

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

ARTHUR CIPRIANO BUFFO

**BIOCONCRETOS: ESTUDO DE MATÉRIAS PRIMAS E
RASTREABILIDADE DE BACTÉRIAS**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

ARTHUR CIPRIANO BUFFO

**BIOCONCRETOS: ESTUDO DE MATÉRIAS PRIMAS E
RASTREABILIDADE DE BACTÉRIAS**

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli

Coorientador: MSc. Alan Rodrigo Sorce

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Buffo, Arthur Cipriano .

BIOCONCRETOS: ESTUDO DE MATÉRIAS PRIMAS E
RASTREABILIDADE DE BACTÉRIAS / Arthur Cipriano Buffo. - Poços de
Caldas, MG, 2025.

50 f. : il. -

Orientador(a): Sylma Carvalho Carvalho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal de
Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Bioconcreto. 2. Lysinibacillus sphaericus. 3. Alginato de sódio. 4.
Concreto de pós reativos. 5. Vidro moído. I. Carvalho, Sylma Carvalho,
orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

ARTHUR CIPRIANO BUFFO


**BIOCONCRETOS: ESTUDO DE MATÉRIAS PRIMAS E
RASTREABILIDADE DE BACTÉRIAS**

A Banca examinadora abaixo-assinada, aprova o Trabalho de Conclusão apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovado em: 02 de Dezembro de 2025

Profª. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli

Instituição: UNIFAL/MG, *campus* de Poços de Caldas

Assinatura: 

Documento assinado digitalmente
SYLMA CARVALHO MAESTRELLI
Data: 09/12/2025 19:08:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra

Instituição: UNIFAL/MG, *campus* de Poços de Caldas

Assinatura:

MSc. Igor Rafael Buttignol de Oliveira

Instituição: UNIFAL/MG, *campus* de Poços de Caldas

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família, que me apoiou desde o início desse ciclo, minha mãe, meu pai e minha irmã, que me inspiram e me dão forças para seguir em frente;

À minha orientadora Sylma, pelo nível de técnico exigido e por todos os momentos de esclarecimentos e risadas;

À universidade, que demonstrou ser um lugar maravilhoso para adquirir conhecimento e conseguir uma evolução pessoal e profissional.

RESUMO

Este trabalho estudou duas vertentes aplicadas a Concretos de Pós Reativos (CPR). A primeira foi o uso de cápsulas de alginato de sódio para proteger a bactéria *Lysinibacillus sphaericus*, que pode ajudar na autocicatrização do concreto por meio da biomineralização. A segunda proposta foi avaliar a adição de pó de vidro moído, obtido de garrafas do tipo *long neck*, na substituição parcial e total da areia natural. As cápsulas de alginato foram produzidas com diferentes corantes (verde de malaquita, safranina e cúrcuma, além de água tônica), buscando facilitar a identificação da bactéria dentro do concreto (rastreadabilidade do processo de biomineralização). Os resultados indicaram resistência ao processo de mistura e ao ambiente alcalino do CPR, mostrando que o encapsulamento pode manter a bactéria protegida e que a produção das cápsulas foi bem sucedida; porém, nenhum dos corantes usados apresentou contraste suficiente para permitir a rastreadabilidade visual das cápsulas dentro do concreto. Na segunda parte, envolvendo o pó de vidro, três formulações de CPR foram preparadas, variando o percentual de substituição da areia em zero, 50 e 100% em massa. O vidro foi limpo, triturado, moído e peneirado até atingir granulometria adequada e compatível com a da areia utilizada na formulação. Os resultados mostraram que o pó de vidro pode ser incorporado ao CPR sem acarretar maiores dificuldades no processo de preparo e obtenção dos corpos de prova, desde que o material esteja bem moído e com distribuição de partículas adequada. Ainda, as propriedades físicas e mecânicas indicaram resultados muito semelhantes entre as composições (confirmados por análise estatística), mostrando que a utilização de pó de vidro oriundo de garrafas do tipo *long neck* é uma alternativa sustentável, já que esse resíduo muitas vezes não é totalmente reciclado.

Palavras-chave: Bioconcreto; *Lysinibacillus sphaericus*; Alginato de sódio; Concreto de pós reativos; Vidro moído.

ABSTRACT

This work investigated two main approaches applied to Reactive Powder Concrete (RPC). The first focused on using sodium alginate capsules to protect the bacterium *Lysinibacillus sphaericus*, which can promote self-healing through biomineralization. The second evaluated the incorporation of ground waste glass powder, obtained from long neck bottles, as a partial and total replacement for natural sand. The alginate capsules were produced with different dyes (malachite green, safranin, turmeric, and tonic water) in an attempt to improve the visual tracking of bacterial activity within the concrete. The capsules showed good resistance during mixing and to the alkaline environment of RPC, indicating that encapsulation was effective in protecting the bacteria; however, none of the dyes provided sufficient contrast to enable visual traceability in the concrete matrix. In the second part of the study, three RPC formulations were prepared with 0%, 50%, and 100% sand replacement. The glass was cleaned, crushed, milled, and sieved to achieve a particle size distribution compatible with that of natural sand. The results showed that glass powder can be incorporated into RPC without difficulty during mixing or specimen preparation, provided that it is adequately ground. Moreover, the physical and mechanical properties were similar among the formulations (confirmed by statistical analysis), indicating that glass powder from long neck bottles is a viable and sustainable alternative, especially considering the limited recyclability of this type of waste.

Keywords: Bioconcrete; *Lysinibacillus sphaericus*; Sodium Alginate; Reactive Powder Concrete; Glass Powder;

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de produção das cápsulas (a) por gotejamento e (b) filtração a vácuo. ...	33
Figura 2 – Cápsulas de alginato de sódio produzidas por gotejamento (a) antes e (b) após secagem	37
Figura 3 – Cápsulas de alginato de sódio produzidas com os corantes (a) Verde de Malaquita; (b) Cúrcuma e (c) Safranina	38
Figura 4 – Cápsulas de alginato de sódio produzidas com cúrcuma e água tônica (a) antes e (b) após secagem	39
Figura 5 – Cápsulas de alginato de sódio produzidas (a) sem e (b) com água tônica, ambas ..	39
Figura 6 – Resistência mecânica a compressão das formulações P, A e B obtidas após 7, 14 e 28 dias de cura	40
Figura 7 – Resistência mecânica a compressão das formulações P, A e B obtidas após 7, 14 e 28 dias de cura	41
Figura 8 – Absorção de água (%) das formulações investigadas após 28 dias de cura.....	42
Figura 9 – Índice de vazios (%) das formulações investigadas após 28 dias de cura	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivo geral.....	13
2.2. Objetivos específicos	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. Concretos de Pós-Reativos (CPR)	14
3.1.1. Origem e definição.....	14
3.1.2. Matérias primas dos CPR e suas funções	15
3.1.2.1 Areia	15
3.1.2.2 Pó de Quartzo	15
3.1.2.3 Microsílica	16
3.1.2.4 Cimento	16
3.1.3. Influência da distribuição do tamanho de partículas nos CPR	17
3.2. Vidros.....	18
3.2.1 Composição química básica e reciclabilidade	18
3.2.2. Vidros oriundos de garrafas tipo <i>long neck</i>	20
3.3. Biomineralização em concretos	21
3.3.1. A bactéria <i>Lysinibacillus sphaericus</i>	22
3.3.2. Rastreabilidade do processo de biomineralização pela bactéria	24
3.3.2.1. Verde de Malaquita	25
3.3.2.2. Safranina	26
3.3.2.3. Cúrcuma	27
3.3.2.4. Água tônica	28
3.3.3 Encapsulamento com alginato de sódio.....	30
4 MATERIAIS E METODOLOGIA	32
4.1 Etapa A.....	32
4.1.1 Produção de cápsulas de alginato de sódio.....	32

4.1.2 Encapsulamento da bactéria <i>Lysinibacillus sphaericus</i>	33
4.1.3 Estudo da rastreabilidade das bactérias no CPR.....	33
4.2 Etapa B.....	34
4.2.1 Preparo das matérias primas envolvidas na produção de diferentes formulações de CPR.....	34
4.2.2 Preparação dos corpos de prova de CPR em três formulações distintas, e subsequente avaliação física e mecânica.....	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
5.1 ETAPA A.....	37
5.2 ETAPA B.....	40
6 CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo por ser resistente mecanicamente à compressão, durável e relativamente barato. Porém, como qualquer material, ele está sujeito a falhas com o passar do tempo. Uma das falhas mais comuns são as fissuras que surgem por diferentes motivos, decorrentes de sobrecarga ou processos naturais de retração. Essas fissuras, mesmo sendo pequenas, podem facilitar a entrada de água e agentes agressivos, o que acelera a degradação do concreto e das armaduras presentes na estrutura, como no caso do concreto armado. Com o tempo, isso compromete a segurança, aumenta os custos de manutenção e reduz a vida útil das construções.

Pensando em soluções mais eficientes e sustentáveis, surgiu o bioconcreto, um tipo de concreto que tem a capacidade de "se auto cicatrizar" quando fissuras aparecem. Isso é possível por meio de um processo chamado biomineralização, que utiliza microrganismos capazes de produzir compostos minerais dentro do concreto que atuam no fechamento das fissuras. Dentre esses compostos minerais, destaca-se o carbonato de cálcio (CaCO_3), que consegue preencher as fissuras, selando/vedando o caminho para a entrada de agentes externos, contribuindo para a recuperação parcial da estrutura e aumento da durabilidade (Khaudiyal *et al.*, 2022; Lima, 2021).

Entre os microrganismos estudados para esse tipo de aplicação, a bactéria *Lysinibacillus sphaericus* tem se mostrado uma das mais promissoras. Essa bactéria é capaz de sobreviver em ambientes com pH altamente alcalino, como é o caso do concreto, e de produzir o carbonato de cálcio de forma eficiente, desde que tenha acesso a nutrientes e à umidade. No entanto, um dos maiores desafios enfrentados por pesquisadores nessa área é acompanhar a atividade da bactéria no interior do concreto, devido à dificuldade de acesso. Saber se a bactéria continua viva, se ainda está produzindo o carbonato e se está agindo de forma eficiente é essencial para entender o comportamento do bioconcreto e validar seus resultados (Khaudiyal *et al.*, 2022; Lima, 2021).

Para enfrentar esse desafio, esta pesquisa propõe uma abordagem singular: a utilização de substâncias atóxicas e de baixo custo como marcadores biológicos, que possam indicar visualmente onde e quando a bactéria está ativa. Entre as alternativas estudadas, foram

escolhidas a Safranina, o verde de malaquita, a cúrcuma e a água tônica por apresentarem compostos com características químicas especiais, a serem abordados em tópico específico deste trabalho.

A cúrcuma é uma especiaria de origem vegetal bastante conhecida na culinária e na medicina tradicional. Seu principal composto ativo é a curcumina, que possui propriedades sensíveis ao pH e à presença de outras substâncias químicas. Em ambientes alcalinos, como o concreto, ou na presença de certas atividades biológicas, a curcumina pode mudar de cor, o que ajuda a identificar possíveis reações causadas pela bactéria.

Já a água tônica, bebida popularmente conhecida por seu sabor amargo, contém uma substância chamada quinina, a qual possui uma característica interessante: brilha sob luz ultravioleta (UV). Desse modo, a água tônica pode ser usada para ajudar na visualização de regiões porosas, úmidas ou biologicamente ativas dentro do concreto. Essa fluorescência pode indicar locais onde a bactéria está agindo, produzindo compostos ou alterando a composição química da matriz do concreto.

A ideia central desta pesquisa é avaliar se essas substâncias podem servir como ferramentas visuais para rastrear a atividade da bactéria *Lysinibacillus sphaericus* dentro do concreto, de forma simples, eficiente e sem a necessidade de equipamentos caros ou técnicas laboratoriais complexas. Busca-se com isso, a aplicação desses materiais em estudos futuros para monitorar o desempenho do bioconcreto em diferentes situações, inclusive em campo.

Buscou-se ainda nesta pesquisa investigar o potencial de utilização de pó de vidro oriundo de garrafas do tipo *long neck* em formulações de concretos de pós reativos (CPR), visando a substituição da areia natural normalmente utilizada na formulação de concretos e afins. A areia é um recurso natural não renovável e vêm sendo utilizada em quantidade elevada, principalmente no setor de construção; sua formação por processo erosivo é lenta, o que faz com que a extração e consumo sejam muito maiores do que sua disponibilidade. Por outro lado, garrafas do tipo *long neck*, apesar de compostas por vidro, não são recicláveis na prática, o que torna especialmente atraente sua utilização como substituto da areia.

Além disso, a substituição da areia por pó de vidro dessas garrafas pode trazer benefícios técnicos ao concreto, como melhor empacotamento de partículas e até mesmo ganhos em resistência mecânica e durabilidade, dependendo da granulometria do pó e das proporções utilizadas. No entanto, é necessário analisar cuidadosamente os efeitos dessa substituição sobre as propriedades do CPR, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, considerando aspectos como trabalhabilidade, tempo de pega, resistência à compressão e possíveis reações indesejadas, como a reação álcali-sílica.

