REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

EFEITO DA PERLITA E MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICO-QUÍMICAS DE BIOCONCRETOS

EFFECT OF PERLITE AND POLYPROPYLENE MICROFIBERS ON THE MECHANICAL AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF BIOCONCRETES

EFECTO DE LA PERLITA Y DE LAS MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y FISICOQUÍMICAS DE LOS BIOCONCRETOS

Neiton Silva Machado[1], Emanuel Dantas Viana[2], Tiago de Sousa Oliveira[3], Julio Cesar Ferreira Melo Junior[4], Georgenes Marcelo Gil da Silva[5]

e737352
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i3.7352

PUBLICADO: 03/2026

RESUMO

O bioconcreto tem se destacado como uma alternativa tecnológica para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto, ao associar mecanismos de autorreparação bacteriana ao uso de materiais convencionais. Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho mecânico, com ênfase na resistência à compressão, de bioconcretos produzidos com as bactérias *Priestia megaterium CCT 7987* e *Bacillus subtilis UFV S1*, encapsuladas em perlita de granulometria média, associadas ao reforço por microfibras de polipropileno, bem como analisar parâmetros físico-químicos e microbiológicos. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos e cinco repetições, totalizando 30 corpos de prova de concreto classe de resistência C20. Foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água, porosidade, densidade aparente, pH, condutividade elétrica e contagem microbiológica. Os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste de Tukey ($p < 0,05$). Os resultados indicaram ausência de diferenças significativas na resistência média à compressão, com valores entre 11,72 e 12,93 MPa, além de baixa viabilidade microbiológica da biocarga comercial. Conclui-se que a eficácia do bioconcreto depende do adequado controle microbiológico, enquanto as microfibras contribuem principalmente para a integridade inicial da matriz cimentícia.

PALAVRAS-CHAVE: Autorregeneração do concreto. Bactérias ureolíticas. Carbonato de cálcio. Biomineralização. Viabilidade microbiológica.

ABSTRACT

Bioconcrete has emerged as a technological alternative for increasing the durability of concrete structures by combining bacterial self-healing mechanisms with conventional materials. This study aimed to evaluate the mechanical performance, with emphasis on compressive strength, of bioconcretes produced with the bacteria Priestia megaterium CCT 7987 and Bacillus subtilis UFV S1, encapsulated in medium-grain perlite and combined with polypropylene microfiber

[1] Engenheiro Civil, Engenheiro Agrícola e Ambiental e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa - UFV. Docente da Universidade Federal do Vale do São Francisco - Univasf, Petrolina-PE, Brasil.
[2] Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal do Vale do São Francisco - Univasf, Petrolina-PE, Brasil.
[3] Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal do Vale do São Francisco - Univasf e Mestrando em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa -MG, Brasil.
[4] Engenheiro Agrícola e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa - UFV. Docente da Universidade Federal do Vale do São Francisco - Univasf, Petrolina-PE, Brasil.
[5] Engenheiro Civil e Doutor em Ciências dos Materiais pela Universidade Federal do Vale do São Francisco - Univasf. Docente do Instituto Federal do Sertão Pernambucano - IFSertãoPE, Petrolina-PE, Brasil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

reinforcement, as well as to analyze physicochemical and microbiological parameters. The experiment was conducted using a completely randomized design, with six treatments and five replicates, totaling 30 C20-class concrete specimens. Compressive strength tests in 28 days, water absorption, porosity, bulk density, pH, electrical conductivity, and microbiological counts were performed. Data were subjected to analysis of variance and Tukey's test ($p < 0.05$). The results indicated no significant differences in mean compressive strength, with values ranging from 11.72 to 12.93 MPa, and low microbiological viability of the commercial bioload. It is concluded that the effectiveness of bioconcrete depends on proper microbiological control, while microfibers mainly contribute to the initial integrity of the cementitious matrix.

KEYWORDS: *Concrete self-healing; Ureolytic bacteria. Calcium carbonate. Biomineralization. Microbiological viability.*

RESUMEN
El bioconcreto se ha destacado como una alternativa tecnológica para aumentar la durabilidad de las estructuras de hormigón, al asociar mecanismos de autorreparación bacteriana con el uso de materiales convencionales. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño mecánico, con énfasis en la resistencia a la compresión, de bioconcretos producidos con las bacterias Priestia megaterium CCT 7987 y Bacillus subtilis UFV S1, encapsuladas en perlita de granulometría media y asociadas al refuerzo con microfibras de polipropileno, así como analizar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. El experimento se llevó a cabo bajo un diseño completamente aleatorizado, con seis tratamientos y cinco repeticiones, totalizando 30 probetas de hormigón clase C20. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días, absorción de agua, porosidad, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica y recuento microbiológico. Los datos se sometieron a análisis de varianza y a la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Los resultados indicaron la ausencia de diferencias significativas en la resistencia media a la compresión, con valores entre 11,72 y 12,93 MPa, además de una baja viabilidad microbiológica de la biocarga comercial. Se concluye que la eficacia del bioconcreto depende de un adecuado control microbiológico, mientras que las microfibras contribuyen principalmente a la integridad inicial de la matriz cementicia.

