CAPÍTULO 42 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/bh4fkn25
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/26nzzy32

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE PROPRIEDADES AUTOLIMPANTES EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO À BASE DE CIMENTO BRANCO COM INCORPORAÇÃO DE DIFERENTES ADITIVOS MINERAIS, ATRAVÉS DA DEGRADAÇÃO DE PIGMENTO

Leticia Lange[1]*, Kim Lisbôa Daudt Maus[1]; Bruna Gabriela Schuster[1]; Eduarda Rafaela Novello[1] e Daiana Cristina Metz Arnold[1]
*Autor de contato: 0138371@feevale.br

[1] Universidade Feevale, Novo Hamburgo, Brasil

RESUMO

Considerando o crescimento dos centros urbanos, associado à presença de poluentes atmosféricos, observa-se o surgimento de manifestações patológicas em fachadas de edificações, como os manchamentos. Nesse contexto, com o objetivo de mitigar tais ocorrências tem-se desenvolvido revestimentos de argamassa com propriedades autolimpantes, obtidos pela incorporação de aditivos minerais capazes de promover a fotocatálise. O presente trabalho propõe a comparação de desempenho autolimpante de amostras de argamassa de revestimento à base de cimento branco, incluindo uma formulação sem incorporação de fotocatalisadores (amostra referência), formulações contendo óxido de zinco (ZnO) nas proporções de 1%, 2% e 3% e formulações com dióxido de titânio (TiO_2), nas mesmas proporções. Para a avaliação, estabeleceu-se um método de ensaio acelerado, que consistiu no manchamento dos corpos de prova com corante azul de metileno, seguido de exposição em câmara ultravioleta (UV). A variação de cor foi aferida por meio de colorimetria, sendo os resultados analisado com base no sistema CIE L*a*b*. Os resultados obtidos indicaram que a incorporação de fotocatalisadores na argamassa contribui para maior degradação do pigmento utilizado, quando comparada à formulação de referência.

Palavras-chave: fotocatálise; óxido de zinco; dióxido de titânio; azul de metileno; argamassa de revestimento.

ABSTRACT

Considering the growth of urban centers, associated with the presence of atmospheric pollutants, the emergence of pathological manifestations on building façades can be observed, such as staining. In this context, in order to mitigate such occurrences, mortar coatings with self-cleaning properties have been developed through the incorporation of mineral additives capable of promoting photocatalysis. The present study proposes a comparison of the self-cleaning performance of white cement-based coating mortar samples, including a formulation without photocatalyst incorporation (reference sample), formulations containing zinc oxide (ZnO) in proportions of 1%, 2%, and 3%, and formulations containing titanium dioxide (TiO_2) in the same proportions. For the evaluation, an accelerated testing method was established, consisting of staining the specimens with methylene blue dye, followed by exposure in an ultraviolet (UV) chamber. The color variation was measured through colorimetry, and the results were analyzed based on the CIE L*a*b* color system.The obtained results indicated that the incorporation of photocatalysts into the mortar contributes to greater degradation of the pigment used when compared with the reference formulation.

Keywords: Photocatalysis; zinc oxide; titanium dioxide; methylene blue; coating mortar.

1. INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento populacional, refletido na intensificação do processo de urbanização e industrialização, aliado a limitações financeiras para manutenções preventivas, pode favorecer o acúmulo de microrganismos e poluentes atmosféricos nas fachadas das edificações. Associados às condições climáticas, esses fatores podem contribuir para a degradação desses sistemas, reduzindo desempenho e vida útil, consequentemente aumentando a necessidade de intervenções de manutenções (Casarin *et al.*, 2022; Shaheen *et al.*, 2024).

Bersch, Masuero e Dal Molin (2023) ressaltam que um ambiente construtivo sustentável deve ser capaz de mitigar impactos climáticos, contemplando também demandas de conservação. Nesse contexto, evidencia-se a necessidade de estudos direcionados ao desenvolvimento de cidades que, além de habitáveis, sejam planejadas e mantidas de forma resiliente e sustentável. Em consonância com essa perspectiva, a Agenda 2030 das Nações Unidas, por meio dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), ressalta a importância de implementação de práticas e tecnologias direcionadas ao aprimoramento da infraestrutura urbana e à promoção da qualidade de vida.

Entre as manifestações patológicas apresentadas em edificações localizadas em áreas urbanas, destaca-se o manchamento em revestimentos de fachadas, como uma das ocorrências mais frequentes. Este fenômeno pode ocorrer devido à presença de umidade, da colonização biológica, ou da deposição de sujidades oriundas de partículas presentes na atmosfera. Este último fator é associado à poluição do ar, resultante da queima incompleta de combustíveis fósseis em processos industriais, veículos movidos a diesel e sistemas de aquecimento, os quais favorecem o acúmulo de dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio. De modo geral, o manchamento não só compromete a estética das construções, mas também na habitabilidade destas, devido à perda de integridade, funcionalidade e durabilidade. Tais condições implicam em aumento nos custos relacionados à manutenção e reparos, situações frequentemente agravadas pela inexistência ou limitação de métodos de limpeza plenamente eficientes (Trevisto, 2016; Pietrosk *et al.*, 2019; Silva e Fioriti 2020; Aschebrock, 2021; Otuka, 2022; Santos e Laursen 2022; Branco *et al.,* 2024).

