

Desempenho do bioconcreto com a bactéria *Bacillus subtilis*

ANTÔNIA MARIANA A. DO NASCIMENTO - GRAD. - <https://orcid.org/0009-0003-8880-4838> - (mariana.nascimento@fas.edu.br) ;

CRISTIANNE BITENCOURT MOURA - ENG. - <https://orcid.org/0009-0001-3654-8989> ;

FRANCISCO ELDER DE SOUZA SANTANA - ENG. - <https://orcid.org/0009-0009-4100-1900> ;

FRANCISCA LILIAN CRUZ BRASILEIRO - ENG. - <https://orcid.org/0000-0002-4030-1321> - UNIAr

CLARICE JORDÂNIA RIBEIRO DE PAIVA - ENG. - <https://orcid.org/0009-0005-7504-4125> - UFC

RESUMO

ESTE ARTIGO APRESENTA OS PRINCIPAIS PROCESSOS E RESULTADOS DE UM ESTUDO DE CARÁTER EXPLORATÓRIO VOLTADO À AVALIAÇÃO DO BIOCONCRETO PRODUZIDO COM *BACILLUS SUBTILIS*, COMPARADO AO CONCRETO CONVENCIONAL. O ESTUDO ANALISA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, ABSORÇÃO DE ÁGUA E CAPACIDADE DE AUTOCICATRIZAÇÃO, VISANDO REDUZIR CUSTOS DE MANUTENÇÃO E AMPLIAR A DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS. FORAM MOLDADOS CORPOS DE PROVA COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DA SOLUÇÃO BACTERIANA E UM TRACÇO DE REFERÊNCIA. A AUTOCICATRIZAÇÃO OCORRE QUANDO BACTÉRIAS EM ESTADO LATENTE, ATIVADAS PELA UMIDADE DAS FISSURAS, GERAM CARBONATO DE CÁLCIO (CaCO_3), MATERIAL QUE PREENCHE E SELA AS ABERTURAS. COMO RESULTADO PARCIAL, VERIFICOU-SE A PRESENÇA E ATIVIDADE DA *BACILLUS SUBTILIS* NOS PROBIÓTICOS IMPREGNADOS EM VERMICULITA, POR MEIO DE ANÁLISE MICROSCÓPICA. A ETAPA DE PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA FOI CONCLUÍDA E OS ENSAIOS EXECUTADOS ATÉ O MOMENTO DEMONSTRAM DESEMPENHO SATISFATÓRIO NA MAIOR PARTE DOS PARÂMETROS AVALIADOS.

PALAVRAS-CHAVE: *BACILLUS SUBTILIS*, AUTOCICATRIZAÇÃO, FISSURAS.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de maior relevância na construção civil e desde a sua descoberta, no final no século XIX, a crescente aplicação deste material o posicionou como um dos recursos mais essenciais para a humanidade.

Tendo em vista a relevância do concreto, o aprimoramento de métodos que prolonguem sua vida útil e durabilidade é indispensável. Prolongar a vida útil deste material está intrinsecamente relacionado à prevenção de manifestações patológicas,

sendo o surgimento de fissuras a principal anomalia. Tais descontinuidades podem originar-se por diversas causas, como falhas no processo de cura, retração hidráulica, variações de temperatura e umidade do ar, presença de agentes agressivos, sobrecarga, erros de projeto e/ou execução etc. (Koga, 2020). Embora fissuras em idades iniciais possam não representar riscos estruturais iminentes, elas funcionam como portas de entrada para agentes agressivos.

A presença de porosidade e permeabilidade excessivas facilita a penetração de cloretos, sulfatos e ácidos, que desencadeiam a degradação da matriz cimentícia e a corrosão prematura da armadura, comprometendo a integridade dos elementos de concreto armado, o que prejudica a durabilidade da estrutura a longo prazo (Jonkers, 2011). Diante das limitações dos métodos convencionais de reparo, que, muitas vezes, possuem alto custo e difícil acesso, a tecnologia de materiais autocicatrizantes surge como uma solução disruptiva.