PALABRAS CLAVE: *Autorregeneración del concreto. Bacterias ureolíticas. Carbonato de cálcio. Biomineralización. Viabilidad microbiológica.*

INTRODUÇÃO

A área de materiais de construção exerce papel estratégico no avanço da engenharia civil, influenciando diretamente a qualidade, a durabilidade, o desempenho estrutural e a sustentabilidade das edificações. Nesse contexto, o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias construtivas tornou-se essencial para atender às crescentes demandas por estruturas mais resistentes, duráveis e ambientalmente responsáveis. As propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais condicionam o comportamento estrutural e a vida útil das obras, tornando a inovação um eixo central da engenharia civil contemporânea (Silva *et al*., 2023; Oliveira *et al*., 2024). Paralelamente, a necessidade de mitigar os impactos ambientais associados à construção civil tem impulsionado a busca por concretos especiais e compósitos avançados, capazes de reduzir manifestações patológicas e minimizar os custos de manutenção ao longo do ciclo de vida das estruturas (Locatelli, 2025).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Apesar de apresentar desempenho mecânico satisfatório e boa resistência às intempéries, o concreto convencional possui limitações inerentes, sendo a fissuração uma das mais relevantes. Mesmo fissuras de pequena abertura permitem a entrada de água e agentes agressivos, como cloretos e dióxido de carbono, favorecendo processos de corrosão das armaduras e comprometendo a durabilidade estrutural. Como consequência, manifestações patológicas recorrentes, como fissuras, rachaduras, umidade excessiva e corrosão, podem reduzir significativamente a vida útil das estruturas e elevar os custos de manutenção quando não tratadas adequadamente (Mehta; Monteiro, 2006; Machado *et al*., 2026).

Diante desse cenário, destacam-se os concretos com propriedades autorregenerativas, capazes de promover o selamento de fissuras por meio de reações químicas ou processos biogênicos (Ferreira; Kniess, 2024). O bioconcreto surge como uma alternativa tecnológica promissora, fundamentada na utilização de bactérias gram-positivas capazes de induzir a precipitação de carbonato de cálcio e promover o reparo autônomo das fissuras, contribuindo para a sustentabilidade e a redução de intervenções corretivas ao longo da vida útil das estruturas (Costa *et al*., 2021; Gardini; De Marco; Florian, 2024). Essa tecnologia teve sua gênese no âmbito da engenharia de materiais, a partir de investigações experimentais sistemáticas iniciadas em 2006 na Universidade Técnica de Delft, conduzidas por Jonkers e Schlangen (2008).

O funcionamento do bioconcreto baseia-se no processo de biomineralização, também denominado Precipitação de Carbonato de Cálcio Induzida por Microrganismos (MICP ou MICCP), no qual bactérias metabolizam nutrientes e precipitam cristais de calcita ($CaCO_3$), promovendo o selamento das descontinuidades formadas no concreto (Costa *et al*., 2021). A eficiência desse processo depende da seleção adequada dos microrganismos, sendo amplamente utilizadas bactérias do gênero *Bacillus*, como *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium,* devido à sua capacidade de formar endósporos e resistir ao ambiente altamente alcalino da matriz cimentícia (Bernal, 2024).

Além da autorregeneração bacteriana, a incorporação de microfibras de polipropileno tem se mostrado eficiente no controle da fissuração inicial, atuando preventivamente na matriz cimentícia, limitando a abertura de fissuras e melhorando o comportamento mecânico e a durabilidade do concreto (Figueiredo, 1997; Figueiredo, 2011; Christ *et al*., 2024). Nesse sentido, a associação entre bioconcreto e concreto reforçado com microfibras configura uma abordagem sinérgica, combinando mecanismos preventivos e reativos de controle da fissuração.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho mecânico, com ênfase na resistência à compressão, bem como nas propriedades físicas e físico-químicas de concretos produzidos com a adição das bactérias *Priestia megaterium CCT 7987* e *Bacillus subtilis UFV S1*, encapsuladas em perlita de granulometria média e associadas ao reforço por microfibras de polipropileno.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

MÉTODOS

Delineamento experimental e estatístico

A metodologia deste estudo foi a mesma adotada por Machado *et al*., (2026) elaborada com base na adaptação de procedimentos descritos por Borges (2015), Arroyo *et al*., (2016), e Pelegrinello (2017). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), composto por seis tratamentos e cinco repetições, totalizando 30 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 das médias por meio do teste de Tukey. Para avaliação do efeito das fissuras e rachaduras induzidas, utilizou-se o teste t de Student para amostras independentes, após verificação da normalidade dos dados (teste de Shapiro–Wilk) e da homogeneidade das variâncias (teste de Levene), conforme Montgomery e Runger (2019). As análises estatísticas foram realizadas com auxílio dos softwares Excel e SPSS 13.