Como estratégia para mitigar essa problemática, o desenvolvimento de soluções autolimpantes aplicadas a revestimentos argamassados em fachadas apresenta-se como uma alternativa promissora. Nesse contexto, Hamidi e Aslani (2019), Jędrzejczak *et al.* (2022), Mocioiu *et al.* (2022), Raha e Ahmaruzzaman (2022) e Hu *et al.* (2025) destacam a incorporação de aditivos minerais com propriedades autolimpantes às superfícies, explorando a fotocatálise como mecanismo central para o desempenho dessas funcionalidades. Por meio desse processo, a superfície torna-se capaz de promover reações induzidas pela radiação ultravioleta, possibilitando a degradação de contaminantes e microrganismos. Dessa forma, contribui-se para a manutenção das características visuais originais das superfícies mesmo quando expostas a ambientes agressivos, configurando a incorporação de materiais fotocatalíticos como uma medida preventiva frente à deterioração estética e funcional das edificações (Behling *et al*.,2025).

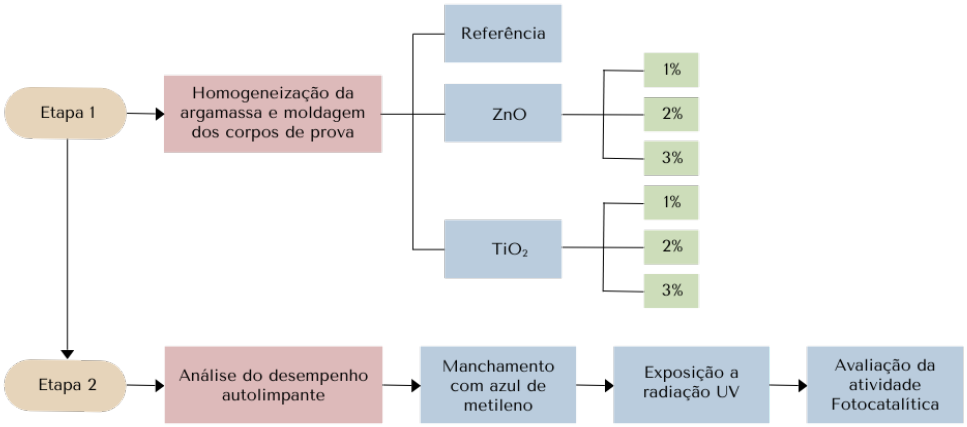
Dentre os aditivos minerais usualmente estudados, destacam-se a utilização de óxido de zinco (ZnO) e dióxido de titânio (TiO_2). Acerca do ZnO, autores como De Maria *et al.* (2024) e Pourali *et al.* (2025) destacam que o material se apresenta como um semicondutor metálico, com capacidade para degradação de compostos orgânicos, favorecida pela alta mobilidade eletrônica, bom desempenho fotoquímico e natureza não-tóxica. Em relação ao TiO_2, Diamanti *et al.* (2013) e Behling *et al.* (2025) referem que a eficiência da fotocatálise está diretamente relacionada à quantidade de radiação absorvida pelo composto, gerando dois efeitos simultâneos: a oxirredução das substâncias adsorvidas na superfície e a hidrofilicidade. No intuito de avaliar a eficiência da fotocatálise, estudos como o de Silva (2022), Kalaycıoğlu *et al.* (2023) e Farghaly *et al.* (2024),

utilizaram azul de metileno como agente de contaminação, realizando o manchamento das amostras com o corante, e a degradação aferida como métrica para avaliação do processo de limpeza.
Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a eficiência das argamassas de revestimento à base de cimento branco, com diferentes teores de incorporação de ZnO e TiO_2, quanto a sua capacidade autolimpante, por meio da análise da degradação do pigmento azul de metileno.

2. METODOLOGIA

Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma da metodologia adotada para o alcance dos objetivos estabelecidos neste estudo. Para a realização do programa experimental, foram utilizados como materiais argamassa industrializada de revestimento à base de cimento branco, impermeável, recomendada para áreas internas e externas; a seleção desse material teve como finalidade possibilitar a visualização mais clara da degradação do corante. Adicionalmente, foram empregados fotocatalisadores, dióxido de titânio P-25 e óxido de zinco (ZnO P.A.), além do corante azul de metileno, utilizado para manchamento das amostras.

