas autorregenerativos e estruturas capazes de redistribuir tensões de maneira mais eficiente. A incorporação desses princípios não significa replicar a natureza literalmente, mas reinterpretá-la como matriz conceitual para inovação estrutural sustentável.

## **12.2 Arquitetura Hierárquica em Sistemas Naturais**

### **12.2.1 Estruturas em múltiplas escalas (nano → micro → macro)**

Sistemas naturais organizam-se segundo uma lógica multiescalar que integra níveis nanoestruturais, microestruturais e macroestruturais em um continuum funcional. No nível nanométrico, arranjos cristalinos e moléculas orgânicas estabelecem padrões de ligação. No nível microscópico, tais unidades se organizam em lamelas, fibras ou placas. No nível macroscópico, essas unidades formam conchas, ossos, corais ou exoesqueletos. A resposta mecânica observada na escala estrutural é, portanto, consequência direta dessa organização progressiva.

### **12.2.2 Organização cristalina natural**

A organização cristalina em sistemas biológicos não é aleatória. Cristais de carbonato de cálcio, fosfato ou sílica crescem sob controle biológico preciso, orientando-se segundo direções específicas que maximizam resistência e minimizam fragilidade. Diferentemente de materiais industriais, nos quais o crescimento cristalino pode ocorrer de forma desordenada, a natureza controla nucleação, orientação e tamanho de grão, resultando em anisotropias funcionais estrategicamente posicionadas.

### **12.2.3 Interfaces orgânico-minerais**

Um dos elementos mais fascinantes da arquitetura natural reside nas interfaces orgânico-minerais. Matrizes orgânicas flexíveis intercalam-se com fases minerais rígidas, criando sistemas compósitos altamente eficientes. Essas interfaces não são meros contatos físicos; são zonas de transição onde ocorre redistribuição de tensões e bloqueio de propagação de fissuras. A energia de fratura é dissipada progressivamente, aumentando a tenacidade global do sistema.

### **12.2.4 Dissipação de energia em materiais biológicos**

A dissipação de energia em materiais biológicos ocorre por múltiplos mecanismos simultâneos: deflexão de trincas, microfissuração controlada, deslizamento interlamelar e deformação da matriz orgânica. Em vez de colapsar de forma abrupta, tais materiais absorvem energia gradualmente. Essa característica é particularmente relevante para a engenharia civil, onde falhas frágeis representam risco estrutural significativo.

### **12.2.5 Tolerância a danos em estruturas naturais**

Estruturas naturais são, em geral, tolerantes a danos. Pequenas fissuras não comprometem imediatamente a integridade global do sistema. Essa redundância estrutural e capacidade de redistribuição interna de esforços constitui lição valiosa para o desenvolvimento de concretos e solos tratados biologicamente, nos quais microfissuras podem ser estabilizadas por precipitação mineral ou reorganização interna do material.

## **12.3 Inspiração na Estrutura de *Strombus gigas***

### **12.3.1 Estrutura mineral da concha**

A concha do molusco *Strombus gigas* apresenta notável organização estrutural baseada em lamelas mineralizadas de carbonato de cálcio. Sua geometria espiralada distribui tensões de maneira eficiente, reduzindo concentrações críticas.

### **12.3.2 Composição (aragonita e matriz orgânica)**

Composta predominantemente por aragonita, uma forma cristalina do  $CaCO_3$ , e por uma matriz orgânica proteica, a concha constitui um compósito natural. A fase mineral fornece rigidez; a fase orgânica confere ductilidade e capacidade de deformação controlada.

### **12.3.3 Arranjo lamelar e resistência mecânica**

O arranjo lamelar em camadas alternadas cria barreiras sucessivas à propagação de trincas. Quando uma fissura encontra uma interface, sua trajetória

é desviada, dissipando energia. Esse mecanismo explica a elevada resistência à fratura observada, superior à de cristais monolíticos de aragonita.

### 12.3.4 Mecanismos naturais de dissipação de fratura

A dissipação de fratura ocorre por deflexão, ramificação e microdeslizamento entre lamelas. A energia de fratura,  $G_f$ , aumenta em função do percurso tortuoso da trinca, de modo que:

$$G_f^{composito} > G_f^{monolitico}$$

### 12.3.5 Aplicações inspiradas em compósitos cimentícios

Em compósitos cimentícios, a introdução de camadas com propriedades distintas ou interfaces controladas pode reproduzir comportamento análogo, aumentando tenacidade e resistência ao impacto.

### 12.3.6 Modelagem estrutural inspirada na concha

Modelos numéricos baseados em elementos finitos podem simular arranjos lamelares artificiais, permitindo avaliar distribuição de tensões e modos de fratura inspirados na concha.

## 12.4 Inspiração na Arquitetura Coralínea de *Acropora palmata*

### 12.4.1 Estrutura porosa e leve

O coral *Acropora palmata* desenvolve estrutura altamente porosa, com significativa redução de massa específica sem comprometer estabilidade.

### 12.4.2 Distribuição de tensões na estrutura ramificada

Sua geometria ramificada distribui esforços de flexão e compressão ao longo de múltiplos caminhos estruturais, reduzindo concentrações localizadas.

### 12.4.3 Eficiência estrutural com baixo peso

A eficiência estrutural pode ser interpretada pela relação:

$$\eta = \frac{R}{\rho}$$

onde  $R$  representa resistência mecânica e  $\rho$  a massa específica. Estruturas coralíneas apresentam elevados valores de  $\eta$ .

#### **12.4.4 Inspiração para estruturas cimentícias porosas**

Concretos porosos bioinspirados podem reproduzir essa lógica, otimizando topologia interna para maximizar rigidez com menor consumo de material.

#### **12.4.5 Aplicação em elementos arquitetônicos e geotécnicos**

Elementos arquitetônicos leves, painéis estruturais e solos tratados biologicamente podem se beneficiar dessa concepção ramificada e multiconectada.

### **12.5 Materiais Híbridos Bio-Minerais**

#### **12.5.1 Interface entre matriz orgânica e fase mineral**

Materiais híbridos bio-minerais combinam fases vivas ou orgânicas com matrizes inorgânicas, criando sistemas funcionalmente graduados.

#### **12.5.2 Integração de componentes vivos em matrizes inorgânicas**

A incorporação de bactérias em matrizes cimentícias, por exemplo, introduz capacidade de autorreparação via precipitação de  $CaCO_3$ .

#### **12.5.3 Propriedades mecânicas emergentes**

Propriedades emergentes surgem da interação entre fases, não sendo previsíveis apenas pela soma das partes.

#### **12.5.4 Controle da microestrutura**

O controle da microestrutura, incluindo tamanho de poros e distribuição bacteriana, determina desempenho mecânico e durabilidade.

#### **12.5.5 Aplicações estruturais avançadas**

Tais materiais apontam para estruturas capazes de responder ao ambiente, adaptando-se a variações de carga e umidade.

### **12.6 Arquitetura Hierárquica Aplicada ao Concreto**

#### **12.6.1 Organização da pasta cimentícia**

A pasta cimentícia apresenta organização interna complexa, composta por produtos de hidratação como C-S-H, portlandita e poros capilares.

### **12.6.2 Controle de porosidade multiescala**

A porosidade multiescala influencia diretamente resistência e permeabilidade, podendo ser descrita por:

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

### **12.6.3 Distribuição estratégica de bactérias**

A distribuição estratégica de bactérias em zonas críticas permite autor-regeneração direcionada.

### **12.6.4 Gradientes funcionais de material**

Gradientes funcionais podem ser projetados, variando composição ao longo do elemento estrutural para otimizar desempenho.

### **12.6.5 Modelos estruturais bioinspirados**

Modelos bioinspirados incorporam hierarquia interna, interfaces controladas e mecanismos de dissipação, aproximando concreto e solos tratados de sistemas naturais complexos.

## Capítulo 13

# Materiais Inteligentes Biológicos

### 13.1 Conceito de Material Inteligente

A noção de material inteligente emerge da capacidade de determinados sistemas materiais perceberem estímulos ambientais, processarem internamente essas informações e responderem de maneira funcionalmente orientada. Diferentemente dos materiais convencionais, cuja resposta mecânica é essencialmente passiva e proporcional às solicitações externas, os materiais inteligentes incorporam mecanismos de retroalimentação capazes de modificar suas propriedades físicas, químicas ou estruturais ao longo do tempo. Trata-se, portanto, de uma mudança ontológica na maneira como a engenharia compreende a matéria: ela deixa de ser elemento inerte para tornar-se sistema responsivo.

No âmbito da engenharia civil, essa transformação adquire significado ainda mais profundo. Estruturas deixam de ser concebidas apenas como suportes estáticos de carga e passam a ser entendidas como entidades capazes de monitorar seu próprio estado, adaptar-se a condições ambientais e, em determinadas circunstâncias, regenerar-se. A inteligência material não implica consciência, mas sim capacidade de resposta integrada e orientada por estímulos.

Historicamente, os chamados materiais inteligentes incluem ligas com memória de forma, polímeros eletroativos e cerâmicas piezelétricas. Esses sistemas respondem a estímulos térmicos, elétricos ou mecânicos por meio de transformações físico-químicas previsíveis. Contudo, sua inteligência permanece restrita a mecanismos físico-mecânicos previamente definidos. Materiais inteligentes biológicos ampliam esse horizonte ao introduzirem processos metabólicos como mecanismo de resposta. Em vez de depender exclusivamente de transições cristalográficas ou rearranjos moleculares induzidos externamente, incorporam organismos vivos ou componentes biológicos capazes de interpretar o ambiente e ativar rotas bioquímicas específicas. A resposta deixa de ser ape-

nas físico-mecânica e passa a ser bioquímica, adaptativa e, em certo sentido, evolutiva.