Tratamentos experimentais

Os tratamentos foram definidos em função da presença ou ausência de perlita expandida, biocarga microbiana e microfibras de polipropileno, conforme descrito a seguir:

T1 – Concreto simples (controle): concreto convencional, sem perlita, microrganismos ou microfibras;

T2 – Concreto com perlita: concreto contendo perlita expandida, sem microrganismos;

T3 – Concreto com microfibras: concreto contendo microfibras de polipropileno;

T4 – Concreto com perlita e microfibras: concreto contendo perlita expandida sem microrganismos e microfibras;

T5 – Bioconcreto: concreto contendo perlita expandida embebida em biocarga microbiana;

T6 – Bioconcreto reforçado: concreto contendo perlita expandida embebida em biocarga microbiana e microfibras de polipropileno.

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

MICRORGANISMOS E MECANISMO DE AUTORREPARAÇÃO

As bactérias utilizadas 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

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

et al., 2017). Dentre essas, destacam-se as bactérias gram-positivas do gênero *Bacillus* (Pelegrinello, 2017).

Neste estudo, utilizou-se o produto comercial BACFOS, comercializado pela empresa Cetro Sustentabilidade e Inovação, contendo *Priestia megaterium* CCT 7987 e *Bacillus subtilis* UFV S1, com concentração declarada no rótulo de 1×10^9 UFC·mL^{-1}.

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 uréase produzida pelas bactérias hidrolisa a ureia em amônia e íons carbonato, que reagem com íons cálcio, promovendo a precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) 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 gnaisse com diâmetro máximo característico de 12 mm, massa unitária de 1550 kg·m^{-3} e massa específica de 2700 kg·m^{-3}. O agregado miúdo foi areia lavada do rio São Francisco, com módulo de finura 2,16, massa específica de 2700 kg·m^{-3} e índice de inchamento de 1,25. A água de amassamento foi proveniente da concessionária COMPESA, atendendo à ABNT NBR 15900-1 (2009).

As microfibras utilizadas neste estudo foram de polipropileno (PP), do tipo sintético monofilamentar, comercialmente identificadas como NEOFIBRA MF 12 mm ST, comercializadas pela empresa Neomatex Fibras e Têxteis Técnicos para Engenharia. As fibras apresentam comprimento nominal de 12 mm e são comercializadas em pacotes de 600 g, acondicionados em fardos contendo 20 unidades, com peso líquido total de 12,0 kg.

As microfibras de polipropileno caracterizam-se por baixa densidade, elevada resistência química e estabilidade em meios alcalinos, sendo amplamente empregadas em matrizes cimentícias com a finalidade de controlar a fissuração em idades iniciais, especialmente aquela associada à retração plástica e às tensões térmicas. Sua incorporação ao concreto contribui para a melhoria da integridade da matriz cimentícia, reduzindo a formação e a propagação de microfissuras, sem impacto significativo na resistência à compressão.

Diferentemente das macrofibras, as microfibras não têm como objetivo principal o aumento da resistência à compressão, mas sim a melhoria da integridade da matriz cimentícia, atuando na redução da formação e da propagação de microfissuras.

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). O concreto foi dimensionado para resistência característica à compressão (fck = 20 MPa, classe

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

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 ± 10 mm.

A perlita expandida utilizada neste estudo foi do tipo médio, da marca AIMIRIM – Insumos para Cultivo (Garden), comercializada em embalagens de 20 L. Trata-se de um material de origem vulcânica submetido a tratamento térmico, que promove sua expansão volumétrica e resulta em partículas de baixa densidade e elevada porosidade. A perlita apresenta elevada capacidade de retenção de água, estabilidade química e comportamento inerte em meios alcalinos, características que a tornam adequada para aplicações em matrizes cimentícias. No contexto do bioconcreto, a perlita foi empregada como material suporte para a incorporação da biocarga bacteriana, atuando como reservatório físico de umidade e nutrientes no interior da matriz cimentícia. Sua utilização contribui para a formação de uma porosidade funcional controlada, potencialmente favorável à manutenção de condições adequadas para a atividade microbiológica, sem comprometer de forma significativa as propriedades físicas e mecânicas do concreto. As quantidades de materiais utilizadas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Quantidade de materiais utilizadas por metro cúbico de concreto no traço experimental

Material	**Quantidade**
Cimento CP V ARI RS	320 kg
Agregado miúdo (areia)	650 kg
Agregado graúdo (brita)	950 kg
Água de amassamento	192 L
Microorganismos na concentração de $1x10^9$ $UFC.ml^{-1}$	1,0 L
Perlita média	6,4 kg
Fonte de nitrogênio (Ureia)	4,8 kg
Fonte de cálcio (Nitrato de cálcio)	4,8 kg
Microfibras de polipropileno	1,0 kg

INCORPORAÇÃO DA BIOCARGA, MOLDAGEM E ENSAIOS

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 microfibras de polipropileno foram adicionadas durante o amassamento, conforme a dosagem definida.

