CAPÍTULO 52 · Parte III · Infraestrutura e projetos complementares
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/j78wv271
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/6f183k23

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA INCORPORAÇÃO DE ZnO E TiO_2 NA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE EM ARGAMASSA DE CIMENTO BRANCO

Ramon Mendonça Teles[1]*, Eduarda Novello[1]; Bruna Gabriela Schuster[1], Kim Lisbôa Daudt Maus[1], Leticia Lange[1], Alexandre Silva de Vargas [2] e Daiana Cristina Metz Arnold[1]
*Autor de contato: 0151420@feevale.br

[1] Departamento de Engenharia Civil, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, Brasil
[2] Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil

RESUMO

A argamassa autolimpante tem sido desenvolvida com a incorporação de fotocatalisadores capazes de promover, sob incidência de luz, a autodegradação de sujidades e microrganismos. O uso de Dióxido de Titânio (TiO_2) e Óxido de Zinco (ZnO) em argamassas é amplamente investigado devido ao baixo nível de toxicidade e aos resultados promissores relacionados à autolimpeza por fotocatálise, além do potencial de modificar a percolação de água na matriz, contribuindo para a redução de manifestações patológicas associadas à umidade. Assim, o objetivo deste trabalho foi incorporar TiO_2 e ZnO em uma argamassa de revestimento branca e avaliar a absorção de água por capilaridade. Foram estudados traços de argamassa industrializada contendo adições de TiO_2 P25 e ZnO nos teores de 0, 1, 2 e 3% em relação à massa da argamassa. Os resultados indicaram aumento da absorção capilar nas formulações com TiO_2, com incremento máximo de aproximadamente 209% para o teor de 3%, enquanto as argamassas com ZnO apresentaram redução da absorção, alcançando diminuição de cerca de 89% no teor de 3%. Conclui-se que o ZnO mostrou-se mais favorável para reduzir a absorção de água, podendo contribuir para a mitigação de manifestações patológicas, enquanto o TiO_2 demanda maior controle de dispersão ou aplicação superficial para conciliar desempenho autolimpante e durabilidade.
Palavras-chave: argamassa autolimpante; fotocatálise, revestimento, poros capilares; manifestações patológicas.

ABSTRACT

Self-cleaning mortar has been developed with the incorporation of photocatalysts capable of promoting, under light exposure, the self-degradation of dirt and microorganisms. The use of Titanium Dioxide (TiO_2) and Zinc Oxide (ZnO) in mortars is widely investigated due to their low toxicity and promising results related to self-cleaning by photocatalysis, in addition to the potential to modify water percolation in the matrix, contributing to the reduction of pathological manifestations associated with humidity. Thus, the objective of this work was to incorporate TiO_2