Dentro dessa vertente, destaca-se o estudo das bactérias do gênero *Bacillus*, que são capazes de secretar substâncias que cristalizam, formando calcário dentro de poros e fissuras, o que promove a autorregeneração do concreto. O gênero *Bacillus* consome o hidróxido solúvel e, através do seu metabolismo, produz carbonato de cálcio (CaCO_3), preenchendo os poros do concreto e aumentando sua resistência mecânica, conforme preconiza Costa e Rodrigues (2018). Os autores descrevem ainda que as fissuras das primeiras idades são eliminadas em cerca de três semanas nos concretos com as bactérias do gênero *Bacillus*.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho do biocon-

creto (concreto que utiliza bactérias para promover a autocicatrização), com a bactéria *Bacillus subtilis*, em relação ao concreto convencional, avaliando comparativamente a resistência à compressão, a absorção de água e a capacidade de autocicatrização de fissuras, como ferramenta de redução de custos de manutenção e promoção da sustentabilidade na construção civil.

2. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento apresenta a metodologia, os materiais empregados, os procedimentos adotados, a produção dos corpos de prova e os ensaios realizados.

2.1 Metodologia

O presente trabalho adota uma abordagem quantitativa, pautada em ensaios laboratoriais para obtenção de dados numéricos. Ademais, devido à natureza desta pesquisa, o estudo possui caráter exploratório e preliminar, voltado à identificação de tendências no comportamento do bioconcreto.

Ressalta-se que, diante das limitações de recursos e da complexidade do agente biológico, a análise foca na viabilidade técnica do método de impregnação. Assim, os resultados servem como indicadores para o desenvolvimento de protocolos experimentais mais robustos em pesquisas futuras.

2.2 Materiais e procedimentos

Para a execução da pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais: Cimento Portland CP II F 32, areia média de rio como agregado miúdo, brita 2 como agregado graúdo, *Bacillus subtilis* QST 71 na concentração 13,68g/l através do probiótico

TABELA 1
PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Agregados	Propriedades	Valores	Método de ensaio	Fonte
Areia fina	Massa específica	2,604 g/cm ³	NBR 16916:2021	Autores
	Massa unitária	1,470 g/cm ³	NBR 16972:2021	Autores
	Módulo de finura	2,63	NBR 17054:2022	Autores
Brita 02	Massa específica	2,560 g/cm ³	NBR 16917:2021	Autores
	Massa unitária	1,472 g/cm ³	NBR 16972:2021	Autores
	DMC	25 mm	NBR 17054:2022	Autores
Argila expandida	Massa específica	0,77632 g/cm ³	NBR 16917:2021	Diniz (2022)
	Massa unitária	0,47586 g/cm ³	NBR 16972:2021	Diniz (2022)
	DMC	25 mm	NBR 17054:2022	Diniz (2022)
Cimento CP II-F- 32	Massa específica	3,000 g/cm ³	NBR 16605:2017	Fabricante

FONTE: AUTORES (2024)

denominado de *Serenade*, lactato de cálcio, ureia, argila expandida do tipo 2215, e vermiculita. Todos os materiais foram fornecidos pelo Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário Ari de Sá.

O presente estudo utilizou o método aplicado por Mello e Santiago (2020) de empregar um produto que já contém a bactéria, a saber: *Bacillus subtilis* QST 713, contida no probiótico *Serenade*. A ativação da bactéria foi realizada a partir do lactato de cálcio e da ureia, e a solução bacteriana foi impregnada na argila expandida.

Os agregados, miúdo e graúdo, foram submetidos aos ensaios pertinentes para obtenção das propriedades necessárias para posterior utilização nas dosagens dos traços. A Tabela 1 sintetiza os valores obtidos.

Para verificação da existência da bactéria *Bacillus subtilis* nos probióticos *Serenade* (Figura 1), realizou-se um teste preliminar com a impregnação da bactéria em partículas de vermiculita. A vermiculita é um silicato hidratado de ferro, alumínio e magnésio, que possui características que se assemelham às da argila expandida.

