

## Artigo Técnico

# Influência de recobrimento da superfície e da adição de fibras de PVA sobre as propriedades da matriz cimentícia

*Influence of Surface Coating and PVA Fiber Addition on the Properties of the Cementitious Matrix*

Vanessa Gabrielle da Silva<sup>a\*</sup>, Indira Teixeira Bessa de Oliveira<sup>b</sup>, Ivone Regina de Oliveira<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratório de Desenvolvimento de Materiais Avançados, Instituto de Pesquisa & Desenvolvimento – Universidade do Vale do Paraíba – São José dos Campos - SP, Brasil.

<sup>b</sup> Instituto de Química de Araraquara – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Araraquara – SP, Brasil.

**Palavras-chave:** matriz cimentícia; fibra polimérica; recobrimento; cimento líquido; durabilidade.

**Keywords:** cementitious matrix; polymeric fibres; coating; liquid cement; Durability.

\* e-mail: vanessa.sgabrielle@gmail.com

## Resumo

A matriz cimentícia, composta por cimento e água, é a base do concreto utilizado na construção civil, adquirindo resistência e solidez por meio do processo de hidratação. Em ambientes agressivos, como nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), esse material está sujeito à biocorrosão, fenômeno induzido por microrganismos que geram ácido sulfúrico, promovendo a formação de fases expansivas como gipsita e etringita, e acelerando a degradação das estruturas. Este estudo investigou o desempenho de uma matriz cimentícia formulada com cimento Portland (CP III) e aditivada com cristalizante, cuja superfície foi tratada com um revestimento à base de cimento de aluminato de cálcio líquido (CAC-I). A proposta visou mitigar a adesão bacteriana de *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* e melhorar a durabilidade do material. Ensaios de resistência à compressão e flexão, porosidade, densidade, capilaridade e microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram conduzidos. Além disso, avaliou-se a incorporação de fibras de álcool polivinílico (PVA) em diferentes teores (1kg/m<sup>3</sup> a 5kg/m<sup>3</sup>, 0,04%-v a 0,20%-v, respectivamente) como reforço, com o objetivo de absorver energia e controlar a propagação de fissuras. Os resultados *in vitro* demonstraram que o revestimento com CAC-I reduziu a viabilidade e adesão microbiana, enquanto a adição de baixos teores de fibras (0,04 e 0,08%-v) proporcionou melhor dispersão na matriz e aumento da resistência mecânica. A análise por MEV confirmou o eficiente ancoramento das fibras, indicando potencial de aplicação em ambientes altamente agressivos.

## Abstract

*The cementitious matrix, composed of cement and water, forms the basis of concrete used in civil construction, gaining strength and solidity through the hydration process. In aggressive environments, such as sewage treatment plant (STP), this material is subject to biocorrosion a phenomenon induced by microorganisms that produce sulfuric acid, leading to the formation of expansive phases like gypsum and ettringite, and accelerating structural degradation. This study investigated the performance of a cementitious matrix formulated with Portland cement (CP III) and enhanced with a crystallizing additive, whose surface was treated with a liquid calcium aluminate cement (CAC-I) coating. The objective was to reduce bacterial adhesion of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* and to improve the material's durability. Compressive and flexural strength tests, porosity, density, capillarity, and scanning electron microscopy (SEM) analyses were performed.*

*Additionally, the incorporation of polyvinyl alcohol (PVA) fibers in varying contents (1kg/m<sup>3</sup> to 5kg/m<sup>3</sup>, 0,04%-v to 0,20%-v, respectively) was evaluated as reinforcement, aiming to absorb energy and control crack propagation. In vitro results demonstrated that the CAC-I coating reduced microbial viability and adhesion, while the addition of lower fiber contents (0,04 e 0,08%-v) resulted in better dispersion within the matrix and increased mechanical strength. SEM analysis confirmed effective fiber anchoring, indicating the material's potential for use in highly aggressive environments.*

## 1 Introdução

Os sistemas cimentícios, uma das ferramentas mais versáteis para a construção civil tem sofrido grandes avanços tecnológicos desde a segunda metade do século XX. A velocidade das construções e a durabilidade dos sistemas podem ser consideradas as forças motrizes dos progressos técnico-científicos, sempre associadas à preocupação com o custo (CHOTOLI *et al.*, 2024).

A busca por aprimoramentos na qualidade e durabilidade dos materiais cimentícios na construção tem gerado avanços significativos na engenharia civil, especialmente no desenvolvimento de composições de matrizes cimentícias constituídas por um ligante hidráulico e água (NEVILLE *et al.*, 2013), cujas características determinam o desempenho do sistema construtivo, sobretudo em ambientes agressivos.

O ligante hidráulico mais utilizado na construção civil é o cimento Portland (PO) produzido pela moagem do clínquer, o qual quando misturado com água forma uma pasta que endurece devido a reações e processos de hidratação. O PO é composto por fases minerais como alita (C<sub>3</sub>S), belita (C<sub>2</sub>S), aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) e ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF), sendo o C<sub>3</sub>S o principal responsável pela resistência inicial do material (ALMEIDA *et al.*, 2021).

Após a hidratação dos compostos do cimento tem-se como resultado a formação do gel de C-S-H, hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub> e a etringita. O C-S-H (silicato de cálcio hidratado) representa de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta totalmente hidratada, sendo responsável por suas principais propriedades. O C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub> (gel de C-S-H) e o hidróxido de cálcio são os produtos da hidratação tanto do C<sub>3</sub>S como do C<sub>2</sub>S. A etringita é resultado da hidratação do C<sub>3</sub>A com o gesso, adicionado na fabricação do cimento (SOUZA *et al.*, 2021).