and ZnO into a white coating mortar and evaluate water absorption by capillarity. Mixtures of industrialized mortar containing additions of TiO_2 P25 and ZnO at levels of 0, 1, 2, and 3% relative to the mass of the mortar were studied. The results indicated increased capillary absorption in formulations with TiO_2, with a maximum increase of approximately 209% at a 3% content, while mortars with ZnO showed reduced absorption, reaching a decrease of about 89% at a 3% content. It is concluded that ZnO proved more favorable for reducing water absorption, potentially contributing to the mitigation of pathological manifestations, while TiO_2 requires greater control of dispersion or surface application to reconcile self-cleaning performance and durability.
Keywords: self-cleaning mortar; photocatalysis; coating, capillary pores; pathological manifestations.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por materiais de construção mais duráveis, funcionais e sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de soluções inovadoras no campo das argamassas de revestimento. Nesse contexto, destacam-se as argamassas autolimpantes, que incorporam materiais fotocatalíticos capazes de promover a degradação de compostos orgânicos e a redução de sujidades superficiais quando expostos à radiação luminosa. Essa tecnologia surge como alternativa promissora para minimizar a degradação estética e funcional das fachadas, especialmente em ambientes urbanos sujeitos à poluição atmosférica (BEHLING *et al*., 2025; JIANG *et al.,* 2025).
Dentre os materiais fotocatalíticos mais utilizados, o dióxido de titânio (TiO_2) e o óxido de zinco (ZnO) têm recebido destaque devido à sua elevada atividade fotocatalítica, estabilidade química e baixo nível de toxicidade. Quando incorporados em matrizes cimentícias, esses compostos atuam na geração de espécies reativas capazes de oxidar poluentes e compostos orgânicos, contribuindo para o efeito autolimpante das superfícies (KHAN et al., 2020; NAM et al., 2019). Além disso, tais materiais podem influenciar propriedades físicas da argamassa, como porosidade, microestrutura e interação com a água.
A modificação da microestrutura da argamassa decorrente da incorporação de partículas finas, como o TiO_2 e o ZnO, pode impactar diretamente o comportamento de transporte de fluidos no material. Em particular, a absorção de água por capilaridade é um parâmetro fundamental para avaliar a durabilidade de revestimentos, uma vez que está diretamente relacionada à penetração de umidade, ao desenvolvimento de manifestações patológicas e à degradação ao longo do tempo. Alterações na distribuição e conectividade dos poros podem resultar tanto na redução quanto no aumento da absorção capilar, dependendo da natureza e do teor das adições incorporadas (PALANISAMY *et al*., 2023; PEREIRA LESSA *et al*., 2025).
Estudo de Pozo-Antonio; Dionísio (2017) avaliou a autolimpeza de crostas negras em revestimentos argamassados formadas pela deposição de fuligem real de motores a diesel, uma manifestação comum em ambientes urbanos que compromete a estética e contribui para a degradação das fachadas. Os resultados indicaram que a incorporação de TiO_2 promoveu apenas uma degradação parcial da matéria orgânica, mais evidente em maiores teores e em argamassas à base de cal, não sendo suficiente para remover completamente as crostas após 30 dias de exposição, evidenciando limitações da fotocatálise nesta aplicação.
Nesse sentido, a utilização de argamassa branca como matriz base potencializa os efeitos fotocatalíticos dos materiais incorporados, devido à sua maior refletância e menor interferência de pigmentos, favorecendo a ativação dos semicondutores. No entanto, a introdução de TiO_2 e ZnO pode também alterar propriedades relacionadas à absorção de água, seja pela atuação como material de preenchimento de vazios (efeito filler), seja pela possibilidade de aglomeração de partículas, o que pode gerar heterogeneidades na matriz (DOĞAN *et al*., 2021; ZHONG *et al*., 2022).

Dessa forma, torna-se essencial avaliar não apenas o desempenho autolimpante dessas argamassas, mas também os impactos nas propriedades físicas, em especial na absorção de água por capilaridade (XIMENES *et al*., 2023). A compreensão desse comportamento é fundamental para garantir que os benefícios associados à fotocatálise não comprometam a durabilidade e o desempenho do revestimento ao longo de sua vida útil.
Assim, o presente estudo tem como objetivo investigar a influência da incorporação de TiO_2 e ZnO em diferentes teores na absorção de água por capilaridade de argamassas de revestimento branco, contribuindo para o desenvolvimento de materiais cimentícios multifuncionais que aliem desempenho autolimpante e durabilidade.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

Para a condução do programa experimental, foram empregados como materiais uma argamassa de revestimento industrializada à base de cimento branco, com propriedades impermeáveis e indicada para uso em ambientes internos e externos, água, bem como os agentes fotocatalíticos dióxido de titânio P-25 e óxido de zinco de origem comercial.

2.2 Métodos

As argamassas foram preparadas seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 16541. A relação entre material seco e água adotada foi de 3,086 para 1, conforme recomendação do fabricante. A incorporação do TiO_2 foi realizada em diferentes teores, correspondentes a 0% para a amostra de referência, 1%, 2% e 3% em relação à massa do material.
A absorção de água por capilaridade, aos 28 dias de cura, foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 15259. A Figura 1 ilustra os corpos de prova (CP’s) durante o ensaio, procedimento em que foram pesados os CP’s em função do tempo.

Figura 1 – Imagens dos corpos de prova durante o ensaio de



Fonte: os autores.