- O procedimento adotado, em consonância com Mello e Santiago (2020) foi:
- (i) aquecimento de 800 ml de água próximo à ebulição, seguido de resfriamento por 10 minutos;
 - (ii) adição de 2 g de ureia e mistura até a dissolução;
 - (iii) retirada de 20 ml da solução e adição de 8 ml do produto *Serenade*, gerando uma solução bacteriana (com ureia e lactato de cálcio) de 28 ml;
 - (iv) homogeneização da solução;
 - (v) adição gradual de 8 g de vermiculita até a mistura apresentar aspecto pastoso (Figura 2). A vermiculita impregnada com bactérias permaneceu em repouso por 12 dias.
- O procedimento foi realizado para os quatros frascos do probiótico *Serenade*.

2.3 Verificação da atividade bacteriana

Como resultados, foi constatada a atividade bacteriana nos probióticos utilizados, tanto por meio da análise visual (Figura 3) quanto por meio da análise realizada via microscópio Marte MIC-100 Bino-cular (Figura 4).

Na Figura 4, tem-se a análise microscópica da vermiculita sem impregnação bacteriana e na Figura 5, com impregnação bacteriana, onde é possível ver a aglutinação da vermiculita. Além disso, através da utilização do microscópio com ampliação



FIGURA 1
PROBIÓTICOS SERENADE TESTADOS
FONTE: AUTORES (2024)



FIGURA 2
VERMICULITAS IMPREGNADAS COM A SOLUÇÃO BACTERIANA
FONTE: AUTORES (2024)



FIGURA 3
COMPARATIVO VISUAL DA VERMICULITA IMPREGNADA E NÃO IMPREGNADA
FONTE: AUTORES (2024)

de 40x retrátil com abertura numérica n.a 0,65, distância de trabalho w.d. 0.10 mm, foi possível identificar a presença dos microrganismos em atividade.

Logo, a comprovação da atividade bacteriana nesta fase preliminar foi de fundamental importância, demonstrando a viabilidade do agente biológico. Ademais, a análise visual e microscópica comprovou que a bactéria se manifesta com poucos dias de impregnação, promovendo o efeito no concreto.

2.4 Dosagem dos traços

O traço de referência da pesquisa foi definido a partir do método de dosagem da Associação Brasileira Cimento Portland (ABCP). Sua composição, em massa, foi



FIGURA 4
ANÁLISE MICROSCÓPICA – VERMICULITA SEM IMPREGNAÇÃO BACTERIANA
FONTE: AUTORES (2024)

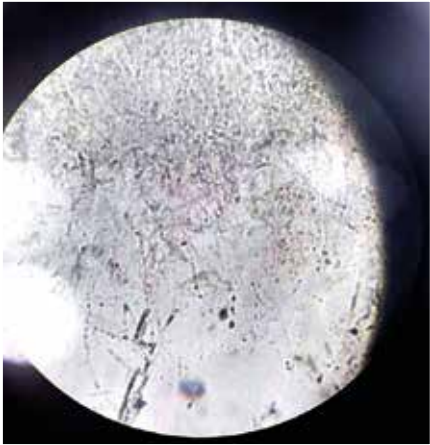


FIGURA 5
ANÁLISE MICROSCÓPICA – VERMICULITA COM IMPREGNAÇÃO BACTERIANA
FONTE: AUTORES (2024)

de 1:1,743:2,368:0,45, buscando atingir os 30 MPa aos 28 dias. Além do traço de referência, outros três traços foram dosados com a descrição sintetizada no Quadro 1.

Para os traços com solução bacteriana, a argila expandida foi empregada para o encapsulamento e preservação da bactéria. A substituição de 20% do agregado graúdo foi realizada compensando a massa

específica. A quantificação dos materiais por traço está exposta na Tabela 2.

As partículas de argila expandida que foram empregadas nos Traços II e III passaram pela impregnação na solução de *Bacillus subtilis*, permanecendo em sistema aberto durante 8 dias.

Para preservar o material biológico das ações mecânicas durante a preparação

QUADRO 1
DESCRIÇÃO DOS TRAÇOS ADOTADOS

Traços	Descrição dos traços
REF	Traço de referência.
I	Traço com argila expandida em substituição de 20% agregado graúdo e sem bactéria.
II	Traço com argila expandida em substituição de 20% do agregado graúdo e com adição 750 mL do Probiótico de Serenade, com impregnação na argila expandida.
III	Traço com argila expandida em substituição de 20% do agregado graúdo e com adição 1000 mL do Probiótico de Serenade, com impregnação na argila expandida.