Figura 1: Fluxograma da metodologia utilizada

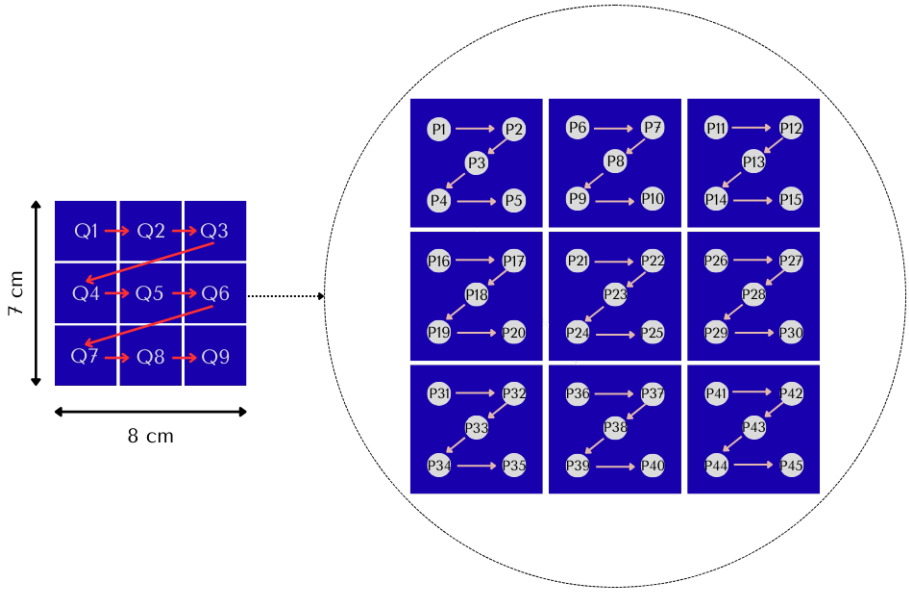


Fonte: Autores (2026).

A preparação da argamassa foi conduzida conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 16541 (ABNT, 2016), sendo a relação água/cimento (a/c) adotada de acordo com as recomendações do fabricante. A incorporação dos fotocatalisadores, por sua vez, foi realizada juntamente com os materiais secos. A definição dos teores de TiO2 teve como base os estudos desenvolvidos por Casagrande (2012), Casarin (2019), Ribeiro (2021), Aschebrock (2021) e Bersh (2021), enquanto os teores de ZnO foram estabelecidos de modo a seguir os mesmos valores. Ainda, foi produzida uma amostra de referência, utilizada como parâmetro comparativo. Para a avaliação do desempenho autolimpante, foram moldados corpos de prova (CPs) com dimensão de 8 cm x 7 cm x 2 cm.
A avaliação da capacidade autolimpante foi conduzida por meio de ensaio acelerado, iniciado com o manchamento dos CPs moldados, utilizando corante azul de metileno, na proporção de 0,5 g por litro de água deionizada, conforme relatado em literatura. A metodologia de manchamento foi adotada de acordo com procedimento proposto por Otuka (2022) e Fleck, Polesello e Leão (2025), consistindo na imersão das amostras na solução preparada, onde permaneceram por 24 horas. Posteriormente as amostras foram retiradas e submetidas à secagem em estufa a 40ºC, durante 72 horas. Destaca-se que tanto o período de imersão, quanto o de secagem ocorreram ao abrigo da luz e da radiação solar. Após o processo de manchamento, os CPs foram expostos, em triplicata, à luz

artificial, em câmara ultravioleta (UV), modelo BGD 276 com comprimento de onda de 365 nm, de modo a simular a exposição à radiação solar, e acelerar o processo de degradação do manchamento, promovendo perda de cor e brilho, além de processos de desintegração e oxidação das amostras. A câmara mantém-se em temperatura constante de 25ºC e, com auxílio do radiômetro, foi determinada a intensidade da radiação ultravioleta, correspondente a 8,89 mW/cm^2. A aferição da variação de cor foi efetuada com equipamento colorímetro ColorMeter Exact, em diferentes intervalos de tempo, sendo: prévio a inserção na câmara (0 h), 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, 60 h e 72 h de exposição. As medições nesses intervalos foram realizadas em adaptação à metodologia adotada por Wang *et al.* (2022). Com o objetivo de assegurar a representatividade da superfície analisada, cada corpo de prova foi subdividido em nove quadrantes, sendo realizados cinco pontos de medição em cada quadrante, totalizando 45 pontos de mensuração por CP (Figura 2) em cada intervalo de tempo. Dessa forma, foram obtidas 1755 leituras por traço ao longo do ensaio.

Figura 2: Aferição de variação de cor



Fonte: Autores (2026).

A análise colorimétrica foi realizada com base nos princípios estabelecidos pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE), conforme descrito no relatório técnico ISO/CIE 11664-5 (2024), que define o espaço tridimensional das cores por meio de funções não lineares representadas pelas coordenadas x, y, z (sistema CIE L*a*b*); cada coordenada representa então um espaço de cor, caracterizado por L, a* e b*. O parâmetro L* se refere à luminosidade, variando em uma escala de 0 a 100 (0 corresponde ao preto e 100 ao branco); a* e b*, por sua vez, definem a cromaticidade das amostras, apresentando valores no intervalo de -127 e +127. Nesse contexto, a* representa a variação entre verde (valores negativos) e vermelho (valores positivos), enquanto b* expressa a variação entre azul (valores negativos) e amarelo (valores positivos). Visto que a percepção de cor pode variar entre observadores, emprega-se o parâmetro ΔE, que permite determinar a variação global de cor. Esse parâmetro é calculado por meio da expressão disposta na Equação 1.