A integração de sistemas biológicos em matrizes construtivas inaugura, assim, uma nova categoria de materiais híbridos. Bactérias incorporadas ao concreto podem permanecer em estado latente por longos períodos e serem ativadas apenas quando determinadas condições, como presença de água ou variações de pH, indicarem a ocorrência de dano. Essa integração exige compatibilização entre o ambiente mineral altamente alcalino e a viabilidade biológica, bem como controle rigoroso da microestrutura para assegurar proteção, ativação eficiente e durabilidade funcional.

## 13.2 Sensores Biológicos Integrados

Quando incorporados à matriz estrutural, microrganismos deixam de atuar exclusivamente como agentes de precipitação mineral e passam a desempenhar papel sensorial. Certas bactérias respondem a mudanças químicas do meio por meio de alterações metabólicas mensuráveis, associadas à produção de compostos específicos ou à modificação de parâmetros físico-químicos locais. O material, nesse contexto, deixa de ser mero suporte estrutural e transforma-se em plataforma de sensoriamento distribuído, onde o próprio volume estrutural constitui rede sensorial viva.

A fissuração em materiais cimentícios, por exemplo, altera o regime interno de umidade e facilita a entrada de oxigênio e agentes agressivos. Tais mudanças podem ativar metabolismo bacteriano previamente dormente. Se considerarmos a abertura de fissura  $w$  como variável indicadora de dano, a atividade metabólica relativa  $A_m$  pode ser descrita como função crescente dessa abertura:

$$A_m = f(w)$$

Essa correlação permite inferir o estado estrutural a partir de parâmetros biológicos, estabelecendo vínculo direto entre dano mecânico e resposta metabólica.

De modo semelhante, a carbonatação do concreto e processos de deterioração química alteram o pH interno da matriz. Microrganismos sensíveis a essas variações podem atuar como indicadores bioquímicos do estado químico do material. A presença de água, variável fundamental tanto para processos de degradação quanto para autorreparação biogênica, também exerce papel central. O teor volumétrico de umidade pode ser representado por:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t}$$

onde  $V_w$  corresponde ao volume de água e  $V_t$  ao volume total do material. A variação de  $\theta$  influencia diretamente a taxa metabólica, permitindo que o sistema funcione como mecanismo de monitoramento hídrico interno.

A convergência entre biossensores e sistemas eletrônicos amplia ainda mais o alcance desse conceito. Sinais bioquímicos podem ser convertidos em

sinais elétricos por meio de interfaces apropriadas, possibilitando integração com redes digitais e plataformas de análise remota. A estrutura passa, assim, a dialogar com sistemas externos de gestão, estabelecendo ponte entre matéria viva e infraestrutura digital.

### 13.3 Monitoramento Estrutural Vivo

O chamado *Structural Health Monitoring* biológico propõe que o próprio material constitutivo da estrutura desempenhe papel ativo na detecção de danos. Diferentemente de sensores externos acoplados, o monitoramento torna-se intrínseco. A ativação metabólica pode ser interpretada como variável indicadora do estado estrutural. Se  $D$  representa um parâmetro de dano, pode-se estabelecer relação proporcional com a atividade metabólica:

$$D \propto A_m$$

desde que devidamente calibrada experimentalmente. A intensidade da resposta biológica transforma-se, assim, em indicador indireto do grau de deterioração.

A sinalização bioquímica pode envolver produção de gases, variações de condutividade elétrica ou liberação de metabólitos específicos. Quando captados por sistemas adequados, esses sinais oferecem leitura indireta do estado interno do material. A integração com sistemas IoT permite transmissão em tempo real desses dados para plataformas analíticas, inserindo a estrutura em ecossistemas urbanos inteligentes.

Entretanto, a confiabilidade desse monitoramento depende da estabilidade metabólica, da repetibilidade das respostas e da resistência a interferências ambientais. Protocolos de calibração, validação experimental e modelagem estatística tornam-se indispensáveis para assegurar que a resposta biológica corresponda efetivamente ao estado estrutural.

### 13.4 Materiais Programáveis

A noção de material programável introduz a possibilidade de definir previamente rotas metabólicas a serem ativadas sob condições específicas. Essa programação pode envolver seleção de cepas com comportamentos controlados ou intervenções de engenharia genética que ajustem sensibilidade e taxa de reação. O controle temporal de ativação permite que o sistema permaneça inativo até que determinado limiar seja atingido, como uma abertura crítica de fissura  $w_{crit}$  ou determinado teor de umidade.

A engenharia genética aplicada à construção amplia a capacidade de personalização metabólica, possibilitando ajuste fino da taxa de precipitação de  $CaCO_3$  ou da sensibilidade a estímulos ambientais. A resposta adaptativa pode ocorrer de maneira graduada, ajustando intensidade conforme magnitude do estímulo, aproximando o comportamento estrutural de sistemas biológicos naturais.

Diferentemente de sistemas de reparo único, materiais biológicos podem

apresentar múltiplos ciclos de ativação ao longo da vida útil. A precipitação acumulada de carbonato pode ser descrita por:

$$M_{CaCO_3}(t) = \int_0^t r(t') dt'$$

onde  $r(t')$  representa a taxa instantânea de precipitação. Essa característica confere ao material potencial de autorreparação repetida, estendendo sua vida funcional.

### 13.5 Captura Contínua de Carbono

A precipitação biogênica contínua de carbonato contribui não apenas para reparo estrutural, mas também para captura de carbono. O dióxido de carbono, ao ser convertido em carbonato de cálcio sólido, integra-se à matriz mineral de forma termodinamicamente estável, reduzindo o potencial de reemissão atmosférica.

O sequestro acumulado ao longo do tempo pode ser modelado como:

$$C_{seq}(t) = \alpha M_{CaCO_3}(t)$$

onde  $\alpha$  representa a fração de carbono incorporada por unidade de carbonato precipitado. A análise de ciclo de vida deve considerar não apenas emissões iniciais associadas à produção do material, mas também essa captura progressiva, redefinindo o balanço ambiental ao longo da vida útil da estrutura.

### 13.6 Confiabilidade e Durabilidade de Sistemas Vivos

A incorporação de sistemas vivos impõe novos desafios de confiabilidade. A vida útil metabólica depende da viabilidade celular, da disponibilidade de nutrientes e da estabilidade do microambiente interno. A estabilidade genética deve ser assegurada para evitar deriva funcional ao longo do tempo. Protocolos de controle de risco biológico tornam-se essenciais para garantir segurança ambiental e sanitária.

A avaliação de desempenho a longo prazo exige combinação de ensaios acelerados, modelagem preditiva e monitoramento contínuo, assegurando que desempenho biológico e estrutural permaneçam convergentes ao longo do ciclo de vida da construção. A engenharia, ao incorporar sistemas vivos, não apenas amplia seu repertório tecnológico, mas assume responsabilidade ampliada sobre controle, previsibilidade e sustentabilidade desses novos materiais.

## Capítulo 14

# Integração com Engenharia Digital

### 14.1 Introdução à Digitalização da Bioengenharia

A incorporação de sistemas biológicos em materiais estruturais inaugura não apenas uma nova fronteira material, mas também uma nova exigência metodológica: a digitalização da bioengenharia. Se, por um lado, a biocimentação e os materiais bioativos introduzem complexidade química e metabólica, por outro, a engenharia digital oferece o instrumental necessário para compreender, prever e controlar essa complexidade.

A engenharia digital aplicada a biomateriais transcende a simples modelagem geométrica. Ela envolve a representação matemática de processos biogeoquímicos, a simulação de interações entre fases vivas e minerais e a integração entre dados experimentais e modelos computacionais dinâmicos. Nesse contexto, a interoperabilidade entre biologia e modelagem computacional torna-se elemento central. Reações metabólicas, taxas de precipitação, consumo de substrato e variações de pH deixam de ser apenas fenômenos laboratoriais e passam a integrar modelos numéricos capazes de dialogar com análises estruturais tradicionais.

A digitalização de processos biogeoquímicos exige a tradução de fenômenos complexos em sistemas de equações diferenciais acopladas. A cinética de precipitação de carbonato, por exemplo, pode ser expressa genericamente como:

$$\frac{dC_{CaCO_3}}{dt} = k f(C_{ureia}, C_{Ca^{2+}}, pH, T)$$

onde  $k$  representa um coeficiente cinético e os termos funcionais traduzem dependências químicas e ambientais. Ao formalizar o metabolismo em linguagem matemática, cria-se a ponte definitiva entre biologia e engenharia computacional.

## 14.2 Modelagem Multiescala

A complexidade dos sistemas bioativos impõe abordagem multiescala. Na escala molecular, ocorrem as reações químicas fundamentais, incluindo hidrólise da ureia, formação de íons carbonato e nucleação de cristais. Essas reações são governadas por leis cinéticas e por princípios termodinâmicos que determinam a estabilidade do  $CaCO_3$  precipitado.

Na escala microscópica, a precipitação mineral modifica a porosidade e a conectividade interna do meio. A porosidade  $n$ , definida como

$$n = \frac{V_v}{V_t},$$

é continuamente alterada pela formação de sólidos nos vazios. Essa alteração influencia diretamente a permeabilidade  $k$ , que pode ser correlacionada à porosidade por relações empíricas ou semiempíricas, como a equação de Kozeny-Carman.

Na escala macroscópica, tais transformações microscópicas refletem-se no comportamento estrutural global: aumento de rigidez, variação da resistência ao cisalhamento, modificação do módulo de deformabilidade. O desafio reside no acoplamento entre escalas, isto é, na construção de modelos capazes de transportar informações da cinética molecular até o desempenho estrutural.

Estratégias computacionais para esse acoplamento incluem técnicas de homogeneização, métodos multiescala hierárquicos e simulações iterativas em que parâmetros microscópicos atualizam continuamente propriedades macroscópicas. O material deixa de ser tratado como homogêneo e passa a ser entendido como sistema evolutivo.

## 14.3 Simulação Numérica (COMSOL / ABAQUS)

A simulação numérica constitui ferramenta essencial para compreender e prever o comportamento de sistemas bioativos. Plataformas como COMSOL e ABAQUS permitem modelagem de transporte reativo, combinando equações de fluxo, difusão e reação química em meios porosos.