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 2
QUANTIDADE DOS MATERIAIS POR METRO CÚBICO (KG/M³)

Traços	Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Brita 2 (kg/m³)	Argila expandida (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	Solução bacteriana (l/m³)
Referência	419,7	731,6	993,9	—	188,9	2,3	—
Traço I	420,3	732,8	796,2	58,9	189,2	2,7	—
Traço II	413,8	721,4	783,9	58,0	186,2	2,0	16,2
Traço III	411,4	717,2	779,3	57,6	185,1	2,4	21,4

FONTE: AUTORES (2024)

e proteger as células dos microrganismos das condições extremas do ambiente, foi utilizada a imobilização prévia do agente biológico e de seus nutrientes em microcápsulas. O microencapsulamento oferece várias vantagens, incluindo a preservação das atividades metabólicas, criando um microambiente favorável para seu desenvolvimento.

O procedimento adotado para a incorporação das bactérias na argila expandida foi em consonância com os pesquisadores brasileiros Mello e Santiago (2020):

- (i) aquecimento de 3 litros de água à 80°C;
- (ii) resfriamento da água com o controle de temperatura até 30° C aproximadamente;
- (iii) adição de 96 g de lactato de cálcio e mistura até a dissolução completa;
- (iv) adição de 750 ml (para o Traço II) e adição de 1000ml (para o Traço III) do probiótico Serenade com a homogeneização da solução até a estabilização;
- (v) imersão de 2,69 kg de argila expandida na solução (Figura 11). A argila expandida com a impregnação da solução bacteriana permaneceu em estufa por 8 dias a uma temperatura constante de 37° C (Figura 6).

2.5 Produção dos corpos de prova

2.5.1 PRODUÇÃO DO CONCRETO E ENSAIOS ESTABELECIDOS

Seguindo os procedimentos especificados pela NBR 12655 (ABNT, 2022) e tendo os traços devidamente calculados, foi realizada a fabricação dos corpos de prova. Para tanto, utilizou-se uma betoneira com capacidade de 250 litros. Durante o processo de concretagem, foi necessária a utilização de aditivo superplastificante para melhoria da fluidez do concreto e para ajustes no abatimento do tronco de cone, que teve seu valor estipulado em

100 ± 20 mm. Os materiais usados no ensaio foram: placa de base, tronco cônico e haste de compactação, conforme prescrito na NBR 16889 (ABNT, 2020).

Ressalta-se que, em todos os traços, foi alcançado um resultado satisfatório, visto que, o esperado era entre 80 e 120 milímetros. A Tabela 3 apresenta os valores de abatimento obtidos.

Para moldagem dos corpos de prova, foi coletada amostragem de concreto fresco, conforme específica a NBR NM 16886 (ABNT, 2020). No total foram moldados 24 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura).

Após a moldagem, os corpos de prova foram deixados em processo de cura inicial por um período de 24h, em uma superfície horizontal, sem vibrações e perturbação. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e submetidos à cura submersa, onde ficaram até as idades de rompimento de 28 e 84 dias, para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial e absorção de água. Todo processo de cura foi feito segundo o prescrito pela NBR 5738 (ABNT, 2016).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme especificações da NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de rompimento de 28 e 84 dias, e, para cada traço, foram utilizados 2 corpos de prova por idade.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi iniciado com a secagem das amostras em estufa (T = 105° C) até a variação de massa ser menor que 0,10 g, segundo a NBR 9779 (2012). Depois disso, os corpos de prova foram colocados em uma camada de água de (5 ± 1) mm, com fundos expostos, e suas massas foram aferidas após 3, 6, 24, 48 e 72 horas de exposição.

O teste de absorção de água por imersão obedeceu às prescrições da norma brasileira NBR 9778 (2009) e, para cada traço, foram utilizados 2 corpos de prova por idade.