Dessa forma, este trabalho integra dois eixos complementares: o estudo da rastreabilidade da bactéria *Lysinibacillus sphaericus* encapsulada em alginato de sódio, por meio de diferentes marcadores visuais; e a avaliação da viabilidade técnica do uso de pó de vidro de garrafas *long neck* em substituição à areia natural em concretos de pós reativos. Ao articular biotecnologia, sustentabilidade e desempenho de materiais cimentícios de alto desempenho, a pesquisa busca contribuir para o desenvolvimento de materiais inteligentes mais duráveis e ambientalmente responsáveis, bem como para a disseminação de métodos de monitoramento mais acessíveis em estudos de bioconcretos.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica e ambiental do uso de bioconcretos de pós reativos (CPR) que integrem a bactéria *Lysinibacillus sphaericus* encapsulada em alginato de sódio, associada a marcadores visuais, e a substituição parcial e total da areia natural por pó de vidro oriundo de garrafas do tipo long neck.

2.2. Objetivos específicos

Para atingir os objetivos desta pesquisa, é necessário:

- Produzir cápsulas de alginato de sódio e investigar o uso da bactéria *Lysinibacillus sphaericus*, encapsulada no material;
- Investigar o efeito da adição de diferentes corantes/agentes (verde de malaquita, safranina, cúrcuma e água tônica) na obtenção das cápsulas de alginato e avaliar o potencial de rastreamento da atividade bacteriana no interior do concreto;
- Adequar a granulometria do pó de vidro oriundo das garrafas do tipo *long neck* para inserção nas formulações a serem investigadas;
- Produzir uma formulação padrão de CPR (contendo areia, microssílica, cimento e pó de quartzo) e duas variações, substituindo-se parcialmente (50% em massa) e totalmente (100% em massa) a areia natural por pó de vidro moído na formulação padrão.
- Verificar o comportamento dos CPR no estado endurecido, com foco nas propriedades físicas (índice de vazios, absorção de água) e mecânicas (resistência à compressão e flexão a três pontos), observando possíveis impactos positivos ou negativos causados pela substituições em relação à formulação padrão.

Ao integrar esses dois focos (a rastreabilidade da bactéria e o reaproveitamento do pó de vidro), espera-se gerar subsídios para o desenvolvimento de concretos de pós-reativos mais sustentáveis e duráveis, com potencial de redução de custos de manutenção em estruturas de concreto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Concretos de Pós-Reativos (CPR)

3.1.1. Origem e definição

Os concretos de pós reativos (CPR), representam uma classe de concretos de ultra alto desempenho, desenvolvidos com o objetivo de superar as limitações do concreto convencional. Sua principal característica é a ausência de agregados graúdos, sendo compostos exclusivamente por materiais finos e altamente reativos, como cimento Portland, sílica ativa, pó de quartzo, e areia de granulometria controlada, aditivos superplastificante e água. Essa formulação resulta em um material com microestrutura extremamente compacta, apresentando alta resistência mecânica, baixa permeabilidade e elevada durabilidade, mesmo em ambientes agressivos (Alkhaly *et al.*, 2021).

O CPR começou a ser desenvolvido na França, nos anos 1990, em iniciativas de P&D voltadas a atender exigências estruturais mais altas: maior vida útil, seções mais esbeltas e melhor desempenho frente a agentes agressivos. O controle fino da curva granulométrica e o uso de adições minerais reativas reduziram defeitos internos comuns em concretos tradicionais, elevando tanto o desempenho mecânico quanto a durabilidade (Biz, 2001; Mayhoub *et al.*, 2021).

Do ponto de vista da formulação, três ideias sustentam o CPR. A primeira é a granulometria otimizada, em que partículas menores ocupam os vazios deixados pelas maiores, aumentando a compacidade. A segunda é a reatividade elevada da matriz: a sílica ativa reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) liberado na hidratação do cimento e forma mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o gel que efetivamente dá resistência ao concreto. A terceira é a baixa relação água/aglomerante, viabilizada por superplastificantes, que reduz os poros, capilares e melhora tanto a resistência quanto a durabilidade. Em algumas composições, a adição de fibras (aço, PVA, basalto) aumenta a tenacidade e ajuda a controlar fissuras, garantindo melhor desempenho pós-fissuração (Alkhaly *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021).

O resultado típico é um material com altas resistências à compressão, permeabilidade muito reduzida e bom comportamento frente a cloretos, sulfatos e ciclos térmicos ou úmido-seco. Como contrapartida, trata-se de um concreto mais sensível à dosagem e à umidade dos materiais, que requer controle tecnológico rigoroso e, em geral, apresenta custo inicial maior, normalmente compensado por vida útil prolongada e menor necessidade de manutenção (Biz, 2001; Mayhoub *et al.*, 2021).

Embora o CPR tenha surgido com foco em ganhos físico-mecânicos, o avanço do bioconcreto e a incorporação de microrganismos com capacidade de autocicatrização por biomineralização abriu uma frente complementar. Desde meados dos anos 2000, estudos têm mostrado que algumas bactérias conseguem precipitar carbonato de cálcio (CaCO_3) e selar microfissuras. A combinação entre a matriz densa do CPR e mecanismos biológicos de autorreparo aponta para estruturas mais resilientes e sustentáveis, com menor demanda de intervenções ao longo do ciclo de vida (Alkhaly *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021).

3.1.2. Matérias primas dos CPR e suas funções

3.1.2.1 Areia

A areia é composta majoritariamente por dióxido de silício e apresenta comportamento relativamente inerte durante a hidratação do cimento. Entretanto, exerce influência física significativa na distribuição dos produtos de hidratação e na configuração final da microestrutura. (Sua presença auxilia na distribuição uniforme da água, favorecendo uma hidratação mais completa e resultando em uma matriz mais densa e homogênea (Vanderlei, 2004; Biz, 2001).

A areia influencia diretamente na formação da microestrutura, nas propriedades mecânicas e na trabalhabilidade do material. Constituída por partículas de quartzo (SiO_2), suas dimensões variam, sendo determinantes para o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto (Chen *et al.*, 2021; Marvila *et al.*, 2021).

A seleção adequada da granulometria da areia, traz como consequência um melhor empacotamento das partículas, permitindo que ela preencha adequadamente os vazios entre o cimento e os agregados mais finos, promovendo maior compacidade e reduzindo a porosidade do concreto. Como consequência, observam-se melhorias significativas nas propriedades mecânicas e na durabilidade do material (Marilyn *et al.*, 2021; Biz, 2001). Além disso, a areia também melhora a estabilidade e a coesão da mistura, evitando segregação e exsudação, o que resulta em uma composição homogênea e fortalece a matriz cimentícia, permitindo maior resistência à compressão (Petrucci, 1995).

3.1.2.2 Pó de Quartzo

O pó de quartzo é composto principalmente por dióxido de silício (SiO_2) e é obtido pela moagem fina de cristais de quartzo (Vanderlei, 2004). Sua principal função nos CPR é o

preenchimento de pequenos vazios na matriz cimentícia, promovendo uma estrutura mais compacta.

Quando combinado à sílica ativa, o pó de quartzo contribui para a redução da permeabilidade e aumento da durabilidade, protegendo o concreto contra agentes agressivos (Milla et al., 2021; Biz, 2001). Outro benefício importante está na interação com superplastificantes, que permitem ajustes na fluidez e trabalhabilidade sem comprometer as propriedades mecânicas (Hou et al., 2023).

3.1.2.3 Microssílica

A microssílica ou sílica ativa é um subproduto da fabricação de silício metálico ou de ligas ferro-silício em fornos de arco elétrico. Durante esse processo, vapores ricos em SiO_2 são liberados e rapidamente condensados, originando partículas ultrafinas e amorfas (Maslennikov et al., 2017).

A adição de microssílica nos CPR favorece um maior empacotamento da matriz ao preencher os vazios entre partículas de cimento e agregados finos, o que reflete na melhoria das propriedades mecânicas e a durabilidade. Suas partículas, com diâmetros entre 0,1 e 1 μm favorecem o aumento na viscosidade e coesão da mistura, reduzindo a segregação e a exsudação (Chen et al., 2021; Fan, 2023).

Combinada em proporções adequadas com as demais matérias primas constituintes dos CPR, a microssílica promove a geração de uma microestrutura mais homogênea e resistente à penetração de agentes agressivos, como sulfatos e cloretos, aumentando significativamente a sua durabilidade (Milla et al., 2021).

3.1.2.4 Cimento

O cimento Portland utilizado nos CPR é composto principalmente por silicatos de cálcio finamente moídos, que contribuem para a maior reatividade do pó e para a resistência mecânica final. O cimento é o principal constituinte dos CPR pois atua tanto do ponto de vista físico, como elemento de empacotamento de partículas, como químico, por meio das reações de hidratação, as quais contribuem para formar uma matriz densa e de baixa porosidade, resistente à penetração de agentes agressivos (Mehta; Monteiro, 2008; Neville, 2001).

Diferentes fases (ou produtos de hidratação) vão sendo formados com a evolução do tempo, a partir da mistura das matérias primas descritas anteriormente e o cimento. Durante a hidratação, os compostos silicato tricálcico ou Alita (C_3S) e o silicato bicálcico ou Belita (C_2S)

C_3S e C_2S reagem com a água, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal responsável pela resistência mecânica. O C_3S confere resistência inicial, enquanto o C_2S contribui para a resistência a longo prazo. Outros compostos, como o aluminato tricálcico (C_3A) C_3A , participam da pega inicial, controlada pela adição de gesso, e o ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) C_4AF auxilia na trabalhabilidade da pasta (Mehta; Monteiro, 2008).

Uma formulação composta por areia, pó de quartzo, microssílica e cimento, e ajustada a partir de parâmetros como distribuição granulométrica contínua, composição química dos constituintes e proporções entre fase sólida e fase líquida (água e aditivos plastificantes), é capaz de promover melhorias substanciais no desempenho dos concretos de pós reativos (CPR). Quando esses parâmetros são otimizados, obtém-se uma matriz com elevado grau de compactação, menor volume de vazios e cinética de hidratação favorecida, resultando em propriedades físico-mecânicas superiores tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, além de maior resistência às intempéries e prolongada durabilidade do material.

3.1.3. Influência da distribuição do tamanho de partículas nos CPR

A distribuição do tamanho das partículas utilizadas em uma mistura de CPR tem um papel fundamental no desempenho do material. Quando essa distribuição é equilibrada, ocorre um melhor empacotamento das partículas, o que reduz os vazios entre elas e favorece a compactação. Isso melhora não só a resistência mecânica, mas também a durabilidade e a impermeabilidade do concreto.

Por outro lado, uma distribuição desequilibrada pode comprometer as propriedades da mistura. Se houver excesso de partículas grandes, pode sobrar espaço entre os grãos, exigindo mais pasta para preenchimento. Já o uso excessivo de partículas muito finas pode aumentar a demanda de água e comprometer a trabalhabilidade. Esse tipo de desequilíbrio pode causar uma rigidez excessiva ou mesmo reduzir a resistência do concreto final, tornando-o inadequado para aplicações estruturais (Biz, 2001).

Neste trabalho, que propõe a substituição parcial e total da areia natural por pó de vidro moído, a granulometria dos materiais se torna ainda mais importante. Para que o desempenho do CPR não seja prejudicado, é necessário que o pó de vidro tenha uma distribuição de tamanhos de partículas semelhante à da areia substituída (Oliveira et al., 2022). Caso contrário, o empacotamento da mistura pode ser afetado, o que impactaria diretamente a resistência e o comportamento mecânico do elemento estrutural. Além disso, o CPR é conhecido por usar materiais de alta finura, como cimento Portland, pó de quartzo, sílica ativa e, em alguns casos,

metacaulim. Esses materiais são extremamente finos e reativos, sendo essenciais para o desenvolvimento das reações de hidratação e pozolânicas que ocorrem durante a cura. A sílica ativa, por exemplo, é composta por partículas extremamente pequenas, que ajudam a preencher os espaços entre os grãos maiores, ao mesmo tempo em que aumentam a formação do gel de C-S-H (silicato de cálcio hidratado), responsável pela resistência do concreto.

A presença do pó de vidro, dependendo da sua finura, também pode ter efeito pozolânico, contribuindo para a formação de produtos secundários de hidratação. No entanto, para que isso ocorra de maneira eficiente, é preciso que o vidro esteja suficientemente fino e bem distribuído na matriz cimentícia (Oliveira et al., 2022). Estudos como o de Muhedin et al. (2023) mostraram que a substituição da areia por vidro moído pode melhorar a resistência do concreto quando o vidro apresenta partículas menores e bem dispersas na mistura. Isso reforça a importância de analisar cuidadosamente a granulometria antes de aplicar o material.

Tayeh et al. (2022) destacam que uma distribuição bem equilibrada de tamanhos de partículas ajuda a alcançar um empacotamento mais eficiente, reduz a porosidade do concreto e melhora a resistência mecânica. Esses autores também indicam que, para materiais alternativos como o vidro reciclado, ajustes finos na composição são necessários para evitar perdas de desempenho. Outra referência importante é o estudo de Tong et al. (2024), que demonstrou que partículas de vidro com granulometria inferior a 100 μm , quando bem distribuídas, melhoram não só a resistência à compressão, mas também a durabilidade do concreto, reduzindo a absorção de água. Isso ocorre devido à maior reatividade e à melhor compactação obtida com partículas mais finas.

