REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/01/2026 - **Accepted:** 20/01/2026
Vol: 01.03
DOI: 10.61164/96we2x76
Pages: 1-23

CONCRETO REFORÇADO COM MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO CONTENDO INSUMOS BIOTECNOLÓGICOS

POLYPROPYLENE MACROFIBER-REINFORCED CONCRETE CONTAINING BIOTECHNOLOGICAL INPUTS

CONCRETO REFORZADO CON MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO QUE CONTIENE INSUMOS BIOTECNOLÓGICOS

Neiton Silva Machado
Doutor em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco – Univasf, Brasil.
neiton.machado@univasf.edu.br

Emanuel Dantas Viana
Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal do Vale do São Francisco – Univasf, Brasil.
emanujacobina@gmail.com

Bruno Coutinho Moreira
Doutor em Microbiologia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco – Univasf, Brasil.
bruno.moreira@univasf.edu.br

Murillo Anderson Gonçalves Barbosa
Doutor em Ciências Agrárias, Centro Universitário UniFTC, Brasil
murillo.barbosa@ftc.edu.br

RESUMO
O estudo avaliou o desempenho de concretos reforçados com macrofibras de polipropileno contendo insumos biotecnológicos, utilizando microrganismos dos gêneros Bacillus subtilis UFV S1 e Priestia megaterium CCT 7987 encapsulados em perlita expandida. Seis tratamentos, com cinco repetições, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), foram analisados por meio de ensaios mecânicos, físicos, químicos e microbiológicos. A análise microbiológica a posteriori do produto comercial BACFOS® indicou baixa viabilidade microbiana em relação à concentração declarada no rótulo. As resistências à compressão aos 28 dias variaram entre 11,29 e 13,79 MPa, sem diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. Os parâmetros de pH e condutividade elétrica da água de imersão refletiram predominantemente efeitos químicos da matriz cimentícia e dos reagentes adicionados, não sendo possível atribuir os resultados à atividade biológica. Conclui-se que, nas condições experimentais adotadas, o material avaliado comportou-se como um concreto modificado com aditivos minerais e químicos, reforçando a importância do controle microbiológico e da validação prévia da viabilidade das biocargas em estudos com proposta biotecnológica.
Palavras chave: *Bacillus subtilis*. resistência à compressão. sustentabilidade.

ABSTRACT
The study evaluated the performance of polypropylene macrofiber-reinforced concretes containing biotechnological inputs, using microorganisms of the genera Bacillus subtilis UFV S1 and Priestia megaterium CCT 7987 encapsulated in expanded perlite. Six treatments, with five replicates, arranged in a completely randomized design (CRD), were analyzed through mechanical, physical, chemical, and

microbiological tests. A post hoc microbiological analysis of the commercial product BACFOS® indicated low microbial viability relative to the concentration declared on the product label. Compressive strength at 28 days ranged from 11.29 to 13.79 MPa, with no statistically significant differences among treatments. The pH and electrical conductivity parameters of the immersion water predominantly reflected chemical effects of the cementitious matrix and the added reagents, and the results could not be attributed to biological activity. It is concluded that, under the experimental conditions adopted, the evaluated material behaved as a concrete modified with mineral and chemical additives, reinforcing the importance of microbiological control and prior validation of bioload viability in studies with a biotechnological approach.
Keywords: *Bacillus subtilis*. compressive strength. sustainability.

RESUMEN
El estudio evaluó el desempeño de concretos reforzados con macrofibras de polipropileno que contienen insumos biotecnológicos, utilizando microorganismos de los géneros Bacillus subtilis UFV S1 y Priestia megaterium CCT 7987 encapsulados en perlita expandida. Se analizaron seis tratamientos, con cinco repeticiones, bajo un diseño completamente aleatorizado (DCA), mediante ensayos mecánicos, físicos, químicos y microbiológicos. El análisis microbiológico a posteriori del producto comercial BACFOS® indicó una baja viabilidad microbiana en relación con la concentración declarada en la etiqueta del producto. La resistencia a la compresión a los 28 días varió entre 11,29 y 13,79 MPa, sin diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Los parámetros de pH y conductividad eléctrica del agua de inmersión reflejaron predominantemente efectos químicos de la matriz cementicia y de los reactivos añadidos, no siendo posible atribuir los resultados a la actividad biológica. Se concluye que, bajo las condiciones experimentales adoptadas, el material evaluado se comportó como un concreto modificado con aditivos minerales y químicos, reforzando la importancia del control microbiológico y de la validación previa de la viabilidad de las biocargas en estudios con enfoque biotecnológico.
Palabras clave: *Bacillus subtilis*; resistencia a la compresión; sostenibilidad.

1. INTRODUÇÃO

A engenharia civil exerce papel central no desenvolvimento social e econômico, sendo responsável pela concepção e execução de estruturas seguras, duráveis e com desempenho adequado ao longo de sua vida útil. Nesse contexto, o concreto destaca-se como o material mais empregado na construção civil, ocupando a segunda posição em consumo global, atrás apenas da água (FREITAS *et al*., 2021). Apesar de sua elevada resistência à compressão e versatilidade, o concreto convencional apresenta limitações importantes, como baixa resistência à tração e elevada suscetibilidade à fissuração, fatores que comprometem a durabilidade das estruturas (SILVA; GODOY; RESENDE, 2022). A ocorrência de fissuras favorece a penetração de água e agentes agressivos, acelerando a corrosão das armaduras e elevando os custos de manutenção e recuperação estrutural (SANTOS *et al*., 2024; HERNÁNDEZ-PIEDRAZUL; ROBLES; MENDIOLA, 2022).

Hirle *et al*. (2023) apontam que as patologias em estruturas de concreto armado estão associadas, principalmente, a cargas dinâmicas ou estáticas excessivas, falhas de execução, movimentações estruturais decorrentes de mau

assentamento, elevado calor de hidratação do cimento, além da ação de agentes ambientais e químicos. Nesse cenário, o desenvolvimento de materiais cimentícios inteligentes tem ganhado destaque, especialmente o bioconcreto, que incorpora mecanismos biológicos capazes de promover a autorregeneração de fissuras por meio da atividade metabólica de microrganismos, notadamente bactérias do gênero *Bacillus* (JONKERS, 2011, 2013; SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019). Na presença de fontes nutricionais adequadas, essas bactérias induzem a precipitação de carbonato de cálcio, atuando no preenchimento de microfissuras e contribuindo para a recuperação parcial da integridade estrutural do concreto (VIJAY; MURMU; DEO, 2017; COSTA *et al*., 2021), com potencial de selar fissuras submilimétricas em poucas semanas (BONIFÁCIO *et al*., 2022).

A literatura descreve diferentes estratégias de incorporação bacteriana ao concreto, como a adição direta, o encapsulamento em sílica, perlita, vermiculita ou argila expandida, além do uso de esporos resistentes (EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017; HERNÁNDEZ-PIEDRAZUL; ROBLES; MENDIOLA, 2022). Entre as espécies mais estudadas destacam-se *Bacillus subtilis*, *Bacillus pasteurii*, *Bacillus cohnii* e *Bacillus megaterium*, reconhecidas pela resistência ao meio alcalino e pela eficiência na precipitação de carbonato de cálcio (AKSHAY *et al*., 2023; NASSER *et al*., 2022). Resultados experimentais indicam que o bioconcreto pode apresentar incrementos progressivos na resistência à compressão, alcançando valores até 15% superiores aos do concreto convencional após um ano de cura (SILVA; PASSARINI; SANTOS, 2017; COSTA *et al*., 2021).