O transporte de espécies químicas pode ser descrito pela equação geral:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D\nabla C + C\mathbf{v}) = R(C),$$

onde  $C$  é a concentração,  $D$  o coeficiente de difusão,  $\mathbf{v}$  o vetor velocidade de escoamento e  $R(C)$  o termo reacional associado à atividade metabólica.

A simulação de fissuração pode ser integrada ao modelo por meio de critérios de dano ou mecânica da fratura, permitindo avaliar como a abertura de fissuras altera transporte de nutrientes e ativa precipitação localizada. Modelagens acopladas mecânico-químicas tornam possível atualizar propriedades mecânicas em função da quantidade de carbonato precipitado.

A parametrização do modelo exige definição cuidadosa de coeficientes cinéticos, parâmetros de difusão, propriedades mecânicas iniciais e limites de ativação metabólica. A validação experimental torna-se etapa indispensável,

garantindo que resultados numéricos correspondam ao comportamento observado em laboratório ou em campo.

## 14.4 Integração com BIM

A integração com BIM representa avanço estratégico na gestão de materiais bioativos. A modelagem informacional de concreto bioativo implica não apenas representação geométrica, mas incorporação de propriedades biológicas e evolutivas nos objetos digitais.

Elementos estruturais podem receber parâmetros adicionais, como taxa potencial de autorreparação, capacidade de captura de carbono ou vida útil metabólica estimada. Esses atributos tornam-se parte do banco de dados do modelo, permitindo gestão do ciclo de vida de maneira ampliada.

O planejamento de manutenção preditiva beneficia-se dessa integração. Ao associar dados de monitoramento biológico ao modelo BIM, torna-se possível antecipar intervenções antes que o dano atinja níveis críticos. A interoperabilidade com softwares estruturais assegura que alterações nas propriedades do material sejam automaticamente consideradas em análises de desempenho.

## 14.5 Digital Twins Biológicos

O conceito de Digital Twin amplia a digitalização ao propor a criação de uma réplica virtual dinâmica da estrutura física. No caso de sistemas bioativos, o Digital Twin biológico incorpora não apenas variáveis estruturais tradicionais, mas também parâmetros metabólicos e químicos.

Essa representação virtual é continuamente atualizada por dados provenientes de sensores biológicos integrados. Variações de atividade metabólica, umidade ou pH alimentam o modelo digital, que recalcula cenários futuros de degradação ou autorreparação.

A simulação preditiva de degradação permite avaliar diferentes estratégias de manutenção ou otimização de dosagem. A integração com algoritmos de inteligência artificial amplia ainda mais essa capacidade, permitindo aprendizado contínuo a partir de dados acumulados.

## 14.6 Banco de Dados Paramétrico

A consolidação de um banco de dados paramétrico constitui base para modelagem confiável. Parâmetros bacterianos, como atividade ureolítica e taxa de precipitação, devem ser registrados de forma sistemática. Parâmetros geotécnicos, porosidade inicial, permeabilidade, resistência ao cisalhamento, e parâmetros estruturais — módulo de elasticidade, resistência à compressão, tenacidade — completam o conjunto de informações.

A interface com planilhas e softwares especializados permite atualização dinâmica desses parâmetros. À medida que novos dados experimentais são obtidos, o banco de dados é refinado, reduzindo incertezas e aumentando precisão preditiva.

## 14.7 Inteligência Artificial Aplicada

A aplicação de inteligência artificial à bioengenharia estrutural representa etapa evolutiva natural. Técnicas de machine learning podem identificar padrões complexos entre variáveis metabólicas, propriedades mecânicas e condições ambientais.

Modelos preditivos podem ser treinados para estimar desempenho estrutural em função de dosagem bacteriana, teor de nutrientes e condições de exposição. A otimização de dosagem pode ser formulada como problema de minimização:

$$\min f(x) = \text{Custo}(x) - \lambda \text{Desempenho}(x),$$

onde  $x$  representa vetor de parâmetros de composição e  $\lambda$  fator de ponderação entre custo e desempenho.

A previsão de vida útil pode incorporar redes neurais ou métodos de regressão avançados, capazes de analisar grandes bases de dados experimentais. À medida que o volume de informações cresce, os modelos tornam-se mais robustos, aproximando a engenharia bioativa de um paradigma verdadeiramente orientado por dados.

A integração entre biologia, modelagem computacional, BIM, Digital Twins e inteligência artificial não constitui apenas ferramenta operacional. Representa a consolidação de uma nova epistemologia da engenharia civil, na qual matéria viva e infraestrutura digital convergem para formar sistemas estruturais adaptativos, monitoráveis e evolutivos.

# Sustentabilidade e Economia Circular

*Avaliação de Ciclo de Vida (ACV); Economia Circular e Biofabricação; Escalonamento e Viabilidade Industrial.*

## Capítulo 15

# Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

### 15.1 Introdução à Avaliação de Ciclo de Vida

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) constitui uma das ferramentas mais robustas para quantificar impactos ambientais associados a produtos, processos ou sistemas ao longo de toda a sua existência. Diferentemente de análises parciais, que se concentram apenas na fase produtiva ou operacional, a ACV busca compreender o sistema de maneira integrada, desde a extração das matérias-primas até o destino final. Trata-se, portanto, de uma abordagem sistêmica que impede deslocamentos invisíveis de impacto — aqueles em que a redução de emissões em uma etapa resulta em aumento significativo em outra.

O arcabouço metodológico da ACV é consolidado internacionalmente pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, que estabelecem princípios, estrutura e requisitos para sua condução. Essas normas definem as etapas fundamentais, definição de objetivo e escopo, inventário, avaliação de impacto e interpretação, assegurando consistência metodológica e comparabilidade entre estudos. No contexto do concreto bioativo, seguir rigorosamente essas diretrizes não é apenas recomendável, mas essencial para legitimar comparações com sistemas convencionais.

A definição das fronteiras do sistema representa decisão estratégica central. Uma análise *cradle-to-gate* considera impactos desde a extração até a saída da fábrica; *cradle-to-grave* amplia o escopo até o fim de vida; e *cradle-to-cradle* incorpora ciclos de reutilização e reciclagem, fechando o fluxo material. No caso de materiais bioativos, cuja principal inovação reside na durabilidade ampliada e na autorreparação ao longo do tempo, limitar-se a fronteiras reduzidas pode ocultar benefícios substanciais.

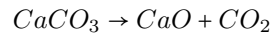
Outro elemento estruturante é a unidade funcional, que garante equivalência comparativa. Para o concreto bioativo, a unidade funcional não deve restringir-se a “1 m<sup>3</sup> de concreto produzido”, mas pode ser redefinida como “1

m<sup>3</sup> de concreto com desempenho estrutural garantido por X anos”. Essa redefinição incorpora durabilidade e reduz distorções comparativas com concretos convencionais de menor vida útil.

## 15.2 Inventário do Ciclo de Vida (LCI)

O Inventário do Ciclo de Vida (LCI) constitui a fase de quantificação detalhada de fluxos de entrada e saída do sistema. No caso do concreto bioativo, o inventário inicia-se na extração de matérias-primas, calcário, argila, agregados, cujos processos envolvem consumo energético e emissões associadas.

A produção de cimento Portland permanece como etapa de maior intensidade carbônica, sobretudo devido à calcinação do clínquer. A reação fundamental pode ser representada por:



liberando dióxido de carbono tanto por decomposição química quanto por queima de combustíveis fósseis.

A incorporação de bactérias introduz nova etapa inventarial: produção e cultivo bacteriano. Essa fase inclui consumo de nutrientes, energia para controle de temperatura e eventual secagem ou encapsulamento das células. Embora quantitativamente inferior à produção de clínquer, essa etapa deve ser rigorosamente contabilizada para evitar subestimações.

Transporte e logística também compõem parcela relevante do inventário, especialmente quando culturas bacterianas ou insumos específicos são produzidos em locais distintos da central de concreto. Durante a fase de uso, o concreto bioativo apresenta comportamento diferenciado: a autorreparação pode reduzir intervenções de manutenção, alterando significativamente fluxos de materiais ao longo do tempo.

No fim de vida, o potencial de reciclagem ou reaproveitamento deve ser considerado. A presença de carbonato adicional precipitado biologicamente pode influenciar propriedades do agregado reciclado, modificando cenários de reutilização.

## 15.3 Pegada de Carbono

A pegada de carbono constitui indicador central na avaliação ambiental do concreto bioativo. As emissões associadas ao clínquer representam a maior contribuição, frequentemente correspondendo a mais de 70% das emissões totais do cimento Portland. A intensidade de emissão pode ser expressa como:

$$E_{clnquer} = m_{clnquer} \cdot EF_{clnquer}$$

onde  $EF_{clnquer}$  representa o fator de emissão específico.

Entretanto, o concreto bioativo introduz mecanismos de compensação parcial. A autorreparação reduz a necessidade de intervenções corretivas e reconstruções prematuras, diminuindo emissões acumuladas ao longo do ciclo de

vida. Além disso, a captura biogênica de dióxido de carbono por precipitação de carbonato pode ser representada por:

$$C_{seq}(t) = \alpha M_{CaCO_3}(t)$$

onde  $\alpha$  corresponde à fração de carbono incorporada na massa precipitada.

O balanço líquido de carbono ao longo do tempo pode, portanto, ser modelado como:

$$C_{liquido}(t) = E_{produo} + E_{manuteno}(t) - C_{seq}(t)$$

A comparação com concreto convencional deve considerar horizontes temporais equivalentes, incorporando cenários realistas de manutenção e vida útil.

## 15.4 Indicadores Ambientais

Embora o aquecimento global seja frequentemente o foco principal, a ACV exige avaliação de múltiplos indicadores ambientais. O Potencial de Aquecimento Global (GWP) mede a contribuição relativa para mudanças climáticas. A acidificação está associada à emissão de óxidos de enxofre e nitrogênio, enquanto a eutrofização relaciona-se à liberação de nutrientes em corpos hídricos.