Dessa forma, fica evidente que a granulometria dos materiais utilizados em CPR - especialmente em substituições como a proposta neste trabalho - precisa ser cuidadosamente analisada. Mais do que simplesmente trocar um agregado por outro, é necessário garantir que a nova composição mantenha o equilíbrio entre partículas finas e grossas, promovendo o empacotamento ideal. Isso é essencial para garantir um concreto com boa resistência, durabilidade e desempenho geral.

3.2. Vidros

3.2.1 Composição química básica e reciclabilidade

O vidro é um material amplamente utilizado em diferentes setores da sociedade, estando presente em embalagens, janelas, utensílios domésticos e diversos outros produtos. Um dos tipos mais comuns é o vidro soda-cálcico, empregado principalmente na fabricação de

embalagens e recipientes. Sua composição básica envolve sílica (SiO_2), óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO). Em menor proporção, também podem estar presentes óxidos como o de alumínio (Al_2O_3) e outros aditivos, a depender da aplicação desejada.

A sílica é o principal formador de rede do vidro, responsável por criar sua estrutura tridimensional rígida. No entanto, seu ponto de fusão elevado dificulta a produção industrial, sendo necessária a adição de óxidos modificadores, como o óxido de sódio, que reduz a temperatura de fusão. O Na_2O , por outro lado, também torna o vidro mais solúvel em água, o que exige a introdução do óxido de cálcio para garantir maior estabilidade e resistência química. Pequenas quantidades de Al_2O_3 também são adicionadas para aumentar a durabilidade e a resistência térmica do material (Ali, Qureshi e Jameel, 2020).

Além desses óxidos, o vidro pode conter corantes metálicos, como óxidos de ferro, cobalto ou manganês, que conferem coloração ao produto final. Essas cores não servem apenas para fins estéticos, mas também para proteger o conteúdo da embalagem da radiação luminosa, como ocorre, por exemplo, com garrafas âmbar ou verdes utilizadas para armazenar bebidas sensíveis à luz.

Uma das maiores vantagens ambientais do vidro é sua alta reciclabilidade. Diferente de outros materiais, o vidro pode ser reciclado várias vezes sem perda significativa de suas propriedades. O processo de reciclagem envolve a coleta do resíduo, separação por tipo e cor, limpeza e trituração, gerando o chamado caco de vidro. Esse material pode ser fundido novamente com menor consumo energético, já que o caco possui maior reatividade e funde a temperaturas mais baixas que os materiais virgens (Oliveira et al., 2022).

Além da economia de energia, a reciclagem do vidro contribui para a redução na extração de matérias primas como areia e calcário, e diminui a emissão de gases poluentes durante a fabricação. No entanto, esse processo ainda enfrenta alguns desafios, como a coleta seletiva inadequada, a contaminação com outros resíduos e a necessidade de separação por cor. Quando mal gerenciado, o vidro acaba sendo descartado de maneira incorreta, acumulando-se em aterros ou no meio ambiente, onde pode permanecer por centenas de anos devido à sua natureza não biodegradável.

Nos últimos anos, tem crescido o interesse pelo uso do vidro reciclado moído em novas aplicações, como na construção civil (Oliveira et al., 2022). Uma alternativa promissora é o uso do pó de vidro como substituição parcial da areia em concretos, especialmente em composições mais técnicas como o Concreto de Pós Reativos (CPR). De acordo com Ali, Qureshi e Jameel (2020), a adição de vidro moído como substituto do agregado miúdo pode melhorar

propriedades como densidade da mistura, desempenho mecânico e durabilidade, desde que sejam respeitadas as condições de granulometria e proporção adequadas.

Essa abordagem mostra como o vidro, mesmo após sua vida útil em embalagens, pode continuar sendo uma matéria-prima valiosa em diferentes setores, especialmente quando incorporado de maneira responsável em soluções sustentáveis como o CPR.

3.2.2. Vidros oriundos de garrafas tipo *long neck*

Os vidros utilizados na fabricação de garrafas do tipo *Long Neck* apresentam características físicas e industriais que dificultam sua reciclabilidade total. Apesar de o vidro, em geral, ser considerado um material 100% reciclável, a reutilização específica desse tipo de garrafa é limitada por fatores relacionados à geometria do recipiente e aos padrões de segurança exigidos na indústria de bebidas (Oliveira et al., 2022).

Por se tratar de um produto destinado ao consumo humano, as garrafas *Long Neck* precisam atender a altos requisitos de resistência mecânica, pureza e integridade estrutural. Qualquer falha no vidro, como microfissuras ou inclusões de materiais estranhos, pode comprometer a segurança do produto final, resultando em riscos de contaminação, rompimento durante o envase ou transporte e até acidentes durante o consumo.

Durante o processo de reciclagem, o vidro precisa passar por uma etapa de triagem minuciosa, na qual são removidas impurezas, contaminantes e fragmentos de diferentes tipos de vidro. Esse processo é custoso, demorado e exige tecnologia especializada, o que, na prática, torna economicamente inviável o uso de vidro reciclado para a produção de novas garrafas *Long Neck*. A indústria, por isso, costuma preferir o uso de vidro virgem, garantindo maior controle sobre a composição química e as propriedades mecânicas do material.

Dessa forma, a maior parte das garrafas *Long Neck* descartadas não retorna ao ciclo fechado de produção como ocorre, por exemplo, com garrafas retornáveis ou de outros formatos reutilizáveis. Quando recicladas, elas são geralmente direcionadas para a fabricação de outros produtos de menor exigência técnica, como frascos, garrafas de bebidas não alcoólicas, objetos decorativos ou até materiais de construção. No entanto, essa reciclagem parcial não é suficiente para absorver todo o volume descartado, o que contribui significativamente para o aumento de resíduos sólidos (Oliveira et al., 2022).

Esse cenário é particularmente preocupante no Brasil, onde as garrafas *Long Neck* estão entre as mais consumidas. A elevada demanda, somada à baixa taxa de reaproveitamento integral do vidro utilizado, gera um impacto ambiental considerável, especialmente quando o

descarte é feito de forma inadequada. O acúmulo de vidro em aterros ou no ambiente natural representa um problema duradouro, já que esse material possui alta durabilidade e baixa biodegradabilidade (Oliveira et al., 2022).

Portanto, a dificuldade de reintegrar o vidro *Long Neck* ao seu ciclo original de uso aponta para a necessidade de buscar novos destinos para esse resíduo, especialmente em aplicações que aproveitem suas propriedades físico-químicas, como a incorporação em materiais cimentícios. Essa abordagem não só auxilia na redução do impacto ambiental, como também promove a valorização de resíduos industriais dentro de propostas mais sustentáveis na construção civil.

3.3. Biomineralização em concretos

A biomineralização é um processo natural em que organismos vivos são capazes de formar minerais como parte de seu metabolismo. Esse fenômeno, que ocorre amplamente na natureza, tem sido adaptado para diversas áreas da engenharia, incluindo o desenvolvimento de concretos com capacidade de autocicatrização. No contexto da construção civil, a biomineralização microbiana vem sendo estudada como uma alternativa promissora para o aumento da durabilidade das estruturas, atuando diretamente na reparação de fissuras por meio da formação de cristais minerais, em especial o carbonato de cálcio (CaCO_3) (Shivanshi *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2015).

A proposta consiste em incorporar bactérias vivas ao concreto, de forma que, ao surgirem microfissuras, essas bactérias sejam ativadas e iniciem um processo metabólico capaz de preencher as fissuras com depósitos minerais. Essa tecnologia contribui não só para a restauração parcial da integridade estrutural do material, mas também para a redução da permeabilidade e prolongamento da vida útil da estrutura. Ao evitar intervenções de manutenção, o bioconcreto surge ainda como uma alternativa ambientalmente mais viável e economicamente atrativa (Shivanshi *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2015)

Os microrganismos utilizados nesse tipo de aplicação são escolhidos por sua capacidade de sobreviver em ambientes alcalinos e por produzirem metabólitos que favorecem a precipitação mineral. Existem diferentes rotas bioquímicas envolvidas no processo de biomineralização, dependendo da espécie bacteriana e das condições do meio. Entre os mecanismos mais estudados estão a hidrólise da ureia por enzimas como a urease, a desaminação de aminoácidos, a oxidação de compostos inorgânicos como enxofre e ferro, além de processos de respiração anaeróbica com redução de nitrato ou sulfato. Cada uma dessas rotas

leva à elevação do pH local, criando um ambiente propício para a nucleação e formação de carbonato de cálcio (Ahmad et al., 2025; Zhang *et al*, 2021).

Diversas espécies bacterianas já foram testadas com sucesso em estudos sobre bioconcretos. A *Sporosarcina pasteurii*, por exemplo, é uma das mais conhecidas, sendo muito eficiente na hidrólise da ureia. Já a *Bacillus sphaericus* e a *Lysinibacillus sphaericus* apresentam bom desempenho na desaminação de aminoácidos e se destacam por sua resistência a ambientes altamente alcalinos, como o interior do concreto. Outras espécies, como *Shewanella oneidensis*, atuam em processos de redução de ferro e são mais indicadas para ambientes anaeróbicos. A escolha da bactéria ideal depende diretamente da aplicação desejada, do tipo de concreto e das condições ambientais do local onde a estrutura será utilizada (Souradeep e Kua, 2016).

Apesar do potencial da biomineralização, um dos principais desafios é garantir a sobrevivência e a atividade das bactérias no interior do concreto, que é um ambiente agressivo, com pH elevado, alta pressão interna e baixa disponibilidade de nutrientes e água. Por esse motivo, muitos estudos têm adotado o uso de técnicas de encapsulamento, que consistem na proteção das bactérias dentro de cápsulas de materiais biocompatíveis. Essas cápsulas funcionam como uma espécie de "abrigo temporário", mantendo as bactérias inativas até que condições mais favoráveis - como a entrada de umidade por uma fissura - permitam sua reativação (Ahmad et al., 2025; Zang *et al*, 2021; Souradeep e Kua, 2016).

Neste trabalho, foi utilizada a técnica de encapsulamento com alginato de sódio, um polímero natural derivado de algas, que tem se mostrado eficaz para imobilizar células bacterianas e proteger sua viabilidade. O encapsulamento permite que as bactérias sejam incorporadas diretamente à matriz cimentícia sem comprometer sua funcionalidade, ao mesmo tempo em que garante que sua atividade se inicie apenas quando realmente for necessária. Estudos recentes, como os de Aytekin (2023), apontam o alginato como uma das melhores opções para esse tipo de aplicação, especialmente pela sua compatibilidade com o concreto e pela facilidade de manipulação.

3.3.1. A bactéria *Lysinibacillus sphaericus*

A bactéria *Lysinibacillus sphaericus* é uma espécie amplamente estudada por sua capacidade de sobreviver em ambientes extremos e por apresentar potencial biotecnológico em diversas áreas, incluindo o tratamento de efluentes, a biorremediação de metais pesados e, mais recentemente, a produção de bioconcretos. Trata-se de uma bactéria gram-positiva, aeróbica, formadora de esporos e naturalmente resistente a condições ambientais severas, o que a torna

especialmente adequada para aplicações em materiais cimentícios, como o concreto, que apresenta pH elevado, alta alcalinidade e baixa disponibilidade de nutrientes (Mokhtar *et al.* 2021).

Um dos fatores que tornam a *Lysinibacillus sphaericus* interessante para o uso em bioconcretos é sua capacidade de biomineralização, isto é, a habilidade de precipitar minerais, principalmente carbonato de cálcio (CaCO_3), a partir de reações metabólicas. Essa precipitação ocorre como resultado da atividade metabólica bacteriana, que gera íons carbonato (CO_3^{2-}) capazes de reagir com íons cálcio (Ca^{2+}) presentes na matriz do concreto, formando cristais que selam fissuras e reduzem a permeabilidade do material. Esse processo confere ao concreto a capacidade de autocicatrização, uma das propriedades mais desejadas em sistemas cimentícios sustentáveis (Wu *et al.*, 2012; Mokhtar *et al.* 2021).

Diferente de outras bactérias também empregadas nesse tipo de aplicação, como a *Sporosarcina pasteurii*, cuja biomineralização ocorre pela hidrólise da ureia, a *Lysinibacillus sphaericus* atua principalmente pela desaminação de aminoácidos. Essa via metabólica libera amônia (NH_3), o que eleva o pH local e cria um ambiente favorável para a nucleação e o crescimento de cristais de CaCO_3 . Essa característica é vantajosa porque dispensa o uso de ureia, um composto que pode gerar subprodutos indesejáveis, como o amônio (NH_4^+), que, em excesso, pode prejudicar o desempenho do concreto e o meio ambiente (Mokhtar *et al.* 2021).

Outro aspecto importante é a capacidade desta bactéria de formar esporos, uma forma de resistência que permite sua sobrevivência por longos períodos de inatividade. No interior do concreto, onde as condições são muito agressivas - com alta alcalinidade, pouca água e calor liberado pela hidratação do cimento -, esses esporos permanecem inativos até que uma fissura se forme e a umidade penetre na matriz. Nesse momento, a bactéria é reativada e inicia o processo de biomineralização, produzindo cristais de carbonato de cálcio que preenchem as fissuras e restauram parcialmente a integridade do material (Souradeep e Kua, 2016; Wu *et al.*, 2012).