Do ponto de vista construtivo, Siqueira *et al*. (2018) destacam que o concreto produzido no canteiro de obras sem acompanhamento técnico tende a apresentar desempenho inferior em resistência à compressão quando comparado ao concreto usinado, o qual, devido ao rigoroso controle de qualidade industrial, atinge valores iguais ou superiores aos esperados, além de maior viabilidade técnica e econômica. Paralelamente, o uso de concretos reforçados com fibras tem se consolidado como estratégia para o controle da fissuração e melhoria do desempenho mecânico (BRAZ; NASCIMENTO, 2015). Nesse contexto, Souza *et al*. (2023) ressaltam que, embora a incorporação de fibras — como a fibra de vidro — apresente vantagens relevantes, é essencial a continuidade de pesquisas e ensaios experimentais para garantir sua

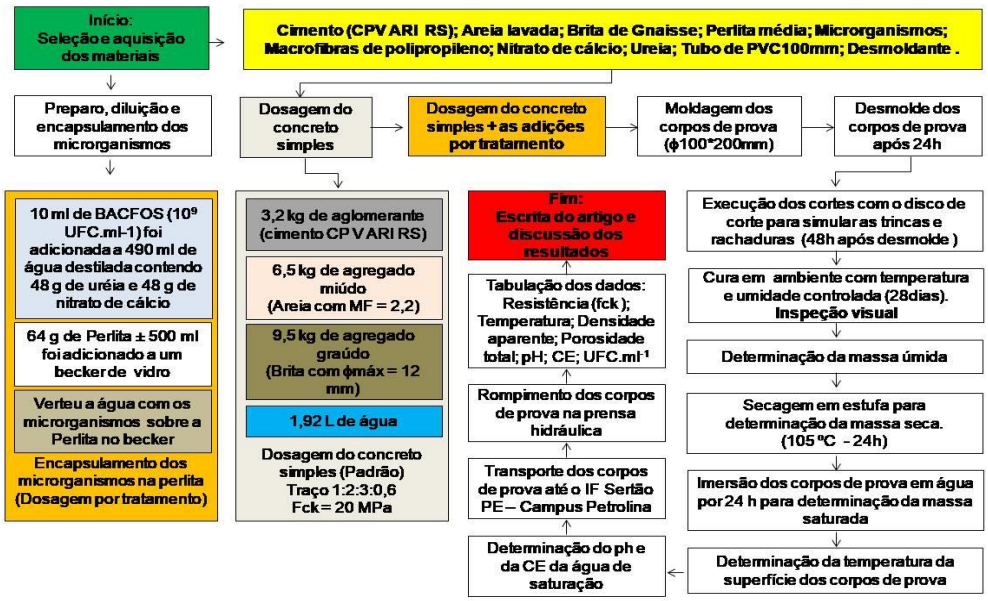
aplicação segura e eficiente, considerando as limitações existentes, uma vez que o uso adequado dessas fibras pode contribuir significativamente para o aumento da durabilidade e da resistência das estruturas.

Diante desse conjunto de evidências, a associação entre bioconcreto e reforço por fibras surge como alternativa promissora para mitigar patologias, aumentar a durabilidade estrutural e reduzir a necessidade de intervenções corretivas, alinhando desempenho mecânico e sustentabilidade (FERREIRA; KNIESS, 2024; VALE; OLIVEIRA, 2024; BERNAL ZUÑIGA; CANTA HONORES, 2024). Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a resistência à compressão de bioconcretos produzidos com bactérias Gram-positivas do gênero *Bacillus*, associadas ao reforço por macrofibras de polipropileno.

2. METODOLOGIA

A metodologia foi organizada em etapas sucessivas, conforme apresentado na Figura 1, de modo a garantir reprodutibilidade experimental e coerência entre objetivos, procedimentos e resultados. O estudo seguiu quatro fases principais: (i) preparação e caracterização das biocargas, (ii) produção e moldagem dos concretos, (iii) ensaios físicos, químicos, mecânicos e microbiológicos, e (iv) análise estatística dos dados.

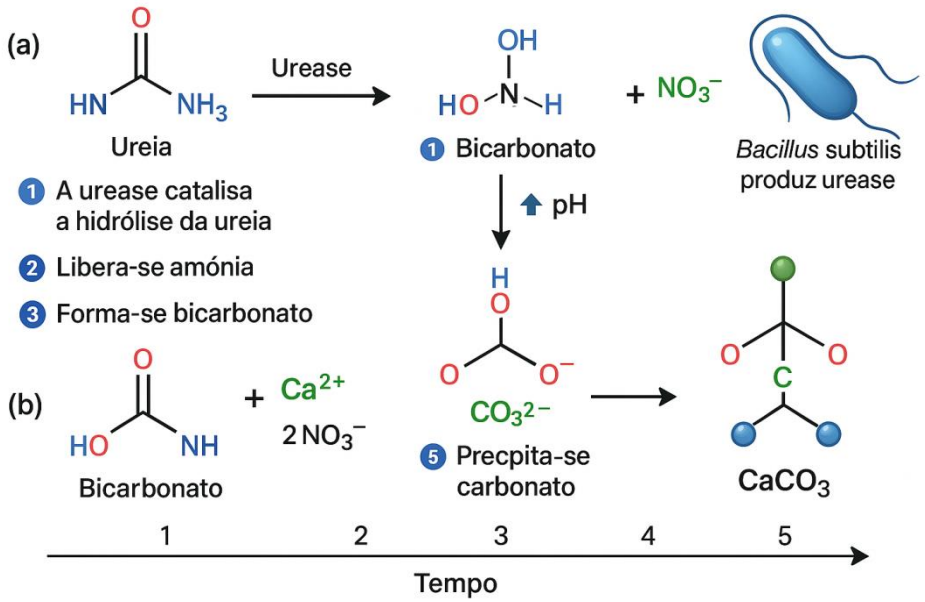
Figura 1 – Fluxograma experimental



Fonte: Autor, 2025

A Figura 2 ilustra, de forma esquemática, o mecanismo bioquímico envolvido na precipitação de carbonato de cálcio mediada por microrganismos, destacando-se duas etapas principais. 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 cálcio disponíveis no sistema, promovendo a precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) ao longo do tempo, evidenciando o papel central da atividade microbiana no processo de biomineralização.

Figura 2 – Fluxograma simplificado do mecanismo bioquímico da precipitação microbiana de carbonato de cálcio mediada pela hidrólise da uréia.



Fonte: Autor, 2025

2.1 MATERIAIS

A Figura 3 apresenta os principais materiais utilizados na produção dos concretos.

O cimento utilizado foi o CP V ARI RS, conforme a NBR 11578 (ABNT, 1991), devido à sua elevada resistência inicial e baixa suscetibilidade a reações expansivas

em ambientes agressivos. O agregado graúdo consistiu em brita com diâmetro máximo de 12 mm, massa unitária de 1550 kg·m^{-3} e massa específica de 2700 kg·m^{-3}, enquanto o agregado miúdo foi areia lavada do Rio São Francisco (módulo de finura 2,2; massa específica 2700 kg·m^{-3}; índice de inchamento 1,25), ambos atendendo à NBR 7211 (ABNT, 2009). A água de amassamento foi fornecida pela COMPESA, conforme a NBR 15900-1 (2009).