FIGURA 6
ARGILA EXPANDIDA NO PROCESSO DE IMPREGNAÇÃO
FONTE: AUTORES (2024)

Para análise e acompanhamento da autocicatrização e verificação visual da precipitação do carbonato de cálcio, foram utilizados 2 corpos de prova por traço. Para formação das fissuras foi realizado o procedimento de pré-fissuração dos corpos de prova com 70% da carga de ruptura aos 28 dias. Os corpos de prova passaram pelo processo de cura úmida e em ciclos (72 horas submersos em água e 72 horas expostos ao ar). O acompanhamento da capacidade de reparo das fissuras foi feito de forma visual.

2.6 Ensaios realizados

2.6.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Conforme as especificações da norma técnica citada posteriormente, foram rompidos dois corpos de prova por traço, sendo adotada a média dos valores encontrados. A Tabela 4 reúne os valores de

TABELA 3
VALORES DE ABATIMENTOS OBTIDOS

Traços	Slump (mm)
Referência	100
Traço I	100
Traço II	110
Traço III	120

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 4
RESULTADO ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (28 DIAS)

Idade (dias)	Nome	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	Média (MPa)
28	REF	32,6	35,4	34,0
	I	28,5	32,7	30,6
	II	28,3	31,8	30,0
	III	28,2	30,2	29,2

FONTE: AUTORES (2025)

TABELA 5
RESULTADO ENSAIOS DE RESISTÊNCIA
À COMPRESSÃO (84 DIAS)

Idade (dias)	Nome	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	Média (MPa)
84	REF	38,1	38,6	38,3
	I	25,7	32,7	29,2
	II	29,5	30,0	29,8
	III	27,2	35,8	31,5

FONTE: AUTORES (2025)

resistência à compressão axial obtidos para cada amostragem do concreto aos 28 dias, e a Tabela 5 apresenta os valores correspondentes aos 84 dias.

Com base nos dados apresentados, através do gráfico 1, é possível estabelecer a comparação visual entre as médias de cada traço e suas referidas idades.

Por conseguinte, a Tabela 6 apresenta os dados comparativos de desempenho e variabilidade entre as idades de 28 e 84 dias. Embora uma oscilação térmica inicial tenha retardado o metabolismo bacteriano e limitado os ganhos de resistência aos 28 dias, a porosidade da argila expandida preservou a viabilidade dos microrganismos. Logo, com a estabilização das condições aos 84 dias, houve a retomada da atividade biomineralizante, alcançando-se resultados satisfatórios no Traço III.

Ressalta-se que a variação percentual de resistência é utilizada para medir o ganho ou a perda de resistência do concreto entre 28 e 84 dias.

Neste caso, as análises estatísticas dos resultados de 28-84 revelam perda significativa de uniformidade nos traços modificados, principalmente no Traço I (argila sem bactéria) e no Traço II (argila com 750 ml de solução do probiótico *Serenade*).

Ademais, ao observar a resistência a longo prazo, nota-se que o Traço III (argila com 1.000 ml de probiótico) demonstrou o maior ganho percentual de resistência

TABELA 6
COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DE 28
E 84 DIAS

Traço	Média 28 dias (MPa)	Média 84 dias (MPa)	Variação (%)
REF	34,01	38,32	12,67
I	30,60	29,23	-4,51
II	30,06	29,77	-0,96
III	29,19	31,55	8,02

FONTE: AUTORES (2025)

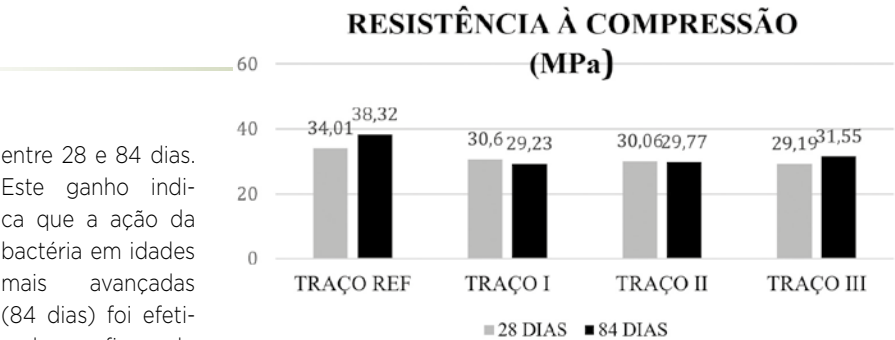


GRÁFICO 1
COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DOS RESULTADOS OBTIDOS NO
ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

FONTE: AUTORES (2025)

entre 28 e 84 dias. Este ganho indica que a ação da bactéria em idades mais avançadas (84 dias) foi efetivada, confirmando que a argila expandida atuou de forma eficiente como um reservatório interno de umidade. A retenção de água e nutrientes (lactato de cálcio e ureia) no interior da argila possibilitou uma liberação gradual desses compostos, prolongando as reações de hidratação e resultando em uma resistência superior a 30 MPa aos 84 dias.