Os corpos de prova foram moldados conforme a ABNT NBR 5738 (2016), com desmolde aos três dias, e ensaiados quanto à resistência à compressão simples aos 28 dias, de acordo com

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

a ABNT NBR 5739 (2018). As propriedades físicas — absorção de água, densidade aparente e porosidade total — foram determinadas segundo a ABNT NBR 9778 (2009), enquanto o pH e a condutividade elétrica da água de imersão foram avaliados conforme as ABNT NBR 10547 (1988) e ABNT NBR 10739 (1989). O preparo, o controle tecnológico e o recebimento do concreto seguiram a ABNT NBR 12821 (2009), com a caracterização dos agregados realizada segundo a ABNT NBR 6467 (2006) e a ABNT NBR NM 248 (2003). A absorção de água por capilaridade foi determinada conforme a ABNT NBR 9479 (2006), e os concretos reforçados com fibras atenderam aos requisitos da ABNT NBR 16935 (2021), considerando-se ainda os critérios gerais da ABNT NBR 6118 (2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A incorporação simultânea de microfibras de polipropileno e insumos biotecnológicos em matrizes cimentícias baseia-se em uma lógica de atuação complementar. As microfibras exercem papel predominantemente físico-mecânico, atuando na contenção da nucleação e propagação inicial de microfissuras, enquanto os sistemas de bioconcreto, quando biologicamente ativos, atuam de forma reativa, promovendo a biomineralização e o selamento de descontinuidades já formadas. Essa abordagem híbrida tem sido amplamente discutida na literatura como estratégia promissora para o aumento da durabilidade do concreto (Jonkers, 2011; Jonkers, 2013; Hernández-Piedrazul *et al*., 2022).

No presente estudo, entretanto, a manifestação plena desse mecanismo foi condicionada por limitações microbiológicas do produto comercial empregado, o que direciona a interpretação dos resultados majoritariamente para os efeitos físicos, químicos e microestruturais da matriz.

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PARÂMETROS FÍSICOS

A caracterização granulométrica dos agregados confirmou a conformidade da areia e da brita com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). O módulo de finura da areia (2,16) e o índice de inchamento (1,25) caracterizam um agregado miúdo de granulometria média, compatível com boa trabalhabilidade e adequada compactação, conforme relatado por Borges (2015) e Arroyo *et al*., (2016). Essa condição favorece a formação de uma matriz homogênea, aspecto fundamental para a distribuição eficiente das microfibras e para a incorporação da perlita expandida impregnada com microrganismos.

Os parâmetros físicos apresentados na Tabela 2 evidenciam que a densidade aparente variou entre 2,13 e 2,25 $g \cdot cm^{-3}$, enquanto a porosidade total oscilou entre 15,11 e 19,29 %. Observa-se tendência clara de redução da densidade e aumento da porosidade nos tratamentos que incorporaram perlita (T3 a T6), com diferenças estatísticas identificadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Esse comportamento está diretamente relacionado à baixa massa específica e à

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

elevada porosidade intrínseca da perlita expandida, amplamente descrita como material leve e altamente absorvente (Euzébio *et al*., 2017; Pelegrinello, 2017).

Do ponto de vista microestrutural, a introdução da perlita promove a formação de uma rede de vazios adicionais, que amplia o volume total de poros, mas não necessariamente sua conectividade efetiva. Esse aspecto explica a ausência de diferenças estatisticamente significativas na absorção de água por imersão, mesmo nos tratamentos com maior porosidade total. Assim, os vazios introduzidos atuam predominantemente como poros fechados ou parcialmente conectados, não contribuindo de forma relevante para o aumento da permeabilidade inicial do concreto.

Os baixos valores de desvio padrão observados para a maioria das variáveis analisadas indicam elevada repetibilidade experimental, reforçando a confiabilidade dos resultados e a homogeneidade dos corpos de prova moldados.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de resistência mecânica e fisico-químicos

Variável	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor Máximo
fc28 (MPa)	1	12,06 **a**	1,82	9,26	13,70
	2	12,93 **a**	1,41	11,04	14,58
	3	12,89 **a**	1,66	11,04	15,36
	4	11,72 **a**	0,68	11,06	12,76
	5	12,30 **a**	1,28	10,34	13,85
	6	12,50 **a**	0,89	11,27	13,32
Temperatura da superfície do corpo de prova aos 28 dias (ºC)	1	29,94 **a**	0,15	29,80	30,10
	2	30,06 **ab**	0,18	29,90	30,30
	3	30,24 **bc**	0,17	30,10	30,50
	4	29,96 **a**	0,09	29,90	30,10
	5	30,32 **c**	0,11	30,20	30,50
	6	30,38 **c**	0,11	30,30	30,50
Absorção de água por imersão (%)	1	2,04 **a**	0,08	1,95	2,14
	2	2,01 **a**	0,09	1,86	2,07
	3	2,02 **a**	0,33	1,61	2,50
	4	2,11 **a**	0,08	2,03	2,22
	5	2,14 **a**	0,13	1,94	2,24
	6	2,05 **a**	0,54	1,58	2,94
Densidade aparente (g cm^{-3})	1	2,25 **b**	0,03	2,21	2,28
	2	2,19 **b**	0,04	2,15	2,23