Para produção dos compósitos reforçados, utilizaram-se macrofibras de polipropileno com comprimento médio de 54 mm e fator de forma 54 FF, resistência à tração de 350 MPa e módulo de elasticidade de 9 GPa, na dosagem de 1 kg·m^{-3}. As fibras apresentavam alta resistência à alcalinidade, não absorviam água e possuíam elevada durabilidade.

Os bioconcretos foram produzidos com uso de perlita expandida como suporte e veículo para o produto bacteriano comercial BACFOS®, contendo *Bacillus subtilis* UFV S1 e *Priestia megaterium* CCT 7987, declarado a 10^9 UFC·mL^{-1}. A perlita foi embebida em suspensão bacteriana na proporção de 1 mL por grama de perlita, permanecendo 30 minutos em repouso para permitir adesão das células à matriz porosa. A incorporação ocorreu na proporção de 2% em massa de cimento.

Figura 3 – Ilustração dos materiais utilizados no trabalho. **A)** Cimento CPV ARI RS, marca CSN; **B)** Areia lavada do rio São Francisco; **C)** Brita de gnaisse 12 mm; **D)** Água potável da concessionária COMPESA; **E)** Macrofibras de polipropileno, marca COLISEU; **F)** Microrganismos, marca BACFOS; **G)** Perlita média, marca, AÌMIRÍM; **H)** Nitrato de Cálcio, marca Yara Tera; **I)** Uréia agrícola, marca Heringer.



Fonte: Autor, 2025

2.2 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A Figura 4 apresenta os principais procedimentos utilizados na produção dos concretos.

A dosagem seguiu o método ABCP (1998), adaptação brasileira do método ACI, adotando fck = 20 MPa (classe C20, NBR 8953:2015) e condição de preparo B com desvio-padrão de 5,5 MPa. O traço final em massa foi 1:2:3:0,6 (cimento:areia:brita:água), resultando em abatimento previsto de 90 ± 10 mm.

As misturas contendo fibras receberam o reforço na etapa final de homogeneização, garantindo distribuição uniforme. A perlita pura ou colonizada foi incorporada anteriormente ao agregado graúdo, evitando flutuação superficial.

Figura 4 – Ilustração de alguns procedimentos adotados na produção dos concretos. **A)** Dosagem dos microrganismos; **B)** Diluição do produto comercial; **C)** Encapsulamento dos microrganismos; **D)** Adição da perlita embebida de microrganismos no croncreto; **E)** Mistura manual; **F)** Aplicação do desmoldante ; **G)** Moldagem dos corpos de prova; **H)** Desoldagem; **I)** Corpo de prova desmoldado; **J)**

Escolha dos discos de corte; **K)** Produção das trincas e rachaduras simuladas; **L)** Corpo de prova pronto para o ensaio de compressão.



Fonte: Autor, 2025

Foram moldados 30 corpos de prova cilíndricos de 10 × 20 cm, conforme NBR 5738 (ABNT, 2016), distribuídos nos seguintes tratamentos, cada qual com 5 (cinco) repetições:

T1 – Concreto simples;

T2 – Concreto com perlita;

T3 – Concreto com macrofibras;

T4 – Concreto com perlita + macrofibras;

T5 – Bioconcreto (perlita impregnada com microrganismos);

T6 – Bioconcreto + macrofibras

O desmolde ocorreu aos três dias, e os corpos de prova permaneceram em cura úmida até 28 dias. Embora, de acordo com Nascimento *et al*. (2023) a cura do concreto por meio de irrigação ou aspersão, realizada por um período mínimo de sete dias, mostra-se eficaz durante o processo, desde que as superfícies sejam mantidas sempre molhadas e que se evitem choques térmicos, como deixar a peça seca exposta a altas temperaturas e posteriormente molhá-la nessas condições..

2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

Aos 28 dias, os corpos de prova foram submetidos aos seguintes ensaios:

a) Resistência à compressão. Realizada conforme NBR 5739 (2018). A ruptura foi executada em prensa hidráulica da marca Pavitest, modelo I 3025 D capacidade de 100 toneladas, calibrada, com velocidade de carregamento constante.

b) Absorção de água, porosidade total e densidade aparente. Conforme NBR 9778 (2009), seguindo as etapas: Limpeza superficial dos CPs, Imersão por 48 h para saturação, Medição da massa saturada, Secagem em estufa (105 ± 5 °C) até massa constante, Determinação da massa seca e da massa submersa. Essas variáveis foram calculadas segundo as equações normativas e relacionam-se diretamente à permeabilidade e densidade estrutural do compósito.

c) Temperatura superficial. Imediatamente após retirada da água de saturação, mediu-se a temperatura em três pontos distintos com termômetro infravermelho digital (precisão ± 0,1°C). Os valores médios foram utilizados nas análises estatísticas.

d) Parâmetros químicos da água de imersão. A água de cura foi coletada após a imersão e analisada em laboratório: pH, determinado por método potenciométrico com pHmetro calibrado (NBR 10547, 1988); Condutividade elétrica, obtida com condutivímetro de bancada calibrado com solução de KCl (NBR 10739, 1989).

Essas variáveis permitiram avaliar alterações decorrentes do meio cimentício, da presença de ureia e nitrato de cálcio e da eventual atividade microbiana.

2.4 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA

A viabilidade celular do BACFOS® foi investigada por contagem de Unidades Formadoras de Colônia (UFC·mL^{-1}) em placas com meio apropriado, aplicando diluições seriadas de 10^{-3} a 10^{-8}.

Para evitar contaminações: todo o material foi esterilizado em autoclave, o procedimento foi realizado em capela de fluxo laminar, somente placas com 30 a 300 colônias foram consideradas válidas. As placas foram incubadas a 35 ± 2 °C por até 48 h. A concentração real observada foi utilizada para interpretar a ausência de biomineralização nos resultados mecânicos e físico-químicos.

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Adotou-se delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos e cinco repetições. Os dados foram analisados da seguinte forma: ANOVA a 5% de significância, conforme Montgomery e Runger (2012); Teste de Tukey, para discriminar diferenças entre médias; Teste de Shapiro–Wilk, para verificar normalidade das distribuições; Teste de Levene, para confirmar homogeneidade das variâncias; Histogramas com curva normal ajustada e gráficos boxplot, para analisar variabilidade, simetria, dispersão e presença de outliers.

A interpretação estatística seguiu o critério convencional: médias acompanhadas pela mesma letra minúscula não diferem entre si ao nível de 5%. As análises foram conduzidas com SPSS 13 e Microsoft Excel.