Além da resistência e da eficiência no processo de precipitação mineral, a *Lysinibacillus sphaericus* também se destaca por sua compatibilidade com técnicas de encapsulamento, como o uso de alginato de sódio. Essa técnica protege as bactérias durante a mistura do concreto e permite que elas sejam liberadas apenas quando as condições adequadas de umidade e fissuração estão presentes. Isso aumenta significativamente a taxa de sobrevivência e a eficácia do processo de autocicatrização, garantindo resultados mais consistentes (Mokhtar *et al.* 2021; Souradeep e Kua, 2016).

Pesquisas recentes apontam que a *Lysinibacillus sphaericus* tem desempenho promissor em concretos com baixa relação água/cimento e presença de adições minerais, como sílica ativa e metacaulim. Nessas condições, a bactéria não apenas sobrevive, mas também mantém sua capacidade de precipitar CaCO_3 e contribuir para o fechamento de microfissuras. Essa combinação entre microestrutura densa do CPR e atividade biológica da bactéria reforça o potencial dessa espécie como uma das mais adequadas para o desenvolvimento de bioconcretos de alto desempenho (Mokhtar *et al.* 2021).

Em síntese, a *Lysinibacillus sphaericus* é uma bactéria altamente adaptável e eficiente para aplicações em autocicatrização de concretos, unindo resistência ambiental, capacidade de formação de esporos, atividade biomineralizadora e compatibilidade com materiais cimentícios. Por essas razões, vem sendo amplamente estudada e utilizada em pesquisas que buscam aprimorar o desempenho e a sustentabilidade de concretos modernos.

3.3.2. Rastreabilidade do processo de biomineralização pela bactéria

Fazer o rastreamento da atividade bacteriana no interior do concreto é um dos maiores desafios para a consolidação do bioconcreto como tecnologia confiável. Esse tipo de análise busca compreender como, onde e em que momento a bactéria atua dentro da matriz cimentícia, verificando se ela sobrevive após a mistura, se permanece viável durante o tempo de cura e, principalmente, se é capaz de se reativar quando ocorre uma fissura. No entanto, acompanhar esse processo de forma direta é extremamente difícil, já que o ambiente interno do concreto é opaco, alcalino, denso e de difícil acesso, o que limita a aplicação de métodos de observação convencionais (Jonkers e Schlangen, 2008; Seifan, Samani e Berenjian, 2016).

Atualmente, os estudos sobre rastreabilidade bacteriana em bioconcretos ainda são limitados e geralmente dependem de métodos laboratoriais complexos, como microscopia eletrônica de varredura (MEV), análises de difração de raios X (DRX), espectroscopia de infravermelho (FTIR) e ensaios de fluorescência de raios X (FRX). Essas técnicas permitem observar a formação de cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3) e, de forma indireta, confirmar que houve atividade microbiana e biomineralização. No entanto, elas são métodos caros, demorados e de difícil aplicação em campo, o que torna a rastreabilidade em tempo real quase inviável (Wang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2021).

Dado o contexto, pesquisadores têm buscado métodos alternativos e mais acessíveis para rastrear a atividade bacteriana dentro do concreto. Uma das propostas recentes é o uso de corantes ou marcadores biológicos naturais, que mudam de cor ou fluorescência conforme

ocorre atividade metabólica. Nesse contexto, substâncias como a curcumina (pigmento natural presente na cúrcuma) e até soluções simples como a água tônica, que contém quinina, têm sido estudadas como possíveis indicadores visuais. Esses compostos permitem observar alterações de cor ou luminescência que indicam a presença e o metabolismo bacteriano, tornando o processo de rastreamento mais simples, rápido e econômico (Ghosh, 2024; Mors e Jonkers, 2017).

No caso da curcumina, além de sua cor intensa e estabilidade, ela apresenta afinidade por compostos minerais, o que pode favorecer sua interação com os produtos da biomineralização, especialmente o carbonato de cálcio. Isso abre a possibilidade de utilizar a curcumina como marcador visual do processo de autocicatrização, auxiliando na identificação das regiões onde as bactérias estão ativas dentro da matriz cimentícia. A utilização desses indicadores não substitui completamente as análises laboratoriais mais sofisticadas, mas representa um importante avanço na tentativa de visualizar e comprovar a eficiência da biomineralização de forma prática e acessível (Ghosh, 2024).

Além disso, há estudos que combinam métodos visuais com análises químicas, buscando rastrear metabólitos produzidos pelas bactérias, como amônia, dióxido de carbono e íons carbonato, que servem como marcadores indiretos da atividade biológica. Essas abordagens ainda estão em fase experimental, mas indicam um caminho promissor para compreender melhor o comportamento das bactérias encapsuladas em meios cimentícios (Seifan, Samani e Berenjian, 2016; Zhang et al., 2021).

De modo geral, a rastreabilidade do processo de biomineralização continua sendo uma etapa complexa e desafiadora, mas também essencial para o avanço do bioconcreto. Entender com precisão quando e como as bactérias atuam é o que permitirá aprimorar as técnicas de encapsulamento, ajustar as condições de ativação e garantir que o processo de autocicatrização ocorra de maneira eficiente e previsível nas aplicações práticas (Jonkers et al., 2010; Wang et al., 2012).

3.3.2.1. Verde de Malaquita

O Verde de Malaquita é um corante sintético da classe dos trifenilmetanos, muito utilizado em microbiologia devido à sua coloração intensa e à capacidade de se ligar a componentes celulares (Arya e Sharma, 2021). Além de atuar como marcador, o composto é conhecido por seu efeito antimicrobiano, sendo empregado em meios seletivos e como agente antifúngico e antibacteriano em laboratórios (Culp e Beland, 1996).

Uma característica importante desse corante é sua habilidade de penetrar em estruturas biológicas e interagir com proteínas e ácidos nucleicos, o que permite seu uso como indicador de células em diferentes condições (Srivastava et al., 2004). Por apresentar variação na intensidade da cor de acordo com interações químicas, o Verde de Malaquita pode, em teoria, ser testado como marcador visual da atividade bacteriana. A proposta seria observar possíveis alterações de cor ou distribuição do corante em regiões onde ocorre biomineralização, especialmente com a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3), como sugerem alguns estudos exploratórios em sistemas biológicos (Kumar e Soni, 2020).

Por outro lado, uma limitação é sua toxicidade. O Verde de Malaquita é reconhecidamente prejudicial a uma série de organismos, incluindo bactérias, fungos e até células eucarióticas (Srivastava et al., 2004). Em microbiologia, ele é frequentemente utilizado justamente como agente inibitório, mostrando que concentrações relativamente baixas já podem comprometer a viabilidade das células (Culp e Beland, 1996). Isso representa um obstáculo significativo para sua aplicação em bioconcretos, onde a sobrevivência e a atividade da bactéria são fundamentais para que o processo de autocicatrização ocorra adequadamente.

Outro ponto a ser considerado é que há poucas evidências de que o Verde de Malaquita apresente afinidade direta com os produtos da biomineralização, como o carbonato de cálcio. Assim, sua aplicação como marcador no bioconcreto ainda se encontra em um estágio experimental, sendo necessário verificar, por meio de ensaios específicos, se o corante realmente apresenta alguma alteração visual relacionada à atividade metabólica da bactéria.

Apesar dessas limitações, testar o Verde de Malaquita pode ser útil em estudos comparativos, permitindo avaliar seu comportamento em relação a marcadores naturais menos tóxicos, como a curcumina ou a quinina presente na água tônica. Esses ensaios ajudam a identificar marcadores mais adequados para o rastreamento da atividade bacteriana em matrizes cimentícias.

3.3.2.2. Safranina

A Safranina é um corante básico da classe dos corantes azo, amplamente utilizado em microbiologia e histologia devido à sua forte afinidade por estruturas celulares carregadas negativamente. Em laboratório, a Safranina é mais conhecida por sua aplicação como corante de contraste em protocolos como a coloração de Gram, atuando como o corante que marca as bactérias Gram-negativas após o processo de descoloração (Beveridge, 2001). Sua facilidade

de aplicação, estabilidade e coloração intensa fazem dela um composto amplamente empregado em análises morfológicas e em identificação bacteriana.

Do ponto de vista químico, a Safranina é um corante cationicamente carregado, o que favorece sua interação com moléculas anionicamente carregadas presentes em membranas, ácidos nucleicos e componentes da parede celular (Prescott et al., 2008). Essa característica permite que o corante realce regiões de atividade celular ou estruturas que sofreram alterações químicas, o que abre a possibilidade de testar seu comportamento como marcador visual da presença ou atividade da bactéria dentro da matriz cimentícia do bioconcreto. No entanto, assim como ocorre com o Verde de Malaquita, o uso da Safranina como marcador para rastrear a atividade bacteriana no concreto apresenta desafios importantes. Um dos principais é que, apesar de ser amplamente utilizada para coloração, a Safranina possui potencial citotóxico em concentrações mais altas, podendo comprometer a viabilidade das células se não for devidamente controlada (Zaharia et al., 2012). Isso significa que, em um sistema de autocicatrização que depende da sobrevivência da bactéria, o corante deve ser empregado com cautela, em concentrações reduzidas e controladas.

Outro ponto é que a Safranina não possui afinidade comprovada com os produtos da biomineralização, como o carbonato de cálcio (CaCO_3), o que limita seu uso como marcador direto dessa etapa do processo. Diferentemente de corantes fluorescentes ou pigmentos com comportamento específico frente a minerais, a Safranina atua principalmente como marcador celular, e não como indicador químico. Assim, sua aplicação no bioconcreto provavelmente se limitaria à identificação de presença bacteriana, e não necessariamente da biomineralização em si. Em síntese, a Safranina é um corante amplamente conhecido e utilizado em microbiologia, com forte afinidade por estruturas celulares. Embora não seja, a princípio, o marcador mais adequado para rastrear o processo de biomineralização no concreto, pode ser empregada como ferramenta auxiliar em testes preliminares ou em análises de presença e distribuição das bactérias, desde que sua concentração seja cuidadosamente controlada.

3.3.2.3. *Cúrcuma*

A cúrcuma (*Cúrcuma longa*) é uma planta herbácea perene originária do Sudeste da Ásia, amplamente cultivada e valorizada em diversas partes do mundo por suas propriedades tanto culinárias quanto medicinais. Sua raiz, conhecida como rizoma, é a parte mais utilizada e é extraída para produzir um pó amarelado, que é um dos temperos mais populares em várias culturas, especialmente na culinária indiana e do Sudeste Asiático. Esse pó possui uma cor

amarela vibrante, atribuída à curcumina, o principal composto ativo da planta (Hewlings e Kalman, 2017). Além de ser amplamente utilizado como tempero, a cúrcuma também desempenha papel importante em práticas medicinais tradicionais, sendo associada a propriedades anti-inflamatórias, antioxidantes e antimicrobianas (Gupta et al., 2013).

A curcumina ($C_{21}H_{20}O_6$), que confere à cúrcuma sua cor característica, é um dos principais compostos fenólicos presentes na planta. Juntamente com outros curcuminóides, como Demetoxicurcumina e Bisdemetoxicurcumina, ela apresenta estrutura aromática conjugada com grupos cetona e fenóis, o que favorece sua forte atividade antioxidante (Hewlings e Kalman, 2017). Essa atividade permite neutralizar radicais livres e reduzir estresse oxidativo, além de contribuir para propriedades antimicrobianas já relatadas em estudos farmacológicos (Gupta et al., 2013).

No contexto deste trabalho, a cúrcuma foi investigada como possível marcador visual para rastrear a atividade da bactéria no concreto, principalmente devido à intensidade de sua coloração. A hipótese era que a curcumina poderia interagir com metabólitos bacterianos ou com produtos da biomineralização, como o carbonato de cálcio, gerando alguma forma de contraste visual (Mors e Jonkers, 2017). Em teoria, esse comportamento poderia auxiliar na identificação de regiões onde as bactérias estivessem ativas.

Entretanto, apesar de seu potencial teórico, os resultados obtidos neste estudo mostraram que a cúrcuma não foi eficaz como indicador visual dentro da matriz cimentícia, uma vez que sua coloração se tornou difusa e pouco perceptível após a incorporação ao CPR. Assim, embora seja um composto amplamente estudado em áreas como saúde, cosméticos e terapias alternativas, sua aplicação prática como marcador para rastreabilidade bacteriana em concreto mostrou-se limitada nas condições testadas.

Mesmo assim, vale destacar que a cúrcuma e seus derivados continuam sendo investigados em diversas áreas devido às suas propriedades antioxidantes e terapêuticas, incluindo pesquisas voltadas para câncer, doenças neurodegenerativas e processos inflamatórios, o que reforça sua relevância científica — ainda que, para o propósito deste trabalho, seu uso como marcador não tenha apresentado resultados satisfatórios.

3.3.2.4. Água tônica

A água tônica tem despertado interesse como possível método alternativo e de baixo custo para o rastreamento da atividade bacteriana no bioconcreto devido à presença da quinina, um composto orgânico conhecido por sua capacidade de emitir fluorescência quando exposto à

luz ultravioleta. A quinina é um alcaloide extraído originalmente da casca da árvore *Cinchona* e, além de seu uso medicinal tradicional, apresenta propriedades ópticas bastante características, o que a torna útil em diferentes aplicações analíticas (Dong et al., 2018).