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

	3	2,17 **a**	0,02	2,15	2,20
	4	2,17 **a**	0,02	2,14	2,20
	5	2,14 **a**	0,01	2,13	2,15
	6	2,18 **ab**	0,06	2,08	2,23
Porosidade total (%)	1	15,11 **a**	1,07	13,83	16,48
	2	17,25 **ab**	1,34	15,88	18,76
	3	18,01 **b**	0,68	16,96	18,76
	4	18,06 **b**	1,03	16,96	19,36
	5	19,29 **b**	0,32	18,76	19,60
	6	17,65 **b**	2,29	15,88	21,40

Continuação da tabela 2

pH da água após imersão dos corpos de prova	Padrão	6,67	0,06	6,61	6,75
	1	10,54 **d**	0,02	10,51	10,56
	2	10,49 **cd**	0,02	10,47	10,51
	3	10,44 **cd**	0,03	10,40	10,48
	4	10,41 **bc**	0,03	10,37	10,45
	5	10,07 **ab**	0,07	9,99	10,14
	6	10,05 **a**	0,01	10,04	10,05
Condutividade Elétrica da água após imersão dos corpos de prova ($\mu S.cm^{-1}$)	Padrão	112,00	0,71	111,00	113,00
	1	589,60 **d**	2,30	587,00	592,00
	2	576,20 **b**	2,77	573,00	579,00
	3	592,00 **d**	1,22	591,00	594,00
	4	589,80 **d**	0,45	589,00	590,00
	5	576,20 **c**	0,45	576,00	577,00
	6	583,00 **a**	1,000	582,00	584,00

Média seguida da mesma letra minúscula na coluna não difere estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: Arquivo pessoal dos autores (2026).

RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

A resistência média à compressão aos 28 dias (Figura 1A) apresentou variação entre 11,72 MPa e 12,93 MPa, sem diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$). Esse resultado demonstra que, nas condições experimentais adotadas, a adição de microfibras de polipropileno, perlita e insumos biotecnológicos não promoveu incremento relevante no fck do material.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

O desempenho ligeiramente superior do tratamento T2 (concreto com perlita) pode estar associado a um efeito combinado de melhor empacotamento da matriz e redistribuição de tensões internas, uma vez que partículas leves podem atuar como pontos de alívio de tensões, retardando a coalescência de microfissuras (Figueiredo, 2011; Christ *et al*., 2024). Ainda assim, essa diferença não se mostrou estatisticamente significativa.

Nos tratamentos T5 e T6, que incorporaram perlita associada aos aditivos biotecnológicos, observou-se resistência intermediária, indicando que a maior porosidade não comprometeu o desempenho mecânico, mas também não gerou ganhos estruturais. Esse comportamento está em consonância com os resultados de Costa *et al*., (2021), que reportaram variações inferiores a 10 % na resistência de concretos contendo *Bacillus subtilis.*

É importante ressaltar que as microfibras de polipropileno não atuam como reforço estrutural clássico, mas como elemento de controle da microfissuração, reduzindo a abertura e a interconectividade das fissuras. Dessa forma, sua contribuição é mais evidente em parâmetros de durabilidade e comportamento pós-fissuração do que na resistência à compressão aos 28 dias.

ABSORÇÃO DE ÁGUA, POROSIDADE E DENSIDADE

A absorção de água por imersão (Figura 1B) manteve-se em torno de 2 %, sem diferenças significativas entre os tratamentos. Esses valores são compatíveis com concretos estruturais convencionais e indicam que a incorporação de perlita, microfibras e insumos biotecnológicos não alterou de forma significativa a permeabilidade inicial da matriz.