No entanto, mesmo com uma microestrutura resistente, a matriz cimentícia pode sofrer degradações em ambientes adversos, como aqueles ricos em matéria orgânica. Nessas condições, a corrosão do concreto pode ser intensificada pela ação de microrganismos, que produzem substâncias corrosivas capazes de comprometer suas propriedades físico-químicas, sendo a intensidade do ataque microbiano dependente das espécies presentes e das condições ambientais. Esse processo, conhecido como corrosão induzida por microrganismos (CIM), causa a deterioração progressiva das peças em que se utilizam as matrizes cimentícias em contato com efluentes, reduzindo a vida útil. A atividade microbiana ocorre principalmente em biofilmes aderidos à superfície da matriz, formados por microrganismos envolvidos por materiais poliméricos extracelulares (MPE), cuja composição e espessura variam conforme o fluxo do efluente e a abrasão. Inicialmente, microrganismos aeróbicos colonizam o biofilme, consumindo o oxigênio disponível e criando condições anaeróbicas que favorecem o desenvolvimento de outras espécies. Entre os principais microrganismos envolvidos, destacam-se *Escherichia coli*, uma bactéria gram-negativa e anaeróbia facultativa, comum em águas residuárias e com crescimento ideal a pH 7,2 (HALL-STOODLEY *et al.*, 2023) e *Staphylococcus aureus*, uma bactéria gram-positiva e resistente, presente na pele humana e em alimentos, com crescimento ideal a 37 °C e pH próximo a 7 (BECKER *et al.*, 2021).

Em sistemas com efluentes, bactérias redutoras de sulfato, sob condições aeróbicas, convertem sulfato em sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S). Esse gás, ao se transferir para a fase gasosa, é oxidado por bactérias como *Acidithiobacillus*, (Yan *et al.*, 2021) formando ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), que reage com compostos da matriz cimentícia, formando produtos expansivos como gipsita e etringita, levando à fissuração e à perda de resistência fazendo-se necessária a proteção da matriz cimentícia por meio de recobrimento com cimento líquido e/ou a adição de reforço por meio da adição de fibras.

A prática de reforço de matrizes cimentícias com fibras remonta às antigas civilizações, que empregavam materiais naturais, como palha ou pelos de animais, com o intuito de melhorar a resistência de argamassas e tijolos de barro (FIGUEIREDO *et al.*, 2011). No entanto, foi apenas no século XX que a introdução de fibras poliméricas sintéticas promoveu um avanço significativo nesta tecnologia. Essas fibras atuam como elementos de reforço, absorvendo energia e restringindo a propagação de fissuras, o que resulta no aumento da durabilidade estrutural.

Entre os diversos tipos de fibras poliméricas, as produzidas a partir da resina de álcool polivinílico (PVA) vêm se destacando como alternativa de contribuição, devido às suas propriedades técnicas superiores. As fibras de PVA apresentam elevada resistência à tração e à flexão, boa aderência à matriz cimentícia por ancoragem química, estabilidade

em ambientes alcalinos, alta resistência à radiação ultravioleta, baixo peso específico e notável resistência à corrosão (LI & LEUNG, 1992). Essas características conferem às fibras de PVA um excelente desempenho como agente de reforço em compósitos cimentícios, sendo amplamente utilizadas em soluções de engenharia moderna que demandam durabilidade e desempenho mecânico aprimorado (MONTEIRO *et al.*, 2007).

Com foco em ambientes marinhos, que apresentam características únicas e desafiadoras, as quais afetam significativamente a durabilidade dos materiais de construção, especialmente dos sistemas cimentícios, exigindo soluções e estratégias específicas para garantir seu desempenho e vida útil. Este ambiente é caracterizado por condições severas, como a alta concentração de íons cloreto provenientes da água do mar, presença de umidade elevada, ciclos de molhagem e secagem, além da ação de cargas mecânicas impostas por ondas e correntes marítimas. Esses fatores criam um cenário agressivo que compromete a integridade e a vida útil dos sistemas construtivos, principalmente devido aos processos de degradação da matriz cimentícia (MONTEIRO *et al.*, 2014).

Assim, este trabalho foi dividido em duas partes: a primeira, avaliando o efeito do recobrimento da superfície; a segunda, refere-se à análise da incorporação das fibras de PVA na matriz cimentícia. Uma suspensão com reatividade controlada, à base de cimento de aluminato de cálcio líquido (CAC-L) foi aplicada sobre a superfície da matriz para avaliar seu desempenho como barreira contra a adesão dos microrganismos *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. As amostras foram caracterizadas por meio de ensaios de resistência mecânica à compressão e à flexão, densidade real, porosidade aparente, viabilidade e ensaios de adesão bacteriana por Microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, diferentes teores de fibra de álcool polivinílico (PVA, 0,04 - 0,2%-v) foram adicionados à matriz cimentícia avaliando as propriedades como resistência mecânica à compressão uniaxial, resistência mecânica à flexão, densidade real, porosidade aparente, absorção de água por capilaridade e análise de microestrutura por MEV.

## 2 Procedimento metodológico

O sistema de matriz cimentícia estudado neste trabalho foi um sistema de referência comercial (PO) preparado com cimento Portland (CPIII da Votorantim) e 1%-p de cristalizante (ADMIX da Penetron). A pasta obtida pela adição de água à matriz cimentícia foi vertida em moldes cilíndricos (16 mm de diâmetro x 18 mm de altura), em formato de barras (75 mm de comprimento x 12,5 mm de altura x 12,5 mm de largura), em formato quadrado (20 mm de comprimento x 20 mm de largura x 4 mm de espessura) e em formato de pastilhas (6 mm diâmetro x 3 mm altura) sob uma mesa vibratória.