A fluorescência da quinina é estável e facilmente identificável, emitindo um brilho azul quando iluminada com luz UV. Essa propriedade é o que possibilita sua utilização como marcador visual em estudos de rastreamento. A lógica do uso no bioconcreto é que, ao ser incorporada ao sistema – seja misturada diretamente, seja associada às cápsulas contendo as bactérias – a quinina pode indicar visualmente regiões onde houve penetração de água, ativação bacteriana ou até movimentação dos produtos do metabolismo microbiano.

A ideia central é que, quando ocorre uma fissura no concreto e a umidade a penetra, a mobilidade da quinina e sua fluorescência podem ajudar a identificar caminhos de infiltração ou regiões onde a bactéria foi ativada. Embora a quinina não interaja diretamente com o carbonato de cálcio (CaCO_3) precipitado durante a biomineralização, sua presença pode ajudar na visualização indireta do processo, principalmente ao destacar a entrada de água – que é o gatilho para a ativação das bactérias encapsuladas.

Outra vantagem da água tônica é que ela não apresenta, nas concentrações usuais, efeitos tóxicos significativos sobre as bactérias, diferentemente de corantes sintéticos como o Verde de Malaquita. De fato, estudos microbiológicos mostram que a quinina possui atividade antimicrobiana apenas em concentrações muito mais elevadas do que as encontradas em bebidas comuns (Chen et al., 2020). Isso favorece sua utilização em experimentos que buscam observar o comportamento das bactérias sem prejudicar sua viabilidade.

Apesar disso, existem limitações. A fluorescência da quinina pode ser afetada pelo pH elevado do concreto e por processos de adsorção em materiais cimentícios, que podem reduzir sua intensidade luminescente. Outro fator é que a água tônica não marca a bactéria em si; ela atua apenas como ferramenta de visualização do movimento de água e possíveis locais de atividade microbiana, exigindo métodos complementares para confirmar a ocorrência da biomineralização.

Mesmo com tais limitações, o uso da água tônica como marcador visual representa uma alternativa interessante e acessível para ensaios preliminares de rastreabilidade em bioconcreto. Seu comportamento fluorescente pode facilitar a identificação de pontos de ativação bacteriana, regiões de fissuras ativas ou áreas onde há circulação de água, oferecendo um método simples, econômico e de fácil interpretação.

3.3.3 Encapsulamento com alginato de sódio

A aplicação de bactérias no concreto exige soluções que garantam sua sobrevivência dentro da matriz cimentícia, já que o ambiente interno deste material é altamente agressivo. O pH elevado, a alta alcalinidade, o calor gerado durante a hidratação do cimento e a escassez de água e nutrientes tornam a vida microbiana bastante difícil. Nesse cenário, uma das estratégias mais estudadas e utilizadas para proteger os microrganismos é o encapsulamento com alginato de sódio, uma técnica simples, eficiente e de baixo custo que tem ganhado espaço nas pesquisas em bioconcretos.

O alginato de sódio é um biopolímero natural extraído de algas marrons, amplamente conhecido por sua capacidade de formar géis quando entra em contato com soluções contendo íons de cálcio (Ca^{2+}). Essa reação de gelificação permite a formação de pequenas cápsulas ou esferas de gel, capazes de aprisionar e proteger as bactérias no interior do concreto. O processo de encapsulamento é relativamente simples: mistura-se o alginato de sódio com uma suspensão bacteriana e, em seguida, essa solução é gotejada em uma solução de cloreto de cálcio. O contato entre os dois líquidos gera uma reticulação iônica, formando esferas de gel onde as bactérias ficam protegidas contra o ambiente alcalino e as variações térmicas (Souradeep e Kua, 2016). Essas cápsulas são, então, adicionadas diretamente à mistura do concreto ainda fresco. Durante a cura do material, as bactérias permanecem inativas, mas protegidas. Quando ocorrem fissuras e a água externa entra em contato com essas regiões danificadas, a umidade penetra nas cápsulas porosas, ativando as bactérias. A partir desse momento, inicia-se o processo de biomineralização, no qual os microrganismos produzem carbonato de cálcio (CaCO_3), preenchendo as fissuras e promovendo a autocicatrização do concreto (Souradeep e Kua, 2016).

O uso de alginato de sódio traz diversas vantagens técnicas e ambientais. Por ser um material natural, biodegradável e não tóxico, ele não agride o meio ambiente nem interfere negativamente na matriz cimentícia. Além disso, o processo de encapsulamento não requer equipamentos sofisticados, o que facilita sua aplicação em escala laboratorial e, futuramente, industrial. A estrutura porosa do gel formado permite a difusão de água e nutrientes, o que é essencial para a reativação das bactérias no momento certo. Segundo Aytekin et al. (2023), o alginato se destaca entre os materiais de encapsulamento por sua alta biocompatibilidade, eficiência de proteção celular e boa integração com a matriz cimentícia.

Por outro lado, o uso do alginato também apresenta alguns desafios. Um dos principais é a necessidade de controle sobre o tamanho e a quantidade das cápsulas. Esferas muito grandes ou em excesso podem comprometer as propriedades mecânicas do concreto, como a resistência

à compressão. Estudos como o de Wang et al. (2014) sugerem que a dosagem ideal de cápsulas deve ser cuidadosamente ajustada para garantir um bom equilíbrio entre eficiência de cura e desempenho estrutural. Outro ponto importante é garantir a distribuição homogênea das cápsulas na mistura, evitando que se concentrem em apenas uma região da peça. Para isso, adaptações no traço do concreto e na sequência de mistura são frequentemente necessárias.

Em comparação com outras técnicas de encapsulamento, como o uso de sílica porosa, cápsulas de poliuretano, hidrogel ou argilas expandidas, o alginato de sódio se destaca por seu custo reduzido, facilidade de manuseio e por permitir a encapsulação suave de células vivas, sem danificá-las. Além disso, enquanto alguns métodos exigem processos químicos complexos ou materiais sintéticos, o alginato pode ser aplicado com poucos recursos e com boa eficiência, o que o torna ideal para pesquisas experimentais e para o avanço de tecnologias sustentáveis na construção civil. Outro aspecto positivo é que o alginato também pode ser utilizado em combinação com nutrientes essenciais, como fontes de carbono ou nitrogênio, para garantir que as bactérias tenham energia suficiente no momento da ativação. Isso amplia ainda mais a eficácia do sistema de autocicatrização, especialmente em ambientes com baixa disponibilidade de matéria orgânica.

Por todas essas razões, o encapsulamento com alginato de sódio tem sido cada vez mais explorado em pesquisas, como mostram os trabalhos de Aytakin et al. (2023), Souradeep e Kua, 2016; Jonkers (2010), e Wang et al. (2014), que destacam a importância de métodos de proteção microbiana simples e eficazes. Essas abordagens vêm sendo aplicadas não só em ensaios laboratoriais, mas também em protótipos reais de elementos estruturais, como blocos, painéis e revestimentos com propriedades de autocicatrização. Em resumo, o alginato de sódio oferece uma solução acessível e eficiente para proteger bactérias dentro do concreto e garantir o funcionamento dos sistemas de autocicatrização. Combinando baixo custo, facilidade de uso e bons resultados práticos, essa técnica tem um papel importante no desenvolvimento de materiais inteligentes, que contribuem para construções mais duráveis, econômicas e sustentáveis.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

Essa pesquisa foi dividida em duas etapas: A e B. Na etapa A foi investigada a produção de cápsulas de alginato de sódio, o encapsulamento da bactéria *Lysinibacillus sphaericus* e o estudo da rastreabilidade das bactérias no CPR; a Etapa B abrangeu o preparo das matérias primas envolvidas na produção de diferentes formulações de CPR (feita em conjunto com alunos de doutorado do grupo de pesquisa) e a preparação dos corpos de prova de CPR, em três formulações distintas, e subsequente avaliação física e mecânica.

4.1 Etapa A

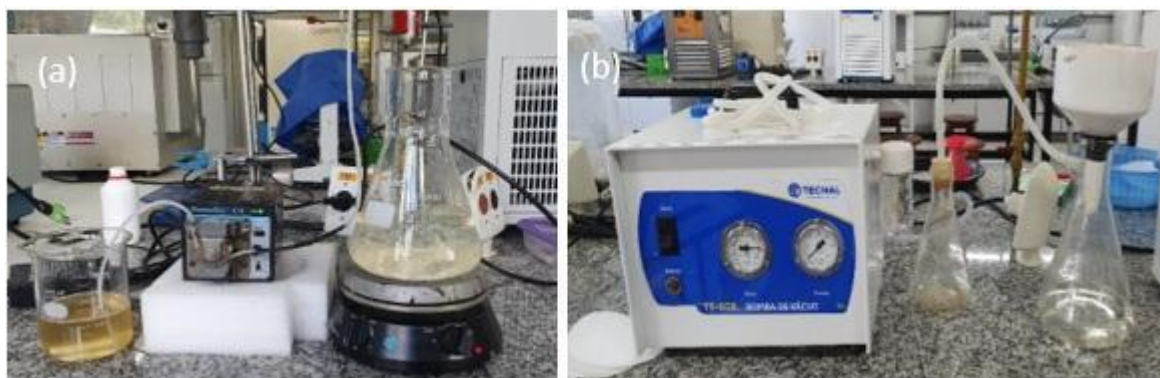
4.1.1 Produção de cápsulas de alginato de sódio

Para a produção das cápsulas de alginato de sódio (com e sem bactéria) foram utilizadas as seguintes matérias primas: alginato de sódio, com teor de pureza de 90% da empresa Êxodo Científica; cloreto de cálcio com teor de pureza de 95% da empresa Êxodo Científica e cepa da *Lysinibacillus sphaericus*, fornecida pela coorientadora Professora Dra. Eliana Cristina da Silva Rigo, docente na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP).

A solução de alginato de sódio 2% (m/v) foi preparada e mantida sob agitação constante até a dissolução e homogeneização completa do alginato em água destilada. A solução de cloreto de cálcio 5% (m/v) foi preparada de forma semelhante, pesando-se a massa em um vidro de relógio, transferida para um Erlenmeyer contendo água destilada e mantida sob agitação até completa solubilização e homogeneização. A seguir realizou-se o gotejamento da solução de alginato de sódio na solução de cloreto de cálcio com o auxílio de uma bomba peristáltica de Marca Cole-Parmer, modelo Masterflex® C/L.

As esferas obtidas a partir do procedimento descrito foram peneiradas com o auxílio de um sistema de filtração à vácuo contendo um Kitassato, funil de Büchner, papel de filtro e bomba à vácuo (da empresa TECNAL, modelo TE-058) e colocadas em uma bandeja forrada com papel toalha para remoção do excesso de água. A seguir, as esferas foram deixadas em temperatura ambiente (mínimo 72h) até a sua secagem completa e armazenadas. As figuras 1(a) e 1(b) ilustram, respectivamente, o procedimento, abrangendo o gotejamento da solução de alginato de sódio na solução de cloreto de cálcio e a obtenção das esferas de alginato de sódio.

Figura 1 – Esquema de produção das cápsulas (a) por gotejamento e (b) filtração a vácuo.



Fonte: Adaptado de Sorce (2023).

4.1.2 Encapsulamento da bactéria *Lysinibacillus sphaericus*

Dois tipos de cápsulas foram produzidas: com e sem material microbiológico. A produção de cápsulas sem material biológico (descrita em 4.1.1) foi feita para utilização nos ensaios que não demandem a análise da interação da bactéria com o meio, apenas da cápsula com o meio; as cápsulas contendo material biológico foram produzidas para serem usadas nos ensaios que envolvam o estudo do processo de biomineralização sua interação com o meio. Em ambos os casos, o processo de produção das cápsulas segue o protocolo descrito por Sorce (2023).

4.1.3 Estudo da rastreabilidade das bactérias no CPR

O estudo da rastreabilidade das bactérias no CPR teve como principal objetivo avaliar a viabilidade das células bacterianas utilizadas no processo de autocicatrização, considerando que parte do material biológico havia sido previamente armazenado sob congelamento. A verificação da viabilidade é essencial, pois mesmo bactérias formadoras de esporos, como *Lysinibacillus sphaericus*, podem sofrer perda parcial de atividade metabólica após longos períodos de estocagem (Setlow, 2014). Assim, tornou-se necessário confirmar se as células ainda apresentavam capacidade de reativação e precipitação mineral após o descongelamento.

Para essa avaliação, novas cápsulas de alginato de sódio contendo *Lysinibacillus sphaericus* foram preparadas e incorporadas às formulações do CPR. O encapsulamento é amplamente reconhecido por proteger microrganismos durante a mistura com materiais cimentícios, garantindo maior taxa de sobrevivência e posterior ativação quando ocorre entrada de umidade (Seifan, Samani e Berenjian, 2016). Desse modo, a produção de novas cápsulas permitiu verificar se a bactéria, após a etapa de congelamento e descongelamento, ainda era capaz de permanecer viável dentro da matriz cimentícia.