O consumo de água torna-se particularmente relevante quando processos de cultivo bacteriano são considerados. A depleção de recursos abióticos avalia o esgotamento de minerais e combustíveis fósseis, enquanto indicadores de toxicidade humana e ecotoxicidade examinam impactos potenciais de substâncias liberadas ao ambiente.

Uma análise equilibrada deve reconhecer que melhorias em um indicador não garantem melhorias universais. A sustentabilidade verdadeira emerge do equilíbrio entre múltiplas dimensões ambientais.

## 15.5 Comparação Quantitativa

A comparação quantitativa entre concreto bioativo e convencional exige metodologia transparente e parâmetros normalizados. A utilização da mesma unidade funcional e das mesmas fronteiras de sistema é condição indispensável para evitar conclusões enviesadas.

A análise estatística pode incluir intervalos de confiança e avaliação de variabilidade dos dados experimentais. Tabelas comparativas devem apresentar valores absolutos e percentuais de redução ou aumento de impacto, acompanhadas de explicitação clara das premissas adotadas.

A análise de sensibilidade desempenha papel crítico ao testar como variações em parâmetros, taxa de precipitação bacteriana, vida útil estimada, fator de emissão energético, influenciam o resultado final. Essa etapa fortalece a robustez interpretativa e impede conclusões simplistas.

## 15.6 Avaliação de Ciclo de Vida Expandida

A ACV aplicada a materiais bioativos deve evoluir para uma perspectiva expandida, integrando desempenho estrutural e durabilidade. A redução de manutenção ao longo do tempo constitui vantagem potencial significativa, especialmente quando considerada em horizontes superiores a cinquenta anos.

Cenários de vida útil prolongada podem ser modelados comparando-se dois sistemas com desempenhos distintos ao longo do tempo. Se  $L_b$  representa a vida útil do concreto bioativo e  $L_c$  a do convencional, o impacto acumulado pode ser expresso como:

$$I_{acum} = \frac{I_{produo} + I_{manuteno}}{L}$$

permitindo comparação anualizada de impacto.

A ACV prospectiva amplia ainda mais o horizonte, incorporando cenários futuros de matriz energética descarbonizada, avanços tecnológicos e melhorias em eficiência produtiva. Essa abordagem reconhece que o contexto tecnológico é dinâmico e que avaliações devem considerar trajetórias evolutivas.

## 15.7 Limitações e Incertezas

Como toda modelagem ambiental, a ACV do concreto bioativo enfrenta limitações. Dados laboratoriais podem apresentar variabilidade significativa, especialmente no que se refere à atividade metabólica e taxa de precipitação. O escalonamento industrial constitui outra fonte de incerteza, uma vez que processos eficientes em laboratório podem sofrer alterações quando aplicados em larga escala.

A modelagem de longo prazo depende de hipóteses sobre durabilidade, frequência de manutenção e estabilidade metabólica, variáveis que ainda carecem de bases empíricas extensas. Além disso, lacunas em bases de dados internacionais podem exigir aproximações ou extrapolações.

Reconhecer essas incertezas não enfraquece a análise; ao contrário, fortalece sua credibilidade científica. A maturidade metodológica reside na transparência das premissas e na disposição para revisar modelos à medida que novos dados se tornam disponíveis.

## Capítulo 16

# Economia Circular e Biofabricação

### 16.1 Fundamentos de Economia Circular

A economia circular emerge como resposta sistêmica às limitações do modelo linear tradicional baseado na lógica “extrair–produzir–descartar”. Nesse paradigma linear, os fluxos materiais percorrem trajetória unidirecional, resultando em esgotamento de recursos naturais e acúmulo crescente de resíduos. A circularidade, por sua vez, propõe a manutenção do valor dos materiais pelo maior tempo possível dentro do sistema econômico, reduzindo perdas energéticas e materiais e promovendo ciclos fechados de reaproveitamento.

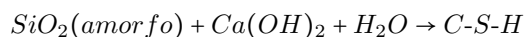
A transição do modelo linear para o circular implica reconfiguração estrutural da indústria da construção, setor historicamente intensivo em recursos e emissões. Essa transformação envolve substituição parcial de matérias-primas virgens, ampliação da vida útil das estruturas, reciclagem de componentes e incorporação de tecnologias regenerativas, como sistemas bioativos capazes de autorreparação.

Indicadores de circularidade tornam-se essenciais para quantificar essa transição. Métricas como taxa de conteúdo reciclado, eficiência no uso de recursos e retenção de valor material permitem avaliar o grau de reinserção de insumos no ciclo produtivo. No contexto do concreto bioativo, a circularidade não se limita à substituição de materiais, mas incorpora a extensão da vida útil estrutural como mecanismo de redução de consumo cumulativo.

### 16.2 Uso de Cinzas Volantes

As cinzas volantes são subprodutos finos provenientes da combustão de carvão mineral em usinas termelétricas. Compostas predominantemente por sílica amorfa, alumina e óxidos de ferro, apresentam propriedades pozolânicas que permitem reação com hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando compostos cimentícios adicionais.

A reação pozolânica pode ser representada simplificada por:



Essa interação reduz a quantidade de hidróxido de cálcio livre, densifica a microestrutura e contribui para o refinamento da porosidade. Em sistemas bioativos, a presença de cinzas volantes influencia tanto o ambiente químico quanto a disponibilidade de íons cálcio para precipitação de carbonato.

A interação com bactérias ureolíticas pode modificar o padrão de nucleação de  $CaCO_3$ , uma vez que a microestrutura mais refinada altera caminhos de difusão e zonas de supersaturação. Além disso, a substituição parcial de clínquer por cinzas volantes reduz emissões associadas à produção de cimento, proporcionando benefícios ambientais quantificáveis.

Se  $r$  representa a taxa de substituição de clínquer, a redução potencial de emissões pode ser estimada por:

$$\Delta E = r \cdot E_{clnquer}$$

onde  $E_{clnquer}$  corresponde ao fator de emissão específico do clínquer substituído.

### 16.3 Uso de Escória de Alto-Forno

A escória granulada de alto-forno é subproduto da indústria siderúrgica, composta principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio em estado vítreo. Quando moída finamente e ativada em meio alcalino, apresenta comportamento hidráulico latente, contribuindo para o desenvolvimento de resistência mecânica.

A ativação alcalina promove dissolução das fases vítreas e subsequente formação de estruturas cimentícias secundárias. Em matrizes bioativas, a compatibilidade química da escória com processos de precipitação bacteriana depende do equilíbrio entre alcalinidade, disponibilidade de cálcio e estabilidade metabólica.

Do ponto de vista mecânico, a escória pode melhorar resistência tardia e reduzir permeabilidade, favorecendo ambiente mais estável para microrganismos encapsulados. Ambientalmente, sua utilização reduz significativamente a demanda por clínquer, deslocando parte do impacto carbônico para um material já existente no ciclo industrial.

A comparação ambiental deve considerar que a escória carrega impacto incorporado reduzido, uma vez que é subproduto inevitável do processo siderúrgico. Sua valorização como insumo construtivo representa aplicação direta dos princípios de simbiose industrial.

### 16.4 Uso de Resíduos Agroindustriais

Resíduos agroindustriais oferecem potencial significativo como fontes alternativas de cálcio e nutrientes bacterianos. Casca de ovo, rica em carbonato de cálcio, pode ser processada e incorporada como fonte suplementar para precipitação mineral. Bagaço de cana, cinzas agrícolas e resíduos lignoceluló-

sicos podem atuar como substratos orgânicos, contribuindo para metabolismo microbiano controlado.

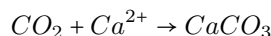
A valorização desses subprodutos promove integração entre cadeias produtivas regionais, reduzindo dependência de matérias-primas extraídas e fortalecendo economias locais. A incorporação de resíduos agroindustriais no concreto bioativo amplia o conceito de circularidade ao conectar setores tradicionalmente dissociados.

Essa integração regional favorece redução de transporte, diminuição de passivos ambientais e geração de valor a partir de fluxos residuais anteriormente subutilizados.

## 16.5 Integração com Captura de Carbono

A precipitação microbiana induzida de carbonato de cálcio (MICP) pode atuar sinergicamente com tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS). O dióxido de carbono capturado de fontes industriais pode ser direcionado para processos de mineralização acelerada, promovendo conversão estável em carbonato sólido.

A reação simplificada pode ser expressa como:



Quando integrada a sistemas bioativos, essa mineralização pode ser intensificada por atividade metabólica que aumenta alcalinidade local e supersaturação.

O potencial de sequestro pode ser modelado por:

$$C_{seq} = \eta \cdot M_{CaCO_3}$$

onde  $\eta$  representa a fração mássica de carbono no carbonato formado.

A avaliação econômica integrada deve considerar custos de captura, transporte e injeção de  $CO_2$ , contrapostos ao valor ambiental e regulatório associado à redução líquida de emissões.

## 16.6 Biofabricação

Biofabricação refere-se à produção assistida por microrganismos, na qual processos biológicos são incorporados intencionalmente ao ciclo produtivo. No contexto da construção, isso significa não apenas utilizar materiais biológicos, mas integrar metabolismo microbiano como componente funcional do sistema construtivo.

A impressão 3D bioativa representa avanço promissor, permitindo deposição controlada de matrizes cimentícias contendo microrganismos encapsulados. Essa técnica possibilita gradientes funcionais, geometrias otimizadas e distribuição estratégica de agentes autorreparadores.

Produção modular sustentável pode emergir dessa abordagem, com elementos pré-fabricados bioativos concebidos para desempenho prolongado e manutenção reduzida. Automação e controle biológico tornam-se essenciais para

garantir viabilidade metabólica durante armazenamento e aplicação.