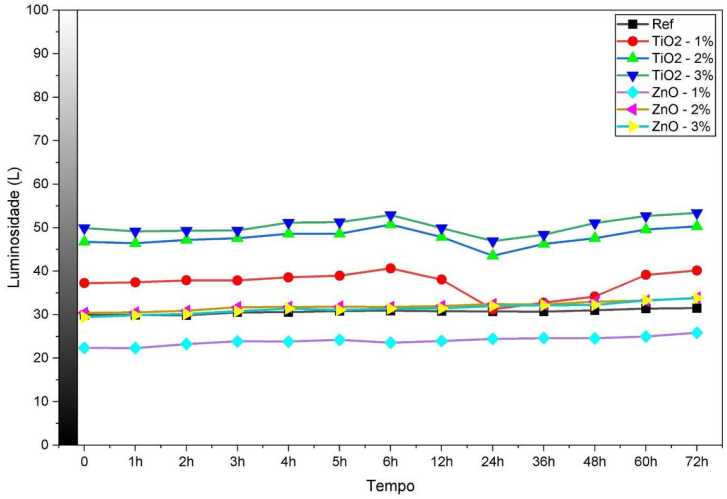
$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \qquad \text{(Equação 1)}$$

A partir desse cálculo, obtém-se um valor numérico que expressa o grau de diferença cromática entre as amostras, indicando o quanto essa variação é perceptível ao olho humano.

3. RESULTADOS

Conforme estabelecido na metodologia, inicia-se a análise com avaliação do parâmetro de luminosidade definido pelo sistema CIE L*a*b*. Na Figura 3, observa-se o comportamento dos corpos de prova ao longo do tempo, evidenciando um aumento gradual na luminosidade das amostras, o que indica a degradação progressiva do pigmento empregado, inclusive na amostra de referência. Entretanto, esse comportamento mostrou-se mais evidente nas formulações contendo fotocatalisadores, sendo particularmente mais pronunciado nas amostras com incorporação de TiO_2. Tal resultado sugere maior eficiência fotocatalítica desse material, quando comparado às demais composições avaliadas.

Figura 3: Gráfico de luminosidade das amostras ao longo do tempo de exposição



Fonte: Autores (2026).

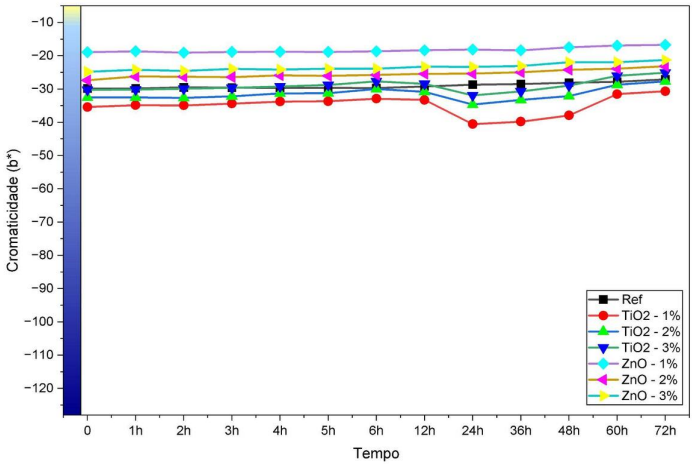
Embora a incorporação de TiO_2 tenha se mostrado promissora, apresentando comportamentos semelhantes entre si, independente do teor adicionado, observou-se redução da luminosidade no intervalo entre 6 e 24 horas de avaliação. Em contraste, a amostra contendo 1% de ZnO demonstrou resultados inferiores aos das demais amostras avaliadas, inclusive em relação à amostra de referência, evidenciando desempenho consideravelmente inferior. Por fim, embora se observe uma tendência de clareamento das amostras ao longo do tempo, destaca-se, conforme evidenciado na Figura 3, que a incorporação de fotocatalisadores contribui para mitigar, em certa medida, a redução inicial da luminosidade associada ao manchamento provocado pelo azul de metileno.

Autores como Reza, Kurny e Gulshan (2017) e Castro-Hoyos *et al.* (2022), por sua vez, apontam que a refletância inicial elevada da argamassa branca contribui para a sensibilidade da análise colorimétrica, facilitando na detecção de pequenas variações, mas que também pode prejudicar a absorção de energia do fotocatalisador e consequentemente reduzir a eficácia da oxirredução promovida pelo efeito fotocatalítico.