Após a moldagem, os moldes permaneceram ao ambiente durante 24 horas seguido de desmoldagem das amostras. As amostras foram adicionadas em solução saturada de cal (hidróxido de cálcio) a temperatura ambiente. Após a cura por 28 dias, parte das amostras receberam recobrimento com cimento de aluminato de cálcio líquido (CAC-l) seguindo recomendações do fabricante (Kerneos, Aluminato technologies), sendo denominadas (PO-R), caracterizando a primeira parte do estudo. As amostras, sem e com recobrimento foram caracterizadas por meio de ensaios de resistência mecânica à compressão e à flexão, porosidade aparente, densidade real, viabilidade e ensaios de adesão dos microrganismos *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* por Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Na segunda parte deste estudo, a matriz recebeu a incorporação de fibras de PVA (Kuraray) em proporções de 0,04%-v a 0,20%-v. As fibras foram incorporadas ao pó da matriz cimentícia referência seguido por um processo de homogeneização à seco, seguido da adição de água, com moldagem direta em moldes de diferentes formatos e cura por 28 dias, sendo a cura em solução saturada de cal a temperatura ambiente.

Após o processo de cura, as amostras foram caracterizadas por meio de ensaios de resistência mecânica à compressão uniaxial, resistência mecânica à flexão, porosidade aparente, densidade real, absorção de água por capilaridade e análise de microestrutura por MEV.

Todos os resultados foram submetidos à análise de ANOVA com valor  $p \leq 0,05$  com confiabilidade de 95%.

## 2.1 Ensaios de resistência mecânica à compressão uniaxial e à flexão

O ensaio mecânico de resistência à compressão uniaxial foi realizado em amostras em formato cilíndrico (16 mm de diâmetro x 18 mm de altura) usando uma máquina de ensaios mecânicos DL 10000, da marca EMIC, obedecendo à norma ABNT NBR 7215 de 1996 com uma velocidade de 0,15 mm/min. A tensão de ruptura  $\sigma_r$  (MPa) foi calculada de acordo com a **EQUAÇÃO 1**:

$$\sigma = \frac{4P}{\pi D^2} \quad (1)$$

Onde:

$P$  = carga máxima exercida em N

$D$  = diâmetro médio em mm

Quanto ao ensaio mecânico de resistência à flexão foi realizado em amostras em formato de barras retangulares (75 mm de comprimento x 12,5 mm de altura x 12,5 mm de largura), obedecendo à norma ASTM C674 de 2006 com a velocidade de 0,5 mm/min, com a utilização da mesma máquina. Para o cálculo da tensão de ruptura ( $\sigma_r$ ) foi empregada a **EQUAÇÃO 2**:

$$\sigma_r = \frac{3Fl}{2bd^2} \quad (2)$$

Onde:

$F$  = força máxima da fratura em N

$l$  = distância entre os apoios em mm

$d$  = largura em mm

$b$  = espessura em mm

## 2.2 Ensaio de porosidade aparente e densidade real

O ensaio de porosidade aparente foi realizado em amostras em formato cilíndrico (16 mm de diâmetro x 18 mm de altura). Estas foram mantidas em 110 °C em estufa por 24 horas, sendo pesadas a seco ( $M_s$ ) e após 1 hora de imersão em querosene sob vácuo, as amostras foram novamente pesadas e imersas no líquido ( $M_l$ ) e úmidas ( $M_u$ ), em triplicata. Nesse ensaio foi usado o princípio de Arquimedes, de acordo com a ABNT NBR 6220 de 2011. Assim, a porosidade aparente é calculada pela massa de líquido retida em seus poros abertos como apresentado pela **EQUAÇÃO 3**:

$$PA = \frac{(M_u - M_s)}{(M_u - M_l)} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

$M_u$ = massa úmida em g

$M_s$ = massa a seco em g

$M_i$ = massa imersa em g

## 2.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados de acordo com a norma NBR 9779 (ABNT, 2012): após determinação da massa seca, as amostras em formato cilíndrico (16 mm de diâmetro x 18 mm de altura) foram inseridas em um recipiente, que era preenchido com água até o nível estar ( $5 \pm 1$ ) mm acima de sua face inferior. Em intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 h (contadas a partir do contato com a água) foram determinadas as massas saturadas. Para cada um desses intervalos, foi calculado o coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $C$ , em  $\text{g}/\text{cm}^2$ ), por meio da EQUAÇÃO 4.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{A} \quad (4)$$

Onde:

$m_{sat}$  = massa saturadas em g

$m_s$  = massa seca em g

$A$  = área da seção transversal em  $\text{cm}^2$

## 2.4 Ensaio acelerado de ataque de cloreto

O programa experimental considerou a execução do ensaio acelerado com cloreto de sódio, cujo intuito é simular a degradação da matriz cimentícia após o contato com o ambiente que simula o ambiente marinho. Esse ensaio consistiu na imersão parcial dos CDP's cilíndricos (16 mm de diâmetro x 18 mm de altura), em solução de cloreto de sódio 3%, devido a sua proximidade com a concentração salina média dos mares e períodos de secagem. Os ciclos e os períodos de imersão/secagem foram de 3 dias para imersão e de 4 dias para secagem. É válido ressaltar que a secagem foi realizada em estufa a  $50^\circ\text{C}$ . Esse ensaio está de acordo com a norma ASTM C1760 de 2021.