A determinação da área superficial específica dos fotocatalisadores dióxido de titânio P25, óxido de zinco e da argamassa branca fo realizada por meio da técnica de adsorção de gases, utilizando o método de Brunauer-Emmett-Teller (BET), com nitrogênio como gás adsorvente. As amostras foram previamente submetidas a um processo de desgaseificação a 150 °C por 20 horas, com o

objetivo de remover impurezas e umidade adsorvida, garantindo maior confiabilidade nos resultados obtidos.
As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram ensaiadas em um microscópio da marca Jeol, modelo JSM-6510LV, que possibilita a análise da microestrutura da amostra em diferentes ampliações, com tensão de aceleração de 10kV.

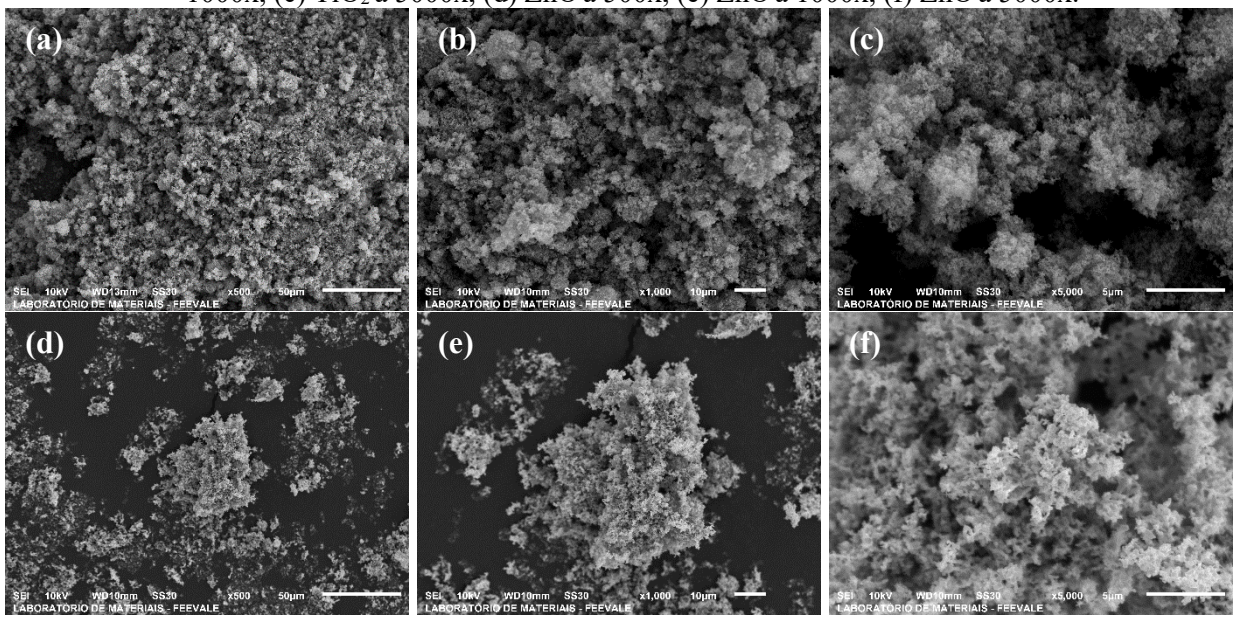
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a discussão dos resultados nesta seção, serão inicialmente apresentadas as caracterizações dos fotocatalisadores. Em seguida, serão expostos os resultados de absorção de água por capilaridade, a fim de analisar a possível correlação entre essas propriedades e seus impactos.

2.1 Caracterização dos fotocatalisadores

A Figura 2 apresenta a comparação das micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura para os materiais TiO_2 e ZnO em três níveis de ampliação. As imagens permitem observar as diferenças morfológicas entre os dois materiais, evidenciando aspectos como forma, distribuição e grau de aglomeração das partículas.

Figura 2 – Comparação de imagens MEV para TiO_2 e ZnO em 3 ampliações: (a) TiO_2 a 500x, (b) TiO_2 a 1000x, (c) TiO_2 a 5000x, (d) ZnO a 500x, (e) ZnO a 1000x, (f) ZnO a 5000x.



Fonte: os autores.

