



## Influência da Perlita Expandida e Fibras de Polipropileno no Comportamento Mecânico e Microestrutural de Concretos com Incorporação Bacteriana

### *Influence of Expanded Perlite and Polypropylene Fibers on the Mechanical and Microstructural Behavior of Concrete Incorporating Bacterial Agents*

Neiton Silva Machado

Emanuel Dantas Viana

Bruno Coutinho Moreira

Julio Cesar Ferreira Melo Junior

Jofran Luiz de Oliveira

Georges Marcelo Gil da Silva

**Resumo:** O bioconcreto tem sido investigado como alternativa tecnológica para aumento da durabilidade de estruturas cimentícias por meio da autorreparação induzida por microrganismos. Este estudo avaliou o desempenho mecânico, físico e químico de concretos produzidos com perlita expandida e fibras de polipropileno, associados à incorporação das bactérias *Priestia megaterium* CCT 7987 e *Bacillus subtilis* UFV S1. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com nove tratamentos e cinco repetições, totalizando 45 corpos de prova classe C20. Foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água, porosidade total, densidade aparente, pH, condutividade elétrica e contagem microbiológica. A resistência média variou entre 11,29 MPa e 13,79 MPa, sem diferenças estatisticamente significativas ( $p > 0,05$ ). A perlita promoveu redução da densidade e aumento da porosidade total, sem alteração significativa na absorção de água. Os parâmetros químicos refletiram predominantemente processos físico-químicos da matriz cimentícia. A análise microbiológica revelou viabilidade celular inferior à declarada pelo fabricante, o que comprometeu a manifestação do mecanismo de biomineralização. Conclui-se que o desempenho do bioconcreto depende criticamente da estabilidade microbiológica e do adequado encapsulamento das cepas bacterianas, sendo que, na ausência desses fatores, o sistema comporta-se como concreto modificado fisicamente, sem evidência de autocicatrização ativa.

**Palavras-chave:** autorregeneração do concreto; bactérias ureolíticas; carbonato de cálcio; biomineralização; viabilidade microbiológica.

**Abstract:** Bioconcrete has been investigated as a sustainable strategy to enhance the durability of cement-based materials through microbially induced self-healing. This study evaluated the mechanical, physical, chemical, and microbiological performance of concrete incorporating expanded perlite and polypropylene fibers combined with the bacterial strains *Priestia megaterium* CCT 7987 and *Bacillus subtilis* UFV S1. The experiment followed a completely randomized design with nine treatments and five replicates, totaling 45 C20-class concrete specimens. Compressive strength at 28 days, water absorption, total porosity, bulk density, pH, electrical conductivity, and microbial counts were assessed. Mean compressive

strength ranged from 11.29 MPa to 13.79 MPa, with no statistically significant differences among treatments ( $p > 0.05$ ). The incorporation of expanded perlite significantly reduced bulk density and increased total porosity, without affecting water absorption. Chemical parameters reflected predominantly physicochemical processes associated with the cement matrix. Microbiological analysis revealed substantially lower viable cell counts than declared by the manufacturer, limiting the occurrence of active biomineralization. The findings demonstrate that the functional performance of bioconcrete critically depends on microbial stability and effective encapsulation strategies. In the absence of adequate bacterial viability, the material behaves primarily as a physically modified concrete rather than an active self-healing system.

**Keywords:** concrete self-healing; ureolytic bacteria; calcium carbonate; biomineralization; microbiological viability.

## INTRODUÇÃO

O concreto é o material estrutural mais utilizado na engenharia civil contemporânea, desempenhando papel central no desenvolvimento de infraestrutura urbana, edificações e obras especiais. Sua ampla aplicabilidade decorre da versatilidade composicional, disponibilidade de matérias-primas e desempenho mecânico satisfatório. Entretanto, desafios relacionados à durabilidade, manifestações patológicas e custos de manutenção têm impulsionado a busca por soluções tecnológicas capazes de aprimorar seu comportamento ao longo do ciclo de vida das estruturas (Mehta; Monteiro, 2006; Silva *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2024).

Entre as principais limitações do concreto convencional destaca-se a fissuração, fenômeno inerente à retração, às variações térmicas e às solicitações mecânicas. Mesmo fissuras de pequena abertura permitem a penetração de agentes agressivos, como dióxido de carbono e íons cloreto, favorecendo processos de corrosão das armaduras e comprometendo a vida útil estrutural. Tais aspectos tornam a durabilidade um dos principais eixos de investigação na ciência dos materiais cimentícios (Mehta; Monteiro, 2006; Locatelli, 2025).

Nesse contexto, emergem os concretos com propriedades autorregenerativas, capazes de promover o selamento autônomo de fissuras por meio de reações químicas ou processos biogênicos. O bioconcreto, fundamentado na Precipitação de Carbonato de Cálcio Induzida por Microrganismos, utiliza bactérias capazes de metabolizar compostos nitrogenados e induzir a formação de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), promovendo o preenchimento de vazios e fissuras na matriz cimentícia (Jonkers & Schlangen, 2008; Jonkers, 2011; Costa *et al.*, 2021; Wong *et al.*, 2024). Estudos experimentais têm demonstrado que, sob condições adequadas de viabilidade microbiológica e encapsulamento, o processo pode contribuir para o aumento da durabilidade e, em alguns casos, para o incremento mecânico (Zakrzewski *et al.*, 2022; Elmenshaw *et al.*, 2024; Elshazly *et al.*, 2025).

Contudo, a eficácia do bioconcreto depende criticamente da estabilidade dos microrganismos em ambiente altamente alcalino. A matriz cimentícia apresenta pH elevado, baixa disponibilidade hídrica e condições adversas à sobrevivência celular,

tornando o encapsulamento e o controle microbiológico fatores determinantes para o sucesso do sistema (Pelegrinello, 2017; Martins *et al.*, 2021; Bernal, 2024). A ausência de proteção adequada pode limitar ou inviabilizar a biomineralização, fazendo com que o material se comporte de maneira semelhante ao concreto convencional modificado fisicamente.

Paralelamente às abordagens biogênicas, a incorporação de fibras de polipropileno tem sido amplamente empregada para controle da fissuração inicial, redução da propagação de microtrincas e melhoria do desempenho pós-fissuração. Conforme Figueiredo (1997; 2011) e Christ *et al.* (2024), fibras poliméricas atuam predominantemente na redistribuição de tensões e no controle microestrutural, com influência limitada na resistência à compressão simples. A associação entre fibras e sistemas biotecnológicos tem sido proposta como estratégia híbrida, combinando mecanismos preventivos e reativos de controle de fissuração (Ferreira; Knies, 2024; Gardini *et al.*, 2024).

Adicionalmente, o uso de materiais leves e porosos, como a perlita expandida, tem sido investigado como suporte físico para incorporação de microrganismos, atuando como reservatório de umidade e nutrientes no interior da matriz cimentícia. Entretanto, a introdução de tais materiais altera a microestrutura do concreto, podendo modificar densidade, porosidade e comportamento físico do compósito (Euzébio *et al.*, 2017; Pelegrinello, 2017).