## 2.5 Ensaio de viabilidade e de adesão de microrganismo *E.coli* e *S.aureus*

Para os ensaios de viabilidade de adesão de microrganismos, foram utilizadas as amostras em formato de pastilhas. As cepas usadas foram de referência ATCC – “American Type Culture Collection” de *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538) e *Escherichia coli* (ATCC 25922)

Primeiramente, as cepas foram cultivadas em meio ágar não seletivo para crescimento das colônias. Após crescimento das mesmas, estas foram alçadas e suspensas em caldo Luria Bertani (LB) que é tipicamente composto por triptona (10 g/L), extrato de levedura (5 g/L) e cloreto de sódio (5 g/L) em água, resultando em um pH final de cerca de 7,0 para quantificação com o auxílio de espectrofotômetro 50 Bio da Cary, sendo realizadas as leituras com comprimentos de onda de 490 nm e 590 nm, referentes às cepas *S. aureus* e *E. coli*, respectivamente. Posteriormente, utilizou-se a solução tampão para obtenção de uma absorvância correspondente a  $1.10^6$  células. mL<sup>-1</sup>, sendo transferido 20 µL para uma placa de 24 poços. Em seguida, as pastilhas foram inseridas nos poços e submetidas a agitação constante em incubadora (6420 Touch, Thoth Equipamentos) a 37 °C por 24 horas. Após o período de incubação, o meio de cada grupo experimental foi transferido para placa de 96 poços e realizada a leitura de densidade óptica com auxílio de espectrofotômetro (DASGIP OD4) para os ensaios de viabilidade. Os poços contendo somente meio e cultura foram usados como controle.

Após os ensaios de viabilidade as pastilhas foram lavadas com diferentes concentrações de 10% a 90% gradualmente de etanol para fixação dos microrganismos aderidos e, posteriormente, foram avaliadas as imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (EVO-MA10, Zeiss).

## 3 Resultados e discussão

### 3.1 Influência de recobrimento da superfície sobre as propriedades da matriz cimentícia

Cada etapa do processo de produção das matrizes cimentícias tem um papel importante nas propriedades do material após a hidratação, e as fases de moldagem e secagem merecem destaque por sua influência direta na estrutura da matriz. Na **FIGURA 1**, são apresentados os resultados da caracterização físico-química das amostras de cimento

Portland (PO), incluindo resistência à flexão e à compressão, porosidade aparente e densidade, antes e depois da aplicação de um recobrimento com cimento líquido (PO-R).

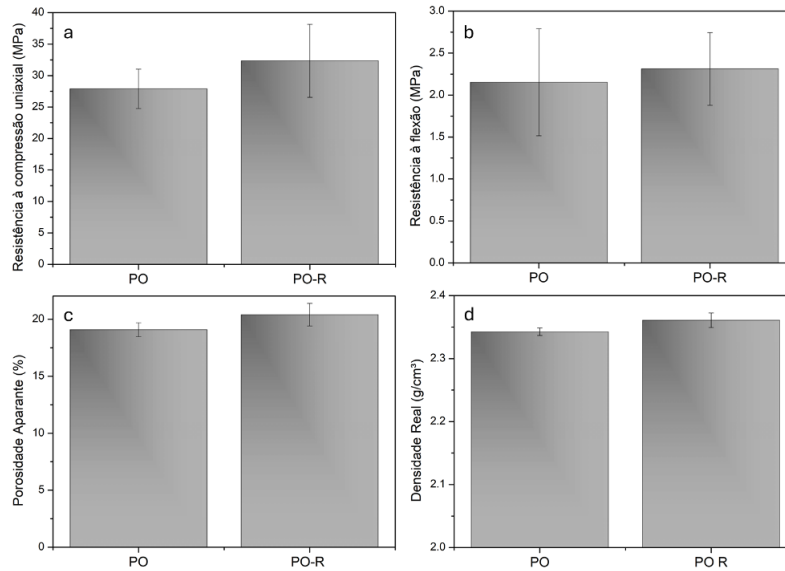
O cimento líquido utilizado nesse recobrimento contém sílica em sua composição, conforme informado pelo fabricante. Esse detalhe é particularmente interessante, já que a sílica desempenha um papel essencial em matrizes cimentícias: ela atua como um ligante eficiente, especialmente na presença de alumínio (Al) e oxigênio (O), formando ligações químicas rápidas e estáveis. Na prática, isso significa que o material seca de forma mais eficiente e tende a apresentar menor porosidade ainda na fase inicial de cura.

Além disso, a sílica pode contribuir com as reações pozolânicas, promovendo a formação de compostos que ajudam a tornar a microestrutura mais densa e resistente. Esses efeitos explicam, em grande parte, o melhor desempenho observado nas amostras recobertas, tanto do ponto de vista mecânico quanto estrutural. Dessa forma, o uso do cimento líquido com sílica não só melhora a interface da matriz, como também traz benefícios visíveis na qualidade e durabilidade do material final.

As amostras recobertas com cimento líquido apresentaram propriedades mecânicas superiores em comparação àquelas sem recobrimento (**Figuras 1a e 1b**). O cimento líquido demonstrou boa aderência à matriz cimentícia, sendo compatível com a sua superfície e promovendo uma interface coesa. Essa compatibilidade contribuiu para o melhor desempenho mecânico observado, indicando o potencial do revestimento como agente de reforço estrutural.

A caracterização física das matrizes cimentícias é fundamental para a compreensão do seu comportamento frente a agentes agressivos, especialmente no que diz respeito à durabilidade, resistência mecânica e permeabilidade. Dentre os parâmetros analisados, destacam-se a porosidade aparente (**FIGURA 1c**) e a densidade real (**FIGURA 1d**), que fornecem informações complementares sobre a estrutura interna do material.