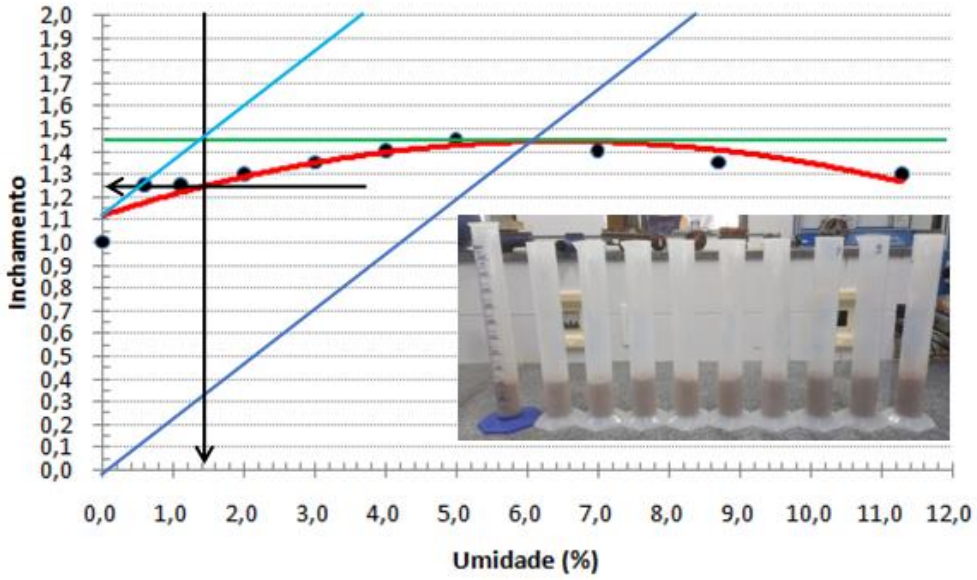
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, embora o traço experimental tenha sido concebido com insumos biotecnológicos, a caracterização microbiológica a posteriori evidenciou baixa viabilidade celular do produto comercial bacteriano empregado. Assim, os materiais avaliados devem ser interpretados como concretos modificados com aditivos minerais e químicos, não sendo possível caracterizá-los como bioconcretos funcionais ativos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PARÂMETROS FÍSICOS

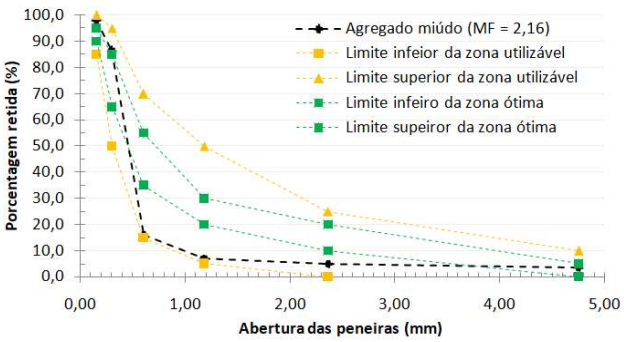
A análise preliminar dos agregados confirmou a adequação granulométrica da areia e da brita aos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), conforme evidenciado nas Figuras 5 e 6. O agregado miúdo apresentou módulo de finura de 2,16 e índice de inchamento de 1,25, valores típicos de areias médias com boa trabalhabilidade, corroborando os achados de Borges (2015) e Arroyo *et al*. (2016). Essa compatibilidade granulométrica contribuiu para a adequada compactação do concreto e para a homogeneidade da mistura, fatores essenciais à dispersão das macrofibras e à fixação da perlita impregnada com microrganismos.

Figura 5 – Curva de inchamento do agregado miúdo (areia com MF de 2,16) Índice de inchamento 1,25 e umidade crítica de 1,4%



Fonte: Autor, 2025

Figura 6 Curva granulométrica do agregado miúdo com seus respectivos limites inferior e superior das zonas otima e de utilização conforme NBR7211





Fonte: Autor, 2025

Os parâmetros físicos obtidos após cura e ensaios (Tabela 1) mostraram densidades aparentes variando entre 2,13 e 2,25 g·cm^{-3} e porosidades totais de 15 a 19%, sem diferenças estatísticas marcantes entre os tratamentos com e sem aditivos microbianos. A ligeira elevação da porosidade nas amostras com perlita e microrganismos (T5 e T6) é atribuída à natureza leve e porosa da perlita expandida, conforme relatado por Euzébio *et al*. (2017) e Pelegrinello (2017), que observaram efeito similar em compósitos biotecnológicos.

Tabela 1- Resultados dos ensaios de resistência mecânica e fisico-químicos

Variável	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor Máximo
fc28 (MPa)	T1	12,064**a**	1,818	9,260	13,700
	T2	12,932**a**	1,408	11,040	14,580
	T3	12,278**a**	0,573	11,460	12,920
	T4	13,794**a**	0,835	12,500	14,760
	T5	11,294**a**	1,674	9,660	13,740
	T6	12,298**a**	1,283	10,340	13,850
Temperatura da superfície do corpo de prova aos 28 dias (ºC)	T1	29,940**a**	0,152	29,800	30,100
	T2	30,060**a**	0,182	29,900	30,300
	T3	30,140**ab**	0,114	30,000	30,300
	T4	30,000**a**	0,100	29,900	30,100
	T5	30,140**ab**	0,089	30,100	30,300
	T6	30,320**b**	0,110	30,200	30,500

Continuação da tabela 1

Absorção de água por imersão (%)	T1	2,039**a**	0,083	1,950	2,140
	T2	2,005**a**	0,087	1,860	2,070
	T3	2,706**a**	1,565	1,850	5,500
	T4	2,176**a**	0,146	1,980	2,340
	T5	2,184**a**	0,118	2,070	2,370
	T6	2,144**a**	0,129	1,940	2,240
Densidade aparente ($g.cm^{-3}$)	T1	2,250**c**	0,029	2,210	2,280
	T2	2,193**abc**	0,035	2,150	2,230
	T3	2,203**bc**	0,042	2,130	2,240
	T4	2,226**c**	0,034	2,180	2,270
	T5	2,158**ab**	0,020	2,130	2,190
	T6	2,139**a**	0,009	2,130	2,150
Porosidade total (%)	T1	15,106**a**	1,070	13,830	16,480
	T2	17,245**abc**	1,337	15,880	18,760
	T3	16,856**ab**	1,583	15,640	19,580
	T4	15,995**a**	1,280	14,430	17,680
	T5	18,568**bc**	0,744	17,440	19,480
	T6	19,289**c**	0,325	18,760	19,6000
pH da água apos imersão dos corpos de prova	Padrão	6,668**a**	0,056	6,610	6,750
	T1	10,542**ef**	0,021	10,510	10,560
	T2	10,492**e**	0,016	10,470	10,510
	T3	10,594**f**	0,006	10,590	10,600
	T4	10,400**d**	0,007	10,390	10,410
	T5	10,212**c**	0,008	10,200	10,220
	T6	10,074**b**	0,065	9,990	10,140
Condutividade Elétrica da água apos imersão dos corpos de prova ($\mu S.cm^{-1}$)	Padrão	112,000**a**	0,707	111,00	113,000
	T1	589,600**e**	2,302	587,000	592,000
	T2	576,200**c**	2,775	573,000	579,000
	T3	581,600**d**	0,548	581,000	582,000
	T4	558,400**b**	0,894	558,000	560,000
	T5	576,200**c**	0,447	576,000	577,000
	T6	583,000**d**	1,000	582,000	584,000