Apesar dos avanços relatados na literatura, ainda há lacunas quanto à distinção entre os efeitos puramente físico-mecânicos da matriz modificada e os efeitos efetivamente biogênicos decorrentes da biomineralização ativa. Nesse sentido, estudos que integrem análise mecânica, físico-química e microbiológica tornam-se essenciais para compreender o real desempenho dos sistemas propostos.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da perlita expandida e das fibras de polipropileno no comportamento mecânico e microestrutural de concretos com incorporação bacteriana, por meio da análise integrada de parâmetros mecânicos, físicos, químicos e microbiológicos, visando distinguir os efeitos estruturais decorrentes de modificações físicas daqueles associados à potencial atividade biogênica.

## METODOLOGIA

### Delineamento Experimental e Análise Estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), composto por nove tratamentos e cinco repetições, totalizando 45 corpos de prova cilíndricos (10 cm × 20 cm). Os ensaios foram realizados aos 28 dias de idade.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância ( $p < 0,05$ ), conforme Montgomery (2017). Quando identificadas diferenças estatisticamente significativas, procedeu-se à comparação

múltipla de médias pelo teste de Tukey. A tabulação dos dados e as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio dos softwares Excel e SPSS 13.

## Tratamentos Experimentais

Os tratamentos (Tabela 1) foram definidos em função da presença ou ausência de perlita expandida, biocarga microbiana e fibras de polipropileno, conforme descrito a seguir.

**Tabela 1 – Descrição dos tratamentos.**

Tratamento	Código	Descrição
1	C	Concreto simples sem perlita expandida, sem microrganismos e sem fibras
2	C + P	Concreto simples com perlita expandida, sem microrganismos e sem fibras
3	C + MaF	Concreto simples com macrofibras de polipropileno sem perlita expandida e sem microrganismos
4	C + MiF	Concreto simples com microfibras de polipropileno sem perlita expandida e sem microrganismos
5	C + P + MaF	Concreto simples com perlita expandida sem microrganismos e com macrofibras de polipropileno
6	C + P + MiF	Concreto simples com perlita expandida sem microrganismos e com microfibras de polipropileno
7	B + P + MaF	Bioconcreto contendo perlita expandida embebida em biocarga microbiana e macrofibras de polipropileno
8	B + P	Bioconcreto contendo perlita expandida embebida em biocarga microbiana
9	B + P + MiF	Bioconcreto contendo perlita expandida embebida em biocarga microbiana e microfibras de polipropileno.

*Em que: C = Concreto simples; B = Bioconcreto (concreto simples + microrganismos); P = Perlita; MiF= Microfibras de polipropileno; MaF= Macrofibras de polipropileno*

**Fonte: Autores (2026).**

Cada tratamento foi moldado em cinco corpos de prova independentes, garantindo a repetibilidade experimental.

## Micro-Organismos e Mecanismo de Autorreparação

As bactérias empregadas em bioconcretos devem ser não patogênicas, resistentes à elevada alcalinidade da matriz cimentícia, capazes de permanecer em estado latente por longos períodos, não produzir gases tóxicos e apresentar potencial de precipitação de carbonato de cálcio (Euzébio *et al.*, 2017). Dentre essas, destacam-se as bactérias Gram-positivas do gênero *Bacillus* (Pelegrinello, 2017).

Neste estudo, foi utilizado o produto comercial BACFOS, comercializado pela empresa Cetro Sustentabilidade e Inovação, contendo as cepas *Priestia megaterium* CCT 7987 e *Bacillus subtilis* UFV S1, com concentração declarada no rótulo da

embalagem de  $1 \times 10^9$  UFC·mL<sup>-1</sup>.

A cicatrização biológica foi promovida pela rota ureolítica, utilizando ureia como fonte de nitrogênio e nitrato de cálcio como fonte de cálcio. Nesse processo, a enzima urease produzida pelas bactérias hidrolisa a ureia em amônia e íons carbonato, os quais reagem com íons de cálcio, promovendo a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), responsável pelo selamento das fissuras.

## Materiais Constituintes do Concreto

O cimento empregado foi o Portland CP V ARI RS, conforme classificação da ABNT NBR 11578 (1991). O agregado graúdo consistiu em brita de gnaiss com diâmetro máximo característico de 12 mm, massa unitária de 1550 kg·m<sup>-3</sup> e massa específica de 2700 kg·m<sup>-3</sup>. O agregado miúdo foi areia lavada do rio São Francisco, com módulo de finura 2,16, massa específica de 2700 kg·m<sup>-3</sup> e índice de inchamento de 1,25. As especificações da NBR 7211 (2009) de agregados para concreto foram atendidas. A água de amassamento foi proveniente da concessionária COMPESA, atendendo à ABNT NBR 15900-1 (2009).

## Fibras de Polipropileno

As microfibras utilizadas foram de polipropileno (PP), do tipo sintético monofilamentar, comercialmente identificadas como NEOFIBRA MF 12 mm ST, comercializadas pela empresa Neomatrix Fibras e Têxteis Técnicos para Engenharia. As microfibras possuem comprimento nominal de 12 mm e são comercializadas em pacotes de 600 g, acondicionados em fardos com 20 unidades, totalizando 12,0 kg por fardo.

As macrofibras de polipropileno utilizadas foram as da marca COLISEU que apresentam comprimento médio de 54 mm, fator de forma 54 FF, resistência à tração de 350 MPa e módulo de elasticidade de 9 GPa.

As fibras apresentam elevada resistência à alcalinidade, não absorvem água e possuem alta durabilidade. De modo geral, as fibras de polipropileno caracterizam-se por baixa densidade, elevada resistência química e estabilidade em meio alcalino, sendo amplamente utilizadas para controle da fissuração em idades iniciais, especialmente aquela associada à retração plástica e às tensões térmicas. Sua incorporação melhora a integridade da matriz cimentícia, reduzindo a formação e a propagação de microfissuras, sem impacto significativo na resistência à compressão.

Especificamente, as microfibras têm como principal função o controle microestrutural da fissuração, não sendo destinadas ao aumento da resistência à compressão.

## Perlita expandida

A perlita expandida utilizada foi do tipo médio, da marca AIMIRIM – Insumos para Cultivo (Garden), comercializada em embalagens de 20 L. Trata-se de material

de origem vulcânica submetido a tratamento térmico que promove expansão volumétrica, resultando em partículas de baixa densidade e elevada porosidade.

A perlita apresenta elevada capacidade de retenção de água, estabilidade química e comportamento inerte em meio alcalino, sendo adequada para aplicação em matrizes cimentícias. No bioconcreto, foi utilizada como suporte físico para a incorporação da biocarga bacteriana, atuando como reservatório de umidade e nutrientes no interior da matriz cimentícia. Sua utilização favorece a formação de porosidade funcional controlada, potencialmente adequada à manutenção da atividade microbiológica, sem comprometer significativamente as propriedades físicas e mecânicas do concreto.

## Dosagem do Concreto e Quantidades de Materiais

A dosagem do concreto foi realizada conforme o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1998), adaptado do método do American Concrete Institute (ACI) e as quantidades calculadas para cada metro cúbico de concreto encontram-se na Tabela 2. O concreto foi dimensionado para resistência característica à compressão ( $f_{ck} = 20$  MPa, classe C20), conforme a ABNT NBR 8953 (2015), adotando-se desvio padrão de 5,5 MPa (condição B). O traço em massa adotado foi 1:2:3:0,6 (cimento:areia:brita:água), visando abatimento de tronco de cone de  $90 \pm 10$  mm.