Para o estudo de rastreabilidade das bactérias, diversos materiais foram investigados e adicionados durante o processo de formação das cápsulas de alginato de sódio: os corantes verde de malaquita, safranina e cúrcuma e também a água tônica.

Outro aspecto analisado foi a possível interferência do pó de vidro no comportamento biológico das bactérias. Como o estudo propõe substituir parcial ou totalmente a areia natural por vidro moído, tornou-se importante verificar se esse componente poderia alterar o ambiente microbiano, influenciando a precipitação de CaCO_3 ou afetando a sobrevivência das células. Estudos anteriores mostram que a composição química do vidro e a alcalinidade do meio podem influenciar o microambiente onde as bactérias atuam, podendo afetar tanto a nucleação quanto a morfologia dos cristais de carbonato de cálcio (Mors e Jonkers, 2017).

Assim, os ensaios realizados nesta etapa tiveram dupla finalidade: confirmar a condição biológica da bactéria após o congelamento e obter uma prévia da compatibilidade do pó de vidro com o processo de biomineralização. A avaliação preliminar da atividade bacteriana (não mostrado aqui em detalhes) permitiu verificar se a bactéria ainda estava funcional e se continuava capaz de promover a autocicatrização das fissuras. Esses resultados - positivos - foram essenciais para garantir a confiabilidade das etapas posteriores da pesquisa, incluindo análises de desempenho mecânico e acompanhamento da precipitação mineral.

4.2 Etapa B

4.2.1 Preparo das matérias primas envolvidas na produção de diferentes formulações de CPR

O preparo das matérias primas utilizadas nas diferentes formulações de CPR incluiu a adequação prévia da granulometria dos componentes e homogeneização durante a mistura, visto que a distribuição de partículas afeta diretamente a compacidade e o desempenho mecânico do material (Mehta e Monteiro, 2014). Cabe salientar que a caracterização das matérias primas utilizadas nesta pesquisa já haviam sido previamente realizada por Sorce (2023) pelas técnicas de difração de raios X, microscopia óptica, umidade, massa específica real e intumescimento, o que permitiu focar a pesquisa na granulometria dos componentes do CPR.

Foram investigadas duas formulações distintas, além de uma formulação padrão desenvolvida por envolvendo pó de quartzo, microssílica, cimento e areia. Nas duas formulações investigadas a areia foi substituída por pó de vidro em 50% e 100% em massa.

No caso do vidro utilizado em substituição à areia, o processo começa pela coleta e triagem das garrafas, que são limpas para remoção de rótulos, tampas e resíduos orgânicos que

possam gerar algum tipo de contaminação. Após a limpeza, as garrafas foram fragmentadas manualmente, facilitando sua alimentação nos equipamentos de redução de tamanho, procedimento comumente adotado em estudos que utilizam vidro reciclado para fins cimentícios (Shaikh, 2021).

Esses fragmentos passaram então pelo processo de moagem em moinho de bolas. Após essa etapa, o material foi peneirado para separar partículas maiores, garantindo que o pó resultante esteja dentro da faixa granulométrica desejada - etapa importante porque partículas muito grossas prejudicam a compacidade, enquanto partículas ultrafinas afetam a demanda de água e a reologia da mistura (Zidol et al., 2020).

O preparo da areia natural utilizada como referência segue uma lógica semelhante. O procedimento se inicia com a secagem do material, removendo completamente a umidade e evitando distorções na massa e na distribuição granulométrica final. Em seguida, a areia é peneirada a seco utilizando peneiras padronizadas, conforme recomendado por normas internacionais de caracterização de agregados (ASTM C136, 2014).

Ao final do processo, tanto o pó de vidro quanto a areia padronizada encontram-se adequados para a formulação dos CPR. Como a granulometria influencia diretamente o empacotamento de partículas, a demanda de água, a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, o rigor nessas etapas é essencial para garantir resultados confiáveis e reproduzíveis (Mehta e Monteiro, 2014). Por isso, o preparo das matérias primas não deve ser visto apenas como uma etapa inicial, mas como parte essencial do desenvolvimento das formulações avaliadas.

4.2.2 Preparação dos corpos de prova de CPR em três formulações distintas, e subsequente avaliação física e mecânica

Foram preparadas três formulações de concreto de pós reativos: a primeira foi confeccionada como referência; ou seja, composta apenas pelas matérias primas convencionais (areia, microssílica, pó de quartzo, cimento e água) sem a adição parcial do pó de vidro provenientes das garrafas *long neck*. A segunda formulação consistiu na substituição parcial em 50% e a terceira em 100% da areia pelo pó de vidro oriundo da moagem das garrafas do tipo *long neck*.

A moldagem dos corpos de prova em dois formatos distintos ocorreu após a mistura das matérias primas. O primeiro formato, cilíndrico, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, foi moldado de acordo com a norma ABNT NBR 5738:2015; o segundo formato,

prismático/retangular, será moldado de acordo com a norma ABNT NBR 13279:2015, com dimensões de 40 mm x 40 mm de seção transversal por 160 mm de comprimento. As diferentes moldagens foram realizadas em função dos ensaios mecânicos a serem realizados: compressão e flexão a três pontos, como será mais detalhado adiante. Foram utilizados 5 corpos de prova para cada ensaio.

Para facilitar a desmoldagem, o interior dos moldes foi coberto com uma fina camada de lubrificante mineral. Os moldes foram vedados com filme plástico para evitar-se a percolação da pasta de cimento para fora da fôrma e perda de umidade para o ambiente e, após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e imersos (solução aquosa saturada com hidróxido de cálcio, em torno de 25 °C, pH entre 11 e 13), sendo iniciado o processo de cura em câmara fechada. Os corpos de prova produzidos para as três formulações foram mantidos em imersão até atingirem as idades de rompimento.

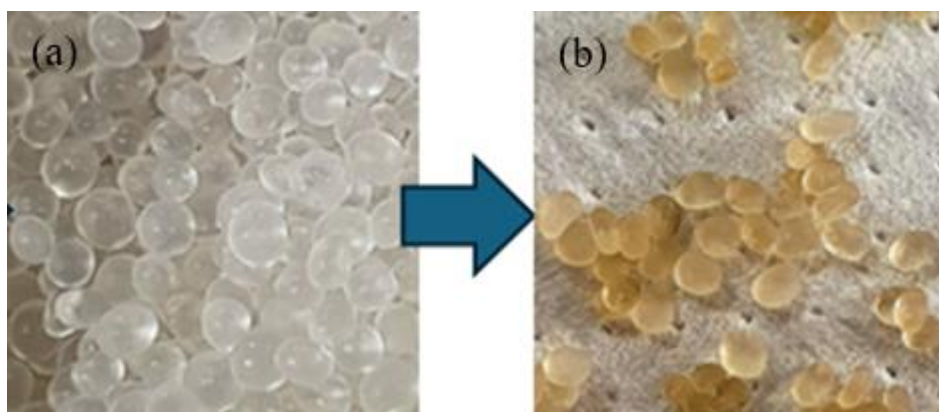
Ensaio de absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova foram realizados conforme a norma NBR 9778/2009; ensaios de compressão, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 5738:2015 e os ensaios de flexão a três pontos foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 13279:2015. Os ensaios mecânicos foram realizados após 7, 14 e 28 dias; os ensaios físicos após 28 dias.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ETAPA A

Nesta etapa, o foco foi observar como as cápsulas de alginato de sódio contendo *Lysinibacillus sphaericus* se comportaram dentro do CPR. A primeira preocupação foi verificar se elas resistiriam ao processo de mistura e moldagem, já que o concreto fresco apresenta um ambiente bastante agressivo, com pH elevado e atrito mecânico intenso. De modo geral, as cápsulas se mostraram resistentes, não se romperam durante o preparo e permaneceram bem distribuídas, sem causar segregação ou comprometer a trabalhabilidade (Figura 2).

Figura 2 – Cápsulas de alginato de sódio produzidas por gotejamento (a) antes e (b) após secagem



Fonte: do Autor (2025).

Também foi importante analisar se o alginato suportaria a alcalinidade do cimento. Embora as cápsulas tenham ficado ligeiramente mais moles após o contato com o concreto fresco, elas continuaram firmes o suficiente para manter a bactéria protegida durante o início da cura. Esse comportamento é coerente com observações de Jonkers e Schlangen (2008), que relataram que o encapsulamento protege significativamente microrganismos durante o período crítico inicial da hidratação do cimento.

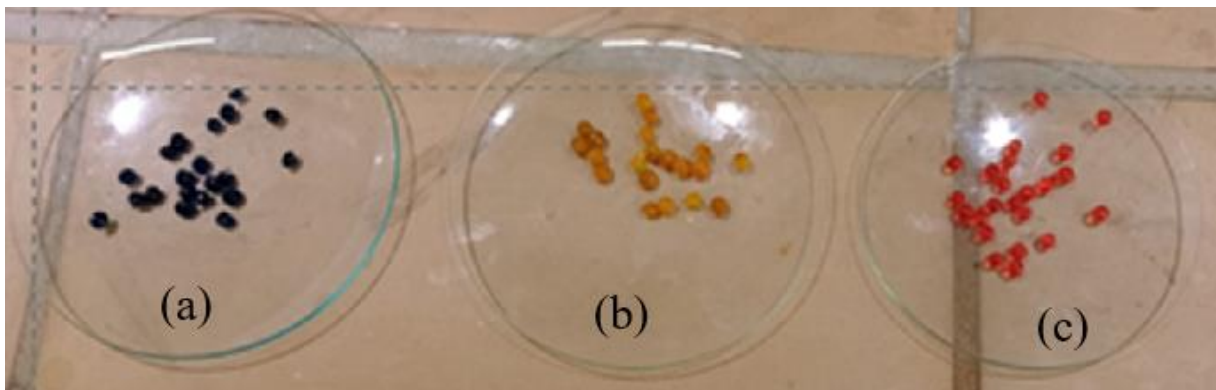
Nas formulações com pó de vidro, foi possível notar uma leve diferença visual: as cápsulas pareciam absorver menos umidade da mistura, possivelmente devido à menor porosidade e absorção do vidro quando comparado à areia natural. Pesquisas indicam que materiais vítreos podem alterar o ambiente imediato de umidade no concreto, o que pode influenciar o comportamento de cápsulas ou agentes de autocicatrização (Tayeh et al., 2022). Embora essa diferença não tenha prejudicado diretamente o desempenho das cápsulas, ela sugere que a presença do vidro pode modificar o microambiente em torno delas, algo que deverá ser analisado em etapas mais avançadas do estudo.

De maneira geral, os resultados mostram que as cápsulas funcionam na Etapa A, pois resistiram ao processo de mistura, não apresentaram sinais de degradação acelerada e parecem capazes de liberar a bactéria principalmente quando houver ocorrência de fissuras e entrada de água, condição necessária para ativação da autocicatrização. Conclusões semelhantes foram observadas em estudos sobre bioconcreto, que indicam que o encapsulamento é uma estratégia eficiente para garantir a sobrevivência e ativação controlada das bactérias (Wang et al., 2012). Esses resultados permitem avançar para as próximas etapas, nas quais é possível avaliar de forma mais detalhada a ativação da bactéria e a precipitação do carbonato de cálcio dentro do CPR.

A Figura 3 mostra o resultado obtido a partir da produção das esferas de alginato de sódio utilizando-se os seguintes corantes no processo: (a) Verde de malaquita; (b) Cúrcuma e (c) Safranina. Apesar das cápsulas terem apresentado, para todos os corantes investigados, uma cor de destaque, ao serem colocadas em corpos de prova, as cápsulas se tornaram pouco perceptíveis, o que inviabilizou seu uso para a rastreabilidade do processo de biomineralização no concreto.

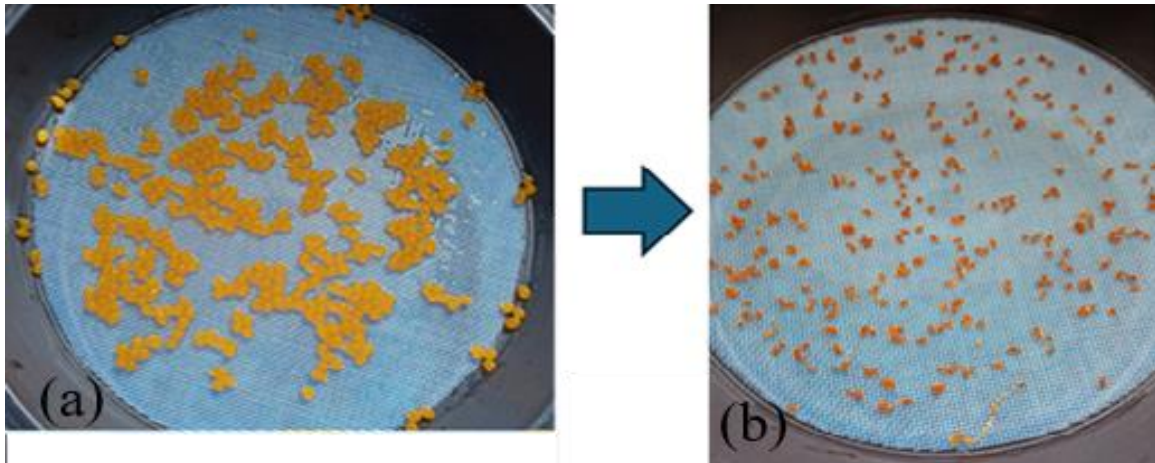
Também foram investigadas a produção de cápsulas de alginato de sódio com cúrcuma e água tônica e somente com água tônica, buscando a rastreabilidade do processo (Figuras 4 e 5, respectivamente).