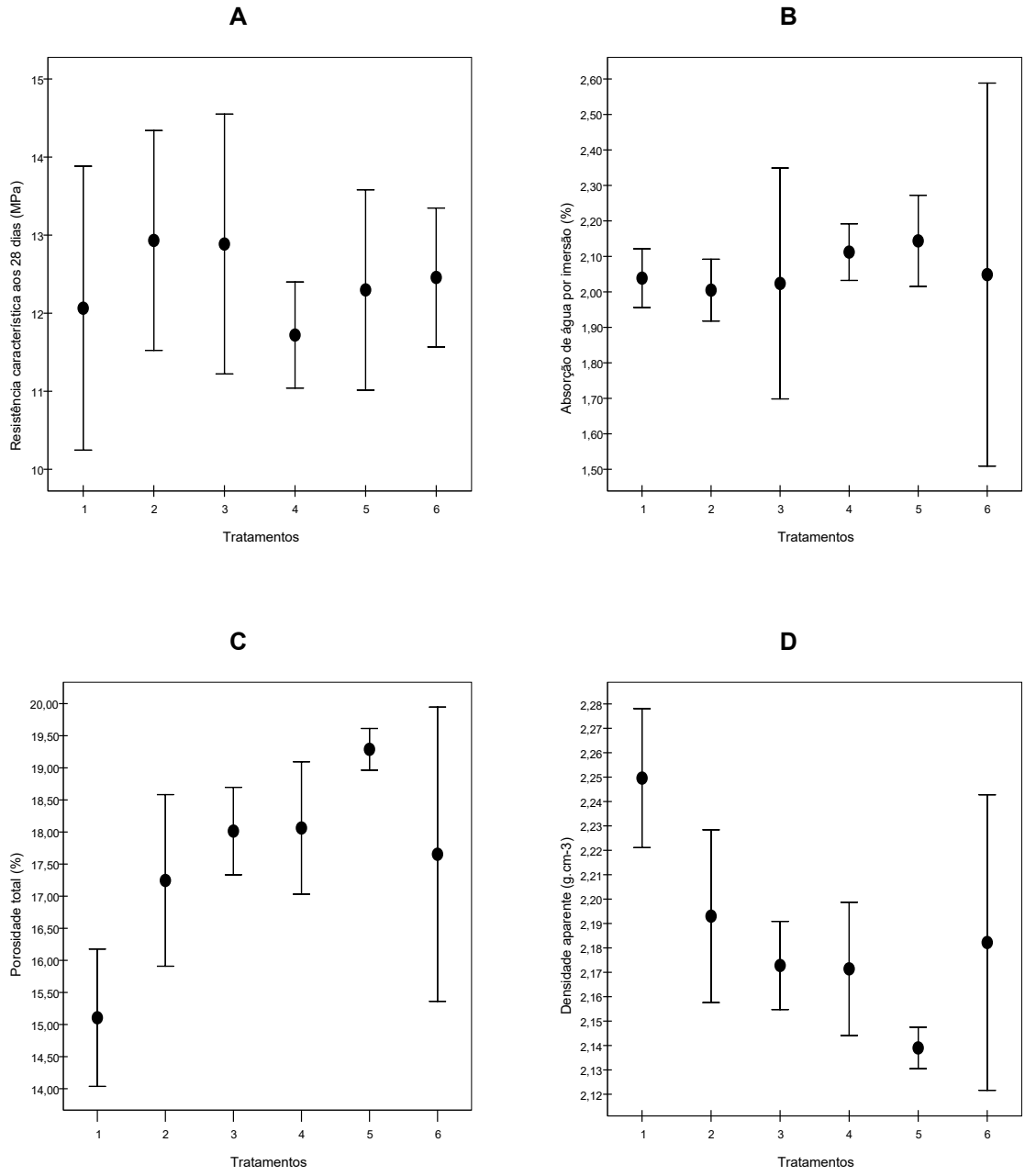
A elevação da porosidade total (Figura 1C) observada nos tratamentos com perlita, especialmente em T5 (19,29 %), reflete o aumento do volume de vazios associados ao encapsulamento biológico. Embora esse aumento possa ser interpretado, à primeira vista, como fator negativo, a literatura destaca que esses poros podem atuar como reservatórios físicos de umidade e nutrientes, condição essencial para a reativação bacteriana em sistemas biologicamente viáveis (Jonkers, 2011; Hernández-Piedrazul *et al*., 2022).

A redução da densidade aparente (Figura 1D) nos tratamentos biotecnológicos está diretamente associada à substituição parcial da matriz por um material de baixa densidade (perlita ≈ 0,64 g·cm^{-3}), sem prejuízo significativo à resistência mecânica global, mantendo o material dentro da faixa típica de concretos leves para aplicações estruturais moderadas.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 1. Ilustração gráfica dos parâmetros físicos: A) Resistência característica aos 28 dias; B) Absorção de água por imersão; C) Porosidade Total; D) Densidade Aparente



Fonte: Arquivo pessoal dos autores (2026).

PARÂMETROS QUÍMICOS: PH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Os valores de pH (Figura 2A) da água após imersão dos corpos de prova variaram entre 10,05 e 10,54, significativamente superiores ao pH da água padrão (6,67). Essa alcalinização

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

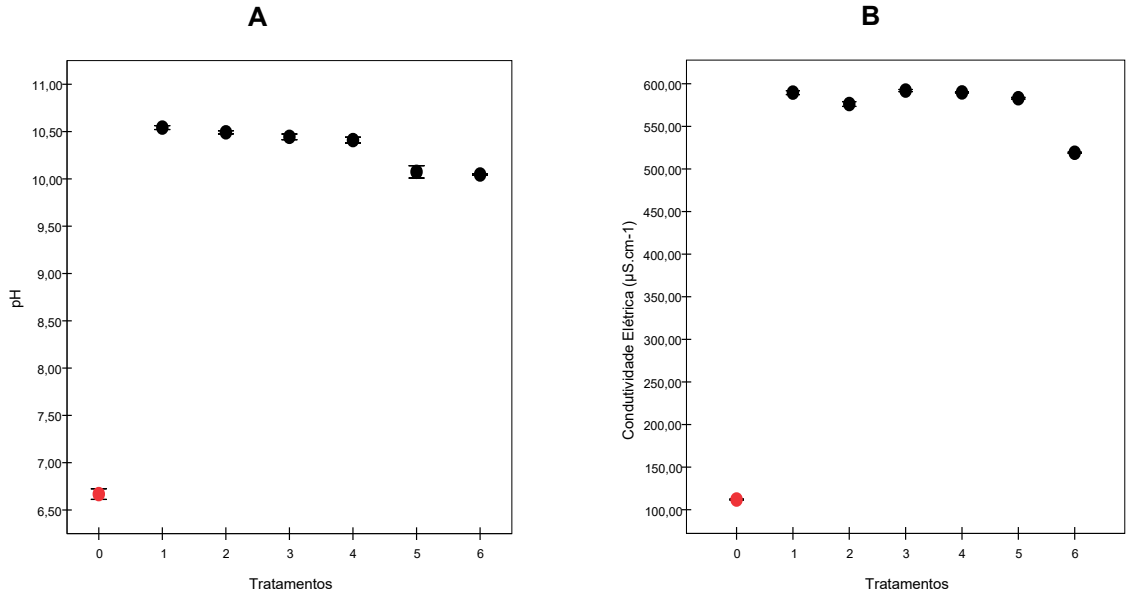
REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