A escalabilidade industrial dependerá da padronização de protocolos biotecnológicos, controle de qualidade microbiológico e compatibilização com linhas produtivas existentes.

## 16.7 Métricas de Circularidade

A quantificação da circularidade exige métricas objetivas. O Material Circularity Indicator (MCI) avalia proporção de conteúdo reciclado, eficiência de recuperação e duração do uso. No concreto bioativo, o MCI pode ser ampliado para incluir extensão de vida útil estrutural como fator de retenção de valor.

A taxa de substituição de clínquer constitui indicador direto de redução de impacto primário. O índice de reutilização avalia potencial de reincorporação de materiais ao fim da vida útil, enquanto a retenção de valor material mede a capacidade do sistema em preservar funcionalidade ao longo do tempo.

Matematicamente, um índice simplificado de circularidade pode ser expresso como:

$$CI = \frac{M_{reciclado} + M_{substituido}}{M_{total}} \cdot \frac{L_{real}}{L_{referencia}}$$

onde  $L_{real}$  representa a vida útil efetiva do sistema e  $L_{referencia}$  a vida útil convencional.

Assim, a circularidade no concreto bioativo não se restringe à composição material, mas integra desempenho, durabilidade e capacidade regenerativa, consolidando uma abordagem verdadeiramente sistêmica e regenerativa da construção civil.

## Capítulo 17

# Escalonamento e Viabilidade Industrial

### 17.1 Transição Laboratório–Indústria

A consolidação do concreto bioativo como tecnologia estrutural exige a superação do hiato clássico entre demonstrações laboratoriais e aplicação industrial em larga escala. Resultados promissores obtidos em ambiente controlado precisam ser traduzidos em processos robustos, repetíveis e economicamente viáveis.

A etapa de escala piloto representa o primeiro movimento estratégico nessa transição. Plantas piloto permitem testar protocolos de cultivo bacteriano, encapsulamento, mistura e cura em volumes intermediários, revelando desafios que não se manifestam em escala de bancada. Nessa fase, variáveis como temperatura ambiente, tempo de transporte e variação na composição dos insumos tornam-se determinantes.

A validação em campo constitui o passo seguinte. Elementos estruturais reais, vigas, lajes, pavimentos, devem ser monitorados ao longo do tempo para avaliar desempenho mecânico, eficiência de autorreparação e estabilidade metabólica. Essa validação não apenas comprova viabilidade técnica, mas constrói confiança junto ao setor produtivo.

O controle de qualidade industrial exige integração entre parâmetros físico-químicos tradicionais do concreto e indicadores microbiológicos. Ensaios de resistência mecânica, porosidade e durabilidade passam a coexistir com testes de viabilidade celular, atividade ureolítica e uniformidade de encapsulamento.

A padronização de processos é condição indispensável para escalabilidade. Protocolos claros de dosagem, armazenamento, transporte e mistura devem ser definidos para garantir repetibilidade interindustrial e conformidade normativa.

## 17.2 Custos

A análise econômica do concreto bioativo inicia-se na quantificação do custo de cultivo bacteriano. Esse custo inclui meio de cultura, energia para controle térmico, equipamentos de fermentação e eventual etapa de concentração celular. Em escala industrial, a otimização do rendimento volumétrico torna-se fator decisivo para competitividade.

O encapsulamento das bactérias, frequentemente realizado com sílica, polímeros ou materiais porosos, adiciona parcela adicional ao custo. Contudo, esse investimento inicial deve ser analisado em perspectiva sistêmica, considerando os benefícios associados à extensão de vida útil estrutural.

A comparação com manutenção convencional revela que estruturas sujeitas a fissuração frequente demandam intervenções periódicas, consumo adicional de materiais e custos indiretos associados à interrupção de uso. Se  $C_b$  representa o custo inicial do concreto bioativo e  $C_m(t)$  o custo acumulado de manutenção do concreto convencional ao longo do tempo  $t$ , a condição de vantagem econômica pode ser expressa como:

$$C_b \leq C_{conv} + C_m(t)$$

A análise de custo-benefício deve incorporar não apenas despesas diretas, mas também externalidades ambientais evitadas. O conceito de payback ambiental emerge quando o investimento adicional inicial é compensado pela redução acumulada de emissões e consumo de recursos.

A viabilidade financeira pode ser avaliada por métricas como Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), especialmente em projetos de infraestrutura de longo prazo. A inclusão de precificação de carbono pode alterar significativamente os resultados, favorecendo tecnologias de menor intensidade carbônica.

## 17.3 Regulamentação

A introdução de sistemas bioativos na construção civil exige alinhamento com normas técnicas consolidadas para concreto estrutural. Ensaio de resistência, durabilidade, retração e módulo de elasticidade devem atender aos requisitos estabelecidos por regulamentações nacionais e internacionais.

Além das normas estruturais, a regulamentação ambiental desempenha papel central, especialmente quando microrganismos são incorporados ao material. Protocolos de biossegurança devem assegurar que as espécies utilizadas não apresentem risco à saúde humana ou ao meio ambiente.

Certificações ambientais, como selos de construção sustentável, podem reconhecer benefícios associados à redução de emissões e aumento de durabilidade. Entretanto, barreiras regulatórias internacionais podem surgir em função de diferenças legislativas relativas ao uso de organismos vivos em materiais de construção.

A harmonização normativa representa desafio estratégico para internacionalização da tecnologia.

## 17.4 Barreiras Tecnológicas

Entre as principais barreiras tecnológicas destaca-se a estabilidade bacteriana em larga escala. Microrganismos precisam manter viabilidade metabólica durante armazenamento prolongado e após incorporação à matriz cimentícia altamente alcalina.

Armazenamento e logística tornam-se críticos quando culturas precisam ser transportadas para centrais de concreto distribuídas geograficamente. A manutenção da atividade celular depende de controle rigoroso de umidade e temperatura.

O controle de qualidade microbiológico deve ser incorporado à rotina industrial, incluindo testes de contagem celular e avaliação de atividade enzimática. A variabilidade de desempenho entre lotes pode comprometer confiabilidade estrutural se não for adequadamente monitorada.

O escalonamento de reatores biológicos também impõe desafios técnicos, especialmente no que se refere à homogeneidade de mistura, transferência de massa e eficiência energética em grandes volumes.

## 17.5 Estratégias de Mercado

O posicionamento estratégico do concreto bioativo deve enfatizar seu caráter sustentável e inovador, destacando benefícios ambientais e redução de custos ao longo do ciclo de vida. A narrativa de durabilidade ampliada e autorreparação automática constitui diferencial competitivo significativo.

Parcerias com a indústria cimenteira podem acelerar adoção, permitindo integração da tecnologia às linhas produtivas existentes. Incentivos governamentais voltados à descarbonização da construção civil podem funcionar como catalisadores de mercado.

Estratégias de diferenciação incluem certificações ambientais, rastreabilidade digital e integração com sistemas BIM e Digital Twins. O mercado de créditos de carbono pode gerar receita adicional, caso a captura mineral de  $CO_2$  seja contabilizada conforme regulamentações vigentes.

Modelos de negócio circulares, baseados em contratos de desempenho estrutural de longo prazo, podem redefinir a lógica comercial tradicional, deslocando o foco da venda de material para a entrega de serviço estrutural durável.

## 17.6 Projeções Futuras

O mercado global de biomateriais apresenta trajetória de crescimento consistente, impulsionado por políticas climáticas e demanda por soluções de baixo carbono. A integração do concreto bioativo com metas de neutralidade climática pode posicioná-lo como componente estratégico na transição energética do setor da construção.

A convergência entre bioengenharia, digitalização e economia circular possui potencial disruptivo. Estruturas capazes de monitorar seu próprio estado, autorreparar fissuras e capturar carbono redefinem o conceito tradicional de material inerte.

Cenários prospectivos até 2050 indicam expansão significativa de tecnologias construtivas regenerativas, especialmente em contextos urbanos resilientes e infraestrutura sustentável. A consolidação desse paradigma dependerá da maturidade regulatória, redução de custos e aceitação cultural da biofabricação como prática construtiva legítima.

O escalonamento industrial, portanto, não representa apenas desafio técnico, mas etapa decisiva na transformação estrutural da engenharia civil rumo a um modelo regenerativo e climaticamente responsável.

# Ética, Segurança e Futuro

*Biossegurança e Regulamentação; O Futuro dos  
Materiais Vivos.*

## Capítulo 18

# Biossegurança e Regulamentação

### 18.1 Introdução à Biossegurança na Engenharia Bioativa

A incorporação de organismos vivos em materiais estruturais inaugura uma nova fronteira tecnológica na engenharia civil e, simultaneamente, impõe responsabilidades inéditas no campo da biossegurança. Tradicionalmente, a construção civil lida com riscos físicos, químicos e estruturais; a introdução de sistemas bioativos amplia esse escopo para incluir variáveis biológicas que demandam análise específica e abordagem interdisciplinar.

Biossegurança aplicada à construção pode ser definida como o conjunto de princípios, práticas e normas destinadas a prevenir riscos à saúde humana, ao meio ambiente e aos ecossistemas decorrentes do uso intencional de microrganismos em infraestruturas. Essa definição desloca o debate do campo puramente microbiológico para o domínio da engenharia, exigindo integração entre ciência dos materiais, biotecnologia e regulamentação ambiental.

É fundamental distinguir risco biológico de risco estrutural. O risco estrutural refere-se à possibilidade de falha mecânica ou comprometimento do desempenho físico da edificação. Já o risco biológico envolve potenciais efeitos adversos decorrentes da presença ou liberação de organismos vivos. Ambos devem ser avaliados de forma complementar, mas com metodologias distintas.

O princípio da precaução assume papel central nesse contexto. Quando incertezas científicas persistem, especialmente em aplicações inovadoras, a adoção de medidas preventivas proporcionais ao potencial risco torna-se imperativa. A ética na aplicação de organismos vivos em infraestrutura exige transparência, responsabilidade e compromisso com a segurança coletiva.