Além disso, salienta-se que o traço de referência, aos 28 dias superou a resistência esperada (30 MPa) em aproximadamente 13,37%. Dessa forma, este resultado demonstra um excelente controle de qualidade e uma alta uniformidade na mistura do concreto convencional, confirmando a confiabilidade do processo de dosagem e moldagem.

2.6.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA
POR CAPILARIDADE

O processo de absorção de água por capilaridade de acordo com a NBR 9779

(ABNT, 2012) envolve a determinação da capacidade de um material em absorver água devido à ação capilar. Dessa maneira, foram utilizadas 3 amostras, colocadas na estufa para a secagem e, em seguida, pesadas para obter o valor de sua massa seca. Posteriormente, os 3 corpos de prova foram parcialmente emergidos em água, em uma lâmina de 5 mm, e feito a sua nova pesagem nos intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Os resultados estão apresentados na tabela 7 e para uma melhor visualização e análise no gráfico 2.

Ao observar os dados obtidos, é notório que:

- ▶ O Traço de referência (REF) apresentou as menores taxas de absorção em todos os intervalos de tempo;

TABELA 7
ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE MEDIDOS COM 3H, 6H, 24H, 48H E 72H
DE ENSAIO (G/CM²)

Traços	Corpo de prova	Área da seção transversal (cm ²)	C Msat (3h)	C Msat (6h)	C Msat (24h)	C Msat (48h)	C Msat (72h)
REF	CP 01	78,54	0,051	0,076	0,318	0,560	0,662
	CP 02	78,54	0,255	0,127	0,178	0,357	0,471
	CP 03	78,54	0,280	0,204	0,089	0,331	0,458
I	CP 01	78,54	0,140	0,267	0,509	0,688	0,802
	CP 02	78,54	0,191	0,229	0,509	0,675	0,726
	CP 03	78,54	0,140	0,229	0,535	0,764	0,802
II	CP 01	78,54	0,229	0,344	0,637	0,777	0,891
	CP 02	78,54	0,229	0,306	0,598	0,713	0,815
	CP 03	78,54	0,166	0,229	0,420	0,535	0,598
III	CP 01	78,54	0,255	0,369	0,675	0,828	0,904
	CP 02	78,54	0,267	0,369	0,726	0,840	0,968
	CP 03	78,54	0,216	0,369	0,573	0,713	0,802

FONTE: AUTORES (2024)

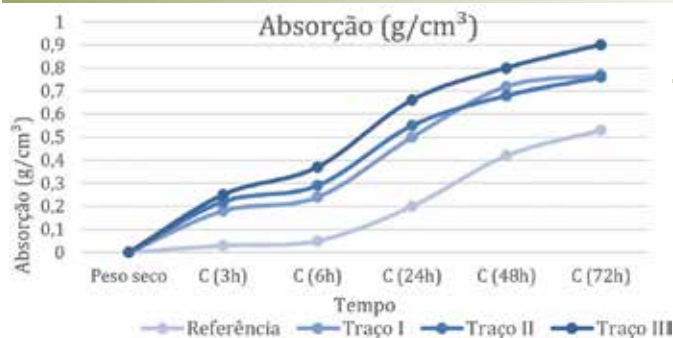


GRÁFICO 2

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE EM G/CM²

FONTE: AUTORES (2024)

- Os Traços I, II e III mostram valores de absorção superiores aos do traço de referência, o que se pode relacionar com a maior porosidade do agregado leve (argila expandida);
- O Traço III, com maior concentração da solução probiótica, foi o que apresentou maior taxa de absorção acumulada durante as 72 horas de ensaio.