Em relação ao parâmetro b*, correspondente ao eixo azul-amarelo, visto que o pigmento escolhido para o presente estudo, foi o azul de metileno, as superfícies manchadas possuem valores negativos. Salienta-se que a tendência de degradação é demonstrada pela aproximação dos valores registrados pelo colorímetro para o valor 0, além do clareamento através do aumento no espectro L. Ao observar a Figura 4, nota-se que dentre as formulações contendo óxido de zinco, as amostras com incorporação de 2% e 3%, apresentaram maior variação cromática em relação a concentração de

1%. Já em relação ao conjunto de TiO_2, a mesma tendência de deslocamento em direção ao eixo 0 é observada no gráfico pelas concentrações possuindo 2% e 3% de dióxido de titânio, corroborando que concentrações mais altas favorecem o efeito fotocatalítico e a degradação do pigmento.

Figura 4: Gráfico da cromaticidade b* das amostras ao longo do tempo de exposição

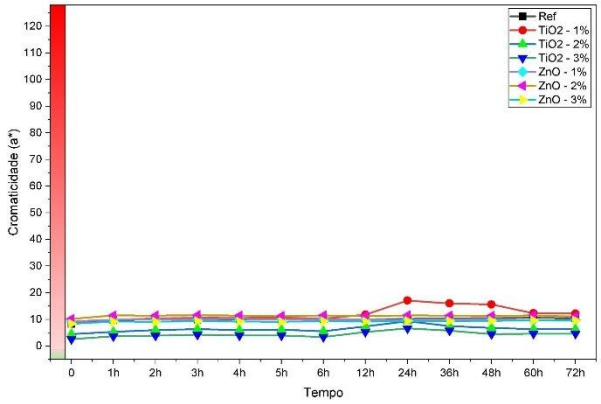


Fonte: Autores (2026).

Ainda, constata-se na Figura 4 que as amostras contendo ZnO apresentam, inicialmente, valores mais próximos de 0 quando comparadas às demais formulações, novamente indicando uma absorção inicial reduzida do pigmento. Nota-se também que os corpos de prova com incorporação de TiO_2 demonstram valores inferiores aos da amostra referência. Destaca-se, adicionalmente, que comportamento semelhante ao observado para parâmetro L nos corpos de prova contendo dióxido de titânio também foi identificado para o parâmetro b*, no qual se verifica alteração na tendência entre os tempos de avaliação de 6h e 12h.

Ao analisar a cromaticidade a*, correspondente ao eixo vermelho-verde (Figura 5), é possível observar que as amostras apresentaram a tendência oposta ao visto no eixo azul-amarelo, onde todas as composições tiveram um valor de a* final superior ao a* inicial. Para autores como Ramli *et al*. (2014), Jiménez (2017) e Dong *et al*. (2023) esse sutil aumento da coloração vermelha das amostras está intrinsecamente relacionada com a oxidação do azul de metileno e a degradação parcial de corantes majoritariamente azuis, gerando um subproduto com consequente mudança gradual de cor para outros tons do espectro.

Figura 5: Gráfico da cromaticidade a* das amostras ao longo do tempo de exposição



Fonte: Autores (2026).

A fim de validar com maior precisão os resultados obtidos previamente, foi realizada uma análise estatística através do ANOVA (Tabela 1) para determinar o grau de significância entre as diferentes composições, para que seja possível avaliar a real eficácia da incorporação do óxido de zinco ou do dióxido de titânio para a autolimpeza das argamassas.

Tabela 1: Análise de significância através do ANOVA para os parâmetros do CIELAB

Parâmetro CIELAB	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor F	Valor P	F Crítico	Efeito Significativo
L	228,1024	84	2,7155	444,7174	2.10^{-61}	2,2085	✓
a*	117,1667	84	1,3948	68,4867	$2,94.10^{-30}$	2,2085	✓
b*	235,2170	84	2,8002	140,2491	$1,34.10^{-41}$	2,2086	✓

Fonte: Autores (2026).

Devido ao fato de todos os parâmetros, sendo luminosidade e cromaticidade a* e b*, terem acusado um valor-P inferior a 0,05 e um valor-F superior ao F Crítico, foi necessária a realização de um teste de post-hoc de Tukey (Tabela 2) para determinação da interação entre os diferentes conjuntos estudados.

Tabela 2: Teste de Tukey para determinação das interações das amostras

Combinação	Luminosidade		a*		b*	
	Módulo da Média	Diferença Significativa	Módulo da Média	Diferença Significativa	Módulo da Média	Diferença Significativa
	Dms = 1,84		Dms = 1,32		Dms = 1,87	
Referência - TiO_2 1%	6,57	✓	2,05	✓	5,88	✓
Referência - TiO_2 2%	17,10	✓	3,57	✓	2,51	✓
Referência - TiO_2 3%	19,76	✓	5,58	✓	0,02	×
Referência - ZnO 1%	6,69	✓	0,09	×	10,73	✓
Referência - ZnO 2%	1,31	×	1,30	×	3,56	✓
Referência - ZnO 3%	0,81	×	0,74	×	5,61	✓
TiO_2 1% - ZnO 1%	13,26	✓	2,14	✓	16,61	✓
TiO_2 1% - ZnO 2%	5,26	✓	0,75	×	9,44	✓
TiO_2 1% - ZnO 3%	5,76	✓	2,79	✓	11,50	✓