**Tabela 2 – Quantidades de materiais utilizadas por metro cúbico de concreto no traço experimental.**

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>
Cimento CP VARI RS	320 kg
Agregado miúdo (areia)	650 kg
Agregado graúdo (brita)	950 kg
Água de amassamento	192 L
Microrganismos na concentração de $1 \times 10^9$ UFC.ml <sup>-1</sup>	1,0 L
Perlita média	6,4 kg
Fonte de nitrogênio (ureia)	4,8 kg
Fonte de cálcio (nitrato de cálcio)	4,8 kg
Fibras de polipropileno	1,0 kg

**Fonte: Autores (2026).**

## Incorporação da Biocarga, Moldagem e Ensaio

A perlita expandida foi embebida em solução bacteriana na proporção de 1 mL de biocarga por grama de perlita, permanecendo em repouso por 30 minutos para assegurar a fixação dos microrganismos. Posteriormente, a perlita colonizada foi incorporada à mistura fresca na proporção de 2% em relação à massa de cimento. As fibras de polipropileno foram adicionadas durante o amassamento, conforme a dosagem estabelecida.

Os corpos de prova foram moldados conforme a ABNT NBR 5738 (2016), com desmolde após três dias, e ensaiados quanto à resistência à compressão simples aos 28 dias, de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018). As propriedades físicas — absorção de água, densidade aparente e porosidade total — foram determinadas conforme a ABNT NBR 9778 (2009). O pH e a condutividade elétrica da água de imersão foram avaliados segundo as ABNT NBR 10547 (1988) e ABNT NBR 10739 (1989), respectivamente.

O preparo, o controle tecnológico e o recebimento do concreto seguiram a ABNT NBR 12821 (2009). A caracterização dos agregados foi realizada conforme a ABNT NBR 6467 (2006) e a ABNT NBR NM 248 (2003). A absorção de água por capilaridade foi determinada segundo a ABNT NBR 9479 (2006). Os concretos reforçados com fibras atenderam aos requisitos da ABNT NBR 16935 (2021), observando-se ainda os critérios gerais estabelecidos pela ABNT NBR 6118 (2023).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento observado nos compósitos analisados deve ser interpretado à luz de três eixos fundamentais: (i) resposta mecânica da matriz cimentícia, (ii) alterações microestruturais induzidas pela perlita e pelas fibras e (iii) limitação microbiológica do sistema biotecnológico empregado.

A literatura contemporânea destaca que o bioconcreto representa uma evolução dos materiais cimentícios tradicionais ao integrar mecanismos biogênicos de autorreparação à matriz convencional (Jonkers & Schlangen, 2008; Jonkers, 2011; Ferreira & Kniess, 2024; Wong *et al.*, 2024). Entretanto, a efetividade desse sistema depende criticamente da viabilidade metabólica dos microrganismos incorporados, condição que, no presente estudo, mostrou-se limitada.

A análise de variância (ANOVA) permitiu avaliar o efeito dos diferentes tratamentos sobre as propriedades mecânicas, físicas e físico-químicas analisadas. Para a resistência à compressão aos 28 dias ( $f_{c28}$ ), não foi observada diferença estatisticamente significativa entre os grupos ( $p$ Valor = 0,150), indicando que os tratamentos avaliados não promoveram variações relevantes na resistência mecânica do material dentro do nível de significância adotado ( $\alpha = 5\%$ ). Esse resultado sugere que as modificações aplicadas não comprometeram o desempenho estrutural, o que é particularmente relevante em estudos envolvendo materiais cimentícios modificados.

A absorção de água não apresentou diferenças significativas entre os grupos ( $p$ Valor = 0,681), indicando comportamento homogêneo quanto à capacidade de absorção hídrica. Esse resultado sugere que, apesar das variações observadas em outros parâmetros físicos, a conectividade dos poros capilares e a permeabilidade global do material permaneceram relativamente constantes entre os tratamentos.

Em contraste, a densidade aparente apresentou diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos ( $p$ Valor < 0,001), evidenciando que as alterações na composição influenciaram diretamente a estrutura interna do material. Variações

na densidade aparente estão geralmente associadas a mudanças na distribuição de vazios e na compactação da matriz, podendo refletir a incorporação de aditivos, materiais porosos ou modificadores físicos.

Por outro lado, a porosidade total apresentou diferenças estatisticamente significativas ( $p\text{Valor} < 0,001$ ), confirmando que os tratamentos alteraram a microestrutura do material. A combinação de porosidade total significativa com absorção de água não significativa indica que as modificações podem ter afetado predominantemente a porosidade fechada ou não interconectada, sem aumentar de forma expressiva os caminhos preferenciais para o transporte de água.

Os parâmetros pH e condutividade elétrica (CE) exibiram diferenças altamente significativas entre os tratamentos ( $p < 0,001$ ), com valores elevados do teste F, indicando forte sensibilidade dessas variáveis às modificações aplicadas. O pH elevado e significativamente distinto entre os grupos sugere mudanças no equilíbrio alcalino do sistema, possivelmente associadas à liberação de íons hidroxila ou à presença de compostos alcalinos solúveis. De forma complementar, a elevada condutividade elétrica indica variações expressivas na concentração de íons dissolvidos, refletindo alterações na composição química da solução intersticial.

A variável temperatura também apresentou efeito significativo entre os grupos ( $p\text{Valor} < 0,001$ ), o que pode estar relacionado a variações no processo experimental, nas condições de cura ou em reações físico-químicas diferenciadas promovidas pelos tratamentos. Em materiais cimentícios, alterações térmicas podem influenciar tanto a cinética de hidratação quanto a formação de produtos secundários na matriz.

De maneira integrada, os resultados da ANOVA (Tabela 3) indicam que os tratamentos avaliados exerceram influência predominante sobre as propriedades físicas e químicas do material, especialmente aquelas relacionadas à microestrutura e à química dos poros, sem comprometer de forma significativa a resistência mecânica aos 28 dias. Esse comportamento é desejável em estratégias de modificação de materiais cimentícios voltadas à funcionalização físico-química, mantendo a integridade estrutural do sistema.

**Tabela 3 – Resumo da Análise de Variância (ANOVA).**

Variável	FV	SQ	GL	QM	F	pValor
fc28	Entre Grupos	21,44	8	2,68	1,63	0,150
	Dentro dos grupos	59,13	36	1,64		
	Total	80,57	44			
Absorção de Água	Entre Grupos	1,84	8	0,23	0,71	0,681
	Dentro dos Grupos	11,69	36			
	Total	13,54	44	0,33		
Densidade Aparente	Entre Grupos	0,05	8	0,01	4,95	<0,001
	Dentro dos grupos	0,04	36	0,00		
	Total	0,09	44			

Variável	FV	SQ	GL	QM	F	pValor
Porosidade Total	Entre Grupos	66,79	8	8,35	5,18	<0,001
	Dentro dos grupos	58,02	36	1,61		
	Total	124,81	44			
pH	Entre Grupos	1,59	8	0,20	256,82	<0,001
	Dentro dos Grupos	0,03	36	0,00		
	Total	1,62	44			
CE	Entre Grupos	21168,98	8	2646,12	1360,86	<0,001
	Dentro dos Grupos	70,00	36	1,94		
	Total	21238,98	44			
Temperatura	Entre Grupos	0,99	8	0,12	7,57	<0,001
	Dentro dos Grupos	0,59	36	0,02		
	Total	1,58	44			

Em que: FV = Fonte de Variação; SQ = Soma de Quadrados; GL = Grau de Liberdade; QM= Quadrado Médio

Fonte: Autores (2026).