## 18.2 Classificação de Risco Biológico

A classificação de risco microbiológico baseia-se tradicionalmente em grupos que consideram patogenicidade, transmissibilidade e disponibilidade de tratamento. Microrganismos utilizados em concreto bioativo devem pertencer a grupos de baixo risco, caracterizados por ausência de patogenicidade significativa e baixo potencial de impacto ambiental.

Os critérios de patogenicidade incluem capacidade de causar doença em humanos ou animais, via de exposição e suscetibilidade a antibióticos ou tratamentos convencionais. A avaliação de toxicidade deve considerar tanto metabólitos produzidos quanto possíveis subprodutos liberados durante o ciclo de vida do material.

A persistência ambiental constitui variável crítica. Microrganismos altamente resistentes e capazes de sobreviver indefinidamente fora da matriz cimentícia podem representar risco ampliado. Assim, a seleção de espécies com sobrevivência condicionada ao ambiente alcalino interno do concreto reduz probabilidade de dispersão ativa.

Outro fator relevante é o potencial de transferência genética horizontal. A possibilidade de genes serem transferidos para outras populações microbianas deve ser avaliada, sobretudo quando engenharia genética estiver envolvida. Estratégias de contenção genética tornam-se particularmente importantes nesse cenário.

## 18.3 Normas Técnicas Internacionais

A aplicação de biossegurança na construção deve dialogar com normas internacionais consolidadas. Normas ISO relacionadas à gestão ambiental e à gestão de risco oferecem arcabouço metodológico aplicável à análise de sistemas bioativos. Diretrizes da Organização Mundial da Saúde fornecem parâmetros para classificação e manipulação segura de microrganismos.

No contexto europeu, a regulamentação sobre organismos vivos modificados estabelece critérios rigorosos para liberação ambiental e uso comercial. Nos Estados Unidos, diferentes agências federais compartilham competência regulatória sobre biotecnologia, abrangendo desde avaliação ambiental até segurança ocupacional.

Protocolos de contenção biológica devem ser adaptados à realidade da construção civil, contemplando armazenamento, transporte e aplicação de culturas bacterianas. Certificação e rastreabilidade tornam-se ferramentas essenciais para garantir conformidade normativa e permitir auditorias técnicas.

A harmonização internacional dessas normas será decisiva para viabilizar exportação e adoção global do concreto bioativo.

## 18.4 Avaliação de Risco Ambiental

A avaliação de risco ambiental inicia-se com a identificação sistemática de perigos potenciais associados ao microrganismo utilizado. Em seguida, procede-se à análise de exposição, estimando probabilidade de contato entre o

agente biológico e o ambiente externo.

A avaliação de consequências ecológicas examina possíveis impactos sobre microbiota do solo, recursos hídricos e cadeias tróficas. Modelos de dispersão ambiental podem ser empregados para simular cenários de liberação acidental e estimar alcance espacial e temporal.

A Avaliação Quantitativa de Risco (QRA) pode ser formalmente representada como:

$$R = P(E) \cdot C$$

onde  $P(E)$  representa a probabilidade de exposição e  $C$  a magnitude das consequências.

Estratégias de mitigação incluem seleção de cepas não patogênicas, encapsulamento eficiente, monitoramento contínuo e protocolos claros de contenção. A robustez da avaliação depende da qualidade dos dados experimentais e da transparência das premissas adotadas.

## 18.5 Controle de Dispersão Biológica

O encapsulamento bacteriano constitui a primeira linha de defesa contra dispersão indesejada. Ao imobilizar células em matrizes sólidas ou microcápsulas, reduz-se a probabilidade de migração para o ambiente externo.

A ativação condicionada por fissuração representa estratégia funcionalmente elegante: as bactérias permanecem metabolicamente latentes até que a formação de fissuras permita entrada de água e nutrientes, desencadeando precipitação localizada de carbonato.

Mecanismos de autolimitação metabólica podem ser projetados para restringir atividade celular após consumo de substratos disponíveis. Estratégias de contenção genética, como circuitos de dependência metabólica específica, reduzem capacidade de sobrevivência fora do ambiente projetado.

O monitoramento pós-implantação, especialmente em projetos de grande porte, pode incluir análise microbiológica de amostras ambientais adjacentes. Protocolos de neutralização devem estar previamente definidos para situações de liberação acidental.

## 18.6 Responsabilidade Ética e Social

A aceitação pública de materiais vivos na infraestrutura depende de confiança social construída por meio de comunicação clara e fundamentada cientificamente. Transparência quanto aos microrganismos utilizados, suas características e medidas de segurança adotadas é essencial.

Governança tecnológica deve envolver não apenas especialistas, mas também órgãos reguladores, sociedade civil e setor produtivo. A incorporação de princípios ESG (Environmental, Social and Governance) fortalece alinhamento com práticas corporativas responsáveis.

A justiça ambiental exige que benefícios e riscos sejam distribuídos equitativamente, evitando concentração de potenciais impactos em comunidades

vulneráveis. A ética aplicada à engenharia bioativa transcende o desempenho técnico e alcança dimensão social ampla.

## **18.7 Aspectos Jurídicos**

A responsabilidade civil relacionada ao uso de sistemas bioativos deve ser claramente definida. Em caso de dano ambiental ou estrutural, mecanismos legais precisam estabelecer atribuições entre fabricantes, projetistas e executores.

Seguros técnicos específicos podem ser necessários para cobrir riscos associados à inovação biotecnológica na construção. A normatização internacional futura deverá consolidar diretrizes comuns, reduzindo incertezas jurídicas e facilitando adoção global.

A harmonização regulatória entre países será determinante para expansão do mercado. Divergências legislativas podem constituir barreiras significativas à internacionalização da tecnologia.

Assim, biossegurança e regulamentação não representam entraves ao avanço da engenharia bioativa, mas pilares estruturantes de sua legitimidade científica, ambiental e social. A maturidade tecnológica será medida não apenas por sua eficiência técnica, mas por sua capacidade de operar com responsabilidade, transparência e segurança em escala global.

## Capítulo 19

# O Futuro dos Materiais Vivos

### 19.1 Introdução à Engenharia de Materiais Vivos

A engenharia de materiais vivos inaugura uma nova etapa na evolução tecnológica da construção civil. Diferentemente dos materiais convencionais, concebidos como sistemas inertes e passivos, os chamados *Living Materials* incorporam organismos ou componentes biológicos capazes de responder, adaptar-se e interagir com o ambiente ao longo do tempo.

Essa transição representa mudança paradigmática profunda. Materiais deixam de ser apenas portadores de propriedades mecânicas fixas e passam a atuar como sistemas dinâmicos, com capacidade de regeneração, adaptação e, em certos casos, aprendizado funcional. A infraestrutura, historicamente concebida como estática, passa a ser interpretada como organismo híbrido, parcialmente vivo, parcialmente mineral.

O paradigma da infraestrutura adaptativa emerge desse deslocamento conceitual. Estruturas deixam de resistir passivamente às ações ambientais e passam a interagir com elas, ajustando propriedades locais conforme estímulos externos. O material torna-se agente ativo no desempenho estrutural.

### 19.2 Concretos Regenerativos

Os concretos regenerativos constituem uma das expressões mais tangíveis desse novo paradigma. Ao incorporar microrganismos capazes de precipitar carbonato de cálcio, esses materiais não apenas selam fissuras iniciais, mas podem operar em ciclos múltiplos de autorreparo ao longo de décadas.

A regeneração estrutural contínua depende da disponibilidade controlada de nutrientes e da preservação da viabilidade metabólica. Sistemas multi-cíclicos pressupõem que o processo de precipitação possa ser reativado repetidamente sempre que novas fissuras surgirem.

A integração com sensores biológicos amplia essa capacidade, permitindo que o próprio material sinalize níveis de dano ou condições ambientais adversas. Em cenários projetados, a vida útil estrutural pode ultrapassar cem

anos com manutenção significativamente reduzida.

A modelagem preditiva de regeneração pode ser expressa como:

$$R(t) = f(N, M, E, \sigma(t))$$

onde  $N$  representa disponibilidade de nutrientes,  $M$  a atividade metabólica,  $E$  as condições ambientais e  $\sigma(t)$  o histórico de tensões aplicadas.

Essa abordagem transforma a durabilidade de variável passiva em variável programável.

### 19.3 Bioengenharia Sintética Aplicada

A bioengenharia sintética amplia ainda mais as possibilidades dos materiais vivos. Por meio de modificação genética controlada, microrganismos podem ser otimizados para maior eficiência de precipitação mineral, maior tolerância alcalina ou resposta seletiva a estímulos específicos.

A otimização metabólica busca maximizar rendimento de carbonato precipitado por unidade de substrato consumido, aumentando eficiência ambiental e econômica. O controle programado de precipitação mineral pode ser ajustado por circuitos genéticos sintéticos que ativam ou inibem reações conforme variáveis externas.

Circuitos genéticos projetados podem funcionar como interruptores biológicos, acionando processos apenas sob determinadas condições de pH, umidade ou deformação estrutural. A segurança genética integrada exige mecanismos de autolimitação que impeçam proliferação descontrolada fora do ambiente projetado.

Essa convergência entre biologia sintética e engenharia estrutural redefine os limites do projeto material.

### 19.4 Infraestruturas Vivas

O conceito de infraestrutura viva extrapola o nível material e alcança o sistema construtivo como um todo. Pontes e fundações bioativas podem incorporar sensores metabólicos capazes de indicar alterações internas antes que danos se tornem críticos.

Sistemas geotécnicos adaptativos podem utilizar microrganismos para consolidar solos *in situ*, ajustando resistência conforme variações de umidade ou carregamento. A interação com o ambiente urbano passa a ser bidirecional: a infraestrutura responde ao meio e simultaneamente contribui para sua regulação.

Cidades biointegradas poderiam incorporar materiais capazes de capturar carbono, regular umidade e monitorar condições estruturais em tempo real. A infraestrutura deixa de ser elemento isolado e passa a integrar ecossistemas urbanos mais amplos.