TiO_2 2% - ZnO 1%	23,79	✓	3,48	✓	13,24	✓
TiO_2 2% - ZnO 2%	15,79	✓	4,87	✓	6,07	✓
TiO_2 2% - ZnO 3%	16,29	✓	2,83	✓	8,12	✓
TiO_2 3% - ZnO 1%	26,44	✓	5,50	✓	10,71	✓
TiO_2 3% - ZnO 2%	18,45	✓	6,89	✓	3,54	✓
TiO_2 3% - ZnO 3%	18,95	✓	4,84	✓	5,60	✓

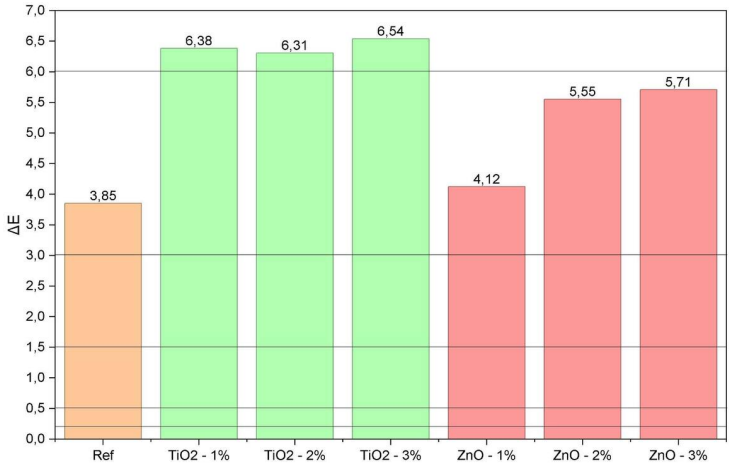
Fonte: Autores (2026).

O teste de Tukey evidenciou diferenças estatisticamente significativas para o parâmetro de luminosidade considerando-se DMS igual a 1,84. As formulações contendo dióxido de titânio apresentaram diferenças expressivas em relação à amostra de referência, sendo que a incorporação de 2% do fotocatalisador resultou em valor de 17,10, enquanto a formulação com 3% de TiO_2 registrou 19,76. No entanto, as maiores discrepâncias foram observadas nas comparações entre formulações contendo os fotocatalisadores. A comparação entre a formulação TiO_2 - 3% e ZnO-1%, apresentou diferença de 26,44, enquanto a comparação entre TiO_2 - 2% e ZnO - 1% resultou em divergência de 23,79. De modo geral, os resultados indicam que maiores teores de TiO_2 intensificam a variação de luminosidade da superfície, sugerindo maior influência desse fotocatalisador sobre o parâmetro analisado.

Para a coordenada a*, considerando DMS igual a 1,32, observa-se diferença significativa na maioria das combinações que contêm TiO_2. A formulação TiO_2 - 3% apresentou módulo de diferença igual a 5,58 em relação à referência. Entre as combinações, TiO_2 - 3% com ZnO - 2% apresentou o maior valor, igual a 6,89, seguido de TiO_2 - 3% com ZnO 1%, com 5,50. As formulações contendo apenas ZnO apresentaram valores inferiores ao limite de significância. ZnO 1% apresentou 0,09, ZnO 2% apresentou 1,30 e ZnO 3% apresentou 0,74. Esse resultado indica menor influência do ZnO isolado na variação da cromaticidade no eixo verde-vermelho, e logo uma maior reação de oxidação do corante pelo TiO_2.

Já na coordenada b*, considerando DMS igual a 1,87, verificam-se diferenças significativas na maioria das comparações. A exceção ocorre entre referência e TiO_2 - 3%, que apresentou módulo igual a 0,02. As maiores variações ocorreram nas combinações entre TiO_2 e ZnO. TiO_2 - 1% com ZnO - 1% apresentou módulo igual a 16,61. TiO_2 - 2% com ZnO - 1% apresentou 13,24. Os resultados indicam que a interação entre os dois semicondutores intensifica a alteração cromática no eixo azul-amarelo, associada à degradação do azul de metileno presente na superfície das argamassas. Esses resultados são corroborados pela Figura 5, que apresenta os valores obtidos de ΔE, conforme normativa CIE 11664-5 (ISO, 2024).

Figura 5: Valores de ΔE obtidos para as diferentes composições estudadas



Fonte: Autores (2026).

Conforme apresentado na Tabela 2 e na Figura 5, as formulações contendo dióxido de titânio apresentaram maior percepção de alteração cromática após 72 horas de exposição à luz UV. Com o objetivo de classificar as variações observadas por meio do cálculo do ΔE, adotou-se como referência o estudo de Aguero (2017), fundamentado na norma DIN 6197 (2007), a qual é empregada para avaliação de pequenas variações de cor em superfícies, e amplamente utilizada na indústria para fins de controle de qualidade e definições de tolerância cromática. Com base nos critérios estabelecidos no trabalho de Aguero (2017), as variações de cor observadas nas formulações contendo TiO2 são classificadas como diferenças “muito grandes” entre a primeira e a última medição. Para as demais formulações, por sua vez, a variação cromática enquadra-se como “facilmente distinguíveis”.