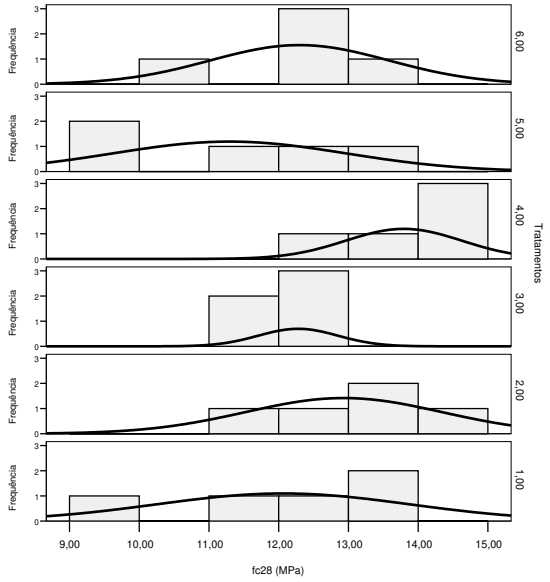
Média seguida da mesma letra minúscula na coluna não difere estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor, 2025

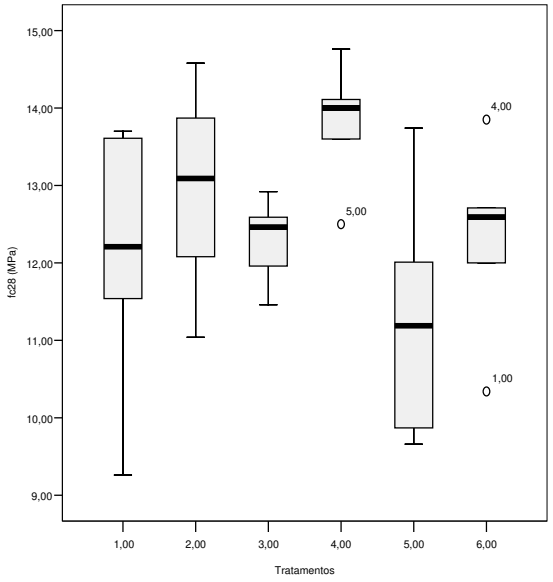
A Figura 7 apresenta a análise estatística dos resultados obtidos para as propriedades do concreto, por meio de histogramas com curva normal ajustada e

gráficos boxplot. Observam-se, respectivamente, nas Figuras 7A e 7B a resistência característica aos 28 dias (MPa), nas Figuras 7C e 7D a absorção de água (%), nas figuras 7E e 7F a porosidade total (%) e, nas Figuras 7G e 7H, a densidade aparente (g/cm³), permitindo avaliar a variabilidade, tendência central e presença de possíveis outliers.

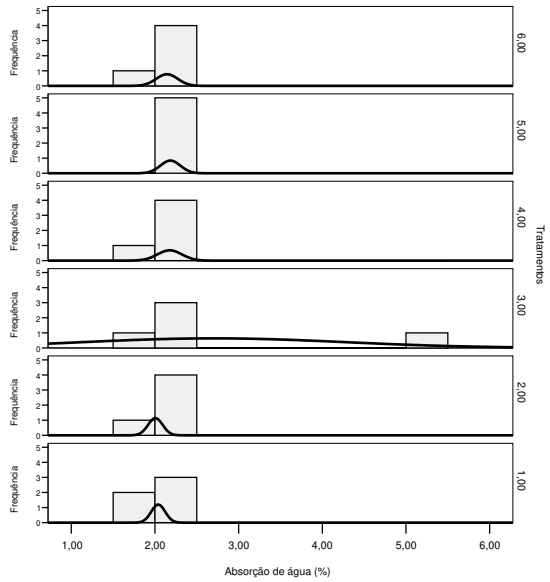
Figura 7 – Histograma com distribuição de frequência e curva normal e gráficos boxplot: **A** e **B**) Resistência caracteristica do concreto aos 28 dias de idade em MPa; **C** e **D**) Absorção de água em porcentagem; **E** e **F**) Porosidade total em porcentagem; **G** e **H**) Densidade aparente em gramas por centimeto cúbico.