Observa-se que o TiO_2 apresenta uma estrutura mais altamente aglomerada, com formação de aglomerados densos e pouco definidos, dificultando a distinção de partículas individuais. Essa característica indica forte interação entre as partículas e elevada energia superficial, resultando em uma textura mais compacta e irregular. Em contraste, o ZnO apresenta uma morfologia mais aberta e organizada, com aglomerados menos densos e maior definição das partículas, permitindo identificar estruturas mais individualizadas e contornos mais nítidos. Em trabalho de Pereira Lessa *et al.* (2025) encontra-se imagens de MEV semelhantes para os mesmos fotocatalisadores estudados da mesma forma em trabalho de Teles *et al.* (2025) e Teles; Arnold. (2025).

A Tabela 1 apresenta os resultados de área superficial específica obtidos por análise BET para as amostras de TiO_2 e ZnO, permitindo a comparação direta entre os materiais quanto à sua capacidade de área disponível para interação superficial.

Tabela 1 – Resultados de BET para as amostras

Fotocatalisador	Área Superficial (m^2/g)
TiO_2	54,642
ZnO	7,701
Argamassa Branca	6,099

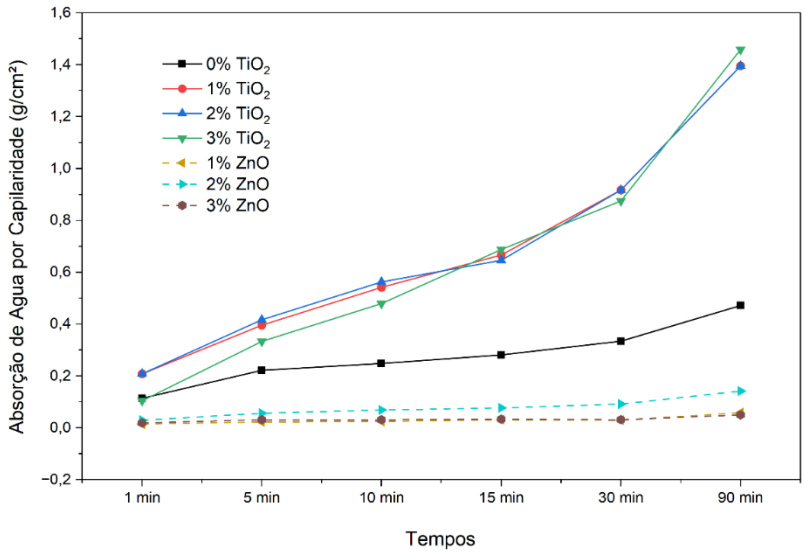
Fonte: os autores.

O TiO_2 possui área superficial superior em relação ao ZnO, com 85,90% maior área. Esse resultado indica que o TiO_2 dispõe de uma quantidade muito maior de superfície disponível por unidade de massa, o que é um fator importante em aplicações que dependem de interações superficiais. Corroborando, Silva *et al.* (2010) encontrou em estudo sobre atividade fotocatalítica ZnO com área superficial de 13 m^2/g e TiO2 com 45 m^2/g.
Ao correlacionar os resultados de BET com as imagens de MEV, observa-se que a elevada área superficial do TiO_2 está associada à presença de partículas muito finas e fortemente aglomeradas, formando estruturas densas compostas por unidades primárias de pequena dimensão. Já o ZnO, que apresentou menor área superficial, exibe nas micrografias partículas mais definidas e menos aglomeradas, sugerindo maior tamanho médio e menor contribuição de área específica.

2.2 Resultados de absorção de água por capilaridade

A Figura 3 apresenta a comparação da absorção de água por capilaridade em função dos diferentes teores de incorporação de fotocatalisadores na argamassa branca, evidenciando as variações no comportamento capilar entre as amostras.

Figura 3 – Comparação da absorção de água por capilaridade de diferentes teores de incorporação de fotocatalisadores na argamassa branca



Fonte: os autores.

Observou-se que, para cada fotocatalisador avaliado, o comportamento da absorção de água por capilaridade foi semelhante entre os diferentes teores de incorporação. Quando comparadas à amostra de referência, as formulações com TiO_2 apresentaram aumentos expressivos na absorção capilar, sendo o teor de 3% o que promoveu o maior incremento, atingindo aproximadamente 209,1%. Em contrapartida, as amostras contendo ZnO apresentaram reduções da absorção, com destaque para o teor de 3%, que resultou em uma diminuição de aproximadamente 89,4%, evidenciando um comportamento oposto entre os fotocatalisadores.