Os ensaios de absorção de água por imersão são de fundamental importância para avaliar a porosidade e durabilidade do concreto. Através das Tabelas 8 e 9, é possível visualizar e analisar o desempenho dos traços em idades iniciais e ao longo prazo.

Com relação aos valores encontrados aos 28 dias (Tabela 8), nota-se que o traço de referência (REF) apresentou o menor

Dessa maneira, os resultados e dados atingidos foram coerentes, já que a substituição de 20% do agregado graúdo por argila expandida eleva o índice de vazios e a permeabilidade.

valor médio de absorção (5,29%), seguido pelos traços I, II e III.

Já, com dados obtidos aos 84 dias (Tabela 9), percebe-se que ocorreu uma redução média da absorção do traço III. Essa queda indica a continuidade da hidratação e possível densificação da matriz interna através da ação bacteriana. Ademais, o traço de referência apresentou um ótimo desempenho com relação aos demais.

2.6.3 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

TABELA 8

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO AOS 28 DIAS

Traço	Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (%)	Absorção média (%)	DP (%)	CV (%)
REF	CP 01	3583,00	3775,00	5,36	5,29	0,11	2,01
	CP 02	3607,00	3795,00	5,21			
I	CP 01	3324,00	3539,00	6,47	6,38	0,12	1,92
	CP 02	3336,00	3546,00	6,30			
II	CP 01	3311,00	3540,00	6,92	6,82	0,14	1,98
	CP 02	3316,00	3539,00	6,73			
III	CP 01	3354,00	3578,00	6,68	6,41	0,38	5,91
	CP 02	3386,00	3594,00	6,14			

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 9

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO AOS 84 DIAS

Traço	Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (%)	Absorção média (%)	DP (%)	CV (%)
REF	CP 01	3.536	3.766	6,50	6,39	0,15	2,38
	CP 02	3.562	3.775	6,00			
I	CP 01	3.274	3.495	6,75	6,67	0,11	1,65
	CP 02	3.344	3.559	6,43			
II	CP 01	3.311	3.518	6,25	7,27	1,44	19,81
	CP 02	3.316	3.577	7,87			
III	CP 01	3.38	3.498	3,49	2,91	0,82	28,18
	CP 02	3.386	3.465	2,33			

FONTE: AUTORES (2025)



FIGURA 7

CP's TRAÇO DE REFERÊNCIA PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO

FONTE: AUTORES (2024)

2.6.4 ENSAIO DE AUTOCICATRIZAÇÃO

Como mencionado anteriormente, para análise e acompanhamento da aut cicatrização, o procedimento de formação das fissuras foi realizado em dois corpos de prova por traço. A conferência da capacidade de reparo e a verificação visual da precipitação do carbonato de cálcio, foram feitas de forma visual (Figuras 7 a 10).

A análise visual da capacidade de aut cicatrização foi realizada nove dias após a pré-fissuração dos corpos de prova, período em que os ciclos de cura úmida foram aplicados. Através da verificação visual, foi possível identificar a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) no Traço II (750 ml de solução bacteriana), esta manifestação se caracteriza pela formação de massa cristalina e de coloração esbranquiçada nos planos

de fissura, indicando que a biomineralização ocorreu com maior eficácia neste traço em específico. Logo, conclui-se que o traço II apresentou a maior evidência de aut cicatrização (Figuras 11 e 12), entre os demais.

Deste modo, comprova-se que a bactéria *Bacillus subtilis* tem potencial regenerativo: a observação de precipitados cristalinos e esbranquiçados nas fissuras do traço II indica fortemente que a bactéria iniciou a



FIGURA 8

CP's TRAÇO I PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO

FONTE: AUTORES (2024)

FIGURA 9

CP's TRAÇO II PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO

FONTE: AUTORES (2024)

FIGURA 10

CP's TRAÇO III PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO

FONTE: AUTORES (2024)



FIGURA 11

CP TRAÇO II APÓS 8 DIAS COM PRECIPITAÇÃO DE CaCO_3

FONTE: AUTORES (2024)