### 19.5 Materiais Programáveis

Materiais programáveis representam etapa avançada da engenharia viva. Esses sistemas respondem adaptativamente a estímulos físicos ou químicos, ajus-

tando propriedades internas conforme necessidade estrutural.

A programação temporal de reações permite que determinadas funções sejam ativadas apenas após períodos específicos ou sob condições acumuladas de dano. A integração com inteligência artificial pode viabilizar sistemas híbridos nos quais dados estruturais alimentam algoritmos preditivos que, por sua vez, modulam respostas biológicas.

Materiais que evoluem ao longo do tempo não apenas se regeneram, mas podem melhorar desempenho em resposta a padrões recorrentes de solicitação. A autoadaptação a mudanças climáticas — variações térmicas extremas, ciclos de umidade intensificados — torna-se possibilidade concreta.

O material deixa de ser produto acabado e passa a ser sistema em evolução contínua.

## 19.6 Fronteiras da Pesquisa

As fronteiras da pesquisa apontam para integração entre biotecnologia, nanotecnologia e ciência computacional. A incorporação de nanopartículas pode atuar como sítios preferenciais de nucleação mineral, aumentando eficiência de precipitação.

Biopolímeros estruturais avançados oferecem matrizes híbridas com maior flexibilidade e resistência a fissuração. A impressão 4D bioativa — na qual estruturas impressas evoluem ao longo do tempo — amplia possibilidades geométricas e funcionais.

A engenharia metabólica direcionada à captura massiva de carbono pode transformar materiais de construção em sumidouros climáticos ativos. Simulações preditivas com aprendizado de máquina permitem explorar combinações paramétricas antes inviáveis experimentalmente.

Materiais híbridos bioeletrônicos, capazes de integrar sinais elétricos e respostas biológicas, configuram um novo domínio interdisciplinar.

## 19.7 Cenários Prospectivos

A construção carbono-negativa torna-se cenário plausível quando materiais vivos capturam mais carbono do que emitem ao longo do ciclo de vida. Infraestruturas autorreguláveis podem reduzir drasticamente custos de manutenção e riscos estruturais.

A integração com economia circular global consolida cadeias produtivas regenerativas, nas quais resíduos tornam-se insumos e emissões convertem-se em matéria-prima mineralizada. Normas técnicas futuras precisarão incorporar critérios específicos para desempenho biológico e regenerativo.

No horizonte tecnológico entre 2030 e 2050, é possível projetar consolidação de padrões construtivos híbridos, combinando componentes minerais, biológicos e digitais em sistemas coerentes e integrados.

## 19.8 Agenda Estratégica de Pesquisa

Apesar do avanço conceitual, lacunas científicas permanecem significativas. A estabilidade metabólica em horizontes superiores a cinquenta anos ainda carece de validação empírica robusta. Estudos de longo prazo são indispensáveis para confirmar previsões de durabilidade estendida.

A padronização experimental global permitirá comparabilidade entre resultados obtidos em diferentes laboratórios. Protocolos uniformes de ensaio microbiológico e mecânico devem ser estabelecidos internacionalmente.

A integração interdisciplinar — envolvendo engenheiros civis, microbiologistas, cientistas de dados, economistas ambientais e formuladores de políticas públicas — será decisiva para consolidar o campo.

A formação de redes internacionais de pesquisa poderá acelerar desenvolvimento tecnológico e harmonização regulatória, transformando materiais vivos de promessa emergente em fundamento estruturante da engenharia do século XXI.

O futuro dos materiais vivos não representa apenas inovação incremental. Ele sinaliza uma redefinição da própria noção de material, deslocando-a de entidade passiva para sistema ativo, adaptativo e regenerativo — uma infraestrutura que, em certo sentido, aprende a permanecer.

# Estudos de Caso Internacionais

*Estudos de Caso Internacionais.*

## Capítulo 20

# Estudos de Caso Internacionais

### 20.1 Introdução aos Estudos de Caso

A consolidação dos materiais bioativos na engenharia civil depende, em última instância, de validação em escala real. Ensaio laboratoriais demonstram viabilidade técnica; aplicações em campo revelam robustez operacional, desempenho de longo prazo e interação com variáveis ambientais complexas. Os estudos de caso internacionais apresentados neste capítulo foram selecionados com base em critérios de relevância técnica, diversidade geográfica, maturidade tecnológica e disponibilidade de dados quantitativos.

Os parâmetros comparativos adotados incluem desempenho mecânico, durabilidade, eficiência de precipitação mineral, impacto ambiental e viabilidade econômica. A metodologia de análise técnica fundamenta-se em revisão documental, relatórios institucionais, dados experimentais publicados e avaliações independentes quando disponíveis.

Entretanto, é importante reconhecer limitações inerentes aos dados acessíveis. Muitos projetos encontram-se em fase piloto ou pré-comercial, com monitoramento ainda em andamento. Assim, algumas estimativas de vida útil e desempenho acumulado são baseadas em projeções modeladas.

### 20.2 Projetos na Netherlands

O contexto nacional dos Netherlands oferece ambiente particularmente propício ao desenvolvimento de tecnologias bioativas. O país apresenta solos moles extensivos, elevado nível freático e vulnerabilidade geotécnica significativa, especialmente em áreas abaixo do nível do mar. Essa condição impõe desafios estruturais permanentes e incentiva soluções inovadoras de estabilização e durabilidade.

A política nacional de inovação sustentável prioriza tecnologias de baixo carbono e infraestrutura resiliente. A integração entre universidades técnicas,

centros de pesquisa aplicada e indústria cimenteira tem sido elemento-chave para acelerar transferência tecnológica.

### **20.3 Concreto Autorreparável em Ambiente Real**

Aplicações em infraestrutura rodoviária incluíram pavimentos expostos a ciclos intensivos de carga e variações térmicas. Em túneis e estruturas hidráulicas, o foco concentrou-se na mitigação de infiltrações e na preservação da integridade estrutural em ambientes úmidos.

O monitoramento de fissuras ao longo do tempo indicou redução significativa na largura média de fissuras após ativação bacteriana. Avaliações após múltiplos ciclos de dano demonstraram capacidade de autorreparo repetido, embora com eficiência decrescente em ciclos sucessivos, dependente da disponibilidade residual de nutrientes.

### **20.4 Biocimentação Geotécnica**

Projetos de biocimentação em solos arenosos foram conduzidos para estabilização superficial e mitigação de subsidência. A precipitação induzida de carbonato promoveu aumento da coesão e redução da compressibilidade.

Em diques e estruturas de contenção, o controle de permeabilidade foi alcançado por meio de injeção controlada de soluções bacterianas. O monitoramento geotécnico de campo incluiu ensaios de penetração, medições piezométricas e análise de deformações ao longo do tempo.

### **20.5 Resultados Quantitativos**

Os ganhos de resistência à compressão variaram entre 15% e 35%, dependendo da dosagem e do tipo de solo ou matriz cimentícia. A permeabilidade apresentou reduções de até uma ordem de grandeza em aplicações geotécnicas específicas.

Modelagens de vida útil indicaram extensão potencial superior a 30% em estruturas expostas a ambientes agressivos. A redução estimada de custos de manutenção, em horizontes superiores a vinte anos, mostrou-se economicamente relevante, especialmente em infraestruturas críticas.

### **20.6 Lições Aprendidas**

A experiência holandesa evidencia que o escalonamento industrial exige protocolos rigorosos de injeção, controle de uniformidade de precipitação e integração normativa desde as fases iniciais. A padronização de métodos de ensaio e a colaboração regulatória antecipada facilitaram a transição da pesquisa para a aplicação prática.

### **20.7 Projetos na China**

O contexto nacional da China caracteriza-se por crescimento urbano acelerado e execução de grandes obras de infraestrutura. A magnitude desses

projetos cria ambiente favorável para aplicação em larga escala de tecnologias emergentes.

Estratégias governamentais voltadas à mitigação ambiental e controle de degradação de solos impulsionaram pesquisas em biocimentação e estabilização sustentável.

## **20.8 Aplicações em Engenharia Geotécnica**

Projetos de estabilização de taludes utilizaram precipitação bacteriana para aumentar resistência ao cisalhamento. Em fundações profundas, técnicas de injeção biológica foram testadas para reforço de camadas arenosas.

Aplicações costeiras focaram no controle de erosão e na mitigação de liquefação sísmica por aumento da rigidez do solo tratado.

## **20.9 Aplicações Ambientais**

Além da estabilização estrutural, projetos chineses exploraram imobilização de metais pesados por precipitação mineral controlada, reduzindo mobilidade em solos contaminados. Iniciativas piloto investigaram captura biogênica de carbono em resíduos industriais alcalinos.

## **20.10 Escalonamento Industrial**

A produção em larga escala foi viabilizada por reatores biológicos de grande capacidade e integração com cadeias industriais já estabelecidas. A redução de custos unitários foi alcançada por economia de escala e otimização de insumos.

## **20.11 Desafios Técnicos**

A heterogeneidade natural do solo representou obstáculo significativo, afetando uniformidade de precipitação. O controle espacial da reação mineral exigiu desenvolvimento de técnicas avançadas de injeção e monitoramento contínuo.

## **20.12 Aplicações Europeias**

Projetos na Germany concentraram-se em pesquisa aplicada em universidades técnicas, com forte integração às políticas de descarbonização industrial. Ensaios de durabilidade de longo prazo investigaram estabilidade metabólica em ambientes controlados.

No United Kingdom, aplicações envolveram infraestruturas ferroviárias e intervenções em estruturas históricas, nas quais métodos convencionais poderiam comprometer integridade arquitetônica. A avaliação de ciclo de vida foi incorporada desde as fases iniciais de projeto.

Na France, programas financiados pela União Europeia estimularam inovação em materiais bioativos, incluindo ensaios estruturais avançados e integração com metas climáticas regionais.