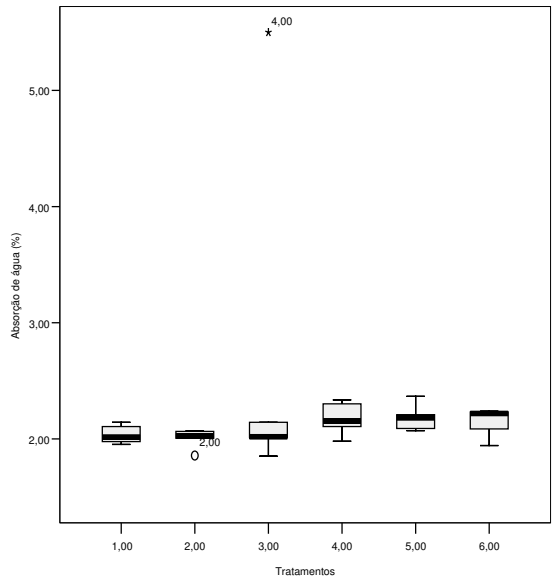
A



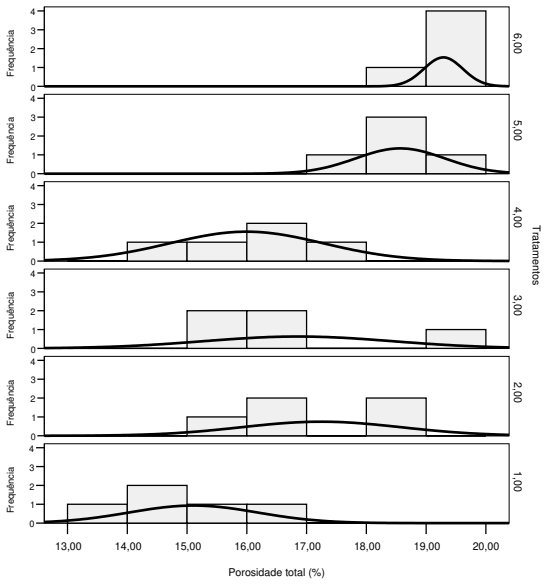
B



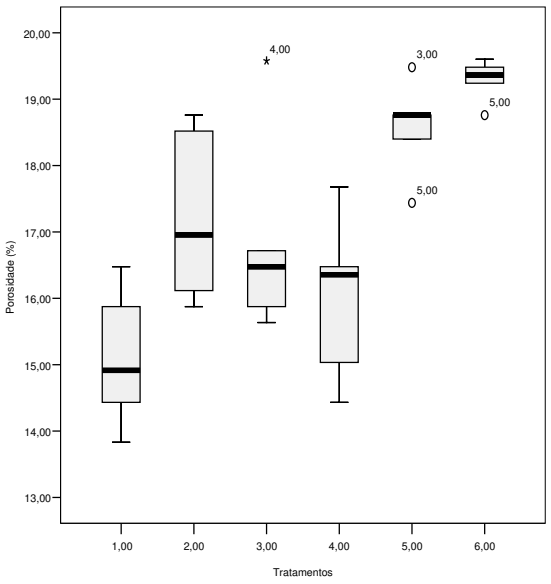
C



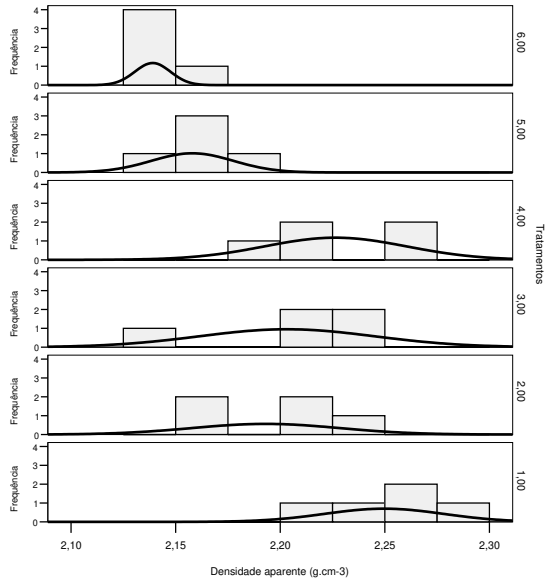
D



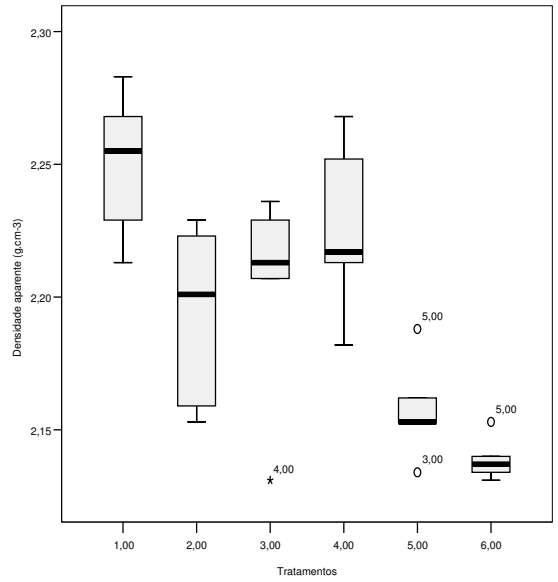
E



F



G



H

Fonte: Autor, 2025

3.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

A resistência média à compressão dos concretos aos 28 dias variou entre 11,29 MPa e 13,79 MPa, sem diferenças estatisticamente significativas entre os seis tratamentos avaliados. A ausência de ganhos expressivos evidencia que, nas condições experimentais adotadas, nem a adição bacteriana nem as macrofibras de polipropileno influenciaram de forma decisiva o fck do material. Resultados semelhantes foram relatados por Silva, Passarini e Santos (2017) e Costa *et al*.

(2021), que observaram variações inferiores a 10 % em concretos contendo *Bacillus subtilis*.

O tratamento T4 (perlita + macrofibras) apresentou o valor máximo de resistência (13,79 MPa), sendo esse desempenho relacionado ao comportamento das fibras no compósito, conforme descrito por Figueiredo (2011) e Christ *et al*. (2024). Os bioconcretos T5 e T6, por sua vez, apresentaram desempenho mecânico ligeiramente inferior, associado à variação de densidade e à heterogeneidade microestrutural decorrente da incorporação da perlita.

Importante destacar que, embora a resistência imediata não tenha aumentado, a tendência de autocicatrização ao longo do tempo — característica esperada de materiais biotecnológicos — pode se manifestar após semanas adicionais de exposição à umidade (JONKERS, 2013; FERREIRA e KNIESS, 2024).

A Figura 8 evidencia os principais modos de ruptura observados nos corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão, caracterizados predominantemente por falhas do tipo cisalhamento e esmagamento, com fraturas inclinadas e fragmentação progressiva do material. Observa-se que os corpos de prova apresentaram comportamento típico de concretos com resistência moderada, sem ocorrência de rupturas explosivas, indicando adequada distribuição de tensões durante o carregamento. Nos tratamentos contendo macrofibras de polipropileno, nota-se maior coesão pós-ruptura, com manutenção parcial da integridade estrutural, atribuída ao efeito de ponteamento das fibras, que limita a propagação abrupta das fissuras. Esses padrões de ruptura corroboram os resultados mecânicos obtidos, sugerindo que, embora não tenham sido observados ganhos significativos de resistência à compressão, a presença das fibras contribuiu para um comportamento mais dúctil do material após a fissuração.

Figura 8 – Principais tipos de rupturas ocorridas nos corpos de prova padrão



Fonte: Autor, 2025

3.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA, POROSIDADE E DENSIDADE

A absorção de água variou de 2,00 a 2,70 %, dentro dos limites aceitáveis para concretos de classe C20 segundo a NBR 8953 (2015). A semelhança entre os tratamentos indica que a presença bacteriana e o uso de fibras não alteraram significativamente a permeabilidade inicial. Essa constatação converge com os resultados de Nasser *et al*. (2022) e Gardini *et al*. (2024), que apontam que a biomineralização tende a reduzir a absorção apenas após o período de cicatrização bacteriana (14 a 28 dias adicionais).

A porosidade total apresentou discreto aumento nas formulações com perlita e microrganismos, atingindo 19,29 % em T6. Essa elevação era esperada, já que o encapsulamento biológico em substratos porosos, como a perlita, amplia a conectividade de poros. Contudo, tais poros atuam como reservatórios de nutrientes e umidade, favorecendo a reativação bacteriana em contato com fissuras, conforme descrito por Jonkers (2011) e Hernández-Piedrazul *et al*. (2022). Assim, embora haja aumento da porosidade física, há também melhoria potencial na durabilidade funcional do material.

A densidade aparente reduziu-se levemente nos tratamentos biotecnológicos (T5 = 2,158 $g \cdot cm^{-3}$; T6 = 2,139 $g \cdot cm^{-3}$), reflexo direto da inclusão de perlita, de menor densidade (0,64 $g \cdot cm^{-3}$). Essa redução não compromete a resistência específica, mantendo-se dentro da faixa esperada para concretos leves de uso estrutural moderado.

3.4 PARÂMETROS QUÍMICOS: PH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Os valores de pH da água após imersão revelaram alcalinidade elevada (≈ 10,0 – 10,6), em contraste com o pH ≈ 6,7 da amostra padrão (água da concessionária Compesa). Essa diferença reflete a atividade metabólica residual das bactérias ureolíticas, cuja degradação da uréia libera íons NH_4^+ e CO_3^{2-}, elevando temporariamente o pH, conforme relatado por Agarwal e Kadam (2017) e Costa *et al*. (2021). Esse aumento de alcalinidade é desejável, pois cria condições químicas favoráveis à precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) — principal agente de autocicatrização.

A condutividade elétrica da água pós-imersão variou de ≈ 558 a 589 $\mu S \cdot cm^{-1}$ nos concretos com aditivos, frente a 112 $\mu S \cdot cm^{-1}$ na amostra padrão.Esse acréscimo indica a presença de íons dissolvidos (Ca^{2+}, NH_4^+, CO_3^{2-}), caracterizando troca iônica intensa entre a matriz e o meio líquido, o que poderia confirma a ocorrência de processos de biomineralização ativa, conforme observado por Sidiq, Gravina e Giustozzi (2019). Entretanto, neste trabalho, os valores de pH e de condutividade elétrica observados refletem predominantemente reações químicas da matriz cimentícia e dos reagentes adicionados, não sendo possível inferir categoricamente atividade biológica ou biomineralização, considerando a baixa viabilidade microbiana constatada a posteriori no produto comercial utilizado na produção dos corpos de prova.