## Desempenho Mecânico e Contribuição das Fibras

A resistência média à compressão variou entre 11,29 MPa e 13,79 MPa (Tabela 4 e Figura 1), sem diferenças estatisticamente significativas ( $p > 0,05$ ). Esse resultado indica que a introdução de perlita, fibras e biocarga não comprometeu a integridade estrutural do concreto classe C20.

Segundo Mehta e Monteiro (2006), a resistência à compressão é predominantemente governada pela relação água/cimento, grau de hidratação e microestrutura da pasta, sendo menos sensível à presença de fibras poliméricas. Essa observação é reforçada por Figueiredo (1997; 2011), que afirma que fibras de polipropileno atuam principalmente no controle da fissuração plástica e na redistribuição de tensões, apresentando impacto limitado na compressão simples.

Christ *et al.* (2024) também relatam que fibras poliméricas promovem melhoria no comportamento pós-fissuração e na tenacidade, mas não necessariamente elevam o fck. Assim, a estabilidade mecânica observada neste estudo está plenamente alinhada à literatura especializada.

No contexto do bioconcreto, incrementos mecânicos são relatados quando há precipitação efetiva de carbonato de cálcio no interior da matriz (Zakrzewski *et al.*, 2022; Sidiq *et al.*, 2019; Elmenshawy *et al.*, 2024; Elshazly *et al.*, 2025). Como tal incremento não foi observado, os resultados corroboram a ausência de biomineralização ativa, conforme evidenciado pela análise microbiológica.

**Tabela 4 - Resultados dos ensaios de resistência mecânica e físico-químicos.**

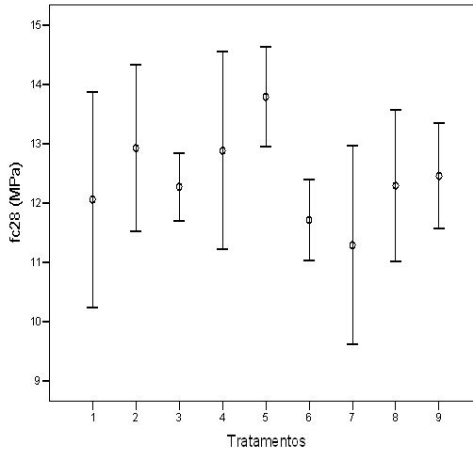
Variável	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor Máximo
fc28 (MPa)	1	12,06 a	1,82	9,30	13,70
	2	12,93 a	1,41	11,00	14,60
	3	12,28 a	0,57	11,50	12,90
	4	12,89 a	1,66	11,00	15,40
	5	13,79 a	0,83	12,50	14,80
	6	11,72 a	0,68	11,10	12,80
	7	11,29 a	1,67	9,70	13,70
	8	12,30 a	1,28	10,30	13,90
	9	12,46 a	0,89	11,30	13,30
Absorção de água por imersão (%)	1	2,04 a	0,08	2,00	2,10
	2	2,01 a	0,09	1,90	2,10
	3	2,70 a	1,57	1,90	5,50
	4	2,02 a	0,32	1,60	2,50
	5	2,18 a	0,15	2,00	2,30
	6	2,11 a	0,08	2,00	2,20
	7	2,18 a	0,12	2,10	2,40
	8	2,14 a	0,13	1,90	2,20
	9	2,05 a	0,54	1,60	2,90
Densidade aparente (g cm-3)	1	2,25 a	0,03	2,20	2,30
	2	2,19 abc	0,04	2,20	2,20
	3	2,20 abc	0,04	2,10	2,20
	4	2,17 bc	0,02	2,20	2,20
	5	2,23 ab	0,04	2,20	2,30
	6	2,17 bc	0,03	2,10	2,20
	7	2,16 bc	0,02	2,10	2,20
	8	2,14 c	0,01	2,10	2,20
	9	2,18 abc	0,06	2,10	2,20
Porosidade total (%)	1	15,11 c	1,07	13,80	16,50
	2	17,25 abc	1,34	15,90	18,80
	3	16,86 abc	1,58	15,60	19,60
	4	18,02 ab	0,68	17,00	18,80
	5	16,00bc	1,28	14,40	17,70
	6	18,06 ab	1,03	17,00	19,40
	7	18,57 ab	0,74	17,40	19,50
	8	19,29 a	0,32	18,80	19,60
	9	17,66 abc	2,29	15,90	21,40

Variável	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor Máximo
pH da água após imersão dos corpos de prova	Padrão	6,67	0,06	6,61	6,75
	1	10,54 ab	0,02	10,50	10,60
	2	10,49bc	0,02	10,50	10,50
	3	10,59 a	0,01	10,60	10,60
	4	10,44cd	0,03	10,40	10,50
	5	10,40d	0,01	10,40	10,40
	6	10,41d	0,03	10,40	10,50
	7	10,21e	0,01	10,20	10,20
	8	10,07f	0,07	10,00	10,10
	9	10,05f	0,01	10,00	10,10
Condutividade Elétrica da água após imersão dos corpos de prova ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	Padrão	112,00	0,71	111,00	113,00
	1	589,60a	2,30	587,00	592,00
	2	576,20c	2,77	573,00	579,00
	3	581,60b	0,55	581,00	582,00
	4	592,00a	1,22	591,00	594,00
	5	558,40d	0,89	558,00	560,00
	6	589,80a	0,45	589,00	590,00
	7	576,20c	0,45	576,00	577,00
	8	583,00b	1,00	582,00	584,00
	9	519,00e	0,71	518,00	520,00
Temperatura da superfície do corpo de prova aos 28 dias ( $^{\circ}\text{C}$ )	1	29,94d	0,15	29,80	30,10
	2	30,06bcd	0,18	29,90	30,30
	3	30,14abcd	0,11	30,00	30,30
	4	30,24abc	0,17	30,10	30,50
	5	30,00cd	0,10	29,90	30,10
	6	29,96d	0,09	29,90	30,10
	7	30,14abcd	0,09	30,10	30,30
	8	30,32ab	0,11	30,20	30,50
	9	30,38a	0,11	30,30	30,50

*Média seguida da mesma letra minúscula na coluna não difere estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.*

**Fonte: Autores (2026).**

**Figura 1 - Ilustração gráfica da resistência característica do concreto aos 28 dias de idade para cada tratamento considerando mais ou menos um desvio padrão.**



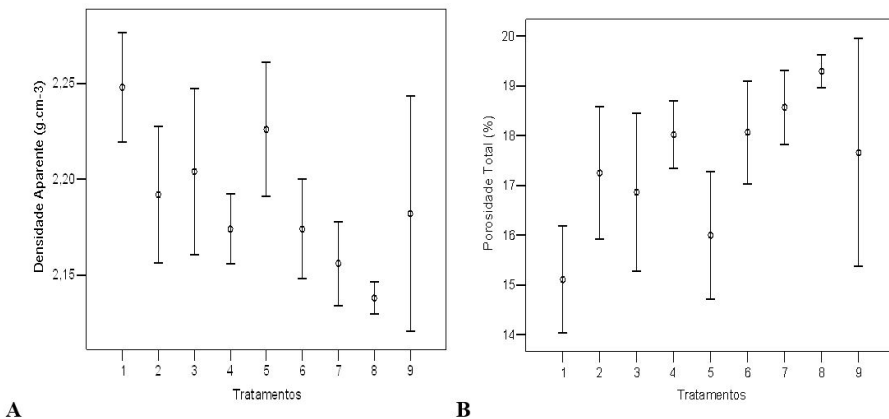
Fonte: Autores (2026).

### Alterações Microestruturais Promovidas pela Perlita

A redução significativa da densidade aparente (Figura 2A) e o aumento da porosidade total (Figura 2B) nos tratamentos contendo perlita confirmam o papel desse material como agente formador de vazios estruturais.

Euzébio *et al.* (2017) e Pelegrinello (2017) descrevem a perlita expandida como material de baixa massa específica e elevada porosidade intrínseca, capaz de modificar a estrutura interna da matriz cimentícia. No presente estudo, a porosidade atingiu 19,29 %, valor estatisticamente superior ao do concreto de referência.

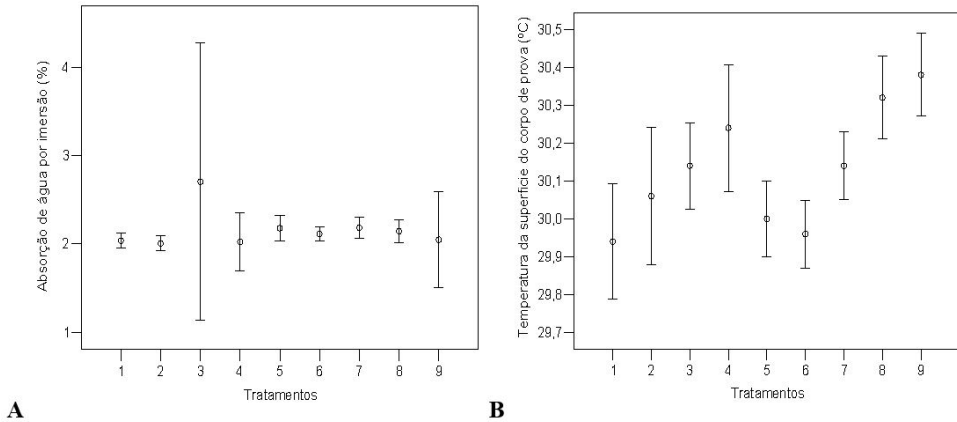
**Figura 2 - Ilustração gráfica da densidade aparente (A) e da porosidade total (B).**



Fonte: Autores (2026)

Entretanto, a absorção de água por imersão (Figura 3A) não apresentou diferença significativa, indicando que o aumento de vazios não implicou maior permeabilidade inicial. De acordo com Mehta e Monteiro (2006), a conectividade dos poros exerce influência mais determinante que o volume total de vazios, o que explica a manutenção da absorção em torno de 2 %.

**Figura 3 - Ilustração gráfica da absorção de água por imersão (A) e da temperatura da superfície dos corpos de prova (B).**



Fonte: Autores (2026)

Sob a perspectiva tecnológica, Locatelli (2025) e Oliveira *et al.* (2024) destacam que modificações controladas na microestrutura podem contribuir para a redução de peso próprio e adequação funcional do material, especialmente em elementos não estruturais.

## Limitações da Viabilidade Microbiológica e Ausência de Biomineralização Ativa no Bioconcreto

A literatura aponta que sistemas de bioconcreto com atividade bacteriana efetiva apresentam redução progressiva da porosidade e selamento de microfissuras por precipitação de  $\text{CaCO}_3$  (Jonkers, 2011; Hernández-Piedrazul *et al.*, 2022; Wong *et al.*, 2024). No presente estudo, entretanto, não foram observadas evidências de biomineralização ativa, uma vez que não houve redução da porosidade nem incremento mecânico significativo, indicando que o comportamento do material foi predominantemente governado por efeitos físicos associados à incorporação de perlita e fibras. A análise microbiológica, realizada a posteriori sobre o produto comercial após os ensaios mecânicos, revelou contagem de unidades formadoras de colônia significativamente inferior à declarada pelo fabricante (Tabela 5), sugerindo que a biocarga já apresentava viabilidade reduzida antes da incorporação ao concreto. Esse resultado reforça a importância da viabilidade celular como fator crítico para a eficiência do processo de MICP, conforme destacado por Pelegrinello (2017) e Martins *et al.* (2021), além de evidenciar os desafios impostos pelo ambiente altamente alcalino da matriz cimentícia à sobrevivência bacteriana (Bernal, 2024).

Ressalta-se, contudo, que a ausência de monitoramento microbiológico ao longo das etapas experimentais limita a distinção entre perdas de viabilidade prévias e aquelas decorrentes das condições do meio cimentício, caracterizado por elevada alcalinidade, baixa disponibilidade hídrica e alta concentração iônica. Adicionalmente, a perlita expandida, embora utilizada como suporte físico, não atuou como sistema de encapsulamento efetivo, não sendo capaz de proteger adequadamente os microrganismos; destaca-se ainda que não foi realizado o selamento com silicato de sódio — procedimento recomendado na literatura — devido a limitações técnicas. Esses aspectos ajudam a explicar a ausência de atividade metabólica relevante e, conseqüentemente, de biomineralização.

Tais resultados corroboram estudos que apontam que o desempenho do bioconcreto depende diretamente da estabilidade microbiológica e de estratégias eficientes de encapsulamento (Gardini; De Marco; Florian, 2024; Ferreira; Kniess, 2024), sendo que abordagens alternativas, como o uso de fungos biomineralizantes, têm sido investigadas devido à maior tolerância a ambientes agressivos (Martuscelli *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2022). Além disso, Elmenshawy *et al.* (2024) e Elshazly *et al.* (2025) destacam que a proteção dos microrganismos frente a variações térmicas e químicas é determinante para a eficácia do sistema, reforçando a necessidade de desenvolvimento de técnicas avançadas de encapsulamento para viabilizar a aplicação prática do bioconcreto.

**Tabela 5 - Número de colônias encontradas nas diferentes diluições do produto comercial.**

Repetições	Concentração de microrganismos (UFC.ml-1)					
	10-3	10-4	10-5	10-6	10-7	10-8
1	20	0	0	0	0	0
2	25	0	1	0	0	0
3	23	1	0	0	0	0

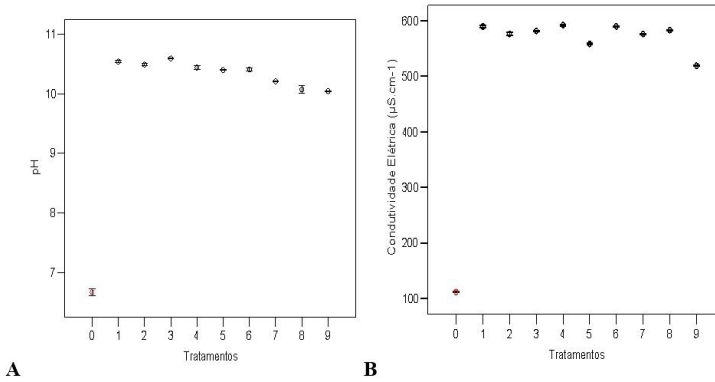
Fonte: Autores (2026).

## Parâmetros Químicos: pH e Condutividade

Os valores elevados de pH (Figura 4A) e condutividade elétrica (Figura 4B) refletem principalmente processos de lixiviação e dissolução iônica da matriz cimentícia, conforme descrito por Mehta e Monteiro (2006).

Embora Costa *et al.* (2021) relacionem aumento de pH à atividade ureolítica, tal associação não se confirmou neste estudo, pois os tratamentos biotecnológicos não apresentaram comportamento distinto dos convencionais. Sidiq *et al.* (2019) demonstram que condutividade elevada pode ocorrer independentemente de biomineralização ativa, sendo resultado da presença de sais dissolvidos — especialmente nitratos e compostos alcalinos.

**Figura 4- Ilustração gráfica dos parâmetros químicos: A) pH B) Condutividade Elétrica.**



Fonte: Autores (2026).

O tratamento zero destacado em vermelho na figura 4A e 4B representa a amostra padrão (branco) da água utilizada no processo de imersão dos corpos de prova

## Contribuição Original do Estudo

O presente estudo contribui para a literatura ao evidenciar experimentalmente que a simples incorporação de biocarga comercial em matrizes cimentícias não garante a ativação do mecanismo de biomineralização, mesmo quando associada a material suporte como a perlita expandida. Diferentemente de investigações que reportam ganhos mecânicos sob condições ideais de viabilidade celular, esta pesquisa demonstra, de forma sistemática e estatisticamente fundamentada, que a estabilidade microbiológica constitui variável determinante para o desempenho funcional do bioconcreto. Além disso, ao avaliar simultaneamente parâmetros mecânicos, físicos, químicos e microbiológicos, o trabalho fornece uma abordagem integrada que permite distinguir efeitos físico-mecânicos daqueles biogênicos, oferecendo subsídios técnicos relevantes para o aprimoramento de protocolos de encapsulamento e controle microbiológico em aplicações futuras.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstraram que a incorporação de perlita expandida e fibras de polipropileno não comprometeu o desempenho mecânico do concreto classe C20, mantendo a resistência média à compressão entre 11,29 MPa e 13,79 MPa, sem diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. Esse comportamento confirma que as fibras atuam predominantemente no controle microestrutural da fissuração, com influência limitada na compressão simples, conforme amplamente descrito na literatura especializada.

A perlita expandida promoveu redução significativa da densidade aparente e aumento da porosidade total, sem elevação correspondente na absorção de água por imersão, indicando que os vazios introduzidos apresentam baixa conectividade efetiva. Tal resultado reforça que modificações microestruturais controladas podem ser adotadas sem prejuízo imediato à durabilidade inicial do material.

Não foram observadas evidências indiretas de biomineralização ativa, como incremento mecânico ou redução de porosidade nos tratamentos contendo biocarga. A análise microbiológica revelou viabilidade celular significativamente inferior à concentração declarada pelo fabricante, comprometendo o potencial de precipitação de carbonato de cálcio. Assim, conclui-se que a eficácia do bioconcreto depende criticamente do controle rigoroso da estabilidade microbiológica, do armazenamento e das técnicas de encapsulamento empregadas.

Do ponto de vista tecnológico, os resultados indicam que, na ausência de viabilidade bacteriana adequada, o sistema comporta-se essencialmente como um concreto modificado fisicamente por material leve e fibras poliméricas, não como um bioconcreto funcionalmente ativo. Portanto, avanços futuros devem concentrar-se no desenvolvimento de protocolos de validação microbiológica, técnicas aprimoradas de encapsulamento e análises microestruturais complementares, a fim de garantir a manifestação efetiva do mecanismo de autocicatrização.

## REFERÊNCIAS

- ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem de concreto: método de dosagem da ABCP** (adaptação do método do ACI). São Paulo: ABCP, 1998.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10547: Água – Determinação do pH**. Rio de Janeiro, 1988.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10739: Água – Determinação da condutividade elétrica**. Rio de Janeiro, 1989.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821: Concreto – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16935: Concreto reforçado com fibras – Requisitos de desempenho**. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2023.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467: Agregados – Determinação do índice de inchamento de agregado miúdo.** Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479: Argamassas e concretos – Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

BERNAL ZUÑIGA, L. **Uso de bacterias tipo Gram-positivo para el mejoramiento del concreto: una revisión de la literatura.** 2024. Trabalho de Investigação (Bachiller en Ingeniería Civil) – Universidad César Vallejo, Lima, 2024. Disponível em [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/146697/Bernal\\_ZL-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/146697/Bernal_ZL-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y) Acesso em 05/02/2026

CHRIST, R. *et al.* Análise da influência das fibras de aço e poliméricas nas propriedades do estado fresco e endurecido de concreto reforçado com fibras. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 13, n. 1, p. 116–134, 2024. Disponível em <https://seer.atitus.edu.br/index.php/arqimed/article/view/5008/3368> Acesso em 05/02/2026

COSTA, L. B. *et al.* Bioconcreto e sua aplicabilidade na recuperação de manifestações patológicas na construção civil. **Revista Mangaio Acadêmico**, v. 6, p. 47–67, 2021. Disponível em <https://estacio.periodicoscientificos.com.br/index.php/mangaio/article/view/1553> Acesso em 05/02/2026

ELMENSRAWY, Y. *et al.* Investigating the bacterial sustainable self-healing capabilities of cracks in structural concrete at different temperatures. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, e03188, 2024. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03188> Acesso em 05/02/2026

ELSHAZLY, M. A. *et al.* Investigating the effectiveness of a bacterial self-healing mechanism for repairing cracks in sustainable cement mortar at low temperatures. *Results in Engineering*, v. 25, 103907, 2025. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103907> Acesso em 05/02/2026

EUZÉBIO, L. A.; ALVES, T. R.; FERNANDES, V. A. **Bioconcreto: estudo exploratório de concreto com introdução de *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, acetato de cálcio e ureia**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017. Disponível em [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/ESTUDO\\_EXPLORAT%C3%93RIO\\_DE\\_CONCRETO\\_COM\\_INTRODU%C3%87%C3%83O\\_DE\\_BACILLUS\\_SUBTILIS\\_BACILLUS\\_LICHENIFORMIS\\_\\_ACETATO\\_DE\\_C%C3%81LCIO\\_E\\_UREIA..pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/ESTUDO_EXPLORAT%C3%93RIO_DE_CONCRETO_COM_INTRODU%C3%87%C3%83O_DE_BACILLUS_SUBTILIS_BACILLUS_LICHENIFORMIS__ACETATO_DE_C%C3%81LCIO_E_UREIA..pdf) Acesso em 05/02/2026

FERREIRA, A. C. C.; KNISS, C. T. Concretos com propriedades autorregenerativas: comparação a partir da revisão bibliográfica da literatura. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 12, p. 1–21, 2024. Disponível em <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/10304/5916> Acesso em 05/02/2026

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras: ciência e tecnologia**. São Paulo: EPUSP, 2011. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/cb1984de-1f2c-4bcb-ab62-2245fa489fd6/Figueiredo-2011-concreto.pdf>. Acesso em: 05/02/2026.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1997. Disponível em <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-11072017-111451/publico/AntonioDominguesdeFigueiredoTese.pdf> Acesso em 05/02/2026

GARDINI, O. L.; DE MARCO, G.; FLORIAN, F. A utilização de bioconcreto na construção civil, pontos positivos e seus desafios. **RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar**, v. 5, n. 1, e6061, 2024. Disponível em <https://doi.org/10.47820/recima21.v5i1.6061> Acesso em 05/02/2026

HERNÁNDEZ-PIEDRAZUL, E.; ROBLES, I. E. C.; MENDIOLA, L. L. **El bioconcreto como agente reparante en estructuras de concreto**. *Pädi*, v. 10, n. esp. 2, p. 176–183, 2022. Disponível em <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/8667/9026> Acesso em 05/02/2026

JONKERS, H. M. **Bacteria-based self-healing concrete**. *Heron*, v. 56, n. 1/2, p. 1–12, 2011. Disponível em <https://heronjournal.nl/56-12/1.pdf> Acesso em 05/02/2026

JONKERS, H. M. e SCHLANGEN, E. **Development of a bacteria-based self-healing concrete Tailor Made Concrete Structures** – Walraven & Stoelhorst (eds) 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47535-8. Disponível em <http://www.abece.com.br/web/restrito/restrito/pdf/ch062.pdf> Acesso em 05/02/2026

LOCATELLI, A. P. K. Ciência dos materiais para a engenharia: evolução e impactos na construção civil. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 10, 2025. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/17931>. Acesso em: 20/01/2026.

MARTINS, M. G. A. *et al.* Bioconcreto: bactérias Gram-positivas retiradas do solo no autorreparo de fissuras, trincas e rachaduras no concreto. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, e40810515215, 2021. Disponível em <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/15215/13534> Acesso 05/02/2026

MARTUSCELLI, C. *et al.* **Potential of fungi for concrete repair**. Procedia Manufacturing, v. 46, p. 180–185, 2020. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920308982?via%3Dihub> Acesso em 05/02/2026

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2006. Disponível em <https://worksaccounts.com/wp-content/uploads/2020/08/Concrete-Microstructure-Properties-and-Materials.pdf> Acesso em 06/02/2026

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 9. ed. New York: John Wiley & Sons, 2017. Disponível em [https://www.researchgate.net/publication/362079778\\_Design\\_and\\_Analysis\\_of\\_Experiments\\_9th\\_Edition#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/362079778_Design_and_Analysis_of_Experiments_9th_Edition#fullTextFileContent) Acesso 05/02/2026

OLIVEIRA, R. M.; SILVA, J. S.; SANTOS, L. F. Materiais cimentícios e sustentabilidade na construção civil: avanços tecnológicos e desafios contemporâneos. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 10, n. 4, 2024. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br>. Acesso em: 20/01/2026.

PELEGRINELLO, M. **Estudo da influência do uso de bactérias na biocalcificação de argamassas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil. Disponível em <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8108> Acesso em 05/02/2026

SIDIQ, A.; GRAVINA, R.; GIUSTOZZI, F. **Experimental investigation of the self-healing performance of bacteria-based cementitious composites**. Cement and Concrete Composites, v. 104, p. 103–114, 2019. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/957556146/sidiq2019> Acesso 05/02/2026

SILVA, J. S.; OLIVEIRA, R. M.; SANTOS, L. F. A ciência do concreto e da argamassa: da mistura à resistência. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 9, n. 9, 2023. Disponível em:

<https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/18696>. Acesso em: 20/01/2026.

WONG, P. Y. *et al.* Advances in microbial self-healing concrete: a critical review of mechanisms, developments, and future directions. **Science of the Total Environment**, v. 947, 174553, 2024. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174553> Acesso em 05/02/2026

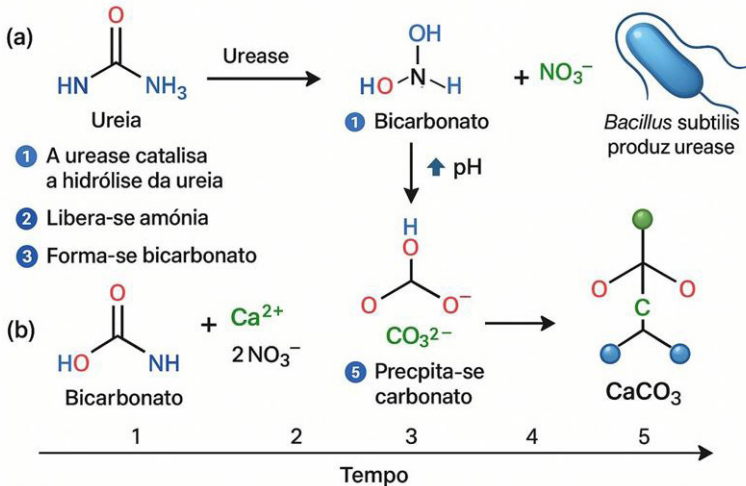
ZAKRZEWSKI, M. *et al.* **Avaliação das propriedades mecânicas e de autocicatrização de bioconcreto produzido com *Bacillus subtilis***. Pesquisa e Desenvolvimento, v. 1, p. 1–10, 2022. Disponível em <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/1809-7197.2022.106.0005> Acesso em 05/02/2026

ZHAO, J. *et al.* Fungal colonization and biomineralization for bioprotection of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 330, 129793, 2022. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129793> Acesso em 05/02/2026

## APÊNDICE

### A - Ilustração Gráfica dos Procedimentos Experimentais

Fluxograma simplificado do mecanismo bioquímico da precipitação microbiana de carbonato de cálcio mediada pela hidrólise da ureia.

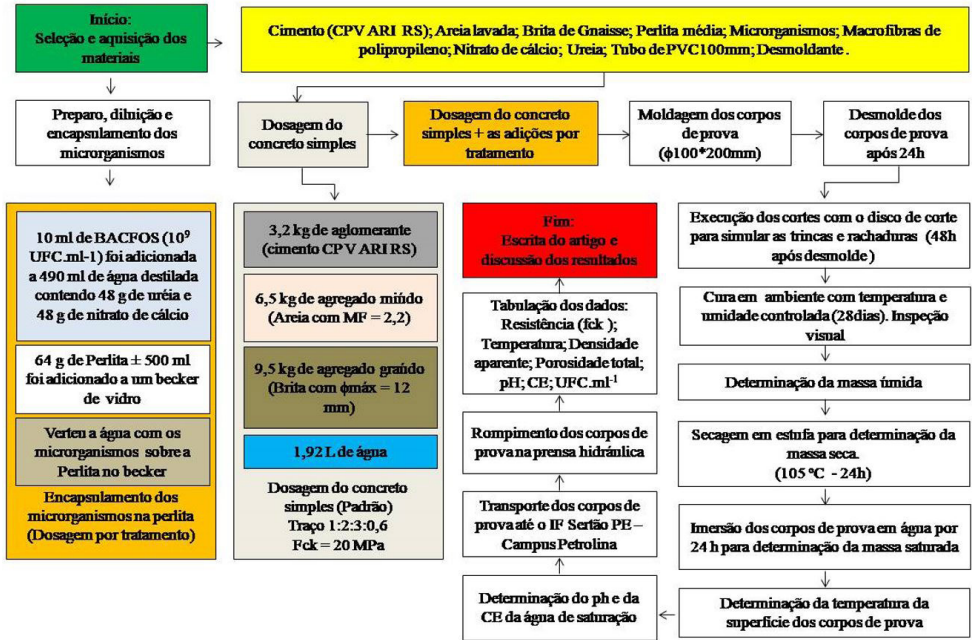


Fonte: Autores (2026)

Na etapa (a), ocorre a hidrólise da ureia catalisada pela enzima urease, produzida por *Bacillus subtilis*, resultando na liberação de amônia, elevação do pH do meio e formação de bicarbonato como espécie intermediária. Esse aumento do pH favorece o deslocamento do equilíbrio químico para a geração de íons carbonato. Já na etapa (b), os íons carbonato reagem com íons de cálcio disponíveis no sistema, promovendo a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) ao longo

do tempo, evidenciando o papel central da atividade microbiana no processo de biomineralização.

**Fluxograma experimental.**



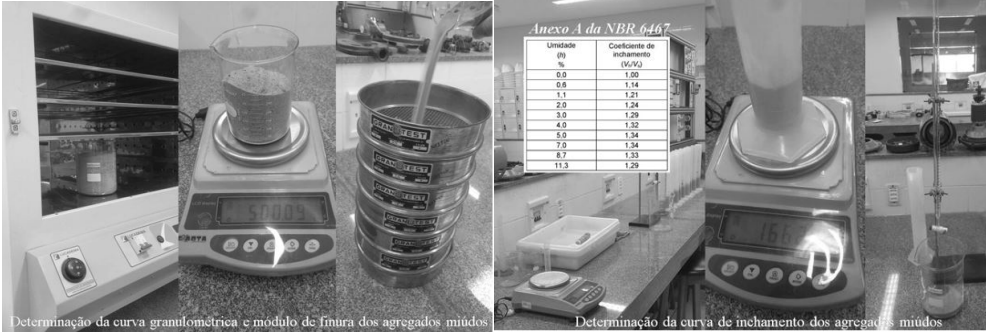
Fonte: Autores (2026).

Ilustração dos materiais utilizados no trabalho. A) Cimento CPV ARI RS, marca CSN; B) Areia lavada do rio São Francisco; C) Brita de gnaise 12 mm; D) Água potável da concessionária COMPESA; E) Macrofibras de polipropileno, marca COLISEU; F) Micro-organismos, marca BACFOS; G) Perlita média, marca AÌMIRÍM; H) Nitrato de Cálcio, marca Yara Tera; I) Ureia agrícola, marca Heringer.



Fonte: Autores (2026)

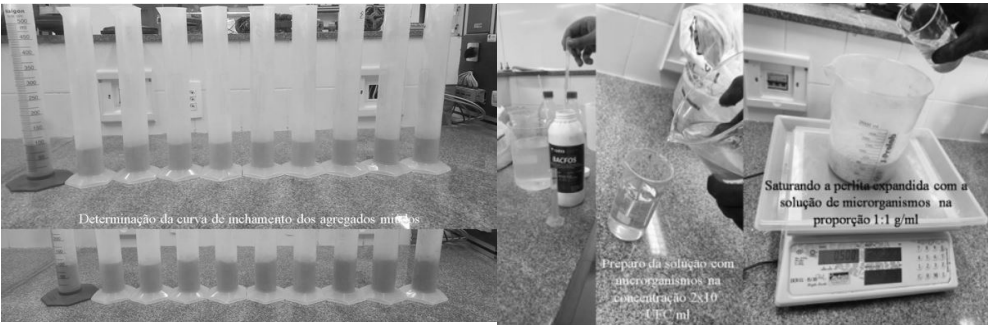
Ilustração de alguns procedimentos adotados na produção dos concretos.



Determinação da curva granulométrica e módulo de finura dos agregados miúdos

Determinação da curva de inchamento dos agregados miúdos

Fonte: Autores (2026)

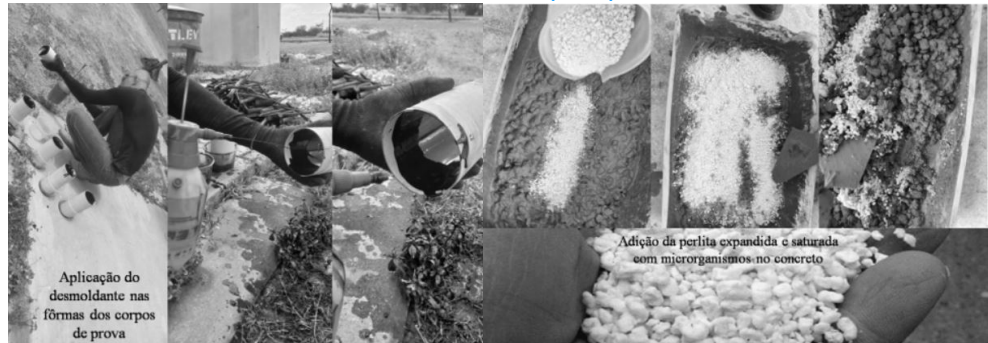


Determinação da curva de inchamento dos agregados miúdos

Saturando a perlita expandida com a solução de microrganismos na proporção 1:1 g/ml

Preparo da solução com microrganismos na concentração 2x10<sup>8</sup> UFC/ml

Fonte: Autores (2026)



Aplicação do desmoldante nas formas dos corpos de prova

Adição da perlita expandida e saturada com microrganismos no concreto

Fonte: Autores (2026)



Mistura manual e moldagem dos corpos de prova

Desmoldagem manual dos corpos de prova

Fonte: Autores (2026)



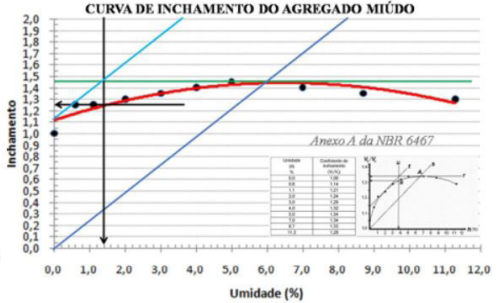
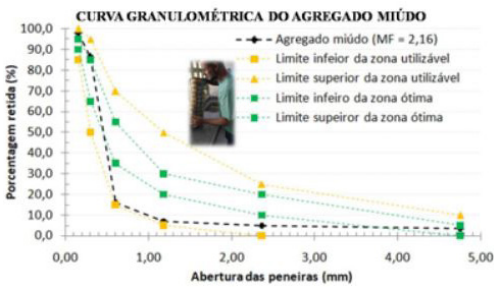
Fonte: Autores (2026)



Fonte: Autores (2026)



Fonte: Autores (2026)



Fonte: Autores (2026)



Ilustração da contagem do número de unidades formadoras de colônia por volume (UFC ml<sup>-1</sup>) em diferentes diluições:

- A) Vista dos materiais e equipamentos utilizados;
- B) Vista geral das placas de petri inoculadas;
- C) Detalhe das colônias na concentração 10<sup>-3</sup>

**Fonte: Autores (2026).**

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao técnico do Laboratório de Materiais de Construção Civil do Instituto Federal do Sertão Pernambucano – Campus Petrolina, Sr. Romero Mendes Rodrigues, pelo auxílio no processo de rompimento dos corpos de prova na prensa hidráulica.