As amostras contendo ZnO apresentaram valores diminuindo a absorção de água em relação à referência, o que pode ser explicado pelo tamanho de partícula mais compatível com os constituintes da matriz cimentícia, resultando em baixa interferência na estrutura porosa. Em contrapartida, as argamassas com TiO_2 apresentaram maior absorção capilar, comportamento associado ao seu tamanho de partícula menor e à elevada área superficial específica, que aumentam a demanda de água e podem favorecer a formação de aglomerados. Esses fatores contribuem para alterações na rede de poros capilares, promovendo maior conectividade e facilitando a absorção de água (DOĞAN *et al*., 2021)

O trabalho de Zhong *et al*. (2022) investigou a influência do nano-TiO_2 na absorção de água por capilaridade em concretos com agregado reciclado, especialmente após ciclos de congelamento e degelo. Os autores avaliaram a absorção ao longo do tempo e analisaram a distribuição de poros por meio de técnicas de imagem, verificando também a microestrutura por microscopia eletrônica. Os resultados mostraram que a incorporação de TiO_2 pode reduzir a absorção de água e a porosidade quando há boa dispersão, devido à formação adicional de gel C-S-H, que densifica a matriz e reduz a conectividade dos poros. Esse estudo corrobora que a absorção de água está diretamente ligada à estrutura porosa e à dispersão das partículas na matriz cimentícia. Assim, embora o TiO_2 tenha potencial para diminuir a absorção ao atuar como refinador de poros, quando mal disperso ou em condições distintas (como em argamassas), pode favorecer a formação de aglomerados e aumentar a conectividade capilar, explicando resultados em que se observa maior absorção.

A Tabela 2 apresenta os valores de absorção de água por capilaridade aos 10 e 90 minutos, bem como a variação de massa (Δm) e o coeficiente de capilaridade (C) das argamassas com diferentes teores de TiO_2 e ZnO.

Tabela 2 – Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade das argamassas

Amostra	10 min (g/dm²)	90 min (g/dm²)	Δm (g/dm²)	C (g/dm²·min^{0,5})
0%	0,24844	0,47187	0,22343	0,035
TiO_2 1%	0,54167	1,39583	0,85416	0,135
TiO_2 2%	0,56250	1,39583	0,83333	0,132
TiO_2 3%	0,47917	1,45833	0,97916	0,155
ZnO 1%	0,02500	0,05833	0,03333	0,005
ZnO 2%	0,06875	0,14167	0,07292	0,012
ZnO 3%	0,03125	0,05000	0,01875	0,003

Fonte: os autores.

As amostras com TiO_2 apresentaram coeficientes de capilaridade superiores à referência que é 0%, indicando maior facilidade de transporte de água, possivelmente associada ao aumento da conectividade dos poros devido à presença de nanopartículas e sua tendência à aglomeração. Em contrapartida, as argamassas com ZnO apresentaram coeficientes significativamente menores, sugerindo uma estrutura porosa menos conectada e maior resistência à penetração de água. Além disso, a variação do teor de incorporação não resultou em mudanças expressivas, indicando que o comportamento está mais relacionado à interação e dispersão das partículas na matriz do que à quantidade adicionada.

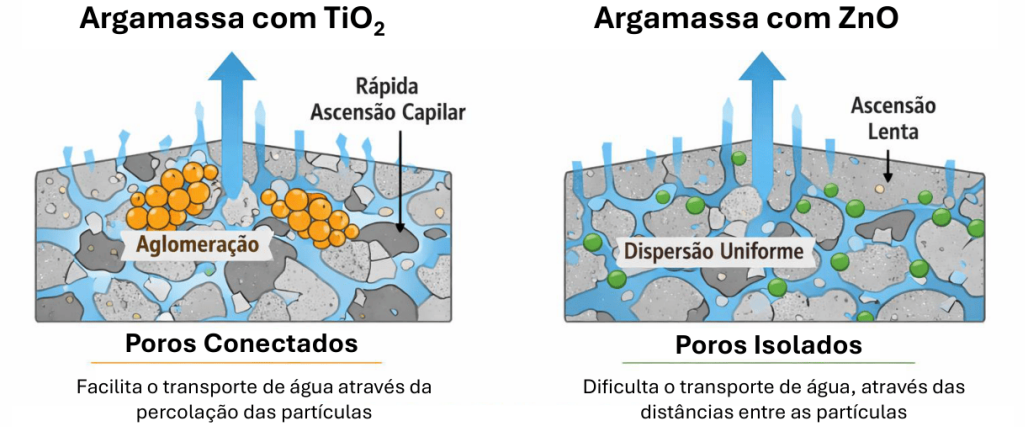
Do ponto de vista das manifestações patológicas, o aumento da absorção de água por capilaridade está diretamente relacionado à maior suscetibilidade ao desenvolvimento de manifestações em revestimentos argamassados, uma vez que facilita o transporte de umidade e de agentes agressivos para o interior da matriz. Segundo Ximenes *et al*. (2023), a presença de água nos poros é um dos principais fatores desencadeadores de manifestações como eflorescências, manchas superficiais e crescimento biológico, pois atua como meio de dissolução e transporte de sais, além de criar condições favoráveis para a proliferação de microrganismos.