A condutividade elétrica mais elevada em T6 (bioconcreto + macrofibras) sugere que as fibras possam aumentar a difusão interna de umidade, facilitando o efeito químico dos reagentes.

3.5 ATIVIDADE MICROBIOLÓGICA

A contagem de unidades formadoras de colônia ($UFC \cdot mL^{-1}$) do produto BACFOS revelou valores muito inferiores à concentração declarada de 10^9 $UFC \cdot mL^{-1}$. Nas diluições testadas, foram observadas colônias apenas até 10^{-3} ou 10^{-4}, sugerindo uma redução drástica da viabilidade celular (Figura 9 e Tabela 2). Esse resultado indica que o material comercial analisado não atendeu às especificações microbiológicas descritas em seu rótulo, o que pode comprometer o potencial de autorreparação esperado.

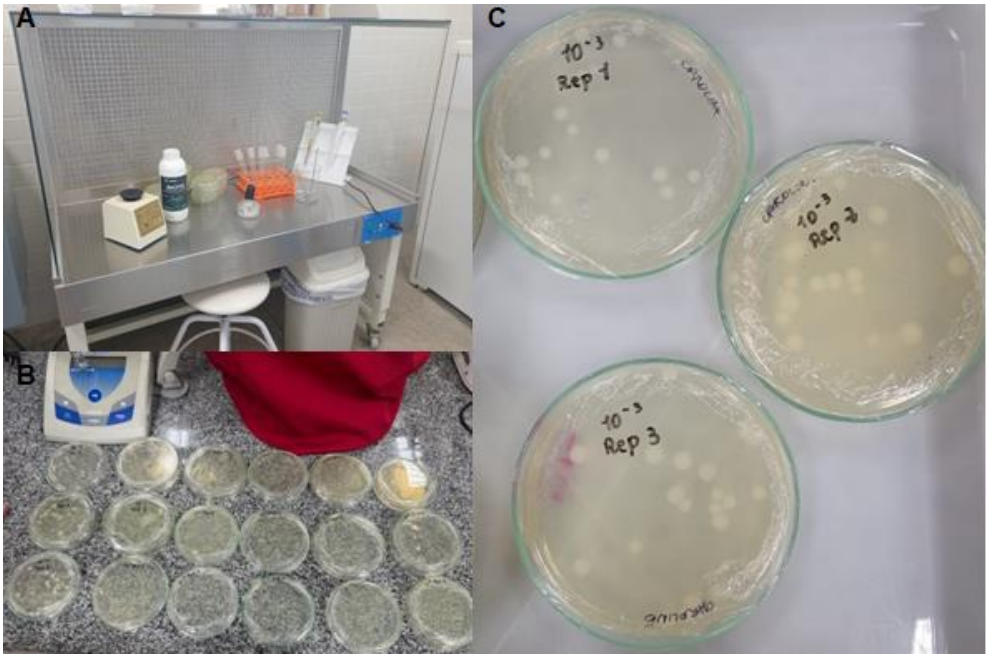
Conforme destacado por Pelegrinello (2017) e Martins *et al*. (2021), a viabilidade microbiana é fator determinante para a efetividade do bioconcreto, uma vez que a precipitação de carbonato de cálcio depende diretamente da atividade metabólica bacteriana. Assim, a ausência de concentração adequada implica redução ou inexistência de biomineralização, tornando o comportamento do compósito mais próximo ao de um concreto convencional com aditivos minerais.

Além disso, é possível que fatores como tempo de armazenamento, exposição térmica ou pH elevado da solução de transporte tenham contribuído para a perda de viabilidade das cepas *Bacillus subtilis* UFV S1 e *Priestiamegaterium* CCT

7987, fenômeno também relatado por Nasser *et al*. (2022) e Akshay *et al*. (2023) em estudos de estabilidade bacteriana.

A ausência de diferenças significativas entre T1–T6 sugere que, nas condições adotadas, nem a adição bacteriana (com baixa viabilidade) nem as macrofibras alteraram o fc28; ou seja, o ganho esperado por cicatrização biogênica requer viabilidade dos microrganismos confirmada e exposição à úmidade.

Figura 9 – Ilustração da contagem do número de unidades formadoras de colônia por volume (UFCml^{-1}) 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^{-3}



Fonte: Autor, 2025

Tabela 2 - Número de colônias encontradas nas diferentes diluições

	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: Autor, 2025

4. CONCLUSÕES

Os resultados indicam que:

O produto comercial analisado não apresentou concentração microbiana suficiente para desencadear o processo de biomineralização esperado. Mesmo assim, o comportamento físico e mecânico dos compósitos permaneceu estável, demonstrando que a inclusão de perlita e macrofibras não compromete as propriedades fundamentais do concreto.

O aumento do pH e da condutividade elétrica refletiu principalmente o efeito químico dos reagentes adicionados, como ureia e nitrato de cálcio, e não a ação biológica.

O reforço com fibras de polipropileno mostrou-se eficiente na manutenção da integridade pós-fissuração, atuando como elemento de redistribuição de tensões.

A eficiência da autocicatrização bacteriana depende diretamente da qualidade microbiológica da biocarga utilizada, sendo recomendável que pesquisas futuras utilizem culturas previamente verificadas em laboratório, com concentração e viabilidade asseguradas.

Ademais, embora o produto comercial testado não tenha atingido a concentração microbiana declarada, o estudo demonstra a viabilidade técnica do traço híbrido de bioconcreto reforçado com fibras, reforçando a necessidade de controle microbiológico rigoroso e certificação adequada dos insumos destinados à engenharia civil. Esses resultados não invalidam a tecnologia de bioconcretos, mas destacam a importância de utilizar biocargas certificadas e realizar testes de viabilidade antes da sua incorporação à matriz cimentícia.

5.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, bem como aos professors Jofran Luiz de Oliveira (UFR) e Júlio Cesar Ferreira de Melo Junior (UNIVASF) pelas valiosas sugestões.

6. REFERÊNCIAS

1) ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem de concreto: método de dosagem da ABCP (adaptação do método do ACI)**. São Paulo: ABCP, 1998.

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

3) _____ **NBR 6467:2006: Agregados – Determinação do índice de inchamento de agregado miúdo.** Rio de Janeiro, 2006.

4) _____**NBR 10547: Água – Determinação do pH – Método potenciométrico**. Rio de Janeiro, 1988.

5) _____**NBR 10739: Água – Determinação da condutividade elétrica**. Rio de Janeiro, 1989.

6) _____**NBR 12821: Concreto – Preparo, controle e recebimento – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2009.

7) _____**NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2009.

8) _____**NBR 16935: Concreto reforçado com fibras – Requisitos de desempenho.** Rio de Janeiro, 2021.

9) _____**NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2016.

10) _____**NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

11) _____**NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2023.

12) _____**NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

13) _____**NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2015.

14) _____**NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

15) _____**NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

16) AGARWAL, V. C.; KADAM, K. N. Bioconcrete: Next Generation ofSustainable Concrete.***InternationalJournalofEngineeringSciences&Research Technology***, v. 6, n. 4, p. 1–6, 2017.