resulta principalmente da lixiviação de hidróxidos e íons cálcio da matriz cimentícia, bem como da presença de ureia e nitrato de cálcio adicionados ao sistema. Embora a literatura associe o aumento do pH à atividade bacteriana ureolítica (Costa *et al*., 2021), no presente estudo esse efeito deve ser interpretado com cautela, dado o comprometimento da viabilidade microbiana.

A condutividade elétrica (Figura 2B) apresentou valores elevados nos tratamentos com aditivos (≈ 576–592 μS·cm⁻¹), em contraste com a água padrão (112 μS·cm⁻¹). Esse incremento indica elevada concentração de íons dissolvidos, resultante principalmente da dissolução de sais e compostos alcalinos da matriz e dos insumos químicos adicionados. Segundo Sidiq, Gravina e Giustozzi (2019), esse comportamento é típico de sistemas cimentícios com elevada troca iônica, não sendo, isoladamente, evidência conclusiva de biomineralização ativa.

Assim, os aumentos observados de pH e condutividade elétrica devem ser atribuídos predominantemente a fenômenos físico-químicos, e não à atividade metabólica bacteriana propriamente dita.

Figura 2. Ilustração gráfica dos parâmetros químicos: **A)** pH **B)** Condutividade Elétrica



Fonte: Arquivo pessoal dos autores (2026).

O tratamento zero destacado em vermelho na figura 2 representa a amostra padrão (branco) da água utilizada no processo de imersão dos corpos de prova.

ATIVIDADE MICROBIOLÓGICA

A contagem de unidades formadoras de colônia (Tabela 3) do produto comercial BACFOS revelou valores significativamente inferiores à concentração declarada pelo fabricante no rótulo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

(10^9 UFC·mL^{-1}). O crescimento bacteriano foi observado apenas até as diluições de 10^{-3} ou 10^{-4}, indicando perda expressiva de viabilidade celular.

A baixa viabilidade comprometeu diretamente o potencial de biomineralização e, consequentemente, a capacidade de autocicatrização do material. Conforme destacado por Pelegrinello (2017) e Martins *et al.*, (2021), a precipitação efetiva de carbonato de cálcio depende da atividade metabólica contínua das bactérias, sendo inviável em sistemas com carga microbiana reduzida.

Tabela 3. Número de colônias encontradas nas diferentes diluições do produto comercial

	Concentração de microrganismos (UFC.ml^{-1})					
Repetições	**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: Arquivo pessoal dos autores (2026).

Fatores como tempo de armazenamento, exposição térmica e elevada alcalinidade do meio podem ter contribuído para a degradação das cepas *Bacillus subtilis UFV S1* e *Priestia megaterium CCT 7987*.

Como limitação do estudo, destaca-se que a baixa viabilidade microbiológica restringiu a manifestação plena dos mecanismos biológicos de autorreparação. Ainda assim, os resultados obtidos permitiram avaliar de forma clara os efeitos físicos, químicos e microestruturais das microfibras de polipropileno e dos aditivos minerais, fornecendo subsídios técnicos relevantes para o aprimoramento futuro de sistemas de bioconcreto com maior controle de viabilidade bacteriana.

A estabilidade de esporos bacterianos em matrizes cimentícias de elevada alcalinidade constitui um fator determinante para a eficácia de sistemas de autocicatrização biológica, uma vez que o meio altamente alcalino do concreto pode comprometer a viabilidade celular ao longo do tempo. Nesse contexto, a literatura reporta diferentes técnicas de encapsulamento voltadas à proteção dos microrganismos e à liberação controlada de seus metabólitos, como o uso de sílica gel, hidrogéis e microcápsulas poliméricas, reconhecidas por sua eficiência como barreiras físico-químicas frente ao ambiente agressivo da matriz cimentícia.

Embora cientes dessas abordagens e de seu potencial, no presente trabalho optou-se, nesta etapa inicial da investigação, pelo encapsulamento dos esporos bacterianos em perlita expandida, sem selamento adicional com silicato de sódio, em função de limitações de ordem instrumental e financeira do projeto. Tal escolha metodológica permitiu avaliar de forma preliminar a viabilidade do sistema proposto. Complementarmente, a análise microestrutural por microscopia

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

eletrônica de varredura (MEV) constitui ferramenta essencial para a confirmação do processo de biomineralização, possibilitando a identificação da morfologia, distribuição e composição de precipitados compatíveis com carbonato de cálcio ($CaCO_3$) no interior da matriz, fortalecendo a interpretação dos resultados obtidos.

IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E TECNOLÓGICAS

Os resultados obtidos indicam que a incorporação de microfibras de polipropileno e perlita expandida em matrizes cimentícias convencionais pode ser adotada, do ponto de vista tecnológico, sem prejuízo significativo às propriedades mecânicas iniciais, mantendo a resistência à compressão e a absorção de água dentro de faixas compatíveis com concretos estruturais de uso moderado.

A presença da perlita promove redução da densidade aparente e aumento controlado da porosidade, características potencialmente vantajosas em aplicações onde se busca menor peso próprio e maior capacidade de retenção hídrica interna, como elementos não estruturais, painéis pré-moldados e componentes sujeitos a ciclos térmicos. Entretanto, os resultados também evidenciam que o desempenho funcional do bioconcreto depende criticamente da viabilidade microbiana dos insumos biotecnológicos, tornando imprescindível, para aplicações em escala real, o controle rigoroso da qualidade microbiológica, do armazenamento e das condições de encapsulamento das bactérias.

Nesse contexto, a tecnologia mostra-se promissora, porém ainda dependente de avanços no desenvolvimento de biocargas mais estáveis e de protocolos de validação microbiológica antes da incorporação à matriz cimentícia, a fim de garantir que os potenciais benefícios de autocicatrização e aumento da durabilidade se manifestem efetivamente em campo.

CONSIDERAÇÕES

Os resultados indicam que o produto comercial analisado não apresentou concentração microbiana suficiente para viabilizar o processo de biomineralização esperado. Ainda assim, o comportamento físico e mecânico dos compósitos manteve-se estável, demonstrando que a incorporação da perlita e das microfibras de polipropileno não compromete as propriedades básicas do concreto. O aumento do pH e da condutividade elétrica esteve associado principalmente aos efeitos químicos dos reagentes adicionados, e não à atividade biológica. As microfibras de polipropileno contribuíram para a integridade inicial da matriz cimentícia e para o controle da fissuração, sem impacto significativo na resistência à compressão aos 28 dias. Conclui-se que a eficácia da autocicatrização bacteriana depende fortemente da qualidade microbiológica do insumo empregado, evidenciando a necessidade de controle rigoroso da viabilidade celular em aplicações futuras.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

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.

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: ABNT, 1988.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10739: Água – Determinação da condutividade elétrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821: Concreto – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16935: Concreto reforçado com fibras – Requisitos de desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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

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

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

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

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

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

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

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

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: ABNT, 2009.

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

ARROYO, L. F. *et al.* **Concreto biológico:** uma proposta sustentável. [S. l.]: Unicesumar, 2016. Disponível em: https://www.unicesumar.edu.br/mostra2016/wpcontent/uploads/sites/154/2017/01/leonardo_franco_arroyo.pdf Acesso em: 05 fev. 2026.

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 Acesso em: 05 fev. 2026.

BORGES, H. M. R. R. **Bio-cimentação como técnica de reparação de argamassas cimentícias**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2015. Disponível em: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043834606/0.%20tese%20final%20a%20submeter.pdf Acesso em: 05 fev. 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 fev. 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 fev. 2026.

CUNHA, W. M. M. **Análise da viabilidade econômica da aplicação do bioconcreto como alternativa ao concreto convencional:** uma revisão bibliográfica. 2024. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão, Bacabal, 2024. Disponível em: https://repositorio.uema.br/bitstream/123456789/2983/1/MONOGRAFIA%20-WILLIAM%20MATHIAS%20MEDEIROS%20DA%20CUNHA%20-%20ENGENHARIA%20CIVIL%20-%20CESB%20UEMA%20-%202024.pdf Acesso em: 05 fev. 2026.

ELMENSHAWY, 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 fev. 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 fev. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

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 Acesso em: 05 fev. 2026.

FERREIRA, A. C. C.; KNIESS, 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 fev. 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 fev. 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 fev. 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 fev. 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 fev. 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 fev. 2026.

JONKERS, H. M.; SCHLANGEN, E. **Development of a bacteria-based self healing concrete**, London: Taylor & Francis Group, 2008. ISBN 978-0-415-47535-8. Disponível em: http://www.abece.com.br/web/restrito/restrito/pdf/ch062.pdf Acesso em: 05 fev. 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: 05 fev. 2026.

MACHADO, N. S. *et al*. Concreto reforçado com macrofibras de polipropileno contendo insumos biotecnológicos. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, *[S. l.],* v. 1, n. 3, p. 1–23, 2026. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/5284. Acesso em: 05 fev. 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 em: 05 fev. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

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 fev. 2026.

MEHTA, P. K.; 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: 05 fev. 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 Acesso em: 05 fev. 2026.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers.** New York: John Wiley & Sons, 2019. Disponível em https://dl.icdst.org/pdfs/files4/57ca3651c10165f7b64ff0dadf4d4f10.pdf Acesso em: 05 fev. 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: 05 fev. 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, 2017. Disponível em http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8108 Acesso em: 05 fev. 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: 05 fev. 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 fev. 2026.

ZAKRZEVSKI, 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 fev. 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 fev. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.