5. CONCLUSÃO

Com base nos objetivos estabelecidos para o presente trabalho, conclui-se que a metodologia empregada mostrou-se adequada para a avaliação da autolimpeza acelerada de superfícies da argamassa, uma vez que forneceu dados necessários para a realização de uma análise consistente do fenômeno investigado. Ademais, constatou-se que, independentemente do fotocatalisador utilizado, seja o óxido de zinco ou o dióxido de titânio, a presença de ambos promoveu maior degradação do corante azul de metileno, quando comparados ao traço referência. Embora os fotocatalisadores tenham sido incorporados juntamente aos materiais secos durante o preparo da argamassa industrializada, e não apenas como camada superficial nos corpos de provas moldados, verificou-se que maiores concentrações de aditivo mineral resultam em uma maior degradação do corante.

Ao analisar separadamente as coordenadas do sistema CIE L*a*b*, observou-se que o dióxido de titânio apresentou variações mais significativas no parâmetro de luminosidade, enquanto o óxido de zinco demonstrou maior variação de cromaticidade na coordenada b*. Em relação à coordenada a*, as formulações contendo TiO_2 apresentaram maior grau de oxidação do corante. De modo geral, verificou-se que a incorporação de fotocatalisadores na argamassa contribui para reduzir a absorção do pigmento utilizado na avaliação da degradação.

Por fim, ao considerar o parâmetro ΔE, responsável por quantificar a variação perceptível de cor, destacam-se os resultados obtidos nas formulações contendo TiO_2, que apresentam valores mais expressivos, indicando maior potencial fotocatalítico em comparação às demais composições avaliadas.

REFERÊNCIAS

AGUERO, Natasha F.. **Estudos de processos de degradação de pigmentos de coloração azul e amarela**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura para realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASCHEBROCK, Giovanna C.. **Avaliação da autolimpeza de argamassa branca com TiO_2 e com hidrofugante**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

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.

BERSCH, Jéssica D.. **Atividade fotocatalítica e autolimpeza de argamassas pigmentadas contendo dióxido de titânio (TiO_2)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

BERSCH, Jéssica D.; MASUERO, Ângela B.; DAL MOLIN, Denise C. C.. Photocatalytic coloured rendering mortars: effect of TiO_2 and iron oxide pigments on the physical, mechanical, hygric, and photoactive behaviour. **Materials and Structures**, v. 56, n.8, p. 146, 2023.

BRANCO, Caroline M. C. *et al.*. Comparação de degradação de fachada com revestimento de argamassa no campus UFSM-CS. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 20, p. 1-19, 2024.

CASAGRANDE, Cézar A.. **Estudo da incorporação de partículas de titânio em argamassas fotocatalíticas**. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

CASARIN, Roberta P.. **Análise da eficiência da ação autolimpante em diferentes tipos de acabamentos superficiais de argamassas com adição de TiO_2**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

CASARIN, Roberta P. *et al.*. Comparação da eficiência da escovação na rápida mudança de cor em parede externa pela aplicação de disperção de nano-TiO_2 e de solução NaClO. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC XIX Edição**. Canela: 2022. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2047/1955. Acesso em: 13 mar. 2026.

CASTRO-HOYOS, Angélica M.; ROJAS MANZANO, Manuel A.; MAURY-RAMÍREZ, Aníbal. Desafios e Oportunidades do Uso da Fotocatálise com Dióxido de Titânio em Materiais à Base de Cimento. **Coatings**, v. 12, n. 968, p. 1-21, 2022.

DE MARIA, Vitor P. K. *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. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135337. Acesso em: 13 mar. 2026.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 6174:2007**. Colorimetric evaluation of colour

differences. Berlin: DIN, 2007

DIAMANTI, Maria Vittoria *et al.*. Photocatalytic and self-cleaning activity of colored mortars containing TiO2. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 167-174, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.038. Acesso em: 13 mar. 2026.

DONG, Yutao et al. Substantial lifetime enhancement for Si-based photoanodes enabled by amorphous TiO2 coating with improved stoichiometry. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 1865, 2023.

FARGHALY, Ahmed *et al.*. Synergistic photocatalytic degradation of methylene blue using TiO2 composites with activated carbon and reduced graphene oxide: a kinetic and mechanistic study. **Applied Water Science**, v. 14, n. 10, p. 228, 2024.

FLECK, William, J. K.; POLESELLO, Eduardo; LEÃO, Felipe A..Efeito do uso de fotocatalisador TiO_2 sobre as propriedades da argamassa estabilizada. **Ambiente Construído**, V. 25, p. e140806, 2025).