Figura 3 – Cápsulas de alginato de sódio produzidas com os corantes (a) Verde de Malaquita; (b) Cúrcuma e (c) Safranina



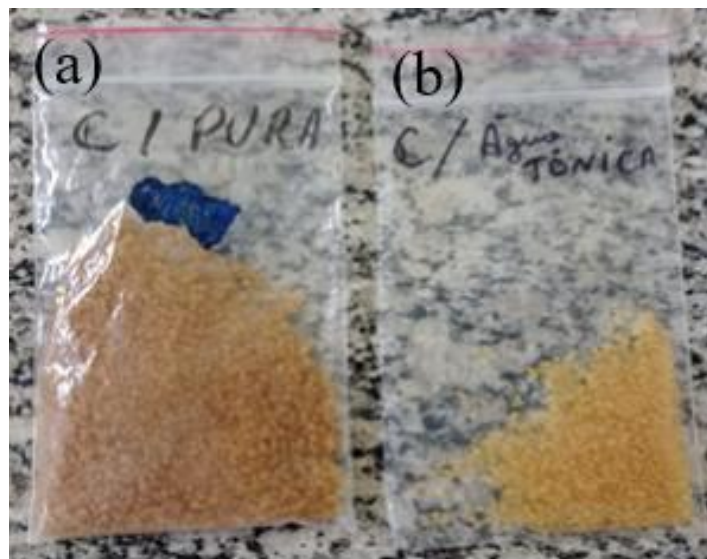
Fonte: do Autor (2025).

Figura 4 – Cápsulas de alginato de sódio produzidas com cúrcuma e água tônica (a) antes e (b) após secagem



Fonte: do Autor (2025).

Figura 5 – Cápsulas de alginato de sódio produzidas (a) sem e (b) com água tônica, ambas já secas



Fonte: do Autor (2025).

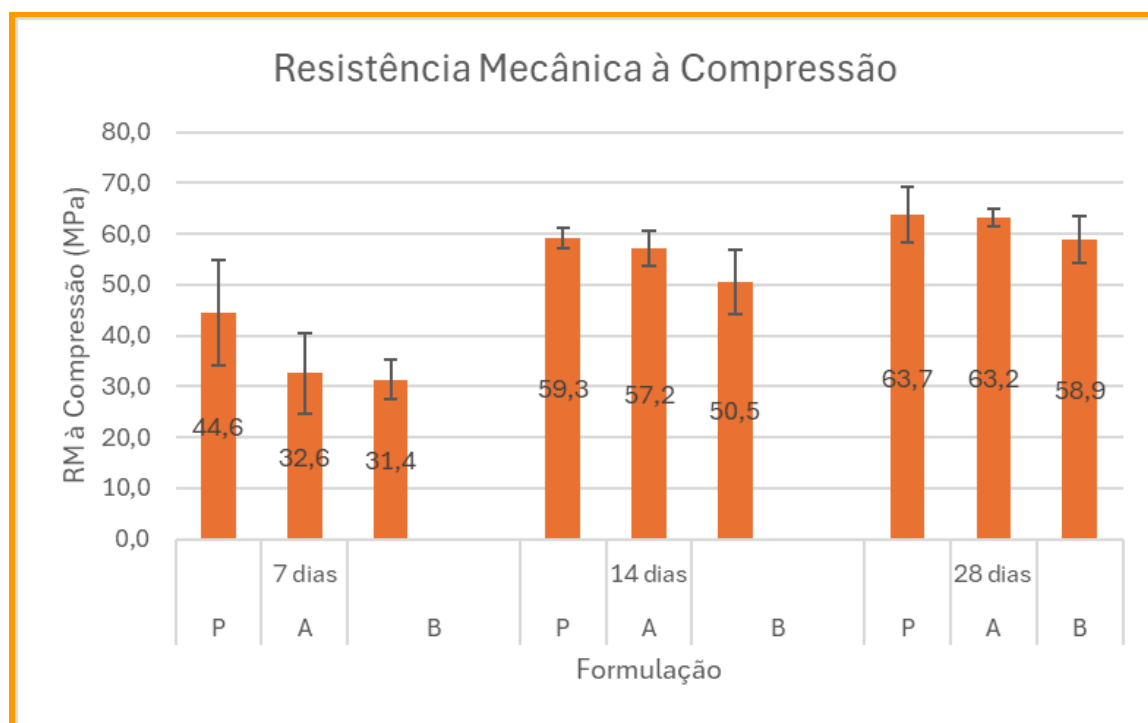
Após analisar todas as amostras, observou-se que, apesar dos corantes mudarem a cor das cápsulas, nenhum deles manteve contraste suficiente dentro do concreto para permitir identificar a bactéria visualmente. Nas cápsulas coloridas com corantes comuns, cúrcuma ou água tônica, a coloração ficou muito fraca depois de misturadas ao CPR e praticamente desapareceu após a cura. Também não houve diferença observável na resistência mecânica das cápsulas produzidas com os diferentes corantes (manuseio), mostrando que os aditivos não alteraram sua integridade física e aspecto geométrico final. Assim, nesta etapa inicial, nenhum

dos métodos testados funcionou para rastrear visualmente a bactéria no concreto, indicando que será necessário buscar outras alternativas de rastreabilidade em estudos posteriores.

5.2 ETAPA B

A Figura 6 mostra a resistência mecânica das três formulações distintas investigadas, após 7, 14 e 28 dias de cura, em que P é a formulação padrão, A é a formulação com 50% de substituição da areia por vidro moído e B é a formulação com 100% de substituição da areia por vidro moído. A resistência mecânica foi obtida por meio de ensaio de compressão.

Figura 6 – Resistência mecânica a compressão das formulações P, A e B obtidas após 7, 14 e 28 dias de cura



Fonte: do Autor (2025).

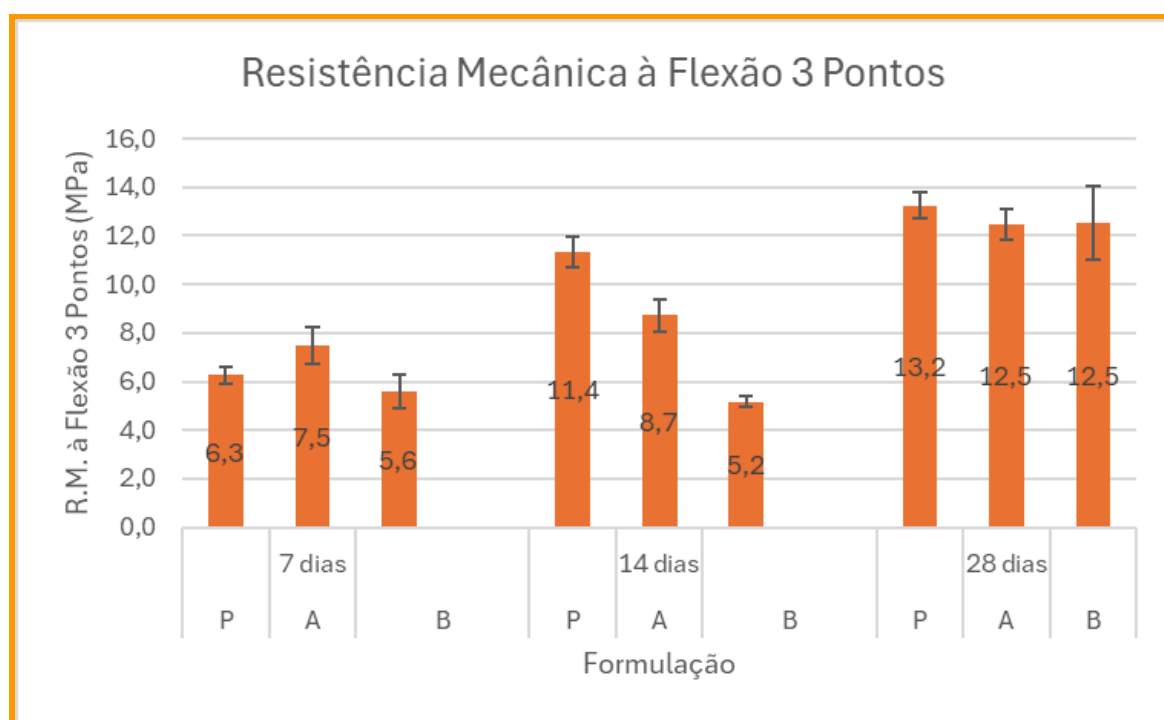
Observou-se, como esperado, um aumento na resistência mecânica em função do aumento do tempo de cura, o que é explicado pela evolução das reações de hidratação do cimento que formam os produtos responsáveis pela resistência, principalmente o C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Após 7 dias, compostos mais reativos como o C₃A e parte do C₃S já sofreram hidratação; após 14 dias as reações continuam ocorrendo, majoritariamente envolvendo o C₃S e aos 28 dias o ganho de resistência é mais lento, mas significativo.

Apesar de observada uma tendência na diminuição da resistência mecânica a compressão com o aumento no teor de vidro moído na formulação, após 14 e 28 dias os resultados mostram-se muito semelhantes, havendo uma perda aparente de 7,5% na resistência

mecânica ao substituir totalmente a areia por “pó de vidro”, resultado muito positivo no que tange à questão de reciclabilidade/sustentabilidade. Apesar da formulação P começar, a priori, com uma resistência mecânica mais elevada que as demais, as formulações A e B apresentam ganho relativo maior aparente, indicando cura e hidratação mais lentas, porém eficientes.

A Figura 7 mostra a resistência mecânica a flexão a três pontos das três formulações distintas investigadas, após 7, 14 e 28 dias de cura.

Figura 7 – Resistência mecânica a compressão das formulações P, A e B obtidas após 7, 14 e 28 dias de cura



Fonte: do Autor (2025).

Assim como no ensaio de compressão, todas as formulações apresentam um aumento na resistência à flexão em função do tempo de cura. Comparativamente aos resultados obtidos no ensaio de compressão, os níveis de resistência mecânica observados são muito inferiores de um modo geral, sendo observadas resistências muito semelhantes após 28 dias, o que corrobora os resultados obtidos por meio do ensaio de compressão; ou seja, que a adição de pó de vidro traz uma série de aspectos positivos como já discutido.

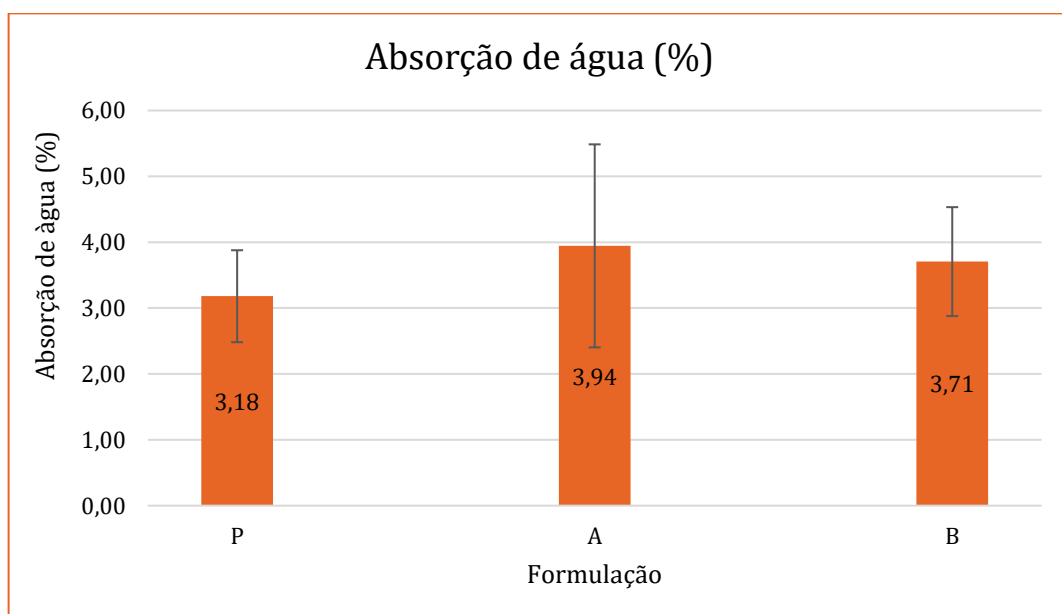
Ainda é possível afirmar que a proximidade dos valores de flexão e a aproximação dos valores de compressão aos 28 dias indicam que as diferenças microestruturais iniciais diminuem ao longo do processo de cura e que as três formulações podem ser consideradas equivalentes para aplicações de longo prazo, embora apresentem desempenho inicial distinto.