**Figura 1 – Ensaio de resistência mecânica à compressão uniaxial (a), à flexão (b), porosidade aparente (c) e densidade real (d).**



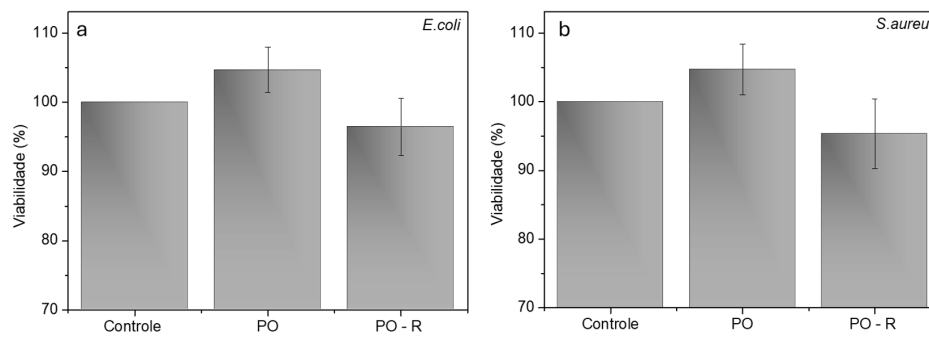
**Fonte:** elaborado pelas autoras

A densidade real, definida como a razão entre a massa da fase sólida e o volume efetivamente ocupado por essa fase, desconsiderando qualquer tipo de porosidade, inclusive microscópica, foi determinada por técnicas baseadas em deslocamento de gás. Os resultados indicaram que as amostras com recobrimento apresentaram densidade real superior em relação às amostras não recobertas. Esse aumento pode ser atribuído à redução da porosidade superficial e ao preenchimento de micro poros possibilitados pelo cimento líquido, que atua como um selante. Esse preenchimento favorece o empacotamento das partículas na interface e reduz a permeabilidade, resultando em uma estrutura mais densa e homogênea, com potencial incremento na durabilidade da matriz.

Entretanto, de forma aparentemente contraditória, observou-se um aumento da porosidade aparente nas amostras com recobrimento, em comparação as sem recobrimento. Esse comportamento pode estar associado a múltiplos fatores, como a formação de microfissuras internas durante o processo de aplicação e secagem do revestimento, ou ainda a uma infiltração parcial do cimento líquido. Embora o recobrimento promova preenchimento superficial, ele pode também induzir redistribuições de tensão e modificações na estrutura interna, aumentando a conectividade entre os poros. Esses resultados indicam que a influência do cimento líquido sobre a microestrutura da matriz cimentícia é complexa e multifacetada, demandando investigações adicionais, como análises microscópicas ou ensaios de permeabilidade, para uma compreensão mais abrangente de seus efeitos.

Com auxílio de espectrofotômetro 50 Bio da Cary, foram realizadas as leituras com comprimentos de onda de 590 nm e 490 nm, referentes às cepas *E.coli* e *S.aureus*, respectivamente (**FIGURA 2**). Foi analisada a viabilidade porcentual dos microrganismos após o contato com a amostra de matriz cimentícia (PO e PO-R). Considerando o microrganismo *E.coli* (100%), gram-negativa em contato com as amostras de PO ocorreu um aumento de 4,69% enquanto em contato com PO-R teve um decréscimo de 3,33%. Com a utilização do microrganismo *S.aureus* (100%) também ocorreu o aumento de 4,74% e o decréscimo 4,7%.

**Figura 2 – Viabilidade da *E.coli* (a) e da *S.aureus* (b) em contato com a matriz cimentícia**

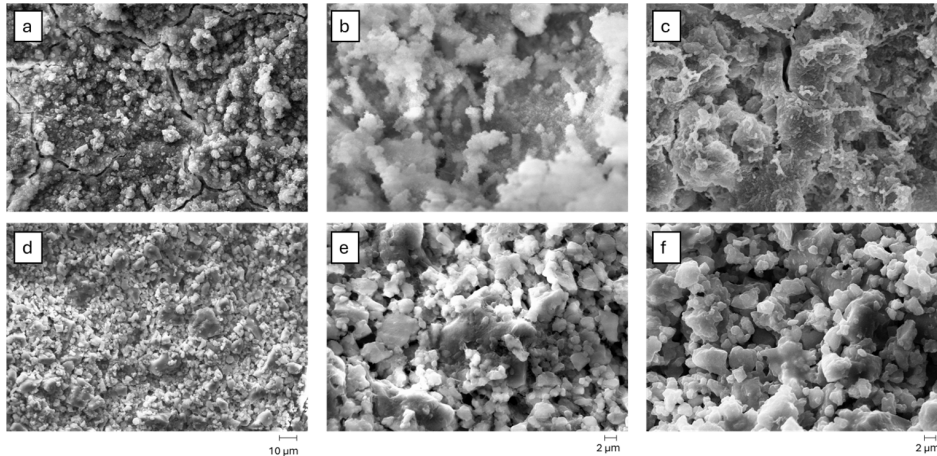


**Fonte: elaborado pelas autoras**

Dessa forma, a matriz cimentícia com o recobrimento mostrou-se capaz de inibir a adesão dos microrganismos e com a atividade microbiana principalmente acerca da *S.aureus*. Como anteriormente citado, o ácido sulfúrico gerado pela ação de microrganismos ataca a superfície da matriz reagindo com o hidróxido de cálcio e com o silicato de cálcio hidratado formado nas reações de hidratação do cimento Portland presente na matriz cimentícia de referência. Por outro lado, a matriz PO-R mostra a ausência dessas fases e inibe a degradação da estrutura pelo ataque de microrganismos.