17) AKSHAY, J. P.; BEBÊ, B.; PALANISAMY, T. Estudo experimental sobre a durabilidade e as propriedades mecânicas de um mortero leve com bactérias formadoras de esporas encapsuladas. **In:** MARANO, G. C.; RAUL, A. V.; ANTÔNIO, J.; KARTHA, G. U.; KAVITHA, P. E.; PREETHI, M. (Eds.). *Anais da SECON'22.* Springer, 2023. p. 1185-1197.

18) ARROYO, L. F.; TANAKA, K. Y. M.; TEIXEIRA, T. M.; ALVES, C. E. S.; FELIX, G. A. A. **Concreto biológico: uma proposta sustentável**. 2016.

19) BERNAL ZÚÑIGA, L.; CANTA HONORES, J. L. **Uso de bactérias do tipo Gram-positivo para o melhoramento do concreto: uma revisão da literatura**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso.

20) BONIFÁCIO, D. R.; SILVA, T. O.; MATOS, A. C. T.; *et al*. *Bacillus subtilis*: uma adição incomum com benefícios inesperados ao concreto. ***Revista de Engenharia e Tecnologia***, v. 14, n. 2, p. XX-XX, 2022.

21) BORGES, H. M. R. R. **Bio-cimentação como técnica de reparação de argamassas cimentícias.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

22) BRAZ, M. C. A.; NASCIMENTO, F. B. C. Concreto reforçado com fibras de aço. ***Ciências Exatas e Tecnológicas***, Maceió, v. 3, n. 1, p. 43-56, 2015.

23) CHRIST, R.; PACHECO, F.; EHRENBRING, H. Z.; SILVA DOS SANTOS, J. W.; MENEGUSSI, G. C.; TUTIKIAN, B. F. Análise da influência das fibras de aço e poliméricas nas propriedades do estado fresco e endurecido de um Concreto Reforçado com Fibras (CRF). ***Revista de Arquitetura IMED***, Passo Fundo, v. 13, n. 1, p. 116–134, 2024. DOI: 10.18256/2318-1109.2024.v13i1.5008

24) COSTA, L. B.; LIMA, F. G. C.; LEITE, G. S.; MERGULHÃO, R. A. C.; OLIVEIRA, R. G. Bioconcreto e sua aplicabilidade na recuperação de manifestações patológicas na construção civil. ***Revista Mangaio Acadêmico***, v. 6, p. 47-67, 2021.

25) 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.

26) FERREIRA, A. C. C.; KNIESS, C. T. Concretos com propriedades autorregenerativas: comparação a partir da revisão bibliográfica da literatura. ***Revista Caderno Pedagógico***, Curitiba, v. 21, n. 12, p. 1-21, 2024.

27) FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras: ciência e tecnologia**. São Paulo: EPUSP, 2011.

28) FREITAS, A. Á. de; ROMÃO, E. M.; ANÍCIO, S. O.; BARROS, A. J. de. Bioconcreto: uma revisão de sua aplicação na construção civil. ***Research, Society and Development***, v. 10, n. 4, e37210414270, 2021.

29) 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, e516061, 2024. https://doi.org/10.47820/recima21.v5i1.6061

30) HERNÁNDEZ-PIEDRAZUL, E.; ROBLES, I. E. C.; MENDIOLA, L. L. El bioconcreto como agente reparanteenestructuras de concreto. ***Pädi***, v. 10, n. Especial 2, p. 176–183, 2022.

31) HIRLE, J. I.; GOMES, F. R.; BARRETO, L. S.; XAVIER, W. F. Patologias em concreto armado e seus métodos de recuperação estrutural. ***Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro***, [S. l.], v. 12, n. 1, 2023. DOI: https://doi.org/10.61164/rmnm.v12i1.1712. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/1712. Acesso em: 13 jan. 2026.

32) IBM CORP. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 13.0. Armonk, NY: IBM Corp., 2004.

33) JONKERS, H. M. Bacteria-based self-healing concrete. ***Heron***, v. 56, n. 1/2, p. 1–12, 2011.

34) JONKERS, H. M. Developmentof a bacteria-based self-healing concrete. ***Tailor Made Concrete Structures***, p. 425-430, 2013.

35) MARTINS, M. G. A.; SILVA, M. O.; FLORENTINO, L. A.; BORGES, D. G. Bioconcreto: bactérias gram-positivas isoladas do solo aplicadas ao autorreparo de fissuras, trincas e rachaduras em concreto. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, e40810515215, 2021. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v10i5.15215

36) MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 6. ed. New York: Wiley, 2012.

37) NASCIMENTO, F. M.; COSTA JUNIOR, H.; SANTIAGO, A. N.; SALOMÃO, P. E. A. Importância de uma correta execução da cura do concreto e sua interferência nas peças concretadas. ***Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro***, [S. l.], v. 1, n. 1, 2023. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/566. Acesso em: 13 jan. 2026.

38) NASSER, R.; *et al*. Durabilityofbacterial self-healing concrete. ***Journalof Building Materials***, v. 7, n. 2, p. 89–103, 2022.

39) 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, Paraná, Brasil.

40) SANTOS, P. R. dos; *et al*. Patologias em estruturas de concreto armado: um estudo de casos. ***Revista Engenharia Diagnóstica***, v. 2, n. 1, 2024.

41) SIDIQ, A.; GRAVINA, R.; GIUSTOZZI, F. Experimental investigationofthe self-healing performance ofbacteria-basedcementitiouscomposites. ***Cement and Concrete Composites***, v. 104, p. 103–114, 2019.

42) SILVA, R. F.; GODÓY, D. R.; RESENDE, A. F. Análise das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado. ***Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil***, v. 8, n. 1, p. 45-60, 2022.

43) SILVA, T.; PASSARINI, L.; SANTOS, M. Avaliação experimental da resistência à compressão de bioconcretos. ***Anais*** *do Congresso Nacional de Engenharia Civil*, p. 1-10, 2017.

44) SIQUEIRA, R. A.; SILVA, A. J. M.; RIBEIRO, P. T.; SALOMÃO, P. E. A. Análise comparativa entre o concreto usinado e o concreto produzido no canteiro de obra. ***Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro***, [S. l.], v. 2, n. 1, 2023. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/577. Acesso em: 13 jan. 2026.

45) SOUZA, B. V.; SILVA, J. M. da; MOREIRA, K. C. B.; LOPES, S. C. Vantagens e desvantagens da utilização da fibra de vidro no concreto armado: uma revisão bibliográfica. ***Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro,*** [S. l.], v. 11, n. 1, 2023. DOI: https://doi.org/10.61164/rmnm.v11i1.1645. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/1645. Acesso em: 13 jan. 2026.

46) VALE, A.; OLIVEIRA, R. Bioconcreto como material inteligente: perspectivas e desafios. ***Revista Engenharia Sustentável***, v. 9, n. 2, p. 233-250, 2024.

47) VIJAY, K.; MURMU, M.; DEO, S. Bacterial concrete: a sustainablealternative for improvingdurabilityofcementitiousmaterials. ***Constructionand Building Materials***, v. 152, p. 1008-1017, 2017.