Para entender melhor os comportamentos apresentados e corroborar a discussão anterior, foi realizada a análise de variância, aplicada aos resultados de resistência à compressão. Observou-se que, aos 7 dias, o valor de F foi de aproximadamente 3,48, com $p \approx 0,08$, indicando que não houve diferença estatisticamente significativa entre as três formulações, já que $p > 0,05$. Aos 14 dias, o valor de F aumentou para cerca de 4,57, com $p \approx 0,046$, o que aponta para a existência de diferença entre as misturas nessa idade, sugerindo influência nas propriedades devido à substituição. Já aos 28 dias, o valor de F foi de aproximadamente 1,55, com $p \approx 0,27$, indicando novamente ausência de diferença significativa entre as formulações. Assim, em compressão, as misturas se comportam de forma semelhante aos 7 e 28 dias, com uma diferença pontual apenas aos 14 dias.

Para o ensaio de flexão a três pontos, a ANOVA mostrou um comportamento mais sensível às variações de traço. Aos 7 dias, obteve-se $F \approx 9,27$ com $p \approx 0,007$, evidenciando diferença estatisticamente significativa entre as formulações na idade inicial, o que ocorre também aos 14 dias. Por outro lado, aos 28 dias, o valor de F foi de cerca de 0,72, com $p \approx 0,51$, não havendo diferença significativa entre os traços nessa idade. Dessa forma, enquanto em flexão as formulações se diferenciam bastante nas idades iniciais e intermediárias, aos 28 dias elas tendem a apresentar um comportamento mecânico semelhante

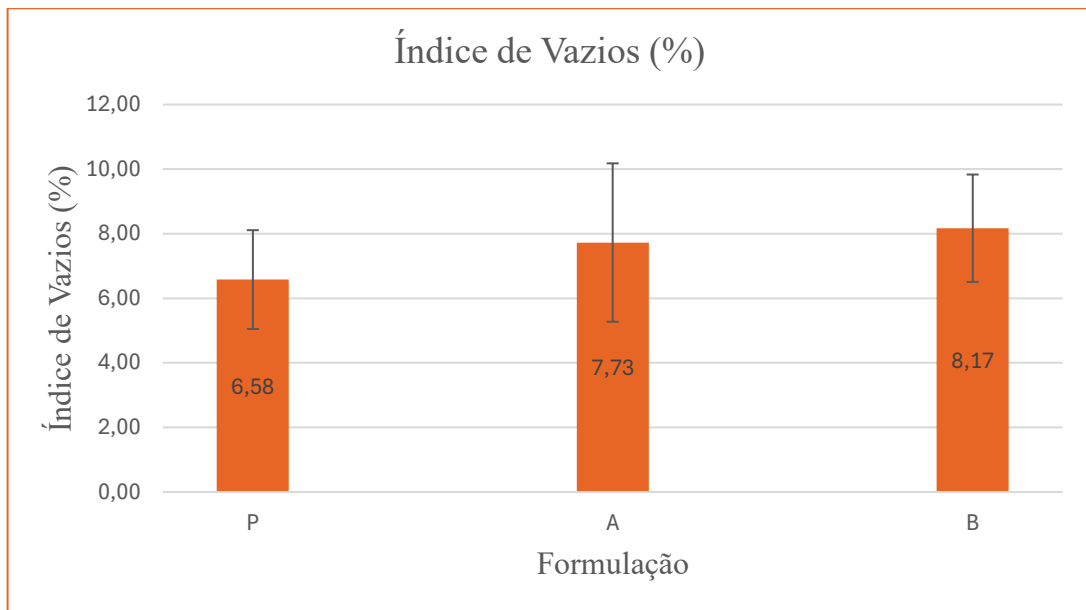
As Figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, a absorção de água e o índice de vazios das três formulações distintas investigadas, após 28 dias de cura.

Figura 8 – Absorção de água (%) das formulações investigadas após 28 dias de cura



Fonte: do Autor (2025).

Figura 9 – Índice de vazios (%) das formulações investigadas após 28 dias de cura



Fonte: do Autor (2025).

Observa-se que os valores são muito próximos, onde a formulação padrão apresenta um valor aparentemente menor de absorção de água e índice de vazios em comparação às demais. Entretanto, pelo teste ANOVA, o valor de p obtido para absorção de água (0,69) o índice de vazios (0,251) indica que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias das três formulações. Esse resultado indica que a substituição da areia por vidro moído não compromete ou traz mudanças relevantes nas propriedades físicas do CPR.

Cabe salientar que uma possível fonte de erro para as medidas de absorção de água e índice de vazios foi o tempo de permanência em água das amostras (cerca de 4 horas no total), com a fervura da água por 40 minutos ao invés de 60. Isso ocorreu devido às dificuldades de manter a água em grande volume em ebulição e pode ter minimizado os valores de porosidade e absorção para todas as formulações.

6 CONCLUSÃO

A produção das cápsulas de alginato de sódio foi bem sucedida, sendo estabelecido um procedimento padrão para sua produção e para o encapsulamento da bactéria *Lysinibacillus sphaericus*, a ser utilizado por outros pesquisadores do grupo de pesquisa em bioconcretos.

Apesar da adição de corantes nas cápsulas de alginato de sódio ter sido bem sucedida, com destaque para a utilização de cúrcuma e água tônica, que não comprometeram a ação das bactérias, o desenvolvimento de uma técnica capaz de rastrear a atividade bacteriana nos CPR necessita mais estudos.

A adição de pó de vidro, obtido a partir da moagem de garrafas do tipo *long neck*, em uma formulação padrão de concretos de pós reativos (CPR) nos teores de 50 e 100% em substituição à areia permitiu a manutenção das propriedades físicas e não comprometeu a trabalhabilidade das massas durante o processo de moldagem. Ainda, no que se refere às propriedades mecânicas, observa-se um ligeiro decréscimo aparente na resistências mecânica a compressão e flexão das amostras em que a areia é substituída por pó de vidro; entretanto, esta pesquisa indica que, dentro das condições investigadas, a substituição da areia é viável, bem como a utilização das garrafas do tipo *long neck* para a formulação de CPR.

Salienta-se, entretanto, que os níveis de resistência mecânica alcançados, por se tratar de corpos de prova de CPR, são muito baixos e que a continuidade desta pesquisa no sentido de adequar as frações granulométricas e proporções de matérias primas é fundamental para atingimento de propriedades mecânicas condizentes com CPR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, I. et al. Factors influencing bacterial-based precipitation, assessment of crack inducing, durability and characterization methods: a comprehensive review. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 10, n. 3, p. 107, 2025.

ALKHALY, Y. R. et al. The design of Reactive Powder Concrete (RPC) mixtures using Aceh Quartzite Powder. **Key Engineering Materials**, v. 892, p. 43–50, 2021.

ALI, B.; QURESHI, L. A.; JAMEEL, M. Development of glass powder as a supplementary cementitious material: A review. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119548, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C136/C136M-14: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. West Conshohocken: ASTM International, 2014.

ARYA, S.; SHARMA, S. Malachite Green: A review of its applications and toxicological effects. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, p. 1–15, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

AYTEKIN, A. et al. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing mechanisms, and encapsulation technologies. **Construction and Building Materials**, v. 376, p. 131–176, 2023.

BEVERIDGE, T. J. *Use of the Gram stain in microbiology*. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 51, p. 531–534, 2001.

BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

CHEN, B. et al. Microstructure and mechanical behavior of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 278, p. 122384, 2021.

CULP, S. J.; BELAND, F. A. Malachite green: A toxicological review. **Journal of the American College of Toxicology**, v. 15, n. 3, p. 219–238, 1996.

DONG, R.; LI, Y.; LU, Y. *Quinine fluorescence as a probe for analytical and sensing applications: A review*. **Journal of Luminescence**, v. 198, p. 470–482, 2018.

FAN, L. et al. Durability of ultra-high performance concrete with silica fume. **Materials**, v. 16, n. 4, p. 1472, 2023.

GHOSH, S. **Exploring the World of Curcumin: Photophysics, Photochemistry and Applications in Nanoscience**. ChemBioChem, 2024.

GUPTA et al. Therapeutic roles of curcumin: lessons learned from clinical trials. **AAPS Journal**, v. 15, p. 195–218, 2013.

HEWLINGS, S. J.; KALMAN D. S. Curcumin: A review of its effects on human health. **Foods**, v. 6, n. 10, p. 92, 2017.

HOU, D. et al. Role of superplasticizers in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 170, p. 107229, 2023.

JONKERS, H. M.; SCHLANGEN, E. Development of a bacteria-based self healing concrete. **Tailor Made Concrete Structures**, p. 425–430, 2008.

JONKERS, H. M. 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.

KHAUDIYAL, S. et al. Bacterial concrete: A review on self-healing properties in the light of sustainability. **Materials Today: Proceedings**, v. 60, p. 136–143, 2022.

KHAN, K. et al. Evaluating the effectiveness of waste glass powder for improving concrete performance. **Journal of Cleaner Production**, 2023.

KUMAR, A.; SONI, H. Assessment of malachite green interaction with biomineralizing systems: An exploratory study. **Journal of Applied Biology e Biotechnology**, v. 8, n. 4, p. 1–7, 2020.

LIMA, M. D. S. **Estudo comparativo sobre os tipos de autocicatrização do concreto**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Amazonas, 2021.

MARVILA, M. T. et al. Influence of fine aggregates on microstructure and performance of concretes. **Journal of Building Engineering**, v. 35, p. 102045, 2021.

- MASLENNIKOV, K. et al. Physical and chemical characteristics of silica fume. **Materials Science Forum**, v. 906, p. 125–132, 2017.
- MAYHOUB, O. A. et al. The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: a review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 145–158, 2021.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MILLA, J. et al. Effect of particle packing on performance of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 290, p. 123234, 2021.
- MOKHTAR, N. et al. A sustainable enhancement of bio-cement using immobilised *Bacillus sphaericus*: Optimization, microstructural properties, and techno-economic analysis for a cleaner production of bio-cementitious mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 318, p. 128470, 2021.
- MORS, R. M.; JONKERS, H. M. Effect of alternative food sources on the biomass and CaCO₃ precipitation of bacteria used for self-healing concrete. **Journal of Industrial Microbiology e Biotechnology**, v. 44, n. 6, p. 955–963, 2017.
- MUHEDIN, D. A. et al. Effect of waste glass powder as partial replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130–145, 2023.
- NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 4. ed. London: Pearson Education, 2001.
- OLIVEIRA, C. O. E. et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria**, v. 23, n. 1, 2018.
- OLIVEIRA, I. R. B. et al. Influence of the addition of glass from long neck bottles in the properties of the reactive powder concrete. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e519111335853, 2022.
- OLIVEIRA, I. R. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazenda Arte, 2000.
- PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 14. ed. São Paulo: Globo, 1995.
- PRESCOTT, L. M.; HARLEY, J. P.; KLEIN, D. A. **Microbiologia**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2008.
- SEIFAN, M.; SAMANI, A. K.; BERENJIAN, A. Bio-concrete: Next generation of self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, p. 2591–2602, 2016.

SETLOW, P. Germination of spores of *Bacillus* species: what we know and do not know. **Journal of Bacteriology**, v. 196, n. 7, p. 1297–1305, 2014.

SHAIKH, F. U. A. Mechanical and durability properties of concrete containing recycled waste glass as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122337, 2021.

SHIVANSHI, S. et al. A study on bacterial self-healing concrete encapsulated in lightweight expanded clay aggregates. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

SORCE, A. R. **Biomíneralização em concretos de alto desempenho**. 2023. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alfenas, 2023.

SOURADEEP, G.; KUA, H. W. Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 12, 2016.

SRIVASTAVA, S.; SIVAPRAKASH, T.; NAGARAJAN, M. Interaction of triphenylmethane dyes with biological systems: Toxicity, binding and cellular effects. **Toxicology in Vitro**, v. 18, n. 6, p. 841–850, 2004.

TAHWIA, A. M. et al. Enhancing sustainability of ultra-high performance concrete utilizing high-volume waste glass powder. **Construction and Building Materials**, v. 17, e01648, 2022.

TAYEH, B. A.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR, H. Effect of recycled glass powder on the mechanical behavior and microstructure of ultra-high-performance concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 50, 104–112, 2022.

TONG, T. et al. Performance improvement of concrete with ultra-fine glass powder as fine aggregate replacement. **Cement and Concrete Composites**, v. 153, 105–126, 2024.

VANDERLEI, R. D. **Materiais Cimentícios: Estrutura e Propriedades**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

WANG, J.; DEWANCKELE, J.; DE BELIE, N.; CNUUDE, V. X-ray computed tomography for monitoring the self-healing of cracks in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 3, p. 349–356, 2012.

WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. A review: self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 571–583, 2012.

YAZICI, H. et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1223–1231, 2009.

ZAHARIA, C.; SUTEU, D.; BORDEANU, N. *Textile wastewater treatment by sorption using organic materials*. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 11, n. 2, p. 493–502, 2012.

ZHANG, J. et al. Microbial-induced carbonate precipitation: A review on influencing factors and applications. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, p. 9974027, 2021.

ZHOU, Y. et al. Sustainable use of ultrafine recycled glass in additive manufactured (3D printed) reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 419, 2024.

ZIDOL, A. et al. Effect of glass powder fineness on the mechanical and durability performance of concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 30, p. 101–279, 2020.

ZHU et al. Processos de biomineralização em materiais de engenharia: mecanismos e aplicações. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 1124–1135, 2015.