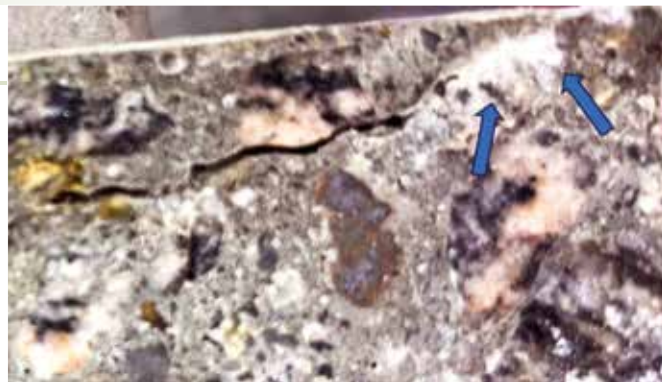


FIGURA 12

IMAGEM AMPLIADA CP TRAÇO II APÓS 8 DIAS COM PRECIPITAÇÃO DE CaCO_3

FONTE: AUTORES (2024)

ação biomineralização, precipitando carbonato de cálcio (CaCO_3). Logo, validando a premissa fundamental deste trabalho e reforçando a viabilidade do bioconcreto.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que o presente trabalho analisou o desempenho do bioconcreto com a bactéria *Bacillus subtilis* visando avaliar em caráter exploratório, propriedades de resistência, absorção de água e a autocicatrização de fissuras nos corpos de prova com e sem a solução bacteriana. O estudo obteve êxito na caracterização dos materiais e na comprovação da atividade bacteriana preliminar, validando o método de impregnação. Embora a funcionalidade bacteriana tenha sido parcialmente retar-

dada em idades iniciais devido a oscilações térmicas na estufa, a estrutura da argila expandida preservou a viabilidade dos microrganismos. Assim, ao realizar novas análises nos ensaios aos 84 dias, o traço com maior solução bacteriana apresentou resultados satisfatórios.

Os ensaios realizados, obteve-se as seguintes conclusões:

- **Resistência à compressão:** Os traços modificados com argila expandida mantiveram a resistência de projeto de 30 MPa em idades avançadas; o Traço III demonstrou um ganho de resistência significativo entre 28 e 84 dias;
- **Absorção por imersão:** Os dados obtidos aos 84 dias indicaram uma redução média na absorção do traço III;

- **Autocicatrização:** A análise visual pós-fissuração revelou depósitos compatíveis — o Traço II (750 ml de solução bacteriana) apresentou precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), manifestada por massa cristalina e esbranquiçada.

Deste modo, a observação demonstra o potencial regenerativo da *Bacillus subtilis* e valida a premissa fundamental de que ela pode induzir a autocicatrização. Logo, o trabalho reforça a viabilidade do princípio do bioconcreto, mas ressalta a necessidade de controle rigoroso na produção para garantir a uniformidade da mistura e a importância de estudos futuros com maior amostragem e técnicas de análise instrumental complementar. ☹

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Estruturas de Concreto Armado – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água Por Imersão - Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto –Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- [6] COSTA, A.; RODRIGUES, F. Desenvolvimento de concretos autocuráveis utilizando a bactéria *Bacillus Megaterium*. Revista Científica UMC. UMC Universidade. [s.l.], 2018. ISSN 2525- 5250.
- [7] JONKERS, Henk M. Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*, v. 56, n. 1-2, p. 5-16, 2011. Disponível em: <http://heronjournal.nl/56-12/1.pdf>. Acesso em: 30 de outubro de 2025.
- [8] JONKERS, H. M.; THIJSSSEN, A.; MUYZER, G.; et al. Application of bacteria as self- healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 2, p. 230-235, 2010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857409000202>. Acesso em: 01 novembro 2025.
- [9] KOGA, D. S. Bioconcreto: autocicatrização do concreto pelo processo de biomineralização. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/895>. Acesso em: 01 novembro 2025.
- [10] MELLO, G.N.A.; SANTIAGO, S.A. Avaliação da microestrutura e da resistência à compressão do concreto com incorporação de concreto do gênero *Bacillus subtilis*, *Tecnologia em Materiais e processos construtivos*, Paraná, p. 15-26, 2020. *high-performance concrete*. *Archives of Civil Engineering*, v. 69, n. 3, 2023.