HAMIDI, Fatemeh; ASLANI; Farhad. TiO_2-based photocatalytic cementitious composites: materials, properties, influential parameters, and assessment techniques. **Nanomaterials**, v. 9, n. 10, p. 1444, 2019. Disponível em: https://www.mdpi.com/2079-4991/9/10/1444. Acesso em: 13 mar. 2026.

HU, Hongyin *et al.*. Experimental Study on Cement-Based Materials Modified by Nano-Zinc Oxide and Nano-Zirconia Based on Response Surface Optimization Design. **Materials**, v. 18, n. 7, p. 1515, 2025.

International Organization for Standardization (ISO). **ISO/CIE 11664-5**: Colorimetry - part 5: CIE 1976 l*u*v* colour space and u', v' uniform chromaticity scale diagram. Genebra, 2024.

JĘDRZEJCZAK, Patryk *et al.*. Physicomechanical and antimicrobial characteristics of cement composites with selected nano-sized oxides and binary oxide systems. **Materials**, v. 15, n. 2, p. 661, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/15/2/661. Acesso em: 13 mar. 2026.

JIMÉNEZ, E. M. **Photocatalysis in construction : Methodologies for determination of active species**. Universidad Autónoma de Madrid, 2017.

KALAYCIOĞLU, Zeynep *et al.*. Efficient photocatalytic degradation of methylene blue dye from aqueous solution with cerium oxide nanoparticles and graphene oxide-doped polyacrylamide. **ACS omeg**a, v. 8, n. 14, p. 13004-13015, 2023.

MOCIOIU, Ana-Maria *et al.*. Self-cleaning and antibacterial properties of the cement mortar with ZnO/hydroxyapatite powders. **Inorganics**, v. 10, n. 12, p. 241, 2022.Disponível em: https://www.mdpi.com/2304-6740/10/12/241

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos do desenvolvimento sustentável no Brasil**. [S.I], 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6. Acesso em: 13 mar. 2026.

OTUKA, Pedro H.. **Argamassa autolimpante por meio da aspersão superficial de dióxido de titânio**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2022.

PIETROSKI, Nicolle P. *et al.*. Avaliação da eficiência autolimpante de fachadas de edificações

históricas após dois anos da aplicação de dispersão de dióxido de titânio (TiO_2). **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, v. 13, p. 665-673, 2019.

POURALI, S. *et al.*. In situ synthesis of ZnO/g-C3N4 based composites for photodegradation of methylene blue under visible light. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 462, 2025. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-024-84645-0. Acesso em: 13 mar. 2026.

RAHA, Sauvik; AHMARUZZAMAN, Md. ZnO nanostructured materials and their potential applications: progress, challenges and perspectives. **Nanoscale advances**, v. 4, n. 8, p. 1868-1925, 2022. Disponível em: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/na/d1na00880c. Acesso em: 13 mar. 2026.

RAMLI, Zatil Amali et al. Photocatalytic degradation of methylene blue under UV light irradiation on prepared carbonaceous TiO2. **The scientific world journal**, v. 2014, n. 1, p. 415136, 2014.

REZA, Khan M.; KURNY, A. S. W.; GULSHAN, Fahmida. Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO2: a review. **Applied Water Science**, v. 7, n. 4, p. 1569-1578, 2017.

RIBEIRO, Daniel V. *et al.*. Performance and radiological implications of using residue from TiO_2 production as a component of coating mortars. **Construction and Building Materials**, v. 306, p. 124885, 2021.

SANTOS, Samara M. S.; LAURSEN, Anderson. Uma abordagem preliminar das manifestações patológicas mais comuns em construções residenciais. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. [S.I.], v. 12, n. 11, p. 137-165, nov. 2022. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/wp-content/uploads/2022/11/abordagem-preliminar.pdf. Acesso em: Acesso em: 13 mar. 2026.S

SHAHENN, Mohamed N.F. *et al.*. Evaluation of physical, chemical, and microbiological characteristics of waste stabilization ponds. **Environmental Sciences Europe**, [S.I.], vol. 36, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1186/s12302-024-00965-y. Acesso em: 12 mar. 2026.

SILVA, Rosilene. Removal of methylene blue from aqueous solution through photocatalysis in the presence of TiO_2 nanoparticles under natural sunlight. **Research, Society and Development**, [S.I], v. 11, n. 6, 2022.

SILVA, Amanda M.; FIORITI, César F.. Mapeamento de manifestações patológicas em revestimentos argamassados externos de edifícios de múltiplos pavimentos. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 2, p. 192-205, maio 2020. Disponível em: https://revistas.ufg.br/reec/article/download/52140/34858. Acesso em: 13 mar. 2026.

TREVISTO, João P. M.. **Avaliação da eficiência de autolimpeza em argamassas e pastas contendo TiO_2 expostas ao microclima urbano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

WANG, Z. *et al.*. Variation of self-cleaning performance of nano-TiO_2 modified mortar caused by carbonation: from hydrates to carbonates. **Cement and Concrete Reaserch**, v. 158, 2022.