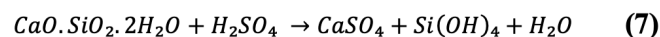
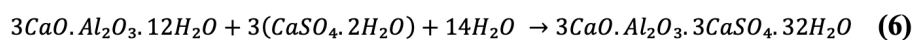
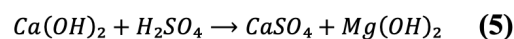
Para uma análise óptica, foram utilizadas microscopias eletrônicas de varredura (MEV) como mostra a **FIGURA 3**. Essa análise evidenciou uma maior adesão dos microrganismos na superfície das amostras, tanto no caso das bactérias gram-positivas quanto nas gram-negativas, dificultando a identificação do substrato, em comparação à matriz que foi revestida de cimento líquido que apresentou uma diminuição significativa em ambos experimentos, observando-se a camada do substrato.

Figura 3– Microscopias eletrônicas de varredura das amostras PO (a,b,c) e PO-R (d,e,f), em meio Luria Bertani, após contato com *E.coli*, e após contato com *S.aureus* respectivamente



Fonte: elaborado pelas autoras

As composições revestidas com CAC líquido mostraram uma significativa resistência à adesão de microrganismos na superfície da matriz cimentícia. Observou-se que as bactérias apresentaram menor viabilidade em contato com o CAC líquido principalmente a *E.coli*. A degradação do sistema com cimento PO decorre em consequência da diminuição do pH da superfície do material, que reagiu com o pH do meio. Nesse caso, a matriz cimentícia reage formando gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) como composto intermediário e a etringita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) como produto final da reação. A pasta de cimento começa a perder resistência porque o cálcio para promover a formação da etringita, advém da descalcificação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , de acordo com as equações a seguir. As fissuras ocorrem pela pressão expansiva da etringita, de dentro para fora.

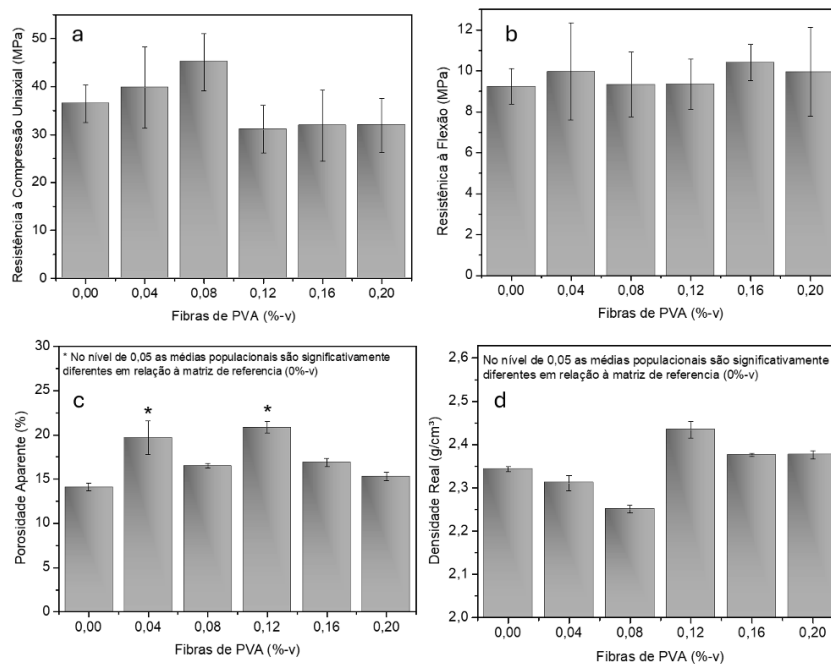


### 3.2 Influência da adição de fibras de PVA sobre as propriedades da matriz cimentícia

Cada etapa do processo de produção das matrizes cimentícias tem um papel importante nas propriedades finais do material. As fases de moldagem e secagem merecem destaque por sua influência direta na estrutura da matriz. A FIGURA 4 apresenta os resultados

obtidos nos diferentes ensaios físicos e mecânicos realizados. Em relação a resistência à compressão na **FIGURA 4a** verifica-se que a incorporação de fibras de PVA em teores de 0,04%-v e 0,08%-v resultou em desempenho mecânico superior à amostra de referência, indicando um efeito positivo da adição de fibras nesses teores. Contudo, observou-se que um aumento maior do teor de fibras compromete as propriedades mecânicas do compósito, possivelmente devido à aglomeração das fibras e à sua má dispersão na matriz cimentícia, o que prejudica a homogeneidade do material. No ensaio de flexão na **FIGURA 4b**, os resultados não demonstraram variações significativas entre as amostras, não sendo identificado um padrão estatisticamente relevante que permitisse estabelecer conclusões claras sobre o efeito da incorporação de fibras nesse parâmetro.

**Figura 4 – Ensaio de resistência mecânica à compressão uniaxial (a), à flexão (b), porosidade aparente (c) e densidade real (d) com adição de Fibras de PVA.**



**Fonte: elaborado pelas autoras**

Quanto à porosidade aparente apresentada na **FIGURA 4c**, constatou-se um aumento dos valores nas composições com 0,04%-v e 0,12%-v de PVA, sugerindo que a presença de fibras favorece a formação de vazios na matriz. Por outro lado, nos ensaios de densidade real na **FIGURA 4d**, observou-se uma redução nos valores para as amostras com 0,04%-v e 0,08%-v de PVA, em comparação com a amostra de referência. Esse comportamento é coerente com a literatura, uma vez que a redução da densidade real está associada ao

aumento da porosidade do material, refletindo uma maior fração de vazios incorporados na matriz cimentícia. Em particular, na amostra com 0,04%-v, a correlação entre o aumento da porosidade e a consequente redução da densidade real reforça a tendência de que a adição de fibras, ao alterar a microestrutura do compósito, aumenta o volume de vazios e reduz a compactação da matriz.

No ensaio de absorção de água por capilaridade na **FIGURA 5a**, foi identificado um aumento na taxa de absorção nas amostras com incorporação de fibras de PVA, especialmente ao longo das primeiras horas de ensaio. Esse comportamento é consistente com os resultados descritos por (Bentz *et al.* – 2001), que apontam que a presença de fibras poliméricas pode modificar a estrutura porosa da matriz, promovendo maior conectividade entre poros capilares e a formação de microfissuras adjacentes à interface matriz-fibra. Isso resulta em um aumento da permeabilidade, favorecendo o transporte de fluidos por ação capilar.

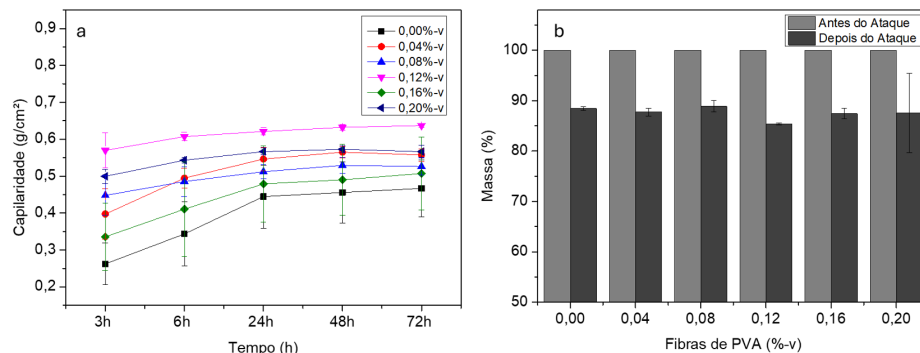
O mecanismo envolvido nesse processo é governado pelas forças de tensão superficial e adesão entre a água e a parede dos poros, sendo descrito por Washburn que estabelece uma relação direta entre a altura da coluna líquida absorvida e a raiz quadrada do tempo. Em materiais cimentícios, a cinética desse transporte está diretamente relacionada à porosidade, ao diâmetro dos poros e à presença de zonas de transição interfacial mais porosas ao redor das fibras (MONTEIRO *et al.*, 2014). Portanto, a maior absorção observada pode ser atribuída à estrutura porosa mais conectada promovida pelas fibras, o que apesar de favorecer a absorção inicial, pode comprometer a durabilidade a longo prazo se não houver uma barreira à progressão de agentes agressivos.

No ensaio de ataque de cloretos acelerado na **FIGURA 5b**, conduzido por imersão parcial em solução de NaCl a 3% por 3 dias, foi verificado que a amostra com 0,04%-v de PVA apresentou a menor perda de massa (11%), em comparação à amostra de referência e às demais formulações, que apresentaram uma média de perda de 12,6%. O transporte de íons cloreto na matriz ocorre predominantemente por difusão e permeação capilar, sendo ativado em regiões com maior porosidade e conectividade dos poros. Contudo, em baixos teores de fibras, é possível que a dispersão mais homogênea contribua para a formação de uma rede de microfissuras menos conectada, reduzindo a profundidade de penetração dos cloretos (SARASWATHY *et al.*, 2007).

Adicionalmente, a interface matriz-fibra pode atuar como uma barreira à mobilidade iônica, em razão da formação de zonas de transição com distintas características de empacotamento e estados de hidratação. Evidências reportadas por Andrade (1993), e atualizadas por Henriques (2023), indicam que a presença de fases de menor permeabilidade contribui para a mitigação da penetração de íons agressivos, uma vez que dificulta a continuidade

dos trajetos preferenciais de difusão no interior da matriz cimentícia. Assim, embora a absorção inicial de água por capilaridade seja favorecida, o mecanismo de ataque por cloretos depende também da microestrutura interna e da natureza da interação entre os poros, e não apenas da porosidade total. Isso explica a melhor resistência da amostra com (0,08%-v) de fibras, sugerindo que há um limite ótimo de incorporação para equilibrar permeabilidade e durabilidade.

**Figura 5 – Ensaios de Capilaridade (a), Ataque de cloreto acelerado (b), com adição de Fibras de PVA.**



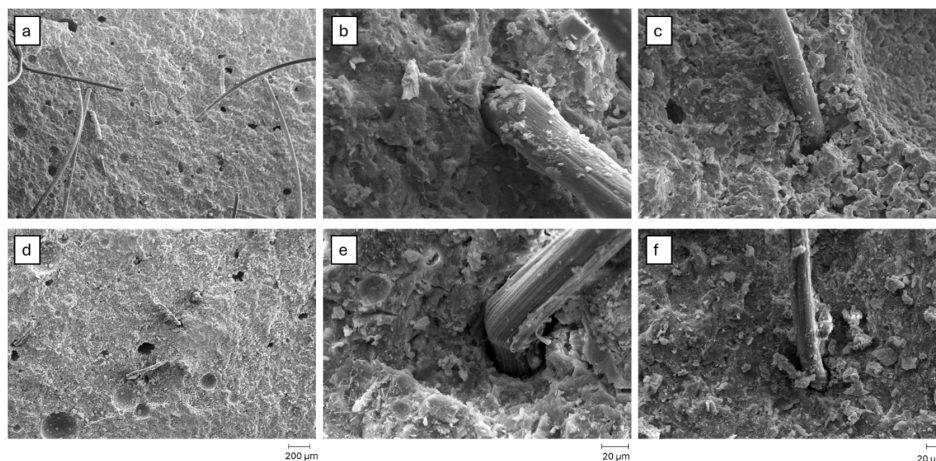
**Fonte: elaborado pelas autoras**

Por conseguinte, mesmo diante do aumento na capilaridade ao longo do tempo, a resistência ao ataque de cloretos pode ser mantida ou até melhorada, desde que o teor de PVA seja controlado, evidenciando a complexa relação entre permeabilidade, transporte de água e resistência química em compósitos cimentícios.

Após a realização do ensaio de resistência mecânica, as amostras fraturadas foram submetidas a um processo de secagem em estufa a 50 °C. Em seguida, essas amostras foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme ilustrado na **FIGURA 6**, com o objetivo de caracterizar a morfologia da fratura e avaliar a interface matriz-fibra.

Nas **Figuras 6a e 6d**, obtidas com aumento de 95x, é possível observar regiões com vazios alongados que indicam a possível extração de fibras de PVA, sugerindo baixa aderência entre a matriz cimentícia e o reforço polimérico em determinadas áreas. Ainda nessas imagens, nota-se a presença de fibras seccionadas transversalmente, o que indica ruptura por cisalhamento interno, e não tração, comprovando que o rompimento ocorreu na própria fibra e não na interface. Esse comportamento sugere que, em alguns pontos, a resistência de ligação na interface matriz-fibra supera a resistência mecânica do próprio reforço, caracterizando o reforço como o elemento estrutural mais frágil do compósito.

FIGURA 6 – Microscopias eletrônicas de varredura das amostras após ensaio de Flexão (a,b,c) e amostras após o ensaio de compressão uniaxial (d,e,f), com adição de Fibras de PVA.



Fonte: elaborado pelas autoras

Nas **Figuras 6b, 6e**, com aumento de 1300x, é possível identificar uma camada contínua de matriz aderida à superfície da fibra, mostrando boa compatibilidade química entre os componentes. Essa aderência superficial reforça a suposição de que há interações eficazes entre a matriz cimentícia e o PVA. No entanto, nota-se também a presença de um espaço vazio cercado parcialmente a fibra, indicando que, apesar da aderência pontual, podem ocorrer regiões de descontinuidade que comprometam a transferência eficiente de tensões.

## 4 Conclusões

O recobrimento das matrizes cimentícias com cimento líquido contendo sílica promoveu melhorias significativas em suas propriedades físico-químicas, estruturais e biológicas. O aumento da resistência mecânica e da densidade real observados nas amostras recobertas está associado ao preenchimento superficial e ao fechamento dos micro poros pela fase cimentícia líquida, favorecendo o empacotamento das partículas e a conexão interfacial. Apesar do aumento da porosidade aparente, possivelmente ligado a efeitos secundários da aplicação do revestimento, como tensões internas e redistribuição de poros, a estrutura apresentou maior homogeneidade e potencial de durabilidade. Do ponto de vista

microbiológico, as amostras recobertas apresentaram menor adesão de microrganismos e diminuição da atividade antimicrobiana, comprovando a eficácia do recobrimento como estratégia de proteção superficial.

O reforço com fibras de PVA em matrizes cimentícias impacta significativamente suas propriedades mecânicas, físicas e microestruturais. A incorporação dos teores (0,04%-v a 0,08%-v) promoveu ganhos na resistência à compressão, confirmando uma atuação ativa das fibras na redistribuição de tensões e no controle de microfissuras. Entretanto, teores mais elevados resultaram em perda de performance, possivelmente devido à agrupamento de fibras e à formação de vazios, afetando a coesão da matriz. Ensaios de capilaridade mostraram que a presença das fibras aumenta a conectividade porosa, elevando a absorção inicial de água por ação capilar. Apesar disso, o comportamento frente ao ataque acelerado por cloretos revelou que baixos teores de PVA (0,08%-v) favorecem a resistência química, reduzindo a perda de massa e indicando uma barreira eficaz à penetração iônica. A análise por MEV mostrou uma boa adesão da matriz à superfície das fibras e, em muitos casos, ruptura do próprio reforço, o que sugere que a interface matriz-fibra é robusta e quimicamente compatível. No entanto, também foram observadas regiões com descontinuidades e vazios, indicando que o sucesso do reforço depende fortemente da homogeneidade na dispersão e do teor de fibras.

## 5 Agradecimentos

À Universidade do Vale do Paraíba pelo suporte e infraestrutura e ao PIBIC-CNPq pelo apoio financeiro, permitindo a elaboração deste projeto.

## 6 Referências

CHOTOLI, Fabiano Ferreira. **Construções de concreto na era digital**. (Editorial). *Concreto e Construções*, v. 52, n.114, p.5-7, abr.jun., 2024.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ALMEIDA, F. J. **Estudo da decomposição da alita em cimentos Portland brasileiros**. *Revista Matéria*, v. 26, e12678, 2021.

SOUZA, L. M. **Comportamento reológico de concretos autoadensáveis produzidos no Brasil**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 14, n. 1, p. 123–134, 2021.

HALL-STOODLEY, L. *et al.* **Bacterial biofilms**: from the natural environment to infectious diseases. Nature Reviews Microbiology, v. 21, 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

BECKER, K. **Emerging resistance in Staphylococcus aureus**: diagnostics and surveillance. Frontiers in Microbiology, v. 12, 2021.

YAN, L. **Advances in testing methods for microbially induced corrosion**. Construction and Building Materials, v. 278, 2021.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BOLDMAN, P.; LATZ, M. **Ceramic membranes and their application in food and beverage processing**. Filtration & Separation, v. 37, p. 36-38, 2000. Apud SCHNEIDER, R. P.; TSUTYA, M. Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso. São Paulo: ABES, 2001

MOURA, C. A. M.; RESENDE, J. A. L. C.; SOUZA, K. C. **Caracterização de pastas de cimento Portland com adição de sílica visando a imobilização de Cr(VI)**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Barra do Garças, MT, 2023.

10.29327/2774886.9.29-4