A convergência dessas iniciativas está alinhada ao Green Deal europeu, que estabelece metas de neutralidade carbônica e incentivos à inovação sustentável no setor da construção.

### **20.13 Avaliação Comparativa**

A comparação técnica entre os casos analisados indica que ganhos de resistência e redução de permeabilidade são consistentes, embora variem conforme tipo de aplicação. A eficiência de captura de carbono permanece dependente da escala e da disponibilidade de cálcio.

Sob critérios ambientais, a redução de emissões associadas à manutenção prolongada constitui vantagem comum. O consumo adicional de insumos biológicos mostrou-se relativamente baixo frente aos benefícios acumulados.

Do ponto de vista econômico, o custo por metro cúbico tratado varia significativamente entre países, influenciado por escala de produção, regulamentação e incentivos governamentais. Em cenários com precificação de carbono, a competitividade aumenta substancialmente.

### **20.14 Tabela Comparativa Consolidada**

A consolidação dos dados permite classificar projetos segundo desempenho estrutural, impacto ambiental, viabilidade econômica e nível de maturidade tecnológica (TRL). Países com forte integração universidade-indústria apresentaram avanço mais acelerado na transição para estágios pré-comerciais.

### **20.15 Análise Crítica Integrada**

Fatores determinantes de sucesso incluem apoio governamental, padronização regulatória, financiamento contínuo de pesquisa aplicada e integração digital para monitoramento. Limitações observadas concentram-se na variabilidade de desempenho e na necessidade de monitoramento prolongado.

O potencial de replicabilidade global depende da adaptação às condições geotécnicas e regulatórias locais. Estratégias de internacionalização devem considerar harmonização normativa e transferência tecnológica estruturada.

### **20.16 Síntese dos Estudos de Caso**

Os estudos de caso revelam convergência tecnológica significativa entre continentes, apesar de diferenças regulatórias e contextuais. A aplicação prática de materiais bioativos já ultrapassa a fase experimental, ingressando em estágios de validação ampliada.

As lições para políticas públicas indicam que inovação sustentável requer alinhamento entre ciência, indústria e regulação. Direcionamentos futuros incluem expansão de monitoramento de longo prazo, consolidação de normas técnicas específicas e integração com estratégias globais de descarbonização.

Assim, os estudos internacionais confirmam que a engenharia bioativa deixou de ser hipótese conceitual para tornar-se trajetória tecnológica concreta, ainda em consolidação, mas já com evidências empíricas robustas de viabilidade

técnica e potencial transformador.

## Sobre os Autores

**Beatriz Oliveira de Almeida Lima** é Doutora em Educação Científica pela Faculdade de Educação da Universidade Federal da Bahia (PPGEFHC/UFBA). Possui Licenciatura em Pedagogia, Bacharelado em Ciência e Tecnologia e Bacharelado em Geofísica pela UFBA. Atuou como professora substituta no Instituto de Humanidades, Artes e Ciências Professor Milton Santos (IHAC/UFBA). É pesquisadora vinculada à Rede de Pesquisa Comunidades Virtuais (CV/UFBA), desenvolvendo pesquisas nas áreas de Plataformas Digitais, Comunicação Científica, Cultura Digital, Educação e Ensino de Ciências.

*ORCID iD:* [orcid.org/0000-0001-5539-8368](https://orcid.org/0000-0001-5539-8368)

**Antonio Luiz de Almeida** possui graduação em Física (1987) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), mestrado em Física (1993) e doutorado em Física (1998) pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). É Professor Pleno da Universidade do Estado da Bahia (UNEB). Atua em pesquisas na área de ensino de Física Moderna nos níveis fundamental e médio e em física e química teóricas, com ênfase no estudo de processos de adsorção e dissociação molecular em superfícies de óxidos e zeólitas, química quântica e química quântica relativística, ressonância magnética nuclear, espectroscopia Raman e UV. Também tem desenvolvido estudos em inteligência artificial quântica.

*ORCID iD:* [orcid.org/0000-0003-4010-4552](https://orcid.org/0000-0003-4010-4552)

## Bibliografia

- [1] ACHAL, V.; PANDEY, P.; CHOUDHARY, D.; RAVINDRAN, B. *Bio-cementation by Bacillus pasteurii: applications to construction materials*. Construction and Building Materials, v. 25, p. 632–638, 2011.
- [2] ACHAL, V.; MUKHERJEE, A. *A review of microbial precipitation for sustainable construction*. Construction and Building Materials, v. 93, p. 1224–1235, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.008.
- [3] AL-QABANY, A.; SANDERSON, D. *Effect of soil type on microbial induced calcite precipitation for soil improvement*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 138, n. 9, p. 1107–1115, 2012.
- [4] BUNDELEVA, I. A.; SHIROKOVA, L. S.; POKROVSKY, O. S. *Calcium carbonate precipitation by anoxygenic phototrophic bacteria*. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 142, p. 95–114, 2014.
- [5] CARRIERE, M.; et al. *A review on the potential of filamentous fungi for microbial self-healing of concrete*. Fungal Biology and Biotechnology, 2021.
- [6] CHENG, L.; SHAO, Y.; SHI, B. *Microbial induced calcium carbonate precipitation in construction materials: review*. Construction and Building Materials, v. 41, p. 718–724, 2013.
- [7] DE JONG, J.T.; MORTENSEN, B.M.; MARTINEZ, B.C.; NELSON, D.C. *Bio-mediated soil improvement*. Ecological Engineering, v. 36, n. 2, p. 197–210, 2010. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.12.029.
- [8] DE MUYNCK, W.; VERSTRAETE, W.; DE BELIE, N. *Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review*. Ecological Engineering, v. 36, n. 2, p. 118–136, 2010.
- [9] DHAMI, N.K.; REDDY, M.S.; MUKHERJEE, A. *Bio-mineralization of calcium carbonates and their engineered applications*. Frontiers in Microbiology, v. 4, p. 314, 2013.
- [10] CARRIERE, M.; et al. *A review on the potential of filamentous fungi for microbial self-healing of concrete*. Fungal Biology and Biotechnology, 2021.

- [11] GARDINI, O.L.; DE MARCO, G.; FLORIAN, F. *A utilização de bio-concreto na construção civil, pontos positivos e seus desafios*. Recima21 – Revista Científica Multidisciplinar, v. 5, n. 1, 6061, 2022.
- [12] HAMMES, F.; VERSTRAETE, W. *Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation*. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, v. 2, p. 3–7, 2003.
- [13] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, 2021.
- [14] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) *Climate Change 2023: Synthesis Report*, 2023.
- [15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, 2006.
- [16] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*, 2006.
- [17] JONKERS, H.M. *Bacteria-based self-healing concrete*. Heron, v. 55, n. 1, p. 17–28, 2010.
- [18] MARTINS, F.B.S.; GONÇALVES, J.R.M.R.; PAULA, L.S. *Bioconcreto: A próxima geração de concreto auto-reparável*. Projectus, v. 4, n. 2, 2019.
- [19] NAVARRO HIDALGO, G.E.; SCHACKOW, A. *Biomíneralização de carbonato de cálcio em bioconcreto pela ação de Bacillus subtilis ATCC 6633*. Ambiente Construído, 2025.
- [20] NASSER, A.; et al. *Sustainable and innovative self-healing concrete technologies to mitigate environmental impacts in construction*. Preprints.org, 2024.
- [21] NODEHI, R.; et al. *Mechanical and durability properties of bacterial concrete: a comprehensive review*. Journal of Cleaner Production, 2022.
- [22] OWOLABI, D.O.; SHOKOUHIAN, M.; AHMAD, I.; et al. *Comparative analysis of autogenous and microbial-based calcite precipitation in concrete: state-of-the-art review*. Buildings, v. 15, n. 18, article 3289, 2025.
- [23] SEIFAN, M.; SAMANI, A.K.; BERENJIAN, A. *Bioconcrete: Next generation of self-healing cementitious materials*. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 100, p. 2591–2602, 2016.
- [24] SEIFAN, M.; BERENJIAN, A. *Application of microbial induced calcium carbonate precipitation in designing bio self-healing concrete*. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 34(11):168, 2018.

- [25] SCHLANGEN, E.; HUANG, W.; VAN DER ZWAAG, S. *Self-healing in concrete: State-of-the-art review*. Construction and Building Materials, v. 158, p. 141–152, 2018.
- [26] STOCKS-FISCHER, S.; GALINAT, J.K.; BANG, S.S. *Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>*. Soil Biology and Biochemistry, v. 31, no. 11, p. 1563–1571, 1999. doi:10.1016/S0038-0717(99)00082-6.
- [27] *A systematic review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization, mechanical, and durability properties*. Journal of Building Engineering, v. 49, 104038, 2022.
- [28] TAO, F.; ZHANG, M.; LIU, Y.; NEE, A.Y.C. *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press, 2019.
- [29] VAN PAASSEN, L. A. *Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, v. 163, n. 2, p. 73–83, 2010.
- [30] WHIFFIN, V.S.; VAN PAASSEN, L.A.; HARKER, M. *Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique*. Geomicrobiology Journal, v. 24, n. 5, p. 417–423, 2007.
- [31] WIKTOR, K.; JONKERS, H.M. *Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete*. Cement and Concrete Composites, v. 60, p. 1–8, 2016.
- [32] SANTOS, G.R.A. *O bioconcreto como alternativa de material concretício: uma revisão bibliográfica*. META 2020, 2021.
- [33] *Application of microbial precipitation in self-healing concrete: protection strategies for bacteria*. Construction and Building Materials, v. 306, 124950, 2021.
- [34] WILSON, U.N.; et al. *Microbial induced calcite precipitation on macrostructural properties of concrete: a review*. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, v. 6, n. 1, p. 42, 2025.
- [35] ZHANG, J.; et al. *A review of biomineralization in healing concrete: mechanism, biodiversity, and application*. Science of the Total Environment, v. 917, p. 170445, 2024.