Nesse contexto, em argamassas autolimpantes, torna-se especialmente relevante a ação fotocatalítica e antimicrobiana dos materiais incorporados, como TiO_2 e ZnO, uma vez que esses podem contribuir para a degradação de matéria orgânica e inibição do crescimento de fungos na superfície. Assim, mesmo diante de uma maior absorção capilar, a presença de fotocatalisadores com atividade antimicrobiana pode atuar como um mecanismo mitigador das manifestações patológicas, auxiliando na manutenção da estética e no desempenho do revestimento ao longo do tempo (DE MARIA *et al*., 2024).

O estudo de Pereira Lessa *et al.* (2025) investigou a aplicação de revestimentos fotocatalíticos à base de TiO_2 e ZnO em substratos cimentícios voltados para fachadas, avaliando diferentes métodos de aplicação e o desempenho fotocatalítico e microestrutural dos materiais. Os autores verificaram que a incorporação de partículas nanométricas de TiO_2 promove o preenchimento de vazios e poros na matriz da argamassa, resultando na redução da porosidade capilar, o que contribui para o aumento da durabilidade e para a diminuição da absorção de água por capilaridade. Além disso, observaram que a adição do fotocatalisador reduz a rugosidade superficial, favorecendo a eficiência, a resistência e o desempenho global do revestimento.

A Figura 4 ilustra, de forma comparativa, o efeito da incorporação de TiO_2 e ZnO na microestrutura e no transporte capilar de água nas argamassas.

Figura 4 – Representação esquemática da influência de TiO_2 e ZnO na absorção de água por capilaridade em argamassas



Fonte: os autores.

O esquema ilustra, de forma comparativa, o efeito da incorporação de TiO_2 e ZnO na microestrutura e no transporte capilar de água nas argamassas, evidenciando que o TiO_2 está associado a uma maior conectividade dos poros e à formação de caminhos preferenciais para a ascensão da água, resultando em maior absorção capilar, enquanto o ZnO apresenta uma distribuição mais homogênea, contribuindo para uma estrutura com poros menos conectados e menor facilidade de transporte de água, fortemente atribuído à área superficial, tamanho das partículas e empacotamento (PALANISAMY *et al*., 2023). Dessa maneira, o aumento da absorção capilar favorece manifestações patológicas, ocasionando acúmulo de umidade no revestimento, criando condições propícias para o surgimento de manchas, eflorescências e, especialmente, o desenvolvimento de mofo e microrganismos, o que pode comprometer a durabilidade do sistema. Apesar do aumento da absorção capilar nas argamassas com TiO_2, seu uso não é inviabilizado, mas requer controle da dispersão e da microestrutura. O comportamento observado está mais relacionado à aglomeração das nanopartículas do que ao teor incorporado, indicando que melhorias na dispersão podem reduzir esse efeito. Além disso, a aplicação superficial por aspersão surge como alternativa viável, permitindo manter a atividade fotocatalítica sem alterar a rede de poros. Assim, é possível conciliar desempenho autolimpante e durabilidade do revestimento. Já com relação ao ZnO torna-se favorável sua aplicação em argamassa de revestimento buscando-se redução da absorção de água, podendo-se auxiliar na mitigação de manifestações patológicas.

4. CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que a incorporação de fotocatalisadores influencia o comportamento capilar das argamassas, sendo observado aumento da absorção nas formulações com TiO_2 e redução nas que contêm ZnO, evidenciando efeitos distintos relacionados ao tamanho de partícula, área superficial e empacotamento na matriz cimentícia. O aumento da absorção capilar pode favorecer manifestações patológicas associadas à presença de umidade, como manchas, eflorescências e crescimento biológico, contudo, a atividade fotocatalítica e antimicrobiana desses materiais pode atuar na mitigação desses efeitos. Dessa forma, enquanto o ZnO se mostrou promissor para reduzir a absorção de água em argamassas de revestimento, o uso de TiO_2 permanece viável quando associado a estratégias de controle de dispersão ou aplicação superficial, possibilitando conciliar propriedades autolimpantes com desempenho físico adequado do revestimento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio financeiro concedido ao projeto por meio de fomento à pesquisa, que possibilitou o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16541: Revestimentos de argamassa — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15259: Argamassas — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BEHLING, Valéria Santos et al. Revisão de literatura sob a perspectiva da análise sistemática de argamassas autolimpantes. **REVISTA DELOS**, v. 18, n. 69, p. e5795-e5795, 2025.

DE MARIA, Vitor Peixoto Klienchen et al. Advances in ZnO nanoparticles in building material: Antimicrobial and photocatalytic applications–Systematic literature review. **Construction and Building Materials**, v. 417, p. 135337, 2024.

DOĞAN, Fatih; DEHGHANPOUR, Heydar. Characterization and hydrophobic surface study of silicon-based TiO2, ZnO and recycled carbon additives on cementitious materials surface. **Journal of Building Engineering**, v. 40, p. 102689, 2021.

JIANG, Zhuoying; ZHANG, Bin; YU, Xiong. Photocatalytic cement mortar with durable self-cleaning performance. **Catalysts**, v. 15, n. 3, p. 249, 2025.

KHAN, Samreen Heena; PATHAK, Bhawana. Zinc oxide based photocatalytic degradation of persistent pesticides: A comprehensive review. **Environmental nanotechnology, monitoring & management**, v. 13, p. 100290, 2020.

NAM, Yeonsig et al. Photocatalytic activity of TiO 2 nanoparticles: a theoretical aspect. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 7, n. 23, p. 13833-13859, 2019.

PALANISAMY, Chandrasekaran et al. Study on the Behavior of Self-Cleaning Impregnated Photocatalyst (Tio2) with Cement Mortar. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2023, n. 1, p. 3571526, 2023.

PEREIRA LESSA, Fabíula et al. Application of nano-TiO2 and micro-ZnO on cementitious surfaces for self-cleaning façades by spray coating and dip coating: A comparative study. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 10, n. 1, p. 16, 2025.

POZO-ANTONIO, José Santiago; DIONÍSIO, Amelia. Self-cleaning property of mortars with TiO2 addition using real diesel exhaust soot. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 850-859, 2017.

SILVA, Shirley Santana; MAGALHÃES, Fabiano; SANSIVIERO, Maria Terezinha C. Nanocompósitos semicondutores ZnO/TiO2: testes fotocatalíticos. **Química nova**, v. 33, n. 1, p. 85-89, 2010.

TELES, Ramon Mendonça et al. Avaliação do efeito autolimpante promovido pela aspersão de fotocatalisadores em argamassa de revestimento. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, v. 15, 2025.

TELES, R. M.; ARNOLD, D. C. M. Análise e caracterização de dióxido de titânio (TiO_2) e óxido de zinco (ZnO) para aplicação em argamassas autolimpantes. **In: SENAFOR**, 2024, Porto Alegre. Anais do Seminário Nacional de Forjamento, v. 5, p. 635-645, 2024.

XIMENES, José Maria Carvalho Belo; DE JESUS, Carlos Manuel; AGUIAR, José. Surface pathology on the walls of limestone and mortar masonry. **U. Porto Journal of Engineering**, v. 9, n. 3, p. 14-27, 2023.

ZHONG, Chuheng et al. Effect of nano-TiO2 on capillary water absorption of recycled aggregate concrete. **Coatings**, v. 12, n. 12, p. 